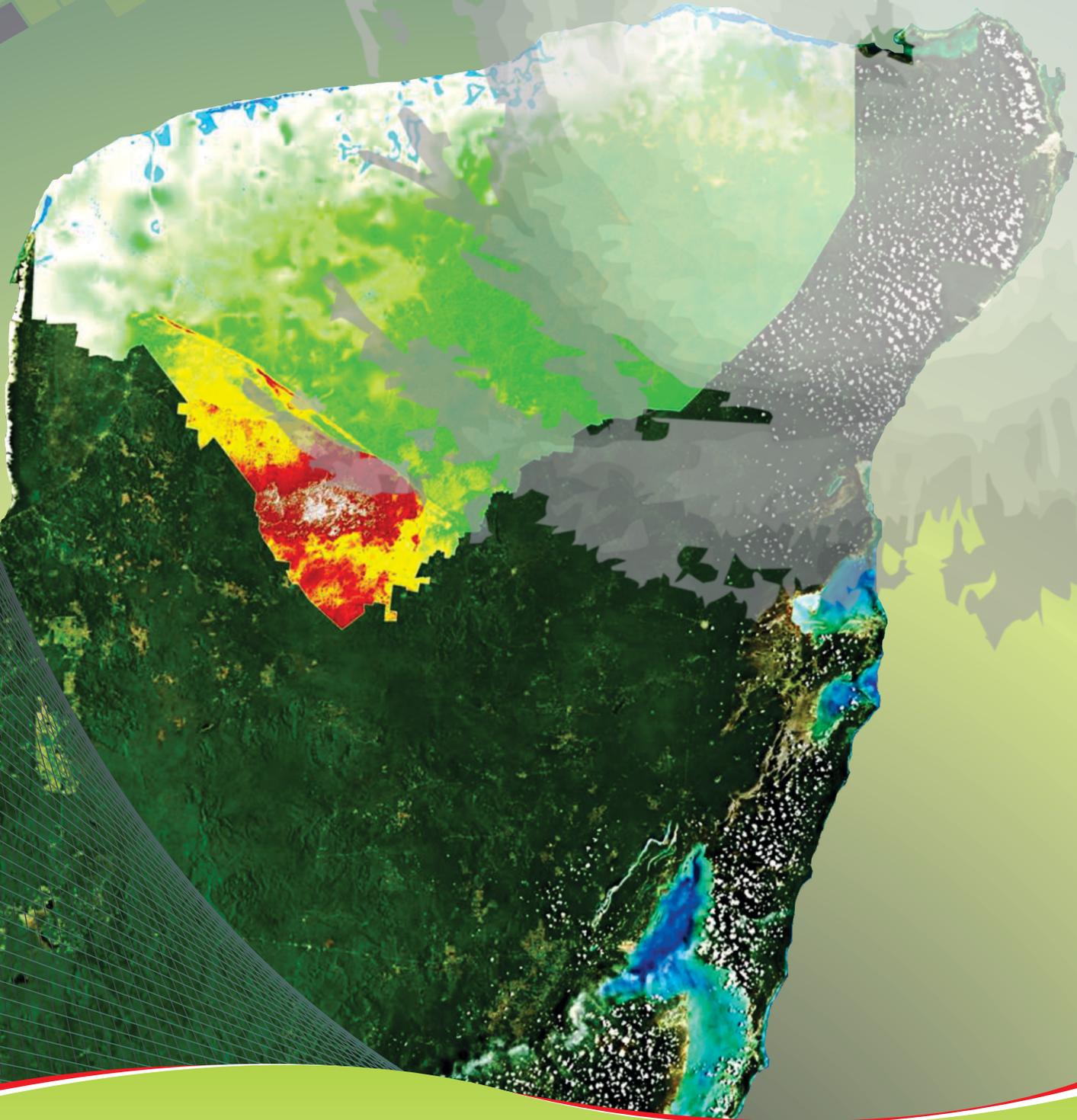


ATLAS

DE PELIGROS POR
FENÓMENOS NATURALES
DEL ESTADO DE YUCATÁN



ATLAS DE PELIGROS POR FENÓMENOS NATURALES DEL ESTADO DE YUCATÁN



PRESENTACION

La presente Obra, es el producto de la intensa colaboración científica y de campo entre el Gobierno del Estado del Yucatán a través de su Dirección Estatal de Protección Civil y el Organismo Público Descentralizado denominado Servicio Geológico Mexicano; los cuales gracias al apoyo otorgado por el Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN) del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), fue posible la realización y exitosa culminación del “Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales del Estado de Yucatán”.

Este Atlas, es un estudio preventivo que tiene la finalidad de contribuir, en el desarrollo de procedimientos que permitan establecer estrategias para la atención, prevención, reducción, y mitigación de desastres en nuestro país. De tal forma que actúa como un instrumento que ayuda a diagnosticar los niveles de peligro y riesgo a los que puede estar expuesta la población en diversas áreas. Los resultados obtenidos serán plasmados en un Sistema de información Geográfica (SIG), que puede ser constantemente actualizado para poder conocer y monitorear más de cerca los peligros a los que está expuesta la población; constituye una valiosa herramienta para planear un ordenamiento y desarrollo estratégico del estado de Yucatán.

Por otra parte, el Servicio Geológico Mexicano, expresa su agradecimiento a las distintas instituciones y personas dentro de ellas que ayudaron y apoyaron de una forma activa y profesional al desarrollo de este proyecto. Participando así, en el intercambio de conocimientos y experiencias que ayudan a mejorar los esquemas normativos para la toma de decisiones responsables, que permiten crear un México resiliente.

A continuación se mencionan las Instituciones del estado de Yucatán que tan amablemente colaboraron:

- *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales SEMARNAT*
- *Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente (SEDUMA)*
- *Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)*
- *Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)*
- *Comisión Nacional Forestal (CONAFOR)*
- *Dirección de Desarrollo Urbano, Ayuntamiento de Mérida*
- *Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Veterinaria y Zootecnia (UADY)*
- *Instituto de Ingeniería UNAM (II) Campus Sisal*
- *Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY)*
- *Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV)*
- *Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH)*



INSTITUCIÓN EJECUTORA
SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO

ING. RAÚL CRUZ RÍOS
DIRECTOR GENERAL

GEOL. PEDRO IGNACIO TERÁN CRUZ
DIRECTOR DE OPERACIÓN GEOLÓGICA

GEOL. SEVERIANO JESÚS GRADIAS FIGUEROA
SUBDIRECTOR DE RECURSOS MINERALES

ING. FRANCISCO DE JESÚS CAFAGGI FÉLIX
GERENTE DE HIDROGEOLOGÍA Y GEOLOGÍA AMBIENTAL

ING. FRANCISCO ARMANDO ARCEO Y CABRILLA
SUBGERENTE DE PELIGROS GEOLÓGICOS

M.C. MARTHA ANGELICA SALAS MARTÍN
COORDINADORA DE ATLAS

RESPONSABLES DE ÁREA

ING. JOSÉ ANTONIO RAFAEL FERNÁNDEZ
JEFE DE PROYECTO

PELIGROS GEOLÓGICOS

M.C. LUIS DANIEL BARAJAS NIGOCHÉ
ING. AGUSTÍN CAZARES VENTURA
ING. JUAN PABLO MORENO RUÍZ
ING. MARÍA ADRIANA CÓRDOVA JIMÉNEZ

PELIGROS HIDROMETEOROLÓGICOS

M.C. MA. ADRIANA LIRA MARES
M.C. GUSTAVO RODOLFO PÉREZ ACOSTA
BIOL. JUAN JOSE HÉRNANDEZ HÉRNANDEZ
ING. ALBERTO HERNÁNDEZ MARTÍNEZ
ING. DIEGO IGNACIO JUÁREZ ALVARADO
ING. ENRIQUE MARTÍNEZ VALENCIA
ING. RAUL VILLASEÑOR LIMA
BIOL. ISMAEL ARZATE HERNÁNDEZ
ING. HERNÁN HERNÁNDEZ ARRIAGA

SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

GEOG. JOSÉ LUIS CAMACHO ESTRADA
ING. EDITH ARLET CARDOSO VÁZQUEZ
ING. LUIS MIGUEL REYES CAMPERO



GOBIERNO DEL ESTADO DE YUCATÁN

LIC. ROLANDO RODRIGO ZAPATA BELLO
GOBERNADOR CONSTITUCIONAL DEL ESTADO DE YUCATÁN

LIC. VÍCTOR CABALLERO DURAN
SECRETARIO GENERAL DE GOBIERNO

C. AARÓN RICARDO PALOMO EUAN
DIRECTOR DE LA UNIDAD ESTATAL DE PROTECCIÓN CIVIL

I. RESUMEN	1
II. INTRODUCCIÓN	6
III. OBJETIVOS, METAS Y ALCANCES	8
III.1. General	8
III.2. Específicos	8
III.3. Metas	8
III.4. Alcances	8
IV. METODO GENERAL DE TRABAJO	9
IV.1. Análisis de Peligro	9
IV.2. Análisis de Vulnerabilidad	17
IV.2.1. Infraestructura	18
IV.3. Elaboración del Sistema de Información Geográfica.....	47
IV.3.1. Estructura Cartográfica	47
IV.3.2. Interfaz del SIG	50
V. ASPECTOS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	53
V.1. Localización.....	53
V.2. Vías de Comunicación	54
V.3. Población	77
V.4. Hidrografía.....	85
V.5. Fisiografía	86
V.6. Vegetación	88
V.7. Clima.....	97
VI. GEOLOGÍA.....	102
VI.1. Marco Geológico Regional de la Península de Yucatán	102
VI.1.1. Geología Superficial	102
VI.1.2. Geología del Subsuelo	104
VI.2. Estratigrafía	105
VI.3. Tectónica.....	113
VI.4. Geología Estructural.....	114
VII. PELIGROS POR FENÓMENOS GEOLÓGICOS	116
VII.1. Causales Detonantes de Peligro	116
VII.1.1. Fallas y Fracturas como condicionantes en la generación de procesos de remoción en masa y subsidencia del terreno.	116
VII.2. Remoción en Masa	130
VII.2.1. Conceptos Básicos	130
VII.2.2. Antecedentes	134
VII.2.3. Método de Trabajo	135
VII.2.4. Análisis de Información y Generación de Mapas Base	139
VII.2.5. Descripción e Interpretación de Datos Tomados en Campo	144
VII.2.6. Susceptibilidad a los Procesos de Remoción en Masa.	149
VII.3. Hundimientos	154
VII.3.1. Conceptos Básicos	155
VII.3.2. Antecedentes	159
VII.3.3. Método de Trabajo	160
VII.3.4. Análisis de Información y Generación de Mapas Base	166
VII.3.5. Descripción e Interpretación de Datos Tomados en Campo	182
VII.3.6. Susceptibilidad a Hundimientos	206
VII.3.7. Discusión	215
VII.4. Sismicidad	217
VII.4.1. Conceptos Básicos	217
VII.4.2. Antecedentes	220
VII.4.3. Método de Trabajo	222

VII.4.4. Análisis de Información	224
VII.5. Vulcanismo	228
VII.5.1. Conceptos Básicos	228
VII.5.2. Antecedentes	233
VII.5.3. Método de trabajo	236
VII.5.4. Análisis de Información	237
VIII. PELIGROS POR FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS	238
VIII.1. Análisis Meteorológico.	238
VIII.1.1. Climatología	239
VIII.1.2. Vientos	273
VIII.2. Erosión.....	326
VIII.2.1. Conceptos Básicos	326
VIII.2.2. Clasificación	328
VIII.2.3. Antecedentes	330
VIII.2.4. Método de Trabajo	330
VIII.2.5. Análisis de Información y Generación de Mapas Base	337
VIII.2.6. Descripción e Interpretación de Datos Tomados en Campo	340
VIII.2.7. Susceptibilidad a la Erosión	360
VIII.2.8. Erodabilidad	365
VIII.3. Erosión Costera	372
VIII.3.1. Conceptos Básicos	373
VIII.3.2. Antecedentes	374
VIII.3.3. Metodología	375
VIII.3.4. Análisis de Información y Generación de Mapas Base	384
VIII.3.5. Descripción e Interpretación de Datos Tomados en Campo	389
VIII.3.6. Susceptibilidad a la Erosión Costera	408
VIII.4. Inundación	423
VIII.4.1. Conceptos Básicos	423
VIII.4.2. Antecedentes	425
VIII.4.3. Método de Trabajo	430
VIII.4.4. Análisis de Información y Generación de Mapas Base	434
VIII.4.5. Descripción e interpretación de datos tomados en campo	449
VIII.4.6. Susceptibilidad a la Inundación	480
VIII.5. Ciclones Tropicales.....	496
VIII.5.1. Conceptos Básicos	497
VIII.5.2. Antecedentes	503
VIII.5.3. Método de Trabajo	504
VIII.5.4. Análisis de Información y Generación de Mapas Base	507
VIII.5.5. Análisis de Peligro y Riesgo por Presencia de Ciclones Tropicales	544
VIII.6. Marea de Tormenta.	552
VIII.6.1. Conceptos Básicos	552
VIII.6.2. Antecedentes	553
VIII.6.3. Método de Trabajo	554
VIII.6.4. Análisis de Información y Generación de Mapa Base	555
VIII.6.5. Análisis de Peligro por Marea de Tormenta	565
VIII.7. Sequía.....	568
VIII.6.1. Conceptos Básicos	569
VIII.6.2. Antecedentes	570
VIII.6.3. Método de Trabajo	573
VIII.6.1. Análisis de Información y Generación de Mapas Base	577
VIII.2.7. Descripción e interpretación de datos tomados en campo	593
VIII.8. Incendios Forestales	595
VIII.8.1. Conceptos Básicos	595
VIII.8.2. Antecedentes	603
VIII.8.3. Método de Trabajo	607

VIII.8.4.	Análisis y Generación de Mapas Base	611
VIII.8.5.	Descripción e Interpretación de Datos Tomados en Campo	627
VIII.8.6.	Determinación de Susceptibilidad de Incendios Forestales	635
IX.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	649
IX.1.	Remoción en Masa	649
IX.2.	Hundimientos	649
IX.3.	Sismicidad	651
IX.4.	Vientos	651
IX.5.	Erosión	652
IX.6.	Erosión Costera	655
IX.7.	Inundación	657
IX.8.	Ciclones Tropicales	659
IX.9.	Marea de Tormentas	660
IX.10.	Sequías	661
IX.11.	Incendios Forestales	663
X.	BIBLIOGRAFÍA	664
XI.	GLOSARIO	694

ÍNDICE DE TABLAS.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	xi

ABREVIATURAS

SGM	Servicio Geológico Mexicano.
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres.
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geográfica e Informática.
PCE	Unidad de Protección Civil del Estado.
PC	Protección Civil.
SIG	Sistema de Información Geográfica.
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social.
DINAPRE	Dirección Nacional de Prevención.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Claves cartográficas utilizadas por tipo de peligro.	11
Tabla 2.	Clasificación del tipo de discontinuidades de las rocas. (fallas y fracturas)	13
Tabla 3.	Clasificación de dureza y resistencia a la compresión de las rocas.....	13
Tabla 4.	Tipos de estructuras kársticas en Yucatán.	13
Tabla 5.	Morfología de paredes de la estructura kárstica.....	13
Tabla 6.	Clasificación para el relieve del terreno.	14
Tabla 7.	Variables de la caracterización de combustible.....	14
Tabla 8.	Tipos de Inundación.....	14
Tabla 9.	Índice de vulnerabilidad según el tipo de vivienda.	25
Tabla 10.	Tipos de vivienda según su menaje.....	30
Tabla 11.	Clasificación de los niveles de riesgo.	31
Tabla 12.	Asignación de costos al Índice de vulnerabilidad según el tipo de vivienda.	32
Tabla 13.	Infraestructura, según su tipo de servicio.	38
Tabla 14.	Clasificación en función al Tránsito Promedio Diario Anual.	44
Tabla 15.	Clasificación de costos para construcción de carreteras.....	46
Tabla 16.	Longitud y características de la red de carreteras del estado de Yucatán.....	54
Tabla 17.	Concesión del sistema ferroviario del sureste de México.....	56
Tabla 18.	Longitud y características de las vías del ferrocarril del estado de Yucatán.....	56
Tabla 19.	Puertos del estado de Yucatán, según tipo de puerto y actividad portuaria.	59
Tabla 20.	Infraestructura de los puertos pesqueros, según tipo, longitud y material de construcción.	65
Tabla 21.	Población según sexo y número de habitantes por cabecera municipal.....	77
Tabla 22.	Población según sexo y número de habitantes por municipio.....	79
Tabla 23.	Total de viviendas particulares habitadas y disponibilidad de servicios.....	82
Tabla 24.	Características del sector educativo del estado de Yucatán.....	82
Tabla 25.	Total de unidades médicas de Instituciones públicas de Salud.	83
Tabla 26.	Total de personal médico, paramédico y servicios de atención interna.	83
Tabla 27.	Total de recursos humanos y físicos por habitantes de instituciones públicas de salud.....	84
Tabla 28.	Total de unidades médicas de Instituciones privadas de salud.....	84
Tabla 29.	Total de recursos humanos y físicos por habitantes de instituciones privadas de salud.....	84
Tabla 30.	Regiones hidrológicas y sus cuencas del estado de Yucatán.....	85
Tabla 31.	Cuerpos de agua superficiales en el estado de Yucatán.	86
Tabla 32.	Principales rasgos hidrográficos de las corrientes de agua del estado de Yucatán.	86
Tabla 33.	Sistema de clasificación climática de Köppen modificado por García.	98
Tabla 34.	Clasificación por grado de pendiente y su valor en la generación a PRM.	140
Tabla 35.	Clasificación por tipo de litología y su valor en la generación de PRM.	141
Tabla 36.	Clasificación por grado de fracturamiento y su valor en la generación de PRM.	142
Tabla 37.	Clasificación por comunidades vegetales y uso de suelo y su valor en la generación de PRM.	143
Tabla 38.	Clasificación edafológica con respecto al grado de erodabilidad.	144
Tabla 39.	Localización de los puntos verificados en campo y las afectaciones por PRM.....	146
Tabla 40.	Características geotécnicas de las unidades litológicas.....	148
Tabla 41.	Matriz de comparaciones pareadas de variables (MCP) en susceptibilidad a PRM.	149
Tabla 42.	Matriz de normalización.	149
Tabla 43.	Vector de la suma ponderada y valor de consistencia.	150
Tabla 44.	Índice de inconsistencia aleatoria o índice de aleatoriedad.	150
Tabla 45.	Municipios con áreas susceptibles a PRM en kilómetros cuadrados.....	152
Tabla 46.	Tipo de caminos y su afectación en kilómetros cuadrados.	153
Tabla 47.	Variables y escalas utilizadas en algunos análisis del peligro, riesgo, susceptibilidad y probabilidad de hundimientos por karsticidad empleados en el mundo.	162
Tabla 48.	Grado de susceptibilidad de las unidades litológicas a procesos de disolución kárstica.	166
Tabla 49.	Clasificación del Grado de Fracturamiento.....	168

Tabla 50.	Clasificación del grado de densidad de dolinas.	169
Tabla 51.	Índice de Ryznar y categoría de las aguas muestreadas respecto de su agresividad química.	177
Tabla 52.	Índice de saturación y condición de agresividad química del agua	178
Tabla 53.	Grado de disolución y valores otorgados.	180
Tabla 54.	Valores otorgados a los diferentes espesores de suelo distribuidos en el territorio del estado de Yucatán.	181
Tabla 55.	Relación de puntos verificados vía aérea en el tema de hundimientos.	184
Tabla 56.	Sitios relevantes en la Zona Planicie Costera.	188
Tabla 57.	Algunos de los sitios importantes sobre estructuras kársticas en el municipio de Mérida.	192
Tabla 58.	Sitios relevantes en la zona de anillo de cenote.	195
Tabla 59.	Sitios relevantes en la zona de Sierrita de Ticul.	201
Tabla 60.	Características importantes de sitios cartografiados en la zona Tizimín-Peto.	203
Tabla 61.	Matriz de comparaciones pareadas de variables (MCP) consideradas en el análisis de susceptibilidad a hundimientos.	207
Tabla 62.	Matriz de normalización.	208
Tabla 63.	Vector de la suma ponderada y valor de consistencia.	208
Tabla 64.	Índice de consistencia aleatoria o índice de aleatoriedad.	208
Tabla 65.	Áreas superiores a 100 Km ² en territorios municipales con diferentes grados de susceptibilidad a hundimientos.	210
Tabla 66.	Áreas urbanas consideradas dentro de zonas con diferentes grados de amenaza a hundimientos.	212
Tabla 67.	Superficies de áreas urbanas en grados de amenaza muy alta, alta y media.	212
Tabla 68.	Costos por tramo carretero federal respecto a su relación al grado de amenaza a hundimientos.	214
Tabla 69.	Costos por tramo carretero estatal respecto a su relación al grado de amenaza.	214
Tabla 70.	Escala de Intensidad de Mercalli Modificada-Abreviada (CENAPRED, 2011).	219
Tabla 71.	Magnitudes de los terremotos e incidencia mundial prevista (USGS).	219
Tabla 72.	Valores de aceleración máxima del terreno en el Estado para periodos de retorno de 10, 100 y 500 años (CENAPRED, 2006).	225
Tabla 73.	Periodos de retorno para aceleraciones del terreno de 0.15 g (aceleración de la gravedad) o mayores (CENAPRED, 2006).	225
Tabla 74.	Sismos ocurridos cercanos al territorio Estatal (SSN, 1990-2013).	226
Tabla 75.	Los principales desastres naturales en México. Clasificado por número de víctimas (Tomado y modificado de www.emdat.be/result-country-profile).	234
Tabla 76.	Los principales desastres naturales en México. Clasificado por número total de afectados (Tomado y modificado de www.emdat.be/result-country-profile).	234
Tabla 77.	Los principales desastres naturales en México. Clasificado por costo en millones de dólares (Tomado y modificado de www.emdat.be/result-country-profile).	234
Tabla 78.	Criterios para la estimación del índice de Explosividad Volcánica (VEI)(Modificado de Newhall y Self, 1982).	235
Tabla 79.	Clasificación de los 68 volcanes y campos volcánicos del Cuaternario en México (modificado de CENAPRED, 2006).	236
Tabla 80.	Coordenadas de las estaciones meteorológicas analizadas.	246
Tabla 81.	Variables reportadas en los registros históricos de CLICOM.	248
Tabla 82.	Densidad mínima para una red de estaciones meteorológicas.	251
Tabla 83.	Valores de temperatura máxima.	254
Tabla 84.	Valores obtenidos de temperatura mínima.	259
Tabla 85.	Valores obtenidos de temperatura media.	261
Tabla 86.	Valores de Precipitación acumulada anual del periodo 1960 a 2000.	264
Tabla 87.	Valores de la precipitación mensual acumulada para cada estación analizada.	266
Tabla 88.	Relación del número de días con granizada por estación.	270
Tabla 89.	Relación del número de tormentas por estación.	271
Tabla 90.	Síntesis de la información construida por la CFE para el estado de Yucatán	282
Tabla 91.	Listado de las estaciones automáticas de la CONAGUA en Yucatán.	294

Tabla 92.	Información Estadística descriptiva e Inferencial del modelo simplificado de vientos para ciclones.	317
Tabla 93.	Información Estadística descriptiva e Inferencial del modelo simplificado de vientos para Nortes.	318
Tabla 94.	Información Estadística descriptiva e Inferencial del modelo simplificado de vientos para todos los tiempos.	320
Tabla 95.	Clasificación de los tipos de erosión de acuerdo a su grado erosivo.	333
Tabla 96.	Clasificación de los climas que prevalecen en la entidad.	333
Tabla 97.	Precipitación media anual (mm) en el estado de Yucatán.	333
Tabla 98.	Clasificación del grado de pendiente asociado a la Erosión.	334
Tabla 99.	Clasificación por comunidades vegetales y uso de suelo.	334
Tabla 100.	Espesor de suelo (cm) para determinar la susceptibilidad.	334
Tabla 101.	Clasificación del tipo de peligro por erosión.	335
Tabla 102.	Localización de puntos verificados en campo con problemas de erosión.	346
Tabla 103.	Localización de puntos de campo con problemas de erosión.	347
Tabla 104.	Localización de puntos en campo con problemas de erosión.	349
Tabla 105.	Localización de puntos verificados en campo con problemas de erosión.	350
Tabla 106.	Localización de puntos verificados en campo con problemas de erosión.	353
Tabla 107.	Localización de puntos verificados en campo con problemas de erosión.	356
Tabla 108.	Localización de puntos verificados en campo con problemas de erosión.	359
Tabla 109.	Correlaciones entre los componentes.	363
Tabla 110.	Varianza Explicada.	363
Tabla 111.	Prueba de Kolmogorov-Smirnov.	364
Tabla 112.	Ecuaciones para estimar la Erosividad de la lluvia "Rh" en la República Mexicana.	366
Tabla 113.	Textura de suelo de acuerdo al porcentaje de materia orgánica.	367
Tabla 114.	Valores de C que se pueden utilizar para estimar pérdidas de suelo.	368
Tabla 115.	Factor de P utilizado para diferentes prácticas y obras de conservación del suelo y agua.	368
Tabla 116.	Estado de la vegetación de duna costera (zona de Pioneras).	378
Tabla 117.	Clasificación de Ancho de Playas del litoral Yucateco.	378
Tabla 118.	Clasificación de Pendientes Geomorfológicas.	379
Tabla 119.	Rango de pendientes medidas en campo.	379
Tabla 120.	Tipos de litoral en la costa de Yucatán.	380
Tabla 121.	Clasificación del grado de Antropización en el litoral yucateco.	380
Tabla 122.	Áreas urbanas y localidades que se encuentran en las diferentes zonas y grados de susceptibilidad por erosión costera a lo largo del litoral yucateco.	422
Tabla 123.	Volumen de precipitación registrada durante el paso de ciclones tropicales.	426
Tabla 124.	Eventos meteorológicos que causaron afectaciones en el estado de Yucatán.	427
Tabla 125.	Localidades con problemática de inundación por eventos extraordinarios.	429
Tabla 126.	Clasificación de la velocidad de infiltración.	435
Tabla 127.	Distribución de los municipios por el área que ocupan.	450
Tabla 128.	Sitios verificados en campo con problemas de inundación en la zona costera.	451
Tabla 129.	Sitios verificados en campo con problemas de inundación en la Zona Plana.	460
Tabla 130.	Sitios donde ocurren eventos de Inundación en la zona de la Sierra de Ticul.	471
Tabla 131.	Matriz de comparaciones pareadas de variables (MCP) en susceptibilidad a la inundación.	480
Tabla 132.	Matriz de normalización.	481
Tabla 133.	Vector de la suma ponderada y valor de consistencia.	481
Tabla 134.	Índice de inconsistencia aleatoria o índice de aleatoriedad.	481
Tabla 135.	Superficie en kilómetros cuadrados por categorías con respecto a las zonas de estudio.	483
Tabla 136.	Escala de daño potencial de Saffir-Simpson.	498
Tabla 137.	Ciclones tropicales que han afectado a Yucatán en las últimas décadas.	504
Tabla 138.	Fases del Semáforo de Alerta Temprana SIAT CT.	506
Tabla 139.	Tabla de acercamiento por detección de tiempo y categoría (escala Saffir-Simpson). .	506
Tabla 140.	Tabla de alejamiento por distancia y categoría (escala Saffir-Simpson).	507
Tabla 141.	Ciclones cuya trayectoria cruzo por el estado de Yucatán a partir de 1852 al 2010.	509

Tabla 142.	Ciclones cuya trayectoria cruzo el área delimitada por el límite estatal y 100 Km a la redonda a partir de 1852 al 2010.	512
Tabla 143.	Frecuencia por década de los ciclones tropicales localizados en el área delimitada.	515
Tabla 144.	Área de ocurrencia por depresiones tropicales por municipio y por grado de frecuencia.	519
Tabla 145.	Área de ocurrencia por tormentas tropicales por municipio y por grado de frecuencia.	521
Tabla 146.	Área de ocurrencia por ciclones tropicales de categoría 1, por municipio y por grado de frecuencia.	522
Tabla 147.	Área de ocurrencia por ciclones tropicales de categoría 2, por municipio y por grado de frecuencia.	523
Tabla 148.	Área de ocurrencia por ciclones tropicales de categoría 3, por municipio y por grado de frecuencia.	524
Tabla 149.	Área de ocurrencia por ciclones tropicales de categoría 4, por municipio y por grado de frecuencia.	525
Tabla 150.	Área de ocurrencia por ciclones tropicales de categoría 5, por municipio y por grado de frecuencia.	527
Tabla 151.	Periodos por década en los que se presentaron más eventos ciclónicos en la región analizada.	528
Tabla 152.	Área de ocurrencia por ciclones tropicales en el periodo que comprende la década de 1881 a 1890, por municipio y por grado de frecuencia.	528
Tabla 153.	Área de ocurrencia por ciclones tropicales en la década comprendida entre 1891 y 1900, por municipio y por grado de frecuencia.	530
Tabla 154.	Área de ocurrencia por ciclones tropicales en el periodo que comprende la década de 1931 a 1940.	531
Tabla 155.	Área de ocurrencia por ciclones tropicales en la década comprendida entre 1951 y 1960, por municipio y por grado de frecuencia.	532
Tabla 156.	Área de ocurrencia por ciclones tropicales en la década comprendida entre 1961 y 1970, por municipio y por grado de frecuencia.	533
Tabla 157.	Área de ocurrencia por ciclones tropicales en la década comprendida entre 1971 y 1980, por municipio y por grado de frecuencia.	534
Tabla 158.	Área de ocurrencia por ciclones tropicales en la década comprendida entre 1991 y 2000, por municipio y por grado de frecuencia.	535
Tabla 159.	Área de ocurrencia por ciclones tropicales en la década comprendida entre 2001 y 2010, por municipio y por grado de frecuencia.	536
Tabla 160.	Cálculo del periodo de retorno para ciclones tropicales en la zona urbana de Mérida ..	542
Tabla 161.	Cálculo del periodo de retorno para ciclones tropicales en la zona urbana de Tizimín.	543
Tabla 162.	Cálculo del periodo de retorno para ciclones tropicales en la zona urbana de Valladolid.	543
Tabla 163.	Cálculo del periodo de retorno para ciclones tropicales en la zona urbana de Oxkutzcab.	543
Tabla 164.	Resumen de los periodos de retorno para ciclones tropicales en las zonas urbanas analizadas pertenecientes al estado de Yucatán.	544
Tabla 165.	Conteo de eventos por categoría de acuerdo a la escala Saffir-Simpson en el área analizada del estado en el periodo que comprende de 1852 al 2010.	544
Tabla 166.	Resultados de la tasa de excedencia.	546
Tabla 167.	Resultados de excedencia de intensidad.	547
Tabla 168.	Resultados de periodos de retorno en base a la categoría del ciclón.	548
Tabla 169.	Matriz de Vulnerabilidad (i) por tipo de vivienda.	549
Tabla 170.	Riesgo ante el próximo evento.	549
Tabla 171.	Riesgo anual.	550
Tabla 172.	Posibles municipios, número de viviendas tipo I y habitantes afectados en caso de presentarse un ciclón tropical.	550
Tabla 173.	Posibles municipios, número de viviendas tipo II y habitantes afectados en caso de presentarse un ciclón tropical.	551

Tabla 174.	Posibles municipios, número de viviendas tipo III y habitantes afectados en caso de presentarse un ciclón tropical.	551
Tabla 175.	Posibles municipios número de viviendas tipo IV y habitantes afectados en caso de presentarse un ciclón tropical.	551
Tabla 176.	Posible número de viviendas tipo V y habitantes afectados en caso de presentarse un ciclón tropical.	551
Tabla 177.	Rangos de tirante de la marea de tormenta de acuerdo a categoría de ciclón.....	552
Tabla 178.	Resultados de la posible altura de marea de tormenta en la zona urbana de Celestún.	559
Tabla 179.	Resultados de la posible altura de marea de tormenta en la localidad de Sisal, en el estado de Yucatán.	560
Tabla 180.	Resultados de la posible altura de marea de tormenta en la zona urbana de Progreso, en el estado de Yucatán.....	561
Tabla 181.	Resultados de la posible altura de marea de tormenta en la zona urbana de Telchac Puerto.....	562
Tabla 182.	Resultados de la posible altura de marea de tormenta en la zona urbana de Dzilam de Bravo.....	563
Tabla 183.	Resultados de la posible altura de marea de tormenta en la zona urbana de Río Lagartos.	564
Tabla 184.	Resultados de la posible altura de marea de tormenta en la localidad de El Cuyo, en el estado de Yucatán.	565
Tabla 185.	Tabla resumen de la altura máxima en metros de marea de tormenta de las áreas urbanas y localidades analizadas del estado de Yucatán.	565
Tabla 186.	Porcentaje de crecimiento poblacional en las áreas urbanas de la costa del estado de Yucatán en el periodo comprendido entre 1990 y 2010.	566
Tabla 187.	Municipio, localidades, número de habitantes y viviendas, así como su tipología de vivienda, localizadas en el polígono de peligro resultante.....	566
Tabla 188.	Impacto de la sequía en: economía, ambiente y sectores sociales.	573
Tabla 189.	Niveles del Índice de Severidad de la Sequía.	575
Tabla 190.	Valores de precipitación Observatorio Mérida (31019), año 1960.	576
Tabla 191.	Clasificación del SPI en periodos húmedos y secos (McKee, 1993)	576
Tabla 192.	Distribución por estado de las estaciones climatológicas incluidas en el I.S.	577
Tabla 193.	Valores asociados al modelo para el periodo 1960-1990.....	582
Tabla 194.	Valores asociados al modelo para el periodo 1960-2003.....	582
Tabla 195.	Porcentaje de superficie expuesta a sequía meteorológica.	583
Tabla 196.	Municipios afectados con índice de sequía Severa, década 1960-1970.	586
Tabla 197.	Resumen de los eventos registrados en la gráfica de SPI a nivel estatal.....	590
Tabla 198.	Cuadro comparativo de defunciones por temperaturas extremas, Temporadas de Calor 2011-2012.	592
Tabla 199.	Casos notificados del 29 de Marzo al 11 de Octubre de 2012.....	593
Tabla 200.	Velocidades de propagación.....	599
Tabla 201.	Diferentes tipos de modelos que se utilizan para determinar susceptibilidad, peligro, vulnerabilidad y riesgo de incendios forestales.	605
Tabla 202.	Puntos de Calor en el estado de Yucatán.	611
Tabla 203.	Total de Puntos de Calor por Periodo.....	612
Tabla 204.	Distribución Mensual de Puntos de Calor en el Periodo (2000-2012).....	613
Tabla 205.	Distribución de Puntos de Calor por Municipio, en paréntesis se indican puntos de calor por año.	615
Tabla 206.	Clasificación de combustibles por tipos de vegetación.	618
Tabla 207.	Registro de incendios forestales de los años 2005-2013.....	622
Tabla 208.	Matriz PAJ con la estructura jerárquica y las comparaciones pareadas.	625
Tabla 209.	Resultados de la obtención de los pesos de la matriz PAJ.....	625
Tabla 210.	Tabla del vector de suma ponderada.	625
Tabla 211.	Lugares verificados en campo con susceptibilidad de propagación de Incendios.....	627
Tabla 212.	Superficie estimada por grado de susceptibilidad.	637
Tabla 213.	Municipios que presentan un grado de susceptibilidad Muy Alto de incendios forestales.....	637

Tabla 214.	Superficies estimadas en relación al nivel de amenaza.....	641
Tabla 215.	Localidades con población mayor a los diez habitantes.	641
Tabla 216.	Análisis de la varianza.	642
Tabla 217.	Prueba de Kolmogorov-Smirnov	643
Tabla 218.	Áreas Naturales protegidas del estado de Yucatán.	645
Tabla 219.	Superficies por grado de amenaza de las áreas Naturales protegidas del estado de Yucatán.....	646
Tabla 220.	Superficies por grado de amenaza y costos por restauración y conservación por tipo de vegetación de las áreas Naturales protegidas del estado de Yucatán.	647

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Método de trabajo generalizado para el desarrollo del presente Atlas.	10
Figura 2.	Ejemplo de ficha técnica, utilizada en campo para la verificación de datos de peligros geológicos.	12
Figura 3.	Diagrama de flujo del método de trabajo empleada para Infraestructura.	19
Figura 4.	Diagrama de flujo del método de trabajo empleada para infraestructura de vivienda.	21
Figura 5.	Áreas geoestadística estatal (agee), municipal (agem), básica (ageb) urbana y rural. ...	23
Figura 6.	Claves geoestadísticas del censo de población y vivienda 2010.	24
Figura 7.	Clasificación de la tipología de vivienda de acuerdo al menaje (CENAPRED, 2006).....	26
Figura 8.	Esquema de Riesgo propuesto por CENAPRED (2006).	29
Figura 9.	Indicadores del censo de población considerados para calcular la vulnerabilidad física.	30
Figura 10.	Distribución de las localidades con su tipología de vivienda.	33
Figura 11.	Áreas urbanas de ciudades y/o cabeceras municipales con su tipología de vivienda.	33
Figura 12.	Áreas urbanas divididas por AGEB, muestran la distribución de la tipología de vivienda.	34
Figura 13.	Las Ageb se dividen en manzanas, las cuales muestra a detalle la tipología de vivienda.	34
Figura 14.	Diagrama de flujo del método de trabajo para la infraestructura de áreas y servicios públicos.	36
Figura 15.	Distribución de las manzanas con áreas que carecen de información.	37
Figura 16.	Mapa de tipología de vivienda por manzana con áreas y servicios públicos.	39
Figura 17.	Diagrama de flujo del método de trabajo empleada para Infraestructura del Transporte.	40
Figura 18.	Cartografía de carreteras federales y estatales de INEGI, 2010.	41
Figura 19.	Cartografía de INEGI de la ruta de la carretera Mérida – Peto, INEGI 2010.	41
Figura 20.	Digitalización de carreteras, caminos y distribuidores viales, en el estado de Yucatán.	42
Figura 21.	Digitalización de libramientos en zonas urbanas sobre la carretera Mérida - Peto.	42
Figura 22.	Mapa de caminos y carreteras actualizado del estado de Yucatán.	47
Figura 23.	Estructura cartográfica del proyecto que comprende la gradícula, donde se representa por medio de la intersección de cruces de la latitud y longitud mostrada en grados y minutos (sexagesimales) y cuadrícula donde se representa por medio de intersección de líneas que forman cuadrados con áreas iguales que muestran unidades métricas en metros.	48
Figura 24.	Índice cartográfico que muestra las 59 cartas topográficas que cubren al Estado.	50
Figura 25.	Estructura del Sistema de Información Geográfica.	50
Figura 26.	Mapa altimétrico de Yucatán.	51
Figura 27.	Imagen Landsat y mosaico de ortofotos del estado de Yucatán.	52
Figura 28.	Localización del estado de Yucatán.	53
Figura 29.	Distribución de vías de comunicación en el estado de Yucatán.	55
Figura 30.	Distribución de la red ferroviaria en el sureste de México.	56
Figura 31.	Aeropuerto internacional de la ciudad de Mérida, Yucatán.	57
Figura 32.	Aeropuerto Kaua, ubicado en el kilómetro 132 carretera Mérida-Valladolid.	58
Figura 33.	Puertos turísticos, comerciales y pesqueros del estado de Yucatán.	59
Figura 34.	Puerto Progreso ubicado al norte del estado de Yucatán.	60
Figura 35.	Terminales que operan en Puerto Progreso, en el estado de Yucatán.	61
Figura 36.	Ubicación de la terminal de contenedores de Yucatán.	63
Figura 37.	Regiones hidrológicas del estado de Yucatán.	85
Figura 38.	Subprovincias fisiográficas del estado de Yucatán.	87
Figura 39.	Escenarios de manglar húmedo y seco.	89
Figura 40.	Vegetación en las rejolladas. 1. Ficus yucatanensis. 2. Melicoccus bijugatus. 3. Sabal japa. 4. Chrysophilum cainito. 5. Brosimum alicastrum. 6. Pouteria sapota. 7. Cocos nucifera. 8. Mangifera indica. 9. Theobroma cacao. 10. Citrus sinensis. 11. Citrus limonia. 12. Musa paradisiaca. 13. Xanthosoma yucatanense. 14. Bursera simaruba. 15. Annona muricata (Flores-Guido J. e Durán R. Méndez, 2010).	96

Figura 41.	Corriente Ecuatorial Norte y del Golfo de México.	97
Figura 42.	Circulación de vientos alisios durante el verano.	97
Figura 43.	Mapa de Climas Köppen, modificado por Orellana.	99
Figura 44.	Localización del área de estudio.	102
Figura 45.	Provincias geológicas de la República Mexicana. Tomado y modificado de Ortega-Gutiérrez <i>et al.</i> , (1992).	103
Figura 46.	Mapa geológico de la península de Yucatán. Modificado de SGM (2007).	104
Figura 47.	Mapa litológico del estado de Yucatán.	105
Figura 48.	Columna estratigráfica del estado de Yucatán.	106
Figura 49.	Mapa geológico estructural del estado de Yucatán.	115
Figura 50.	Clasificación de fallas geológicas.	117
Figura 51.	Diagrama de flujo considerado para la obtención del mapa (capa de información) de Grado de Fracturamiento.	119
Figura 52.	Mapa de lineaciones.	120
Figura 53.	Mapa de frecuencia de fracturamiento.	122
Figura 54.	Mapa de intensidad de fracturamiento.	123
Figura 55.	Mapa de longitud total.	124
Figura 56.	Mapa de Grado de fracturamiento.	124
Figura 57.	Lineamientos y geología del estado de Yucatán (Fuente SGM, 2007).	127
Figura 58.	Roseta de direcciones por Zonas "A,B,C,D,E", ver Figura 57 como referencia.	129
Figura 59.	Principales mecanismos por caída de bloques.	131
Figura 60.	Nomenclatura de las diferentes partes que conforman un deslizamiento (Suárez, 1998).	131
Figura 61.	Representación esquemática de los Flujos, asociada a un talud.	132
Figura 62.	Inestabilidad de ladera, asociada a actividades antrópicas.	133
Figura 63.	Modelo Digital de Elevación del estado de Yucatán, la línea en color rojo delimita el área propensa a Procesos de Remoción en Masa.	134
Figura 64.	Diagrama de flujo, del método de trabajo empleado en la determinación de susceptibilidad peligro por remoción en masa.	135
Figura 65.	Ficha de campo para evaluar macizos rocosos conforme a los lineamientos señalados por la ISRM 1979.	137
Figura 66.	Ficha de campo, modificada de CENAPRED, 2006.	138
Figura 67.	Mapa de pendientes en la parte sur-suroeste del Estado, donde se encuentra la sierrita de Ticul, las partes sombreadas de verde van de 5 a 10° de inclinación, mientras que las de amarillo y rojo van de 10 a 15° y mayores a 15° respectivamente, siendo las máximas de 33°. Predominando en Yucatán las pendientes suaves y zonas planas.	139
Figura 68.	Geología de la parte Sur-Suroeste del Estado.	140
Figura 69.	Grado de fracturamiento del área de estudio.	141
Figura 70.	Relación entre el echado de las discontinuidades y la inclinación de la ladera.	142
Figura 71.	Vegetación en la zona sur y suroeste del Estado.	143
Figura 72.	Mapa de tipo de suelos de la zona de estudio.	144
Figura 73.	Mapa donde se representan los puntos levantados en campo.	147
Figura 74.	Estereofalsilla que define el sistema de falla en cuña (flecha negra).	148
Figura 75.	Mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, las zonas verdes están catalogadas como de grado "muy bajo", en amarillo de grado "bajo" y en blanco "nulo".	151
Figura 76.	Gráfica representando en porcentaje, el grado de susceptibilidad que ocupa en el área de estudio.	151
Figura 77.	Mapa de Amenaza por PRM, donde se muestran las localidades y vías de acceso que pueden ser afectadas.	152
Figura 78.	Estructuras Kársticas.	157
Figura 79.	Dolinas por disolución (a) y colapso (b).	157
Figura 80.	Esquema del aspecto de los conductos kársticos producto de disolución y colapso. Modificado de Ordoñez-Crespo y García-Rodríguez, (2010).	158
Figura 81.	Evolución geológica en la formación de los cenotes y tipos de cenotes. a) Cueva anquihalina, b) cenote tipo cántaro lótico, c) cenote de paredes verticales, d) cenote	

	tipo lentico, e) azolve y hundimiento de paredes, f) cenote tipo aguada (Modificado de eddows <i>et al.</i> , 2007).....	158
Figura 82.	Método general para la obtención del mapa de susceptibilidad a hundimiento kárstico.....	161
Figura 83.	Anáglifo empleado para el análisis morfológico en la zonificación del análisis de datos de campo (tomado de NASA-Jet <i>Propulsion Laboratory</i> , 2003).....	163
Figura 84.	Ficha técnica empleada en la estimación cualitativa de peligro por hundimientos asociado a procesos kársticos.....	164
Figura 85.	Capa de información litológica.....	166
Figura 86.	Relación entre grado de fracturamiento y densidad de dolinas.....	168
Figura 87.	Mapa de densidad de dolinas.....	170
Figura 88.	Mapa de aprovechamientos muestreados.....	171
Figura 89.	Diagrama de Piper.....	172
Figura 90.	Diagrama de Piper en función del tipo de aprovechamiento muestreado.....	172
Figura 91.	Ubicación de muestras tomadas y su clasificación general de familias de agua.....	173
Figura 92.	Zonificación en función de la clasificación general de familias de agua.....	174
Figura 93.	Diagrama Tillman-Trombe.....	175
Figura 94.	Mapa de agresividad química del agua en función de Ph vs. Dureza (Diagrama Tillman-Trombe).....	176
Figura 95.	Zonas de disolución establecidas a través del Índice Ryznar.....	177
Figura 96.	Ubicación de muestras de agua y su condición con respecto al índice de saturación.....	178
Figura 97.	Mapa de susceptibilidad a hundimiento por disolución de rocas carbonatadas.....	179
Figura 98.	Mapa de espesor de suelos.....	181
Figura 99.	Mapa de zonificación para análisis de información de campo.....	182
Figura 100.	Puntos de verificación en vuelo de reconocimiento.....	185
Figura 101.	Mapa de puntos programados y verificados en actividades de campo.....	187
Figura 102.	Localización de sitios cartografiados en el municipio de Mérida.....	191
Figura 103.	Mapa de susceptibilidad a hundimiento del terreno en el estado de Yucatán.....	209
Figura 104.	Porcentaje de área (a) (Km ²) y área ocupada (b) por los diferentes grados de susceptibilidad a hundimientos en el estado de Yucatán.....	210
Figura 105.	Mapa de amenaza por hundimiento en áreas urbanas.....	211
Figura 106.	Mapa de amenaza por hundimientos en vialidades federales y estatales.....	214
Figura 107.	Esquema de propagación de las ondas sísmicas.....	217
Figura 108.	Tipos de ondas sísmicas.....	218
Figura 109.	Placas Tectónicas que afectan a México y epicentros de magnitud >6.5 (modificado de CENAPRED, 2006).....	221
Figura 110.	Epicentros de temblores con magnitud 2 ó mayor, ocurridos en o cerca del territorio nacional durante el siglo XX (modificado de CENAPRED, 2006).....	221
Figura 111.	Método de trabajo para evaluar el peligro sísmico.....	223
Figura 112.	Regionalización Sísmica de la República Mexicana (Manual de Obras Civiles de la CFE, 1993).....	224
Figura 113.	Epicentros cerca del estado de Yucatán, los valores corresponden a su magnitud.....	226
Figura 114.	Estilos de erupción (modificado de Macías y Capra, 2005).....	230
Figura 115.	Distribución de las provincias volcánicas con actividad y algunos de los volcanes considerados como peligrosos en México, A)Provincia Extensional del Golfo de California, B) Cinturón Volcánico Trans-mexicano, C) Arco Volcánico Chiapaneco.....	233
Figura 116.	Método de Trabajo.....	236
Figura 117.	Localización de los volcanes activos más cercanos al estado de Yucatán y el área de influencia de cenizas, conforme a la metodología establecida por CENAPRED (2006).....	237
Figura 118.	Formación de Tormentas de granizo (Modificado de ALERMET, 2011).....	244
Figura 119.	Método de trabajo para Climatología.....	245
Figura 120.	Comparación de datos de estaciones meteorológicas.....	247
Figura 121.	Base de Datos original (CLICOM).....	248
Figura 122.	Datos del Sistema CLICOM en Excel.....	249
Figura 123.	Selección de datos por periodos continuos.....	249
Figura 124.	Hoja de cálculo Amarilla-azul con fórmulas.....	250

Figura 125.	Hoja de Cálculo Amarilla-Azul.	250
Figura 126.	Estaciones meteorológicas y superficie sugerida por la OMM.....	252
Figura 127.	Estaciones meteorológicas y superficie por método Thiessen.	252
Figura 128.	Distribución de los valores registrados de temperatura máxima.....	255
Figura 129.	Registros de la temperatura máxima anual de la estación Dzilam de Bravo.....	256
Figura 130.	Comportamiento de la temperatura máxima mensual durante el periodo 1960-2000 en Dzilam de Bravo.	256
Figura 131.	Registros de la temperatura máxima anual en la estación 31020, Motul.	257
Figura 132.	Comportamiento de la temperatura máxima mensual, estación Motul (1960 a 2000). ...	257
Figura 133.	Registros de la temperatura máxima anual en la estación Chanchimila.	258
Figura 134.	Comportamiento de la temperatura máxima en Chanchimila (Periodo 1960 a 2000). ...	258
Figura 135.	Distribución de las temperaturas mínimas registradas en 40 años (1960-2000).....	260
Figura 136.	Registros de la temperatura mínima anual en la estación Muna.	260
Figura 137.	Comportamiento de la temperatura mínima mensual 1960-2000, (Muna).	261
Figura 138.	Distribución de las temperaturas medias registradas en 40 años (1960-2000).....	262
Figura 139.	Temperatura media de las estaciones analizadas durante el periodo de 40 años.	262
Figura 140.	Comportamiento de la temperatura media mensual. Periodo 1960-2000.	263
Figura 141.	Comparación de las temperaturas medias mensuales. Periodo 1960-2000.	263
Figura 142.	Distribución de la precipitación registrada en el periodo de 1960 al 2000.....	265
Figura 143.	Valores obtenidos de la precipitación acumulada anual.	266
Figura 144.	Comportamiento gráfico de la precipitación mensual para el periodo 1960-2000.....	267
Figura 145.	Climograma para la estación meteorológica de Sisal.	267
Figura 146.	Climograma para la estación meteorológica de Buctzotz.	268
Figura 147.	Climograma para la estación meteorológica de Loche.	268
Figura 148.	Distribución de la ocurrencia de Granizadas en Yucatán. Periodo 1960-2000.....	269
Figura 149.	Número de días de ocurrencia de granizadas. Periodo 1960-2000.....	270
Figura 150.	Distribución de la ocurrencia de Tormentas en Yucatán. Periodo 1960-2000.....	272
Figura 151.	Número de días de ocurrencia de Tormentas. Periodo 1960-2000.	272
Figura 152.	Circulación general de la atmosfera y la Distribución espacial de las Celdas Polares, de Ferrel y de Hadley y su acción para la generación de vientos locales. (Oxford, 2006 modificado por SGM para el Atlas de Yucatán).	274
Figura 153.	Ensamble de imágenes satelitales para la temperatura oceánica comparando enero como mes más frío y agosto como mes más caliente desde el punto de vista de las corrientes oceánicas. Se aprecia en la segunda la acumulación de las corrientes cálidas en el Mar Caribe y Golfo de México. (CONABIO, 2013).....	276
Figura 154.	Modelos descriptivos a partir de mediciones satelitales del comportamiento de la Zona Intertropical que en época de verano trasporta los ciclones tropicales desde la costa de África (NASA, 2013).....	277
Figura 155.	Imagen satelital del comportamiento de la Zona Intertropical en verano con fecha julio 12 del año 2000 (NASA, 2013).	277
Figura 156.	Descripción de los elementos que se utilizan para la interpretación de la escala de Beaufort (Wikipedia, 2013).	278
Figura 157.	Rosa de vientos.	279
Figura 158.	Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 200 años (CFE, 2008).	280
Figura 159.	Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 50 años (CFE, 2008).	281
Figura 160.	Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 10 años (CFE, 2008).	281
Figura 161.	Mapa de isotacas para Q=15 (CFE, 2008).....	282
Figura 162.	Mapa de isotacas para Q=5 (CFE, 2008).....	283
Figura 163.	Metodología para determinar la susceptibilidad por vientos.	284
Figura 164.	Ejemplo de la información base proporcionada por la CONAGUA para la modelación de los vientos en la estación Mérida.	287
Figura 165.	Ejemplo de la información base proporcionada por la CONAGUA para la modelación de los vientos en la estación Mérida. Base de datos depurada para el software WR PLOT View.....	287

Figura 166.	Caratula del software al inicio del proceso.	288
Figura 167.	Rosa de los vientos resultado de la información generada por el programa WRPLOT.	288
Figura 168.	Grafico georreferenciado en google earth que refleja el comportamiento del viento en la Ciudad de Mérida durante el año 2000.	289
Figura 169.	Ensamble de imágenes EOSDIS (The Earth Observing System Data and Information System) de la NASA para el 8 de julio del 2012, donde la ITCZ cubre la Península de Yucatán y se puede apreciar donde mueve los meteoros del Océano Pacífico y del Atlántico.	291
Figura 170.	Cambios de color en la imagen satelital por aportes de agua de lluvia precipitados por cambio de temperatura en los vientos dominantes del Caribe. La flecha indica la dirección del flujo de los vientos alisios.	292
Figura 171.	Modelo conceptual del comportamiento de los vientos dentro de la Circulación general de la atmósfera para la estación de invierno y verano. Se muestran elementos que modifican el microclima y los vientos a escala local. Elementos como la Corriente de Chorro y la Corriente Subtropical modifican el comportamiento climático en las latitudes de la Península de Yucatán y alentados por los frentes fríos en invierno y las corrientes calientes en verano.	293
Figura 172.	Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Mérida en la época de Nortes.	295
Figura 173.	Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Mérida en época de Nortes.	296
Figura 174.	Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Ría Celestún en la época de Nortes.	296
Figura 175.	Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Ría Celestún en época de Nortes.	297
Figura 176.	Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Ría Lagartos en la época de Nortes.	298
Figura 177.	Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Ría Lagartos en época de Nortes.	299
Figura 178.	Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Dzilam tos en la época de Nortes.	299
Figura 179.	Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Dzilam en época de Nortes.	300
Figura 180.	Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Oxkutzcab en la época de Nortes.	301
Figura 181.	Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Oxkutzcab en época de Nortes.	302
Figura 182.	Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Tantakin en la época de Nortes.	302
Figura 183.	Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Tantakin en época de Nortes.	303
Figura 184.	Diagrama de dispersión que ilustra las frecuencias de las direcciones de vientos, la zona gris indica los rumbos de donde el sopro del viento no es relevante y que está por debajo de los 75% del valor.	304
Figura 185.	Mapa que integra las seis estaciones climatológicas para la temporada de nortes y donde se aprecia espacialmente el comportamiento de los pétalos de cada rosa de los vientos.	304
Figura 186.	Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Mérida en la época de Ciclones.	305
Figura 187.	Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Mérida en época de Ciclones.	306
Figura 188.	Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Ría Celestún en la época de Ciclones.	306
Figura 189.	Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Ría Celestún en época de Ciclones.	307

Figura 190. Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Ría Lagartos en la época de Ciclones.	308
Figura 191. Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Ría Lagartos en época de Ciclones.	309
Figura 192. Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Dzilam tos en la época de Ciclones.	309
Figura 193. Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Dzilam en época de Ciclones.	310
Figura 194. Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Oxkutzcab en la época de Ciclones.	311
Figura 195. Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Oxkutzcab en época de Nortes.	312
Figura 196. Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Tantakin en la época de Ciclones.	312
Figura 197. Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Tantakin en época de Ciclones.	313
Figura 198. Diagrama de dispersión que ilustra las frecuencias de las direcciones de vientos para la temporada de ciclones, la zona gris indica los rumbos de donde el soplo del viento que no es relevante, y que está por debajo de los 75% del valor. Se adiciono una señalización en color naranja para indicar la predominancia de los cientos alisios.	314
Figura 199. Mapa que integra las seis estaciones climatológicas para la temporada de ciclones y donde se aprecia espacialmente el comportamiento de los pétalos de cada rosa de los vientos. En esta conjunción de modelos se observa el efecto potencializado de los vientos alisios.	314
Figura 200. Mapa que integra las seis estaciones climatológicas para la Todos los tiempo En esta conjunción de modelos se observa el efecto potencializado de los vientos alisios y su fuerte predominancia.	315
Figura 201. Flujo vectorial (predominante) del viento en temporada de ciclones.	316
Figura 202. Flujo vectorial (predominante) del viento en temporada de nortes.	318
Figura 203. Flujo vectorial (predominante) del viento en todo el tiempo.	319
Figura 204. Modelo basado en registro de radar y boyas marinas para el flujo de vientos del Ciclón Tropical Deán al aproximarse a la Península de Yucatán. Los símbolos corresponden a velocidades de los vientos en la escala de Beaufort de fuerzas de vientos.	321
Figura 205. Imagen satelital del QuikSCAT el 20 de agosto de 2007, a las 5:31 pm hora local Tropical Deán al aproximarse a la Península de Yucatán.	322
Figura 206. Modelo basado en registro de radar y boyas marinas para el flujo de vientos del Ciclón Tropical Wilma al aproximarse a la Península de Yucatán. Los símbolos corresponden a velocidades de los vientos en la escala de Beaufort de fuerzas de vientos.	322
Figura 207. El huracán Wilma sobre tierra (Imagen por cortesía del NOAA).	323
Figura 208. Ilustración del comportamiento del viento en la formación de los huracanes y como parte de su mantenimiento con vida.	324
Figura 209. Ejemplo de cómo se comporta la marea de tormenta y la acción directa del viento en ella para un ejemplo de marejada de 6 metros.	325
Figura 210. Erosión hídrica laminar, la escorrentía no encauzada puede fluir en una lámina uniforme sobre la superficie, donde normalmente se pierde la capa superficial del suelo.	328
Figura 211. Metodología para determinar la susceptibilidad por Erosión.	331
Figura 212. Ficha de campo de erosión.	332
Figura 213. Metodología general de muestreo de suelos.	335
Figura 214. Porcentaje de Uso de suelo de cubierta vegetal en el estado de Yucatán.	338
Figura 215. Distribución espacial de cubierta vegetal en el estado de Yucatán.	338
Figura 216. Municipios que han aumentado la cubierta vegetal en los últimos 10 años.	339
Figura 217. Porcentaje actual de uso de suelo.	340
Figura 218. Regionalización del estado de Yucatán.	341

Figura 219. Polígonos de campo, para determinar el tipo y grado de erosión.	342
Figura 220. Grado de erosión de acuerdo a la prospección en campo.	342
Figura 221. Puntos de muestreo de suelos en el estado de Yucatán.	343
Figura 222. Ubicación geográfica y puntos de verificación en campo de la región I.	345
Figura 223. Ubicación geográfica y puntos de verificación en campo de la región II.	347
Figura 224. Ubicación geográfica y puntos de verificación en campo de la región III.	349
Figura 225. Ubicación geográfica y puntos de verificación en campo de la región IV.	351
Figura 226. Ubicación geográfica y puntos de verificación en campo de la región V.	353
Figura 227. Ubicación geográfica y puntos de verificación en campo de la región VI.	355
Figura 228. Ubicación geográfica y puntos de verificación en campo de la región VII.	358
Figura 229. Porcentaje de grado de erosión hídrica en el estado de Yucatán.	361
Figura 230. Grado de erosión actual en el estado de Yucatán.	362
Figura 231. Distribución y tendencia de los 5 componentes.	364
Figura 232. Dispersión de puntos de los 5 componentes.	365
Figura 233. Numero de toneladas de suelo que se pierden anualmente por hectárea.	369
Figura 234. Erodabilidad de los suelos de acuerdo a sus propiedades físicas e intrínsecas.	371
Figura 235. Diagrama de la zona marina costera y sus divisiones, (basado en Sorensen y McCreary, 1990).	372
Figura 236. a) Esquema de las variables sedimentarias a considerar en un balance sedimentario de un tramo de costa (Peña, 2007). b) Ejemplo de obra que provoca un desequilibrio en la dinámica litoral, produciendo zonas erosivas (Peña, 2007).	373
Figura 237. Método de trabajo para erosión costera.	376
Figura 238. Ficha de campo propuesta por el SGM para levantar puntos de verificación para el nivel de Erosión Costera.	377
Figura 239. Referencia espacial de la zona en la cual fueron medidas las pendientes en campo (inicio de la vegetación de duna costera hasta el nivel del mar instantáneo).	379
Figura 240. Franja de 20 Km con división política delimitando los municipios costeros (CONABIO, 2011).	385
Figura 241. Perfil costero del estado de Yucatán en el que se observan los distintos paisajes litorales, (tomado de CONABIO, 2011).	385
Figura 242. La zona urbana crece en el municipio de Progreso extendiéndose lateralmente hacia las localidades de Chuburná y Chicxulub destruyendo dunas costeras y zonas de manglar.	387
Figura 243. Franja costera del estado de Yucatán 342.7 Km de longitud.	388
Figura 244. Ruta de prospección aérea a lo largo del litoral del estado de Yucatán.	389
Figura 245. Vista panorámica de las funciones que realiza el dique de contención como obra de mitigación para la erosión.	390
Figura 246. Vista panorámica de la problemática ocasionada por la erosión que causa en la zona costera los diques instalados de manera particular por los vecinos de Chabihau, produciendo daño al vecino inmediato, ya que el primero recupera playa y el segundo la pierde.	391
Figura 247. Vista panorámica de la invasión de la zona urbana hacia las zonas de playa, en la que se observan viviendas inundadas por el mar debido a una mala planeación.	392
Figura 248. Vista panorámica de la recuperación de playas instalando geotubo como obras de mitigación para la erosión costera.	393
Figura 249. Puntos de verificación vía terrestre.	395
Figura 250. Distribución de los puntos de verificación en la región I Poniente.	396
Figura 251. Distribución de los puntos de verificación en la región II Noroeste.	400
Figura 252. El Puerto de Altura y el Puerto de Abrigo de Yucalpetén, son los principales factores que han generado erosión severa en las localidades de Yucalpetén, Chelem y Chuburná, ya que impiden el paso de arena al poniente de la costa.	401
Figura 253. Ubicación y distribución de los puntos de verificación (puntos en color rojo) en la región IV Litoral Centro.	403
Figura 254. Distribución de puntos (color rojo), verificados en campo sobre la Región V Noreste.	407
Figura 255. Degradación de la vegetación de duna costera en el litoral Yucateco.	409
Figura 256. El tipo de litoral que sufre mayor afectación por erosión costera es el de tipo arenoso representado en color morado.	410

Figura 257. Antropización del litoral yucateco, mostrando rangos muy altos en el municipio de Puerto Progreso.....	411
Figura 258. Yucalpetén, Chelem y Chuburná son localidades con anchos de playa entre 0 y 10 metros.....	412
Figura 259. Rango de pendientes medidas a lo largo del litoral a partir del inicio de vegetación costera (zona de Pioneras) a la pleamar máxima.....	412
Figura 260. Susceptibilidad del litoral Yucateco a la erosión costera.....	413
Figura 261. El 33.32% del total de la línea de costa presenta susceptibilidad alta a muy alta.....	413
Figura 262. Gran parte del área costera de la región I presenta bajo grado de susceptibilidad a erosionarse.....	414
Figura 263. Susceptibilidad por erosión costera de la región I poniente.....	415
Figura 264. De los 45 kilómetros de costa pertenecientes a esta región, 25 kilómetros presentan susceptibilidad muy alta a la erosión costera.....	416
Figura 265. Susceptibilidad por erosión costera de la región II Noroeste.....	417
Figura 266. En esta región 12 kilómetros de la costa presenta susceptibilidad muy alta a erosionarse.....	418
Figura 267. Susceptibilidad por erosión costera en la región IV Litoral Centro.....	419
Figura 268. Más del 50% de la línea de costa de esta región presenta susceptibilidad media a alta a sufrir erosión.....	420
Figura 269. La zona Noreste existen playas bien conservadas con un ancho promedio de más de 25 metros.....	421
Figura 270. Mapa de precipitaciones acumuladas para el huracán Isidoro.....	430
Figura 271. Diagrama de flujo de método general de trabajo.....	431
Figura 272. Formato de ficha de campo para recolectar información sobre inundaciones.....	433
Figura 273. Mapa de infiltración.....	434
Figura 274. Mapa de espesor de la capa de suelo.....	435
Figura 275. Mapa de zonas planas del Estado.....	436
Figura 276. Detalle de las zonas planas del Estado, mostrando los municipios de Tekax y Tzucacab.....	437
Figura 277. Mapa de pendientes.....	438
Figura 278. Mapa de Coeficiente de Escurrimiento de INEGI.....	439
Figura 279. Periodos de retorno de 2, 5, 10 y 20 años con duración de una hora.....	441
Figura 280. Periodos de retorno de 50, 100,200 y 500 años con duración de una hora.....	442
Figura 281. Periodos de retorno de 1000, 2000, 5000 y 10 000 años con duración de una hora.....	443
Figura 282. Periodos de retorno de 2, 5,10 y 20 años con duración de 24 horas.....	446
Figura 283. Periodos de retorno de 50, 100, 200 y 500 años con duración de 24 horas.....	447
Figura 284. Periodos de retorno de 1000, 2000, 5000 y 10,000 años con duración de 24 horas.....	448
Figura 285. Zonificación del Estado según el tipo de inundaciones que ocurren.....	449
Figura 286. Porcentaje de superficie municipal de la zona costera.....	450
Figura 287. Altura de agua durante inundación en la zona costera de Celestún, Hunucmá y Progreso.....	452
Figura 288. Distribución de puntos de por inundación en los municipios del Celestún, Hunucmá y Progreso.....	452
Figura 289. Altura máxima alcanzada durante una inundación en la Costa Centro.....	455
Figura 290. Puntos de inundación en Telchac Puerto, Sinanché, Yobaín, Dzidzantún y Dzilam de Bravo.....	455
Figura 291. Altura máxima alcanzada durante una inundación en la Costa Este.....	457
Figura 292. Distribución de puntos por inundación en los municipios de San Felipe, Rio Lagartos y Tizimín.....	458
Figura 293. Nivel máximo de agua en calles y viviendas, Mpo. San Felipe.....	458
Figura 294. Distribución en porcentaje de la Zona plana con respecto a la “Costera” y “Sierra de Ticul”.....	459
Figura 295. Altura del agua durante Inundación en Zona Plana.....	464
Figura 296. Distribución de puntos de control por inundación de la Sierra de Ticul del estado de Yucatán.....	471
Figura 297. Altura máxima alcanzada durante un evento de inundación en seis municipios del cono sur.....	472

Figura 298. Altura máxima alcanzada durante un evento de inundación en el municipio de Tekax.....	472
Figura 299. Mapa de susceptibilidad del terreno a inundaciones pluviales.....	482
Figura 300. Susceptibilidad del terreno a inundaciones pluviales con periodos de retorno de 2, 5, 10 y 20 años con duración de 1 hora.....	485
Figura 301. Susceptibilidad del terreno a inundaciones pluviales con periodos de retorno de 50, 100, 200 y 500 años con duración de 1 hora.....	487
Figura 302. Susceptibilidad del terreno a inundaciones pluviales con periodos de retorno de 1000, 2000, 5000 y 10000 años con duración de 1 hora.	489
Figura 303. Susceptibilidad del terreno a inundaciones pluviales con periodos de retorno de 2, 5, 10 y 20 años con duración de 24 horas.....	491
Figura 304. Susceptibilidad del terreno a inundaciones pluviales con periodos de retorno de 50, 100, 200 y 500 años con duración de 24 horas.....	493
Figura 305. Susceptibilidad del terreno a inundaciones pluviales con periodos de retorno de 1000, 2000, 5000 y 10000 años con duración de 24 horas.....	495
Figura 306. Zonas de formación de ciclones Fuente: http://www.jmarcano.com/variados/desastre/huracan2.html	499
Figura 307. Zonas de formación de ciclones en el Atlántico (Fuente: http://www.jmarcano.com/variados/desastre/huracan2.html).....	499
Figura 308. Zonas de formación de ciclones en junio y rutas posibles de trayectorias Fuente: http://www.noaa.gov/	500
Figura 309. Zonas de formación de ciclones en julio y rutas posibles de trayectorias Fuente: http://www.noaa.gov/	500
Figura 310. Zonas de formación de ciclones en agosto y rutas posibles de trayectorias (Fuente: http://www.noaa.gov/).....	501
Figura 311. Zonas de formación de ciclones en septiembre y rutas posibles de trayectorias (Fuente: http://www.noaa.gov/).....	501
Figura 312. Zonas de formación de ciclones en octubre y rutas posibles de trayectorias (Fuente: http://www.noaa.gov/).....	502
Figura 313. Zonas de formación de ciclones en noviembre y rutas posibles de trayectorias (Fuente: http://www.noaa.gov/).....	502
Figura 314. Método de trabajo para el tema de ciclones.....	505
Figura 315. Trayectorias históricas de los ciclones tropicales desde 1852 al 2010, hasta 100 Km partiendo del límite estatal, el color indica la categoría de acuerdo a la escala Saffir-Simpson.	508
Figura 316. Frecuencia de ciclones registrados en el área delimitada para el estado de Yucatán, 1852 al 2010.	508
Figura 317. Meses con mayor número de ciclones tropicales registrados en el estado de Yucatán.....	509
Figura 318. Origen geográfico de las trayectorias de ciclones tropicales localizadas en el área delimitada.....	514
Figura 319. Origen geográfico de las trayectorias de los ciclones tropicales que cruzan el área delimitada en el estado de Yucatán.....	515
Figura 320. Frecuencia por década de los ciclones tropicales localizados en el área delimitada. ...	516
Figura 321. Trayectorias de los ciclones tropicales y área de análisis que comprende (100 Km)....	517
Figura 322. Cuadrícula de análisis en el área analizada conformada por celdas de 40 X 40 Km, la frecuencia está dada por el número y longitudes de las trayectorias.....	518
Figura 323. Frecuencia de cada celda en base a la sumatoria de las longitudes de las trayectorias de los ciclones.....	518
Figura 324. Mapa de frecuencia considerando las trayectorias que han cruzado el área de análisis en el periodo que comprende de 1851 al 2010.....	519
Figura 325. Mapa de frecuencia y trayectorias de depresiones tropicales que han cruzado el área de análisis en el periodo que comprende de 1851 al 2010.....	520
Figura 326. Mapa de frecuencia y trayectorias de tormentas tropicales que han cruzado el área de análisis en el periodo que comprende de 1851 al 2010.....	521
Figura 327. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales de categoría 1 que han cruzado el área de análisis en el periodo que comprende de 1851 al 2010.....	523

Figura 328. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales de categoría 2 que han cruzado el área de análisis en el periodo que comprende de 1851 al 2010.....	524
Figura 330. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales de categoría 4 que han cruzado el área de análisis en el periodo que comprende de 1851 al 2010.....	526
Figura 331. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales de categoría 5 que han cruzado el área de análisis en el periodo que comprende de 1851 al 2010.....	528
Figura 332. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales presentada en el periodo que comprende de 1881 a 1890, en el estado de Yucatán.....	529
Figura 333. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales presentada en el periodo que comprende el intervalo de 1891 a 1900, en el estado de Yucatán.....	530
Figura 334. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales presentada en el periodo que comprende de 1931 a 1940.....	531
Figura 335. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales presentada en el periodo que comprende el intervalo de 1951 a 1960, en el estado de Yucatán.....	533
Figura 336. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales presentada en el periodo que comprende el intervalo de 1961 a 1970, en el estado de Yucatán.....	534
Figura 337. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales presentada en el periodo que comprende el intervalo de 1971 a 1980, en el estado de Yucatán.....	535
Figura 338. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales presentada en el periodo que comprende el intervalo de 1991 al 2000, en el estado de Yucatán.....	536
Figura 339. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales presentada en el periodo que comprende el intervalo del 2001 al 2010, en el estado de Yucatán.....	537
Figura 340. Mapa de probabilidad de ocurrencia para depresión tropical en el estado de Yucatán.....	538
Figura 341. Mapa de probabilidad de ocurrencia para tormenta tropical en el estado de Yucatán.....	539
Figura 342. Mapa de probabilidad de ocurrencia para huracanes categoría 1 en el estado de Yucatán.....	539
Figura 343. Mapa de probabilidad de ocurrencia de huracanes categoría 2 en el estado de Yucatán.....	540
Figura 344. Mapa de probabilidad de ocurrencia para huracanes categoría 3 en el estado de Yucatán.....	540
Figura 345. Mapa de probabilidad de ocurrencia para huracanes categoría 4 en el estado de Yucatán.....	541
Figura 346. Mapa de probabilidad de ocurrencia para huracanes categoría 5 en el estado de Yucatán.....	541
Figura 347. Mapa de número de eventos ciclónicos en el periodo que comprende los años de 1851 al 2005, en el estado de Yucatán.....	542
Figura 348. Tasa de excedencia de los ciclones en el área delimitada.....	546
Figura 349. Zonificación de marea de tormenta del estado de Yucatán realizado por el CENAPRED, 2006.....	553
Figura 350. Zonificación de zonas vulnerables de inundación de la península de Yucatán realizado por CONAGUA, 2010.....	553
Figura 351. Método de trabajo general para la determinación de Peligro y altura por Marea de tormenta.....	554
Figura 352. Curva de nivel 10 metros, determinada con el modelo digital de elevación.....	555
Figura 353. Mapa de peligro por el fenómeno de marea de tormenta.....	556
Figura 354. Croquis esquemático del ángulo α para la obtención del valor correspondiente al factor correctivo.....	557
Figura 355. Velocidad de desplazamiento o translación de los ciclones tropicales en el Estado.....	558
Figura 356. Características de rumbo y variación de desplazamiento de los ciclones tropicales, ángulo α y línea de costa en la zona urbana de Celestún.....	558
Figura 357. Características de rumbo y variación de desplazamiento de los ciclones tropicales, ángulo α y línea de costa en la localidad de Sisal.....	559
Figura 358. Características de rumbo y variación de desplazamiento de los ciclones tropicales, ángulo α y línea de costa en la zona urbana de la zona comprendida por las áreas urbanas de Chuburná, Chelem, Progreso y Chicxulub Puerto.....	560

Figura 359. Características de rumbo y variación de desplazamiento de los ciclones tropicales, ángulo α y línea de costa en la zona urbana de Telchac Puerto.....	561
Figura 360. Características de rumbo y variación de desplazamiento de los ciclones tropicales, ángulo α y línea de costa en la zona urbana de Dzilam de Bravo.	562
Figura 361. Características de rumbo y variación de desplazamiento de los ciclones tropicales, ángulo α y línea de costa en la zona urbana de Río Lagartos.	563
Figura 362. Características de rumbo y variación de desplazamiento de los ciclones tropicales, ángulo α y línea de costa en la localidad de El Cuyo.	564
Figura 363. Afectación por contingencias climatológicas, 2004-2011 en México (Fuente: SIAP, 2012).	571
Figura 364. Manifestación de fenómenos hidrometeorológicos a nivel global en la República Mexicana, (SIAP, 2012).	571
Figura 365. Clasificación de Peligro por sequía a escala municipal de CENAPRED (2012).	572
Figura 366. Diagrama de método de trabajo para el tema de sequía.....	574
Figura 367. Estaciones climatológicas en el estado de Yucatán.	575
Figura 368. Mapa del (INEGI, 2006), donde se observa la relación que existe entre el clima y el desarrollo de la sequía.....	578
Figura 369. Mapa del índice de severidad de sequía meteorológica de la República Mexicana (Hernández, 2007).	579
Figura 370. Mapa de déficit Hídrico (R. Orellana, C. Espadas, 2002).....	580
Figura 371. Estimativo del comportamiento del índice de severidad de sequía, periodo 1960 - 1990 por el método IDW.	581
Figura 372. Estimativo del comportamiento del índice de severidad de sequía, periodo 1960 - 2003 por método IDW.	581
Figura 373. Comportamiento del índice de severidad de sequía, periodo 1960 - 1990, simplificado de IDW.	582
Figura 374. Comportamiento del índice de severidad de sequía, periodo 1960 - 2003, simplificado de IDW.	583
Figura 375. Severidad de sequía en cuanto a déficit de precipitación. década 1960-1970.	584
Figura 376. Severidad de sequía en cuanto a déficit de precipitación. década 1970-1980.	584
Figura 377. Severidad de sequía en cuanto a déficit de precipitación. década 1980-1990.	585
Figura 378. Severidad de sequía en cuanto a déficit de precipitación. década 1990-2000.	585
Figura 379. SPI periodo 1980-2012.	586
Figura 380. SPI periodo 1920-2000.	586
Figura 381. SPI estación Mérida Yuc.	587
Figura 382. SPI estación Progreso, Yuc.	587
Figura 383. SPI estación Valladolid, Yuc.	587
Figura 384. Mapa de SPI, Enero de 2012.	588
Figura 385. Mapa de SPI, Marzo de 2012.	588
Figura 386. Mapa de SPI, Junio de 2012.	588
Figura 387. Mapa de SPI, Septiembre de 2012.	588
Figura 388. Mapa de SPI, Diciembre de 2012.	589
Figura 389. Gráfica a nivel estatal del SPI abarcando los años de 1979 al 2012.	589
Figura 390. Sequía de medio verano o canícula, comprende un período entre 1961 y 1990. Tomado y modificado del Atlas, Escenarios de Cambio Climático en la Península de Yucatán, 2009.	591
Figura 391. Triangulo del fuego.	596
Figura 392. La gran triada de incendios.....	597
Figura 393. Formas de Incendio controlado.	600
Figura 394. Tipos de incendios por tipo de combustible de comunidad vegetal (Morfin-Ríos et al., 2012).	601
Figura 395. Mapa de peligro por ocurrencia de incendios forestales 2013 (Fuente CONAFOR, 2013).	604
Figura 396. Método de trabajo generalizado para elaborar el estudio de incendios forestales.	608
Figura 397. Formato de Ficha de campo de Incendios Forestales.....	610
Figura 398. Distribución Anual de Puntos de Calor durante el Periodo 2000-2012.	612
Figura 399. Distribución de Puntos de Calor por Periodo de Cuatro Años.....	612

Figura 400.	Distribución Anual de Puntos de Calor durante el Periodo 2000-2012.....	613
Figura 401.	Distribución Mensual de Puntos de Calor Mediante cada cuatro años durante los años 2000-2012.....	614
Figura 402.	Distribución Municipal de Puntos de Calor durante el Periodo 2000-2012.....	616
Figura 403.	Ubicación espacial de la frecuencia de los puntos de calor.....	616
Figura 404.	Reincidencia de Puntos de Calor.	617
Figura 405.	Mapa de combustible por comunidad vegetal.....	618
Figura 406.	Mapa de espesor del horizonte O de suelo.....	619
Figura 407.	Número de Incendios registrados entre 1991-2013 el estado de Yucatán.....	620
Figura 408.	Número de superficies afectadas Fuente SEMARNAT, CONAFOR Febrero 2013.....	620
Figura 409.	Número de superficies afectadas por vegetación. Fuente SEMARNAT, CONAFOR Febrero 2013.	621
Figura 410.	Número de Incendios registrados mensualmente Fuente SEMARNAT, CONAFOR Febrero 2013.	621
Figura 411.	Registro de incendios forestales por municipio de los años 2005-2013.....	622
Figura 412.	Causas de Incendios registrados. Fuente SEMARNAT, CONAFOR Febrero 2013.	624
Figura 413.	Puntos de Verificación de campo sobre la zona Noreste y Sureste del estado de Yucatán.....	627
Figura 414.	Esquema del proceso para la generación del mapa de susceptibilidad con (AHP) Arc Map. V 10.	636
Figura 415.	Mapa de susceptibilidad por incendios forestales.	636
Figura 416.	Municipios que presentan un grado de susceptibilidad Muy Alta de incendios forestales.	639
Figura 417.	Mapa de amenaza por incendios forestales.....	640
Figura 418.	Dispersión de puntos de las 7 variables.....	643
Figura 419.	Mapa de Amenaza por Incendios Forestales de las Áreas Naturales Protegidas de Yucatán.....	646

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1.	Viviendas humildes son construidas con material de desecho.....	26
Fotografía 2.	La mayoría de las viviendas Tipo I, corresponden a zonas marginadas.....	26
Fotografía 3.	Vivienda construida con paredes de barro y techo de hojas de palma de guano. ...	27
Fotografía 4.	Vivienda construida con paredes de piedra caliza y techo de hojas de palma de guano.....	27
Fotografía 5.	Las viviendas de clase baja cuentan con techos sin elementos estructurales.....	27
Fotografía 6.	Vivienda tipo III construida con paredes de material rígido y techo de lámina o teja.....	27
Fotografía 7.	Las viviendas de clase media, equiparada con viviendas de interés social.....	28
Fotografía 8.	Las viviendas de clase alta con acabados de buena calidad y elementos de confort.....	28
Fotografía 9.	Carretera No 180 comunica a la ciudad de Mérida.....	54
Fotografía 10.	Ferrocarriles Chiapas Mayab S.A. de C.V.	55
Fotografía 11.	Aeropuerto Internacional “Lic. Manuel Crescencio Rejón” de Mérida Yucatán.	57
Fotografía 12.	Aeropuerto Kaua, ubicado cerca de la zona arqueológica de Chichén Itzá.	58
Fotografía 13.	Terminal de Puerto Progreso en el estado de Yucatán.	60
Fotografía 14.	Terminal de hidrocarburos de Pemex en Puerto Progreso.....	61
Fotografía 15.	Muelle marginal ubicada terminal de hidrocarburos.	61
Fotografía 16.	Terminal granel agrícola en Puerto Progreso del estado de Yucatán.	62
Fotografía 17.	Terminal de granel agrícola opera desde el muelle 7, Puerto Progreso.....	62
Fotografía 18.	Terminal de contenedores de Puerto de Progreso del estado de Yucatán.	63
Fotografía 19.	Grúa panamax de contenedores Yucatán, opera 47 movimientos / hrs.....	64
Fotografía 20.	La Terminal de Cruceros en Puerto de Progreso.	64
Fotografía 21.	Los cruceros arriban en los muelles norte y sur de la terminal de Progreso.	64
Fotografía 22.	La aduana marítima de Puerto Progreso, edificada en un terreno ganado al mar.	65
Fotografía 23.	Puerto pesquero y turístico de Celestún.	66
Fotografía 24.	Faros del puerto pesquero de Celestún.....	66
Fotografía 25.	Puerto turístico y pesquero de Sisal.....	67
Fotografía 26.	Faro de concreto de Sisal puerto.	67
Fotografía 27.	Puerto pesquero y turístico de Chuburná.	68
Fotografía 28.	Puerto turístico y pesquero de Yucalpetén.	69
Fotografía 29.	Puerto de Yucalpetén tiene instalaciones para yates, pesca y la marina.....	69
Fotografía 30.	Puerto turístico y pesquero Telchac.....	70
Fotografía 31.	Cerca de la playa de puerto Telchac se encuentra en faro de concreto y tabique.....	70
Fotografía 32.	Puerto pesquero Chabihau.	71
Fotografía 33.	Puerto pesquero de Chabihau, tiene muelle marginal de 192 metros.....	71
Fotografía 34.	Puerto pesquero y turístico Dzilam de Bravo.	72
Fotografía 35.	Puerto Dzilam de Bravo, cuenta con un malecón y un faro de concreto armado....	72
Fotografía 36.	Puerto pesquero San Felipe.....	73
Fotografía 37.	Muelles del Puerto pesquero San Felipe.	73
Fotografía 38.	Puerto turístico y pesquero Río Lagartos.....	74
Fotografía 39.	Faro de concreto armado sobre sale en el puerto pesquero Río Lagartos.	74
Fotografía 40.	Puerto industrial-comercial Las Coloradas.	75
Fotografía 41.	El Puerto Las Coloradas descarga de sal a las embarcaciones.....	75
Fotografía 42.	Puerto pesquero y turístico El Cuyo.....	76
Fotografía 43.	Muelle de madera en el puerto pesquero y turístico El Cuyo.	76
Fotografía 44.	Duna costera en la zona de pioneras. (Foto Durán R. y Méndez, 2010).....	88
Fotografía 45.	Matorral de duna costera en Uaymitún. (Foto Durán R. y Méndez, 2010).	88
Fotografía 46.	Manglar de franja. (Foto Durán R. y Méndez, 2010).....	90
Fotografía 47.	Manglar achaparrado Rhizophora mangle. (Foto S. Flores en Durán R. y Méndez, 2010).....	90
Fotografía 48.	Selva baja caducifolia (Foto M. Casillas en Durán R. y Méndez, 2010).....	91
Fotografía 49.	Selva baja espinosa (Foto Durán R. y Méndez, 2010).	91
Fotografía 50.	Cactáceas columnares en selva baja. (Foto Durán R. y Méndez, 2010).....	92

Fotografía 51.	Selva mediana subcaducifolia. (Foto S. Flores en Durán y Méndez, 2010).	92
Fotografía 52.	Selva mediana subperennifolia (Foto S. Flores en Durán y Méndez, 2010).....	93
Fotografía 53.	Vegetación de la Sabana (Foto R. Durán en Durán R. y Méndez, 2010).	93
Fotografía 54.	Vista panorámica de un peten (isla de vegetación). (Foto M. Andrade en Durán R. y Méndez, 2010).....	95
Fotografía 55.	Vegetación típica en haltunes o sartejenas o cavidades pequeñas (Foto Durán R. Méndez, 2010).	95
Fotografía 56.	Vegetación hidrófita (helechos). (Foto S. Flores en Durán R. Méndez, 2010).....	96
Fotografía 57.	Vegetación secundaria derivada de selva baja caducifolia (Foto S. Flores en Durán R. Méndez, 2010).....	96
Fotografía 58.	Carretera Uxmal (YPRM01), cerca de la localidad de Calcehtok, se encuentra un talud de 5 m de altura, roca caliza con sistemas de fracturamiento, dentro de las fracturas se encuentra rellena de suelo de color rojizo, en esta zona se observó una brecha de falla.....	145
Fotografía 59.	Talud sobre camino pavimentado con flujo constante de vehículos (punto YPRM04), el macizo rocoso se encuentra altamente fracturado, lo que provoca pequeños bloques que caen sobre el camino.	145
Fotografía 60.	Talud del punto YPRM22, la brújula indica el buzamiento de la estratificación. Obsérvese que los estratos buzán 12 grados con respecto a la horizontal.	145
Fotografía 61.	Alternancia de materiales rocosos con diferente composición y estructura en un talud en el trayecto del camino de Santa Elena a Emiliano Zapara (YPRM09), que se manifiesta en distinto grados de alteración, resistencia y comportamiento mecánico.	145
Fotografía 62.	Talud de 4 m de altura (punto YPRM21), donde afloran rocas con estratificación sub horizontal.....	146
Fotografía 63.	Caída de suelo y rocas (punto YPRM22), afectando a la vía de comunicación, debido las precipitaciones pluviales recientes.....	147
Fotografía 64.	Afloramiento de Boudstone perteneciente a la Formación Carrillo Puerto, localizado en la zona urbana del poblado de Cuzamá.....	167
Fotografía 65.	Cenotes clásicos cercanos a la línea de costa.....	186
Fotografía 66.	Islote de vegetación contrastante con la vegetación circundante.	186
Fotografía 67.	Estructuras alineadas característico del anillo de cenotes, imagen viendo al oeste.	186
Fotografía 68.	Cenote al costado de la carretera Federal 261, que comunica al poblado de Yaxcopoil y Muna.....	186
Fotografía 69.	Cenote en zona urbana de la cabecera municipal de Cenotillo.	186
Fotografía 70.	Cenote en área verde en el poblado de Yalcón en el Municipio de Valladolid.	186
Fotografía 71.	Punto YHB2016. El camino mantiene la misma dirección de la cavidad	189
Fotografía 72.	Punto YHB2028. Desarrollo de gruta con dirección hacia la granja.....	189
Fotografía 73.	Punto YHB2031. Vialidad al costado de caverna en Dzidzantún.....	190
Fotografía 74.	Punto YHB2045. Estructura kárstica circulada con mampostería contigua a viviendas.	190
Fotografía 75.	Afectación en muros de vivienda y vialidad.....	190
Fotografía 76.	Caverna utilizada como depósito de escombros y basura.	190
Fotografía 77.	Estructura kárstica próxima a la vialidad (YHB2096).	192
Fotografía 78.	Estructura (YHB2103) la cual subyace parcialmente a vía de comunicación.	192
Fotografía 79.	La roca en el techo y paredes consta de brecha calcárea sana (YHB1108).	193
Fotografía 80.	El agua presenta cierto grado de turbidez y acumulación de basura (YHB2105)....	193
Fotografía 81.	Punto YHB2047. Fracturas en muros y piso de teatro municipal, en cabecera municipal Cenotillo.....	195
Fotografía 82.	Punto YHB2048. Vista aérea del cenote, situado detrás de la iglesia de Cenotillo.	195
Fotografía 83.	Cavidad subterránea con clave (YHB2005) del cenote San Ignacio, en Chocholá.....	196
Fotografía 84.	Colapso en superficie provocado por cavidad en el subsuelo. Santa María Acu. Municipio de Halachó.....	196

Fotografía 85.	Sitio YHB5012. Cenote San Kuat, Situado cerca del COBAY, no presenta protección.....	197
Fotografía 86.	Sitio YHB5008. Dolina situada en medio de infraestructura urbana en Huhí.....	197
Fotografía 87.	Punto YHB2035. La eminente contaminación del manto acuífero y colapso generado a través de las cavidades en zonas urbanas.....	198
Fotografía 88.	Punto YHB2041. Cavidad colapsada asociada al paso del Huracán Isidoro en Septiembre de 2002.....	198
Fotografía 89.	Punto YHB2014. Estructura contigua a vía de comunicación Granada- Santo Domingo.....	199
Fotografía 90.	Punto YHB2062. Cavidad evidenciada a través de una noria y jardinera parque central Quintana Roo.....	199
Fotografía 91.	Punto YHB5007. Cenote Tabí relativamente cerca de viviendas.....	200
Fotografía 92.	Cavidad con posibilidad de colapso debido al poco espesor del techo y su amplitud en el subsuelo.....	200
Fotografía 93.	Vialidad en el límite de dolina en tramo Tunkás-Cenotillo.....	200
Fotografía 94.	Carpeta asfáltica recién construida con presencia de fracturas.....	200
Fotografía 95.	Presencia de escombros producto de colapsos en Caverna Calcehtok.....	201
Fotografía 96.	Estructura contigua a la vivienda.....	201
Fotografía 97.	Cenote Xtatun, contiguo a viviendas y calle.....	204
Fotografía 98.	Cenote Azul. Cavidad susceptible a colapso.....	204
Fotografía 99.	Casas, negocios ubicados en el entorno de la dolina en el municipio de Tizimín..	204
Fotografía 100.	Vivienda expuesta sobre la cavidad.....	205
Fotografía 101.	La cavidad limitan al norte centro de salud y al sur comercio y vivienda.....	205
Fotografía 102.	Hundimiento activo, frente a iglesia en construcción.....	205
Fotografía 103.	La superficie del cenote, subyace a calle. Chan Tres Reyes.....	206
Fotografía 104.	Cavidad en subsuelo manifestada en superficie por 5 norias.....	206
Fotografía 105.	a) Bloques producto de colapso en el Cenote Maní y b) Detalle de material arqueológico.....	215
Fotografía 106.	Bloque caído en el Cenote Yaxbacaltun. SE del poblado de Homún.....	215
Fotografía 107.	Sucesión de vegetación primaria a secundaria, Municipio de Tizimín.....	344
Fotografía 108.	Cambio de uso de suelo, de forestal a agrícola Municipio de Tizimín.....	344
Fotografía 109.	Erosión hídrica laminar en grado alto Eh3, acelerada por la deforestación, es una zona en proceso de desertificación, Municipio de Tekit.....	345
Fotografía 110.	Erosión hídrica laminar en grado medio Eh2, la vegetación secundaria no es suficiente para mitigar los efectos erosivos.....	345
Fotografía 111.	Erosión hídrica laminar en grado alto Eh3, afloramiento de caliza coquina, Mpo. de Maxcanú.....	346
Fotografía 112.	Erosión hídrica laminar en grado bajo Eh1, Municipio de Celestún.....	346
Fotografía 113.	Erosión hídrica laminar en grado bajo Eh1, Municipio de progreso.....	348
Fotografía 114.	Campo ganadero, en la localidad de San Diego Texan, Municipio de Mérida, erosión hídrica laminar en grado medio Eh2.....	348
Fotografía 115.	Erosión hídrica laminar en grado medio Eh2, Municipio de Izamal.....	349
Fotografía 116.	La vegetación secundaria ha ido desplazando a la primaria.....	349
Fotografía 117.	Erosión hídrica laminar en grado alto Eh3, fomentada por los incendios forestales, Municipio de Sudzal.....	350
Fotografía 118.	Erosión hídrica laminar en grado alto Eh3; se observa el suelo desnudo desprovisto de vegetación.....	350
Fotografía 119.	Erosión hídrica laminar en grado medio Eh2, cerca de la línea de costa Municipio de Telchac Puerto.....	351
Fotografía 120.	Erosión hídrica laminar en grado medio Eh2, la deforestación es la causa principal, Municipio de Dzilam.....	351
Fotografía 121.	Erosión hídrica laminar en grado alto Eh3, el espesor de suelo es nulo, Municipio de Espitia.....	352
Fotografía 122.	Erosión hídrica laminar en grado bajo Eh1, la buena cubierta vegetal ayuda a mitigar los efectos erosivos Municipio de Yobaín.....	352
Fotografía 123.	Erosión hídrica laminar en grado medio Eh2, la ampliación de las fronteras agrícolas han fomentado la degradación, Municipio de Tizimín.....	354

Fotografía 124.	Erosión hídrica laminar en grado Medio Eh2, la deforestación es la causa principal, Municipio de Rio Lagartos.....	354
Fotografía 125.	Erosión hídrica laminar en grado medio Eh2, fomentado por la deforestación y ampliación de las fronteras agrícolas, Municipio de Valladolid.....	357
Fotografía 126.	Erosión hídrica laminar en grado medio Eh2; se observan algunos manchones de vegetación natural.....	357
Fotografía 127.	Erosión hídrica laminar en grado medio Eh2, el espesor de suelo es casi nulo, Municipio de Yaxcabá.....	357
Fotografía 128.	Erosión hídrica laminar en grado alto Eh3, los incendios forestales aceleran el proceso, Municipio de Chemax.....	357
Fotografía 129.	Zona de acumulación de material edáfico, debido al grado de pendiente y escurrimientos, lo cual fomenta la erosión hídrica laminar en grado alto Eh3, Municipio de Tekax.....	360
Fotografía 130.	El sobrepastoreo fomenta la erosión hídrica laminar en grado medio, Municipio de Tzucacab.....	360
Fotografía 131.	Corte de carretera de Oxkutzcab a Loltun; donde se puede observar la filtración de sedimentos al subsuelo acumulándose en las oquedades debido a la karsticidad de la roca.....	361
Fotografía 132.	Se observan la cementación de suelo infiltrado en grietas y oquedades de la roca.....	361
Fotografía 133.	En la localidad El Cuyo, la construcción de un dique impide la deposición normal de sedimentos a lo largo de la costa.....	390
Fotografía 134.	En la localidad de San Felipe, se aprecia que la corriente lleva una dirección preferente al Noroeste (NW), por lo que los sedimentos se acumulan en la parte izquierda del dique.....	390
Fotografía 135.	En la localidad de Chisascab, la corriente de agua se observa con poco sedimento para ser depositado en la costa, razón por la cual posiblemente esta se encuentra con menor espesor.....	390
Fotografía 136.	En la localidad de Dzilam de Bravo, el dique de contención, impide el depósito de sedimentos.....	390
Fotografía 137.	Construcción de diques para ganar y conservar la playa frente a las casas de los habitantes del lugar.....	391
Fotografía 138.	En la localidad de Chabihau, municipio de Yobaín, los diques que acumulan y a la vez erosionan la costa formando estructuras en “Z”.....	391
Fotografía 139.	En el Municipio de Sinanché, los diques construidos en el tramo anterior a esta población, erosionan de manera severa la playa, dejando varias construcciones expuestas frente al mar.....	392
Fotografía 140.	En la Cabecera municipal de Telchac Puerto, debido a la intensa erosión, diversas casas han quedado expuestas frente al mar.....	392
Fotografía 141.	Implementación de geotubos como obras de mitigación contra la erosión costera en la localidad de Huaytum, municipio de Ixil.....	393
Fotografía 142.	En la localidad de Chicxulub Puerto, la construcción de diques que descompensan la deposición normal de la arena en la costa.....	393
Fotografía 143.	En la localidad de Yucalpetén, claro ejemplo de acreción-erosión debido a la construcción del dique.....	394
Fotografía 144.	En la localidad de Yucalpetén, existen construcciones que se encuentran prácticamente dentro del mar debido al desequilibrio sedimentario que existe cuando se construyen diques o espigones.....	394
Fotografía 145.	Construcción desmedida de diques provocando acreción-erosión de la costa, en la localidad de Chelem.....	394
Fotografía 146.	Zonas erosionadas en las que algunas viviendas quedan dentro de los dominios del mar.....	394
Fotografía 147.	En Chuburná municipio de Progreso, la acumulación de arena debido a la construcción del dique, provoca también erosión en el lado opuesto.....	395
Fotografía 148.	En la localidad Tres Piedras, municipio de Hunucmá, la reducción del espesor de la playa, se asocia posiblemente al poco aporte de material en esta parte de la costa.....	395

Fotografía 149.	En Cholul Municipio de Celestún, no existe antropización ni degradación de la vegetación de la duna costera, lo cual ayuda a mantener homogéneo el espesor de la playa.	397
Fotografía 150.	Puerto de Celestún, se construyen casas, hoteles y restaurantes sobre la playa, degradando la vegetación de la duna costera, acelerando el proceso de la erosión.....	397
Fotografía 151.	Puerto de Celestún, impide que pase la arena de manera natural, acumulándola en la parte Este (E) de la estructura llegando a medir hasta 35 metros.....	397
Fotografía 152.	Lado Oeste (W) de la estructura, el espesor de la playa se reduce a 23 metros debido a la construcción del puerto.....	397
Fotografía 153.	En San Ramón, Municipio de Celestún, las playas presentan un espesor homogéneo, ya que no hay antropización ni degradación de la vegetación costera.....	398
Fotografía 154.	En Punta Piedra, Municipio de Hunucmá, la construcción del Puerto de Abrigo de Sisal contribuye a intensificar el fenómeno de la erosión.	398
Fotografía 155.	En Sisal Puerto, Municipio de Hunucmá, la construcción de casas y algunos hoteles están afectando la vegetación de duna costera, proceso que acelera la erosión en las playas.....	398
Fotografía 156.	En la parte Este (E) de la estructura en Sisal Puerto, se acumula arena conservando el espesor de la playa que llega a medir hasta 35 metros.....	398
Fotografía 157.	Localidad Sisal Puerto, Municipio de Hunucmá, existe una descompensación en la playa debido a la construcción del Puerto.....	399
Fotografía 158.	En el Carmen, Municipio de Hunucmá, la playa se conserva en buen estado, ya que no hay alteración del medio.	399
Fotografía 159.	Tramo entre las localidades de El Carmen y San Antonio Copte, el espesor de playa se reduce hasta 7 metros, debido posiblemente a la construcción del puerto de Altura en Progreso y al Puerto de Abrigo en Yucalpetén.	399
Fotografía 160.	En Ha-Huay municipio de Ixil, la construcción de casas de verano va en aumento alterando el equilibrio costero.	401
Fotografía 161.	En Tropical Riviera, municipio de Progreso, debido a la evidente pérdida de playa, los habitantes han implementado medidas de mitigación contra la erosión.....	401
Fotografía 162.	En Chicxulub Puerto, municipio de Progreso, evidente problema de erosión debido principalmente a la construcción del muelle ya que no permite el paso al lado poniente de la estructura.....	401
Fotografía 163.	En Chelem, municipio de Progreso, el espesor de playa ha sido totalmente erosionado, dejando a las viviendas en el límite con el mar.....	402
Fotografía 164.	En Chuburná, municipio de Progreso, existe una indiscriminada construcción de espigones y/o espolones, que contribuyen al desequilibrio en la dinámica de la costa.	402
Fotografía 165.	En el Puerto de Chuburná, municipio de Progreso, la zona urbana aun no llega a este punto, por lo que la vegetación costera se encuentra conservada, factores que ayudan a mantener el buen estado de las playas.....	402
Fotografía 166.	En Miramar, municipio de Dzemul, la mancha urbana se expande hacia esta zona, evidencia de ello es la construcción de algunas viviendas sobre la vegetación costera.	404
Fotografía 167.	En Playa San Bruno, municipio de Dzemul, existen espesores de playa de hasta 35 metros, reduciendo drásticamente metros adelante en la misma zona...	404
Fotografía 168.	En San Bruno, municipio de Dzemul, la degradación de la vegetación se debe al aumento en la construcción de viviendas en la zona.....	404
Fotografía 169.	En Playa Bonita, debido a las construcciones, se está degradando la vegetación de duna costera principal protector y reten de playas.....	404
Fotografía 170.	En Telchac Pueblo, el incremento en la construcción de viviendas cerca del Puerto, representa un factor que acelera el proceso de erosión en la costa.	405

Fotografía 171.	En Laguna Rosada, municipio de Telchac Puerto, la construcción del dique genera acumulación de arena al lado oriente de dicha estructura creando erosión al lado contiguo de la misma.	405
Fotografía 172.	En San Crisanto, Municipio de Sinanché, la invasión de viviendas sobre la vegetación costera, representa un factor importante que acelera el proceso de erosión costera.....	406
Fotografía 173.	En Chabihau municipio de Yobaín, existen casas construidas delante de la línea de vegetación costera quedando expuestas al mar.	406
Fotografía 174.	En Santa Clara, municipio de Dzidzantún, la construcción de espigones para tratar de conservar el frente de playa de las viviendas, requiere de una mejor planeación de obras para el control de la erosión, ya que su funcionamiento no es el adecuado.....	406
Fotografía 175.	En la Cabecera Municipal de Dzilam de Bravo, se construyó un muro de contención sobre la línea de costa, con el objetivo de mitigar inundaciones cuando aumenta el nivel del mar principalmente en época de huracanes o tormentas tropicales.....	406
Fotografía 176.	En Boca Chipepte, municipio de Tizimín, la vegetación costera y playas se encuentran bien conservados.....	407
Fotografía 177.	La vegetación de duna costera de playas se encuentra bien conservada con amplios espesores.....	407
Fotografía 178.	En Playa Cocal, municipio de Tizimín, la vegetación costera y playas se encuentran bien conservados.....	408
Fotografía 179.	En Playa Cocal, la cobertura de vegetación se mantiene en buen Estado, ya que no existe alteración en ella.	408
Fotografía 180.	Vista 1 de la Laguna Costera. Col. Felipe Carrillo Puerto, Celestún.....	453
Fotografía 181.	Vista 2 de la Laguna Costera. Col. Felipe Carrillo Puerto, Celestún.....	453
Fotografía 182.	Loc.Sisal Puerto, Mpio Hunucmá, el nivel del agua alcanza hasta 1.5 m.	453
Fotografía 183.	El desborde de la Ciénega afecta el único acceso a la localidad.....	453
Fotografía 184.	Chelem, en Progreso, el aumento en el nivel del mar afecta viviendas situadas en la costa.....	454
Fotografía 185.	Casas cerca de la Ciénega. Col. La Guadalupe, Progreso,.....	454
Fotografía 186.	Casas a la orilla de la Ciénega, libramiento a Chicxulub.	454
Fotografía 187.	Nivel que alcanzó el agua durante el huracán Isidoro.....	456
Fotografía 188.	Área inundada por Isidoro.....	456
Fotografía 189.	Área inundada por Isidoro.....	457
Fotografía 190.	Casa ubicada cerca a la Ciénega.....	457
Fotografía 191.	Zonas de inundación por marea de tormenta.....	457
Fotografía 192.	Zonas inundables en Chunchucmil.....	464
Fotografía 193.	Depresiones del terreno que favorecen la acumulación de agua.	465
Fotografía 194.	Zonas de acumulación de agua en temporada de lluvias.	465
Fotografía 195.	Relieve que favorece la acumulación de agua.....	465
Fotografía 196.	Sitio con problemática de inundación.	466
Fotografía 197.	En este lugar el nivel del agua alcanza los 70 cm.....	466
Fotografía 198.	Poblado establecido en una depresión del terreno.	466
Fotografía 199.	Calles con problemática de inundación.	466
Fotografía 200.	El nivel del agua alcanza los 70 cm en este sitio.	467
Fotografía 201.	Zonas bajas donde es factible la acumulación de agua.....	467
Fotografía 202.	Punto de Verificación YIB5015.	467
Fotografía 203.	Localidad de Dzoncauich, Calle 25 zona de inundación.	467
Fotografía 204.	Viviendas construidas por debajo del nivel de la calle.	468
Fotografía 205.	Alcantarillas entre suelos descubiertos y vegetación que ocasionan azolve.	468
Fotografía 206.	Zona en depresión relativa del terreno.	469
Fotografía 207.	Zona de pequeños lomeríos que condicionan inundaciones en aras bajas.....	469
Fotografía 208.	Localidad de Yohactun de Hidalgo afectada por precipitaciones.....	469
Fotografía 209.	Poblado de Moctezuma ubicado en depresión del terreno.	469
Fotografía 210.	Toda la localidad de Santa Rosa se vio afectada por el Huracán Isidoro.....	469
Fotografía 211.	Depresión del terreno que favorece la acumulación de agua.	469

Fotografía 212.	Colonia de San Benito en Ticul es afectada por inundación durante las lluvias. ...	472
Fotografía 213.	Poblado San Isidro en el municipio de Santa Elena, es afectado por inundación..	473
Fotografía 214.	Cooperativa-Emiliano Zapata en el municipio de Oxkutzcab, fue afectado por inundación.	473
Fotografía 215.	Poblado Xul en el municipio de Oxkutzcab, también fue afectado por inundación.	473
Fotografía 216.	Poblado Yaxhachen en el municipio de Oxkutzcab, fue afectado por inundación.	474
Fotografía 217.	San Agustín-Salvador Alvarado en el municipio de Tekax, es afectado por inundación.	474
Fotografía 218.	Benito Juárez en el municipio de Tekax, es afectado por inundación.	475
Fotografía 219.	San Martín Hili en el municipio de Tekax, es afectado por inundación.	475
Fotografía 220.	Chan Dzinup en el municipio de Tekax, es afectado por inundación.	475
Fotografía 221.	San Isidro Yaxche en el municipio de Tekax, es afectado por inundación.	475
Fotografía 222.	Poblado de Huntochac se inundó hasta 3 metros en las partes más bajas.	476
Fotografía 223.	Localidad José López Portillo, fue severamente afectado por la inundación del Isidoro.	476
Fotografía 224.	Planicie localmente conocida como La Sabana se inundó durante el huracán Isidoro.	476
Fotografía 225.	Localidad de Mac-Yan del municipio de Tekax, fue inundada durante el huracán Isidoro.	477
Fotografía 226.	Nohalal fue afectada por inundación donde el nivel del agua alcanzó los 3 metros.	477
Fotografía 227.	Casas de la localidad de X-Cunchaca, fue afectada por inundación durante el huracán Isidoro.	477
Fotografía 228.	Las casas construidas en alto, fueron afectadas por la inundación.	477
Fotografía 229.	Vista panorámica del poblado X-Cunchaca rodeada por la extensas planicies.	477
Fotografía 230.	Vista panorámica de la Planicie La Sabana, está zona fue totalmente cubierta por el agua, durante la inundación del huracán Isidoro.	478
Fotografía 231.	Planicie donde se ubica la localidad de Mesatunich, se inundó hasta 2 metros. ...	478
Fotografía 232.	Localidad de San Pedro Xtokil, se inundó hasta alcanzar 1 metro de agua.	478
Fotografía 233.	Localidad de Blanca Flor en el municipio de Tzucacab, es afectado por inundación.	479
Fotografía 234.	Pisteakal en el municipio de Tzucacab, es afectado por inundación.	479
Fotografía 235.	Tigre Grande en el municipio de Tzucacab, es afectado por inundación.	479
Fotografía 236.	Poblado de Xcobiakal en el municipio de Peto, es afectado por inundación.	479
Fotografía 237.	Vista aérea que muestra evidencia sobre la deforestación.	593
Fotografía 238.	Preparación de suelo con fines agrícolas.	593
Fotografía 239.	Agricultura de temporal.	594
Fotografía 240.	Suelo con poco espesor.	594
Fotografía 241.	Se muestran zonas de Agricultura las cuales son representativas a las prácticas de quema de la vegetación original.	629
Fotografía 242.	Muestra el tipo de vegetación que es Pastizal cultivado e Inducido, y la agricultura de temporal.	629
Fotografía 243.	En la Col. Moctezuma al Noreste del municipio de Tizimín, el fuego es utilizado para preparar una parcela para cultivar ya que facilita la limpia de vegetación.	629
Fotografía 244.	Hacia la Col. San Salvador se observa la el tipo de vegetación y de sus pastizales secos.	629
Fotografía 245.	Hacia la localidad de Panabá se observa un tipo de susceptibilidad media.	630
Fotografía 246.	Vegetación predominada por pastizal cultivado.	630
Fotografía 247.	En la localidad de las Ruinas, Municipio de Tizimín se observa un pequeño incendio para fines de limpieza del terreno.	630
Fotografía 248.	Se observa el color café oscuro después de una quema de pastizal.	631
Fotografía 249.	Se observan la zona de vegetación que es muy representativa como zonas de pastizales para la agricultura de temporal Municipio de Chemax.	631
Fotografía 250.	Se muestra la propagación de Incendios forestal esto dentro de la localidad de Temozón.	631

Fotografía 251.	Vista panorámica que muestra la remoción de cubierta vegetal para introducir pastizal, con fines pecuarios.....	631
Fotografía 252.	Se muestra la quema sin control de la vegetación la cual corresponde a la localidad de Chocholá.....	632
Fotografía 253.	Se muestra la quema de suelo dentro del municipio de Kopomá.	632
Fotografía 254.	En esta imagen se puede observar la ignición de un incendio forestal a la orilla de la carretera con dirección al municipio de Oxkutzcab.	632
Fotografía 255.	Se observa el incremento de la quema de maleza a la orilla de la carretera con trayecto a la localidad de Xúl en el municipio de Oxkutzcab.....	632
Fotografía 256.	Se observa el terreno después de la quema de vegetación. Se distingue el color café-rojizo característico de las primeras quemadas.	633
Fotografía 257.	Se muestra el uso del fuego para la quema de la vegetación, para limpiar el terreno y obtener una mejor cosecha, localidad de Ticum municipio de Tekax.....	633
Fotografía 258.	YIF18 Vista aérea de la localidad Xuxcab Municipio de Teabo (Selva Mediana Subcaducifolia).....	633
Fotografía 259.	YIF19.Vista aérea de un incendio cerca a la localidad Santa Cruz, municipio de Valladolid.....	633
Fotografía 260.	YIF20. Vista aérea del municipio de Ixil, asociado a susceptibilidad muy alta en las inmediaciones por el tipo de vegetación de selva baja espinosa.	634
Fotografía 261.	YIF21. Vista aérea de la localidad Balamtum, municipio de Izamal, muestra zonas agrícolas.	634
Fotografía 262.	YIF22.Vista aérea de la comunidad de Xanché, municipio de Tekax, muestra selva mediana subcaducifolia susceptible a incendios.	634
Fotografía 263.	YIF23. Vista aérea en las inmediaciones de la localidad Santa Rosa-Petén, municipio de Celestún.....	634
Fotografía 264.	YIF24. Vista aérea de la localidad Opinchén, municipio de Kopomá.....	634

I. RESUMEN

El estado de Yucatán, de acuerdo a sus ubicación y características geográficas, es una región expuesta a diversos peligros y riesgos por fenómenos naturales como huracanes, erosión costera y hundimientos, entre otros; que pueden afectar a su población poniendo en riesgo tanto a sus habitantes como a la infraestructura física y los recursos naturales de las distintas regiones del Estado.

Ahora, si bien no es posible poder evitar que los fenómenos naturales ocasionen daños y pérdidas, si es viable poder reducir de manera sustancial la vulnerabilidad socioeconómica siempre y cuando exista una buena planificación del uso del territorio basado en información oportuna y confiable

Con base en lo anterior y considerando la necesidad de identificar, ubicar y enlistar los peligros a los que está expuesta la Población, el Gobierno del Estado del Yucatán a través de su Dirección Estatal de Protección Civil, solicitó mediante su Oficio SGG/UEPC/092/2010 al Organismo Público Descentralizado denominado Servicio Geológico Mexicano el desarrollo del “Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales del Estado de Yucatán”, el cual servirá como instrumento esencial para la prevención, mitigación y atención de desastres en la entidad.

Para desarrollar este Atlas, el Servicio Geológico Mexicano realizó gestión ante Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN) a fin de obtener financiamiento parcial para desarrollar el estudio preventivo denominado Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales del Estado de Yucatán. Como resultado de esta gestión, el 25 de enero de 2011, el Director General del FONDEN, Lic. Rubén Hofliger Topete, a través del Oficio DGF/0049/2011, comunicó al Servicio Geológico Mexicano la resolución del Consejo de Evaluación del Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN) de la entonces Coordinación General de Protección Civil de la Secretaría de Gobernación, resolución misma que fue: Autorizarlo en Definitiva. La autorización dada se hizo en forma de coparticipación, según la cual cada una de las partes, FOPREDEN y SGM, aportarían el 50% del costo del estudio preventivo.

Considerando las características del estado de Yucatán, en el presente Atlas, se abordan los aspectos de los fenómenos naturales geológicos, hidrológicos y meteorológicos, a partir de los cuales se genera información, con la cual se pueden simular contingencias y posibles afectaciones de áreas determinadas. A partir de dicha información se hacen los estudios territoriales necesarios y adecuados, de tal forma que se establecen las zonas susceptibles y/o vulnerables a dichos fenómenos, dando así, la pauta al gobierno y las autoridades correspondientes, para trabajar en planear y ejecutar las obras y acciones que eviten esas contingencias y mitiguen en lo posible los riesgos.

El Atlas a su vez, también funciona como una herramienta ágil y dinámica, puesto que permite una permanente actualización a través de una base de datos integrada en un Sistema de Información Geográfica (SIG) de fácil manejo, el cual permiten poder procesar y analizar cantidades de datos que resultan excesivos para el manejo manual, además de disponer e integrar de manera coherente la información de un conjunto de datos espaciales (mapas o imágenes) y temáticos (datos geológicos, geomorfológicos, estructurales, determinación de uso de suelo, etc.) asociada a las diferentes áreas de estudio

Varios fenómenos naturales, causales de peligros, pueden ser consecuencia de un mismo evento. El mecanismo que origina el incidente puede interconectar varios peligros que se logran identificar fácilmente mediante el uso de una cartografía compuesta. Adicionalmente, los efectos y el impacto de un solo evento peligroso, puede incluir diferentes tipos de impacto, cada uno con diferente severidad y afectando distintas localidades. De esta manera, podemos apreciar que la cartografía múltiple es un medio excelente para crear conciencia respecto a la mitigación de peligros múltiples. Por lo tanto cabe resaltar que la creación de un SIG, resulta ser una herramienta analítica total para evaluar la vulnerabilidad y el riesgo, especialmente cuando se combina la cartografía de instalaciones críticas.

En la realización del presente trabajo, se tomó como base la Guía Metodológica para la elaboración de Atlas de Peligros Naturales a Nivel Ciudad (Identificación y Zonificación), edición 2004 (SEDESOL y SGM) y la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatal y Municipales de Peligros y Riesgos (CENAPRED, 2006 y 2007). Para cada uno de los tipos de peligros geológicos, se siguió una metodología apropiada y adaptada para el área de estudio según las condiciones del terreno y las necesidades propias de este proyecto.

Para los trabajos en campo se elaboraron fichas, cuyo formato incluye, entre otros datos, clave de verificación según el nivel de información a elaborar, fecha de visita, nombre del lugar visitado, localidad, municipio, estado, clave y nombre de la carta topográfica y/o geológica utilizada, coordenadas con proyección cartográfica Universal Transverse Mercator (UTM), un espacio para la descripción de observaciones o características relevantes del sitio, así como un espacio para que se anexe una fotografía del lugar que muestre la problemática encontrada.

Los actividades a desarrollar se dividieron en tres etapas generales consistentes la primera de ellas en trabajos de gabinete, como la adquisición y compilación de información digital, bibliográfica y cartográfica referente a la zona de estudio, así como la búsqueda de antecedentes históricos tanto en dependencias gubernamentales como centros de investigación; la segunda en la verificación en campo que consistió en la ubicación de sitios en peligro y el llenado de fichas técnicas, y la tercera nuevamente de gabinete donde se incluye el análisis de la información recabada en campo, y se ajustan los mapas base a partir de los cuales se llega al resultado de las mapas finales de susceptibilidad y/o amenaza.

Dentro de los tipos de peligros originados por fenómenos naturales que se analizaron en este trabajo a escala regional, se encuentran los Geológicos e Hidrometeorológicos. Considerándose dentro de los primeros: los fenómenos de remoción en masa, hundimientos, sismicidad y vulcanismo. Y dentro de los segundos: erosión costera, inundación por precipitación pluvial, ciclones tropicales en sus diversas etapas (depresión tropical, tormenta tropical, huracanes), marea de tormenta, incendios forestales y sequía. Por otra parte, también se hizo el análisis de los insumos o factores detonantes de peligros, tales como: fallas y fracturas, análisis de variables meteorológicas y adicionalmente erosión.

En el análisis de Peligros Geológicos se tomaron en cuenta litología y estructura geológica de la roca. El grado de fracturamiento juega un papel importante ya que puede favorecer la susceptibilidad a algunos procesos geológicos que representen una amenaza a la población, como es el caso de los hundimientos asociados a karsticidad.

Con lo que respecta al tema de Peligro por Remoción de Masa (PRM). La zona de estudio se encuentra en la zona denominada sierrita de Ticul, que tiene elevaciones de hasta 210 msnm, con pequeños valles, así también sobre trazas y zonas de influencia de fallas y fracturas geológicas, lo que resulta que la infraestructura pudiera estar expuesta a remoción en masa, sin embargo en el Estado este tipo de peligro es de categoría de Muy Bajo a Bajo, lo cual indica que las afectaciones son mínimas comparadas con otras regiones del País.

Para el caso de Hundimientos, en general todo el Estado tiene las condiciones para la presencia de hundimientos del terreno, pues el medio geológico del territorio en interacción con otras variables, puede generar las condiciones necesarias para que exista disolución de las rocas y por consiguiente el colapso en zonas de por sí ya con evidencias de subsidencia del terreno, y sin ellas, es decir nuevos colapsos.

De acuerdo a datos históricos, los colapsos y su relación con aumentos bruscos de los niveles freáticos establecen además zonas con gran susceptibilidad a hundimientos en el centro, este y sureste del Estado. Lo anterior es un tema que requiere de estudios de mayor detalle que necesariamente tienen que realizarse en zonas donde existe desarrollo urbano.

Referente a los temas de Sismicidad y Vulcanismo, aunque este tipo de fenómenos no es muy común en el estado de Yucatán, se hizo su análisis correspondiente con la finalidad de tener la

información necesaria que evite confusiones por la presencia de sucesos que pudiesen relacionarse a este tipo de fenómenos.

En el caso particular del análisis de Sismicidad, se tienen que dentro del Estado no existe el registro de sismos, pero si en zonas geográficas próximas al mismo, tal es el caso de los estados colindantes Campeche y Quintana Roo, donde se han registrado eventos de magnitudes bajas. Cabe señalar, que la Sismicidad en Yucatán puede estar asociada a colapsos de cavidades cársticas, que como es bien sabido abundan el Estado, o bien, se pueden llegar a sentir sismos de magnitudes mayores que ocurren en el Golfo de México y/o en la franja del límite entre las placas Norteamericana y del Caribe.

Para el caso del análisis por Vulcanismo, geológicamente el territorio Yucateco, corresponde a una plataforma calcárea desarrollada desde el Triásico-Cretácico hasta nuestros días ausente de vulcanismo. Sin embargo existe actividad ígnea en el estado vecino de Chiapas donde se encuentra el Volcán Chichón asociado al Arco Volcánico Chiapaneco el cual es un edificio volcánico localizado aproximadamente a 438 km de distancia. Tomando en cuenta las consideraciones básicas que señalan que el área de influencia de los depósitos volcánicos se centra en un área dentro de 100 km de radio respecto del volcán, en este sentido se puede determinar que el estado de Yucatán queda fuera de la zona de influencia respecto del Volcán El Chichón, por tanto se establece que no existe peligro por caída de cenizas en el Estado.

Por otra parte, con lo que corresponde al análisis de Peligros Hidrometeorológicos, se incluyó la compilación de datos meteorológicos, y su tratamiento estadístico, con el objeto de conocer la influencia que estos pueden tener sobre los diversos fenómenos que inciden en el Estado.

Para el desarrollo de este apartado se recopilaron los datos de estaciones meteorológicas con varias dependencias: CLICOM (Sistema de Clima Computarizado) del Servicio Meteorológico Nacional, CONAGUA (Estaciones Meteorológicas Automatizadas E.M.A.) y CICY (Centro de Investigaciones Científicas del Estado de Yucatán, proporcionadas por el Dr. Roger Orellana). Las principales variables analizadas en este apartado fueron: Temperatura Máxima, Temperatura Media, Temperatura Mínima, Precipitación, Días con Tormenta de lluvia y Días con Granizo.

También se realizó un análisis de la acción de los vientos, su intensidad, duración y periodicidad, lo cual permite tener un conocimiento e identificación de los elementos adversos asociados a la naturaleza y origen de este factor meteorológico, su representación cartográfica y valoración sistémica orientado hacia la prevención. En este sentido, se generaron una serie de mapas vectoriales de flujo de viento, que señala la dirección y magnitud del aire, durante la temporada de Nortes (enero a abril y de noviembre a diciembre) y de Ciclones (mayo a octubre).

Con lo que se refiere al tema de Erosión se elaboró el mapa de susceptibilidad por erosión hídrica en el Estado, con la metodología del Servicio Geológico Mexicano en el marco de elaboración del Atlas, utilizándose mapas base y temáticos, asociados a factores que pueden condicionar o acelerar los procesos erosivos y tomando en cuenta las alteraciones antrópicas y las condiciones "naturales" del territorio Estatal. Los resultados obtenidos mediante el cruce de información de los mapas de los factores utilizados, muestran tasas de erosión en grado alto, principalmente en el sur, suroeste y parte noreste del Estado. De lo anterior se obtuvo que el 63% de la superficie, presentan susceptibilidad por erosión hídrica en grado medio con tendencia a alto, el 15% del territorio está clasificado como grado alto a severo y el 22% restante presenta erosión en grado bajo.

En cuanto al nivel de Erosión Costera se determinó la susceptibilidad de la línea de costa a sufrir erosión mediante el análisis de los principales factores que hace que se genere y/o se acelere este proceso, los elementos que se evaluaron son: degradación de la vegetación en la duna costera, ancho de la playa, pendiente de la playa, antropización de la duna costera y el tipo de litoral. La combinación de dichos factores ambientales, generan zonas de susceptibilidad por erosión costera en los 342 Km que tiene el litoral yucateco de la siguiente manera: 124 Km lineales presentan susceptibilidad baja, 104 Km susceptibilidad media, 77 Km susceptibilidad alta y por último, en la parte centro y poniente con 37 Km susceptibilidad muy alta.

Referentes a las Inundaciones, en este trabajo se adaptó una metodología específica que se adecuó a la información disponible y en relación a las particularidades de la entidad, ya que a pesar de que el Estado tiene características físicas particulares como: suelo cárstico (muy permeable) y topografía plana con ausencia de ríos, que son factores atribuibles a zonas sin problemas de inundación; el Estado ha sido afectado por inundaciones provocadas por ciclones tropicales como el caso de Hilda, Janet, Beulah, Gilbert e Isidore, entre otros.

Se clasificó al territorio en tres zonas según la distribución de los diferentes tipos de inundaciones que se presentan en la Entidad, dichas clasificaciones corresponden a la “Zona Costera” que comprende áreas afectadas por inundaciones costeras y donde se identifica que los principales tipos de inundación son a causa de la marea de tormenta y por fenómenos hidrometeorológicos extremos (lluvias extremas); “Zona Plana” en donde debido a las condiciones planas del terreno y a que no hay corrientes superficiales de agua, sólo se aborda inundaciones pluviales que se dividen en inundación por acumulación en zonas bajas y encharcamientos asociados a zonas urbanas; y “Sierra de Ticul” que muestra una variedad en la configuración del relieve, donde las principales causas de inundación en la zona están dadas por la saturación de las capas de baja permeabilidad, la presencia de crecientes por lagunas y aguadas y la interrupción del paso del agua por la presencia de infraestructura.

Para el caso de los Ciclones Tropicales, que son el fenómeno más recurrente que afecta al Estado, y donde entre algunas experiencias recientes de fenómenos hidrometeorológicos destacan los impactos de los huracanes Isidoro, Emily, Wilma y Dean, con vientos extremadamente fuertes y lluvias torrenciales que produjeron inundaciones, corrimientos de tierra y marejadas ciclónicas en áreas costeras que fueron dañadas de forma significativa. El análisis estadístico se basó principalmente, en la información histórica, obteniéndose mapas de salida que ejemplifican la frecuencia e incidencia exclusiva de los ciclones para el estado de Yucatán.

De acuerdo al análisis estadístico realizado se determinó que en el área acotada se han presentado 107 eventos en 158 años, partiendo del año 1852 al 2010. De tales eventos en dicho intervalo de tiempo, los de mayor recurrencia han sido las tormentas tropicales con 47 sucesos, depresiones tropicales con 20, huracán categoría 2 con 18, huracán categoría 1 con 12 y huracanes con categoría 3, 4 y 5 con 2, 5 y 3 sucesos respectivamente.

De acuerdo a la estadística realizada y con base en la información recopilada, se determinó que en el mes de septiembre se han presentado en 40 ocasiones estos eventos, 26 ocasiones en el mes de agosto y en 17 en el mes de octubre, el resto se ha distribuido en los meses de junio, julio y noviembre, inclusive en los meses de febrero, mayo y diciembre se ha presentado al menos un evento.

Por otro lado se realizaron los períodos de retorno para cuatro municipios: Mérida, Tizimín, Valladolid y Oxkutzcab, utilizando para ello los mapas de probabilidad de ocurrencia de los eventos ciclónicos en México. En general, para las áreas urbanas localizadas en la zona occidente (Mérida y Oxkutzcab) se obtuvieron periodos de retorno para depresión tropical igual a 4.8 años, tormenta tropical entre 7.8 y 8.2 años, huracán categoría 1 una variación de 20.6 a 28.3 años, huracán categoría 2 osciló entre 33.3 y 44.9 años, huracán categoría 3 la variación fue entre 77.5 y 134.6 años, para la categoría 4 la variabilidad resultó entre 132.2 y 155 años, y finalmente para huracanes categoría 5 no se obtuvieron resultados debido a que no se tienen registros en los mapas de probabilidad de ocurrencia para esa categoría.

En las áreas urbanas ubicadas en la porción oriente del Estado (Tizimín y Valladolid) los resultados de los periodos de retorno para ciclones tropicales son prácticamente iguales para todas las categorías (Depresión tropical 4.4, tormenta tropical 6.5, huracán categoría uno 12.8, categoría dos 15.8-16.2, categoría tres 45.5 y categoría cinco 155) excepto en la categoría de huracán 4 en donde los resultados fueron de 90.7 en Tizimín y 68.9 en Valladolid. Con lo que respecta a periodos de retorno de huracán categoría 4, tanto en las regiones del occidente (Mérida y Oxkutzcab) como en las del oriente (Tizimín y Valladolid) la variación difiere prácticamente en 20 años, mientras que los

periodos de retorno de los huracanes categoría 5, sólo se presentan en la región oriente (Tizimín y Valladolid), esto debido a que el mapa de probabilidad indica eventos de esa categoría solamente en esa zona.

Para el tema de tormenta, de acuerdo a la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, fenómenos hidrometeorológicos de la serie Atlas Nacional de Riesgos, editada por CENAPRED en el 2006 se creó un método de trabajo general, dentro partir del cual se elaboró el mapa de peligro por marea de tormenta.

De acuerdo al análisis realizado para este nivel de información, las áreas urbanas que posiblemente se encuentran afectadas por el fenómeno de marea de tormenta son: Río Lagartos, Dzilam de Bravo, Telchac Puerto, Progreso, Chicxulub, Chelem, Chuburná, Celestún y San Felipe, adicionalmente se tiene registradas 48 sitios entre localidades y rancherías que están dentro de zonificación señalada con algún tipo de peligro, sin embargo, sólo 24 se localizan en el área marcada entre la línea de costa y 3 kilómetros tierra adentro (Ángel, Casita de Piedra, Celeste Vida, Chabihau, Chichitos, El Cuyo, El Faro, El Porvenir, El Salvador, El Sauce, Ha Uay, La Mano Poderosa, La Victoria, Las Coloradas, Las Gaviotas, Los Canadienses, Ongay, Perlita Tampico, Playa Gaviota, Pueblo Nuevo, Ralph Broom, Rancho Alegre, San Ángel, San Antonio, San Antonio Xux, San Benito, San Bruno, San Carlos, San Crisanto, San Esteban, San Francisco, San Isidro, San José, San José Uno, San Lorenzo, San Luis, San Pablo, Santa Ana, Santa Clara, Santa Elena, Santa Rita, Santa Rosa y Sisal.

Con lo que respecta al tema de Sequía, tomando como referencia, los trabajos de los doctores Roger Orellana Lanza y Celene Espadas Manrique del CICY, que abordan el tema para el estado de Yucatán con una representación cartográfica definida, se elaboraron mapas representativos, utilizando bases de datos de la Comisión Nacional del Agua, de estaciones meteorológicas correspondientes a los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo.

A partir del análisis realizado, se pudo observar que los tres sistemas que se ven comprometidos a causa del fenómeno de sequía son en definitiva; el social, el económico y el ambiental. Vale ejemplificar, que entre los años 1997 y 1998 se tiene registrada una sequía que afectó a todo el país con pérdidas de 204 millones de dólares en el renglón agrícola, dejando un saldo de pérdidas por 5000 hectáreas de pastizales y maíz en el estado de Yucatán CENAPRED, (2007). A manera de conclusión se puede decir que prácticamente todo el territorio yucateco ha estado bajo los efectos de la sequía intraestival, las zonas con donde ha impactado con mayor intensidad son las porciones norte y sur, los valores están dados en porcentaje en relación al total de lluvia en verano y no se descarta una influencia del calentamiento global al frágil sistema meteorológico. Resumiendo, en el estado de Yucatán ha habido alrededor de 15 sequías entre los años de 1980 al 2012.

Finalmente, en lo concerniente al tema de Incendios Forestales, se realizó un análisis estadístico con los datos de CONAFOR de los años de 1991-2013, para obtener las superficies afectadas y el número de incendios por año. Se obtuvo el mapa de tipo de combustibles a partir del mapa de uso de suelo y vegetación. Con los datos de CONABIO 2012, se generaron los mapas de reincidencia por puntos de calor y frecuencia de puntos de calor, y con los datos obtenidos en campo se realizó el mapa de espesor de la capa superficial de suelo. Mediante el proceso de análisis jerárquico otorgándole un peso a cada variable se obtuvo el mapa de susceptibilidad por incendios forestales, pudiéndose así identificar las zonas más susceptibles a este tipo de fenómeno y teniendo como resultado que los municipios con mayor susceptibilidad son: Maní con 8170 ha, Abalá con 1713 ha, Dzán con 3404 ha, Oxkutzcab con 34476 ha. y Tizimín con 141,659 ha.

Los incendios forestales en el estado de Yucatán representan uno de los peligros de mayor impacto, anualmente se destruyen desde pequeñas comunidades vegetales hasta amplios ecosistemas de los años 1991-abril 2013, se registraron 902, afectando 78,229 ha; Así mismo los incendios registrados en el periodo de diciembre de 2012 a abril de 2013, afectaron 5279.43 ha. Los municipios más impactados en el presente año son: Chemax 225.68 ha, Motul 444.78 ha, Tekax 479.27 y Tizimín 710.50 ha.

II. INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo, nuestro país al igual que otros países del mundo, debido a su geomorfología y situación geográfica a estado expuesto a cambios en la naturaleza, que cuando superan sus límites de normalidad se convierten en fenómenos naturales extremos, capaces de generar una serie de desastres que causan importantes daños a la naturaleza, infraestructura y vivienda, provocando a su vez una serie de pérdidas económicas y humanas en una comunidad o población.

Los desastres se clasifican dependiendo del agente perturbador que lo origine:

- Fenómenos geológicos: son en los que intervienen la dinámica y los materiales del interior de la Tierra o de su superficie. Entre ellos están los sismos, el vulcanismo, los tsunamis o maremotos y los movimientos de laderas y suelos.
- Hidrometeorológicos: como son los ciclones, las inundaciones, granizadas, lluvia, nevadas, sequías.

Cabe remarcar, que no hay desastres naturales, lo que existe son fenómenos naturales que causan desastres por la acción del hombre en su entorno, es decir: un derrumbe en la sierra no es un desastre, a menos que pase por allí una carretera, o un huracán en medio del mar, solo provocaría un desastres si en su paso se encontrara un barco.

Equivocadamente se tiene la percepción de que los desastres se deben exclusivamente a los fenómenos naturales, cuando en realidad se debe tener en cuenta que algunos de ellos, pueden ser causados por las actividades humanas que alteran la normalidad del medio ambiente. Por otra parte, los efectos de un desastre también pueden amplificarse, debido a la mala planificación humana, a la falta de planes de emergencia y medidas de seguridad. El principal problema cuando ocurre un desastre, es que no estamos preparados para enfrentarlos, antes, durante y después del evento.

De acuerdo a lo anterior y dado el impacto negativo que los fenómenos naturales pueden causar en la sociedad, las instituciones de gobierno, universidades e iniciativa privada, han enfocado parte de sus actividades a estudiar aspectos técnicos que lleven a establecer medidas de prevención y mitigación ante el efecto de desastres, ya sea naturales o de orígenes antrópicos, con la finalidad de anticiparse al efecto de los fenómenos y generar una respuesta eficaz que permita disminuir considerablemente pérdidas humanas y materiales.

El riesgo de desastres, entendido como la probabilidad de pérdida, depende de dos factores fundamentales que son el peligro y la vulnerabilidad. Comprender y cuantificar los peligros, evaluar la vulnerabilidad y con ello establecer los niveles de riesgo, es sin duda el paso decisivo para establecer procedimientos y medidas eficaces de mitigación para reducir sus efectos. Por ello, es necesario y prioritario desarrollar herramientas y procedimientos para diagnosticar los niveles de peligro y de riesgo que tiene nuestro país a través de sistemas organizados de información que conforman los Atlas de Peligros y Riesgos estatales y municipales.

Los Atlas de peligros y/o Riesgos tienen como principal finalidad dar a conocer a la población los distintos peligros naturales a que puede estar expuesta, sin embargo para comprender mejor la importancia de la elaboración y utilidad de dichos Atlas, es necesario entender que son y para qué pueden servir, para ello empecemos por definirlos de la siguiente manera:

Por analogía con un atlas geográfico, un Atlas de Peligros y/o Riesgos, pudiera entenderse como un conjunto de mapas o cartas encuadradas en un voluminoso libro que muestra de una manera gráfica información de peligro o amenaza para una cierta área o región. Sin embargo, el peligro y riesgo son variables muy complejas y continuamente cambiantes en el tiempo que están en función de la variabilidad de las amenazas que nos circundan y de la condición también dinámica de la vulnerabilidad y grado de exposición. Por lo tanto, para la mayoría de los fenómenos, no es posible representar al riesgo mediante una simple gráfica o mapa, éste debe ser estimado de acuerdo con las

circunstancias y condiciones específicas del lugar o área de interés. Por lo anterior, conceptualmente un Atlas de Peligros y/o Riesgos, ha evolucionado de un conjunto estático de mapas, a un “sistema integral de información sobre riesgos de desastres, empleando para ello bases de datos, sistemas de información geográfica, cartografía digital, modelos matemáticos y herramientas para visualización, búsqueda y simulación de escenarios de pérdidas” (CENAPRED 2006)

En este sentido, el presente Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales” pretende ser una herramienta para orientar y ayudar a evaluar los peligros y riesgos a los que está expuesta la población Yucateca.

Dentro de los tipos de peligros originados por fenómenos naturales que se analizaron en este trabajo a escala regional, se encuentran los Geológicos e Hidrometeorológicos. Los primeros consideran: los fenómenos de remoción en masa, hundimientos, vulcanismo y sismicidad; mientras que los segundos: ciclones tropicales en sus diversas etapas (depresión tropical, tormenta tropical, huracanes), inundación por encharcamiento y por acumulación en zonas bajas, así como por marea de tormenta, incendios forestales, erosión costera y sequía. Por otra parte, también se hizo el análisis de los insumos o factores detonantes de peligros, tales como: fallas y fracturas, análisis de variables meteorológicas y adicionalmente erosión.

El estado de Yucatán, derivado de su ubicación geográfica, está expuesto a la recurrencia de ciclones tropicales los cuales traen consigo fuertes precipitaciones que ocasionan afectaciones a la población, tales como inundaciones (acumulación y encharcamiento), así como afectación a la línea costera por los efectos de marea de tormenta y erosión. Un efecto posterior del paso de un meteoro es la acumulación de gran contenido de materia orgánica la cual funciona como combustible generándose incendios forestales que afectan principalmente campos agrícolas. Otra característica particular del Estado es su composición litológica constituida por calizas, lo que hace a la región muy vulnerable a procesos cársticos, esto se refleja en la gran cantidad de dolinas (cenotes, rejolladas y aguadas) y cavernas existentes no sólo en Yucatán sino en toda la Península, que aunque hasta el momento no han reportado afectaciones por hundimientos, es importante tener ubicadas este tipo de estructuras.

En el presente trabajo, se muestra un análisis general de los principales fenómenos naturales que inciden en el estado de Yucatán y sus repercusiones, tomando en consideración los aspectos relacionados con los conceptos y definiciones básicas sobre riesgo, los aspectos relacionados con la geografía y la cartografía del territorio, así como los aspectos generales geográficos y tecnológicos. Para el desarrollo de dicho análisis y la obtención de resultados, se hizo uso de las diferentes tecnologías, como son los sistemas de posicionamiento global, la percepción remota y los sistemas de información geográfica que se han posicionado como tecnologías indispensable en la elaboración de estudios territoriales y en el análisis de los peligros, ya que facilitan la automatización en la generación de escenarios de peligro y riesgo, permitiendo reducir costos, agilizar tiempos de desarrollo y obtener productos que puedan ser utilizados en otros ámbitos mediante la sobreposición de capas de diferentes tipos de información

Finalmente, mediante la elaboración del Sistema de Información Geográfica (SIG), toda la información, estará disponible en una base de datos con información cartográfica digital, y a partir del cual, las autoridades de Protección Civil podrán incluir nueva información de campo y gabinete que permitan su constante actualización, convirtiéndose así, en una herramienta que proporcione la información necesaria para ayudar a emprender las acciones correspondientes a fin de salvaguardar a los habitantes, bienes y servicios de cualquier centro de población, mediante la elaboración de planes de contingencia ante la incidencia de algún fenómeno perturbador inevitable pero prevenible, ante el cual gracias al manejo óptimo del Atlas puede aminorarse el impacto que éste pueda causar en la población, infraestructura y entorno ambiental.

III. OBJETIVOS, METAS Y ALCANCES

III.1. General

Generar un Atlas Estatal de Peligros que permita establecer medidas de prevención, reducción y mitigación de riesgos por Fenómenos Naturales, así como la generación de un esquema normativo para la toma de decisiones responsables en la planeación y desarrollo de los asentamientos humanos. Todo mediante la compilación, integración y generación de conocimiento geológico - ambiental, meteorológico y topográfico de la entidad, en una base de datos apoyada con información cartográfica digital previamente validada en campo, la cual estará disponible para su consulta y actualización en un sistema de información geográfica (SIG).

III.2. Específicos

- Identificar los peligros por fenómenos naturales (geológicos e hidrometeorológicos), llegando a zonificación, por posible afectación hacia el ser humano y su infraestructura, estableciendo información para facilitar acciones en la atención de contingencias, su prevención y mitigación.
- Crear un Sistema de Información Geográfica (SIG) confiable, de fácil manejo, el cual permita su actualización permanente, para servir a las autoridades en materia de Protección Civil, como base para la toma de decisiones para evitar al máximo las pérdidas económicas y sobre todo la de vidas humanas.
- Promover la participación de los diversos sectores de la sociedad, que estén involucradas en la respuesta a contingencias.

III.3. Metas

Preparar un atlas en formato electrónico del estado de Yucatán, con una base de datos asociada, de fácil manejo y actualización e integrada en un Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual incluya información geográfica y de zonificación de peligros por fenómenos geológicos e hidrometeorológicos, del que se apoyen las unidades estatal y municipal de protección civil para establecer medidas de reducción de riesgos para la población.

III.4. Alcances

Actualizar el conocimiento sobre los diferentes peligros y riesgos a los que se encuentra expuesta la ciudadanía a fin de que se tenga conciencia plena de éstos; caracterizando así el territorio Estatal con los niveles de información concernientes a los diversos peligros a través de mapas que faciliten su identificación y, con ello, se programen acciones de prevención y mitigación de riesgos.

IV. METODO GENERAL DE TRABAJO

Para el desarrollo del Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales del Estado de Yucatán, se emplearon las metodologías oficiales vigentes tales como, la “Guía Metodológica para la elaboración de Atlas de Peligros Naturales a Nivel Ciudad (Identificación y Zonificación)” edición 2004, la “Guía para la identificación rápida de peligros naturales” mismas que fueron desarrolladas, tanto por la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) y el Consejo de Recursos Minerales (COREMI), actualmente Servicio Geológico Mexicano (SGM), y la “Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos” desarrolladas por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2006 y 2007) en los niveles de Conceptos Básicos sobre Peligros y Riesgos y su representación gráfica (Versión 2004) y Evaluación de la Vulnerabilidad Física y Social, Fenómenos Geológicos y Fenómenos Hidrometeorológicos.

Por otra parte también se llevó a cabo la recopilación, depuración, análisis e integración de la información proporcionada por las dependencias gubernamentales como: SEMARNAT, SEDUMA, INEGI, CONAGUA, CONAFOR, Desarrollo Urbano de Mérida, así como los centros de investigación: Universidad Autónoma de Yucatán (UADY), Instituto de Ingeniería UNAM (II) Campus Sisal, Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) Yucatán, Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV) unidad Mérida, donde además se dieron asesorías sobre diversos temas relacionados con los fenómenos naturales que prevalecen en el Estado. Posteriormente, toda esta información junto con la que cuenta el Servicio Geológico Mexicano fue incorporada a un Sistema de Información Geográfica (SIG) en plataforma ArcGIS 10.1, para su mejor despliegue y fácil manejo para la elaboración de mapas, consulta y corrección o actualización de datos.

En el presente apartado se hace una breve descripción de la metodología empleada para cada uno de los temas involucrados en este proyecto, de tal forma que el lector se vaya dando una idea general de cómo se elaboró el Atlas y a la vez se vaya familiarizando con cada uno de los niveles de información. Posteriormente, en cada uno de los capítulos asignados a cada tema, se hará la descripción más detallada del método de trabajo utilizado para cada uno.

IV.1. Análisis de Peligro

Para cada uno de los tipos de peligros analizados, se aplicó el método de trabajo señalado por las instituciones arriba mencionadas realizando adecuaciones de acuerdo al área de estudio, condiciones del terreno, así como las necesidades del proyecto.

Dentro de los tipos de peligros originados por fenómenos naturales que se analizaron en este trabajo a escala regional, se encuentran los Geológicos e Hidrometeorológicos. Considerándose dentro de los primeros: los fenómenos de remoción en masa, hundimientos, vulcanismo y sismicidad. Y dentro de los segundos: ciclones tropicales en sus diversas etapas (depresión tropical, tormenta tropical, huracanes), inundación por encharcamiento y por acumulación en zonas bajas, así como por marea de tormenta, incendios forestales, erosión costera y sequía. Por otra parte, también se hizo el análisis de los insumos o factores detonantes de peligros, tales como: fallas y fracturas, análisis de variables meteorológicas, análisis de vientos y adicionalmente erosión.

Con la finalidad de facilitar la realización del presente Atlas, se dividieron las tareas en tres etapas generales: la primera consistió en trabajos de gabinete, la segunda verificación en campo y la tercera nuevamente de gabinete donde se incluye el análisis de la información recabada en campo. Es relevante mencionar que, para algunos de los temas aquí abordados no se realizó verificación de campo, sólo se realizó una compilación de información y una interpretación por medio del uso del SIG y software especializados. En primera instancia, para tener un mejor control y organización de las actividades a realizar, se llevó a cabo un método general de trabajo, el cual aplica para todos los fenómenos verificados, con ciertas modificaciones, complementos y/o ajustes, dependiendo de las necesidades del tema (Figura 1), y considerando también que algunos niveles de información que formarán parte de los insumos para el desarrollo de otros.

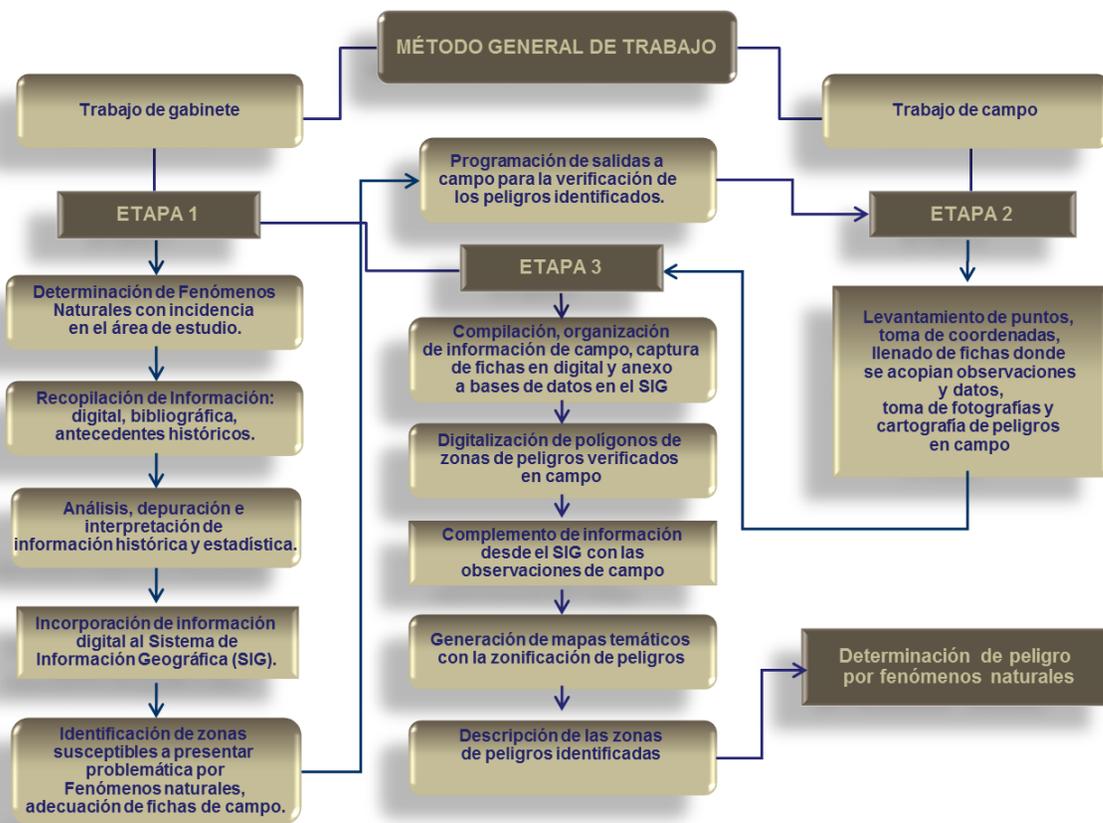


Figura 1. Método de trabajo generalizado para el desarrollo del presente Atlas.

Trabajo en gabinete – Etapa 1. En primera instancia se lleva a cabo la adquisición y compilación de información digital, bibliográfica y cartográfica referente a la zona de estudio, búsqueda de antecedentes históricos en relación al desarrollo del presente Atlas y una elección de escalas de trabajo. Por medio de interpretación de la cartografía básica (imágenes de satélite Landsat, Spot, Quick Bird, ortofotos, fotografías aéreas, cartas topográficas, cartas geológicas, modelo digital de elevación, rasgos hidrográficos, mapas temáticos de uso de suelo, límites estatal y municipales, poblaciones y localidades, zonas urbanas, climatología, mosaico de imágenes google, etc.), entre otras herramientas, se hizo la extracción de información relativa a la expresión regional de los peligros causados por fenómenos naturales y en la definición de las zonas de peligro en áreas urbanas o por urbanizar. Así como un análisis de los datos climatológicos con los que se cuenta.

A partir de la información del Servicio Geológico Mexicano y las asesorías e información proporcionada por algunas dependencias gubernamentales y de investigación, se obtuvo un panorama general del área de estudio, donde, de modo preliminar se pudieron identificar las zonas susceptibles a presentar alguna problemática con el fin de programar la prospección de campo para la verificación y obtención de datos. En la Etapa 2 (trabajo de Gabinete) se explicará de manera resumida lo que se realiza en común para los diversos análisis.

Durante esta Etapa y para los trabajos en campo de acuerdo a las necesidades para adquirir y generar información de cada tema, se elaboraron fichas técnicas, cuyo formato incluye, entre otros datos: clave de verificación según el tema, fecha de inspección, nombre del lugar visitado, ciudad, en ocasiones el nombre de la calle, localidad, municipio, estado, clave y nombre de la carta topográfica y/o geológica utilizada, además de, coordenadas con proyección cartográfica Universal Transverse Mercator (UTM), los campos anteriores aparecen en todas las fichas de campo y dependiendo del tipo de peligro, campos especiales de llenado, un espacio para la descripción de observaciones o características relevantes del sitio, así como un espacio para que se anexe una fotografía representativa del sitio que muestre la problemática encontrada (sólo para el formato digital). Es

importante mencionar que para el tema de erosión fueron desarrolladas dos fichas de campo, una para los datos pertinentes al tema y una más para el muestreo de suelos (que sirve de insumos para algunos temas desarrollados dentro del Atlas).

Uno de los campos a ser llenados es la clave del punto de verificación, el cual está compuesto por siglas alfanuméricas, donde cada una tiene el siguiente significado: La primera letra identifica la inicial del Estado en donde se realizó el levantamiento, la primera letra es Y de Yucatán, en algunas, la segunda letra corresponde a B de Brigada y el carácter numérico correspondiente a la brigada; la sigla o las abreviaturas siguientes significan el fenómeno natural (I - Inundación, PRM – Proceso de Remoción en masa (Caída de Bloques), H – Hundimientos, E – Erosión, EC - Erosión Costera e IF - Incendios Forestales. Las cifras consecutivas corresponden al número del punto de control (Tabla 1).

Tabla 1. Claves cartográficas utilizadas por tipo de peligro.

CLAVE	TIPO DE PELIGRO
YB1I001	Inundación
YPRM001	Procesos de Remoción en masa (Caída de Bloques)
YB1H001	Hundimientos
YE001	Erosión
YEB1001	Muestreo de Suelos (Erosión)
YEC001	Erosión Costera
YIF001	Incendios Forestales

La captura de la ficha de campo en digital permite que, para el levantamiento regional se anexen, ya sea dos fotografías del sitio que representen la problemática cartografiada o que incluya una fotografía del sitio censado, un ejemplo se muestra en la Figura 2. En algunos de los peligros, para el llenado de las fichas se utilizaron tablas de referencia con los parámetros que deben incluir cada una de ellas, con la finalidad de homogeneizar el llenado de las mismas. Como ejemplo en las tablas 2 a 8 se muestran algunos de los parámetros utilizados, el resto posteriormente podrán observarse con mayor detalle en la descripción de cada tema.

Trabajo de Campo – Etapa 2. Desde gabinete se programaron los puntos de verificación para la prospección de campo y poder llegar al lugar previsto. Se prepara el equipo de campo necesario, brújula, mapamóvil, el equipo de muestreo de suelos, cámara y lo necesario para cada tema. Previamente se carga el mapamóvil con las fichas de campo diversas para cada tema, junto con *shapes* necesarios para el llenado de las fichas (tipo de vegetación, roca, entre otros. En dado caso de no ser posible el acceso al sitio de verificación, por cualquier problema, se replantearon nuevos puntos cercanos y/o con las mismas características de los que originalmente se tenían.

Ubicados en el punto a verificar, se realiza una inspección visual del terreno, identificando el o los sitios que presenten un posible peligro, se hacen una serie de observaciones propias del tema y se toman los datos que se plasman en la ficha de campo correspondiente, para el caso de Erosión se toma las muestras de suelo para su posterior análisis y se identifica el tipo de erosión considerando los niveles de información edafología, precipitación, geología, clima y pendiente; considerando la fisiografía de la región, factores antrópicos, condiciones del terreno, entre otros. Finalmente, se procedió a tomar coordenadas y fotografías del lugar buscando que éstas reflejen el fenómeno observado. Para inundación, se buscó la manera de zonificar las zonas afectadas y hacer anotaciones de los comentarios que las personas que han resultado afectadas nos proporcionen, cuidando ciertos criterios para tomar como válidas éstas. Dentro de cada tema se describen a mayor detalle el procedimiento a realizar en esta etapa.

Trabajo de gabinete- Etapa 3. En algunos temas no se realizó prospección de campo y únicamente se llevó a cabo, la interpretación estadística y bibliográfica. Varios apartados desarrollados de esta manera sirven de insumo para complementar otros capítulos, ya sean de peligros por fenómenos geológicos y/o hidrometeorológicos.

En este apartado sólo se menciona someramente la manera de abordar los temas, para tener una visión más clara de cada nivel de información, en cada uno de ellos se describe con mayor detalle el método de trabajo específico que se llevó a cabo.

ATLAS DE PELIGROS POR FENOMENOS NATURALES DEL ESTADO DE YUCATÁN	
HUNDIMIENTOS POR KÁRSTICIDAD	
UBICACIÓN	
LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	
PUNTO DE CONTROL	YHB2006
FECHA	13/04/2012
ESTADO	YUCATAN
MUNICIPIO	MAXCANU
LOCALIDAD	HACIENDA GRANADA
COLONIA	CENTRO
CALLE	CARRETERA A SANTO DOMINGO
CARTA TOPOGRÁFICA	CHUNCHUCMIL YUCATAN, CAMPECHE
CLAVE CARTA	F15-D69
COORDENADAS UTM WGS84	
LATITUD X	182333
LONGITUD Y	2278370
ELEVACIÓN Z	17
CARACTERÍSTICAS	
RELIEVE DEL TERRENO	LIGERAMENTE ONDULADO 4"-7"
TIPO DE ROCA	BRECHA CALCAREA
CONDICIONES DE LA ROCA	LIGERAMENTE FRACTURADA
ESTRUCTURA KÁRSTICA	DOLINA S/N
MORFOLOGÍA DE LAS PAREDES	EN CUENCA
SUPERFICIE DEL HUNDIMIENTO (M2)	S/D
PROFUNDIDAD DE LA CAVIDAD (M)	3
PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO (M)	S/D
AFECTACIÓN A INFRAESTRUCTURA EXPUESTA	
EVIDENCIA DEL HUNDIMIENTO	DEPRESION EN SUPERFICIE
AFECTACION	CANCHA DEPORTIVA Y CAMINO
GRADO DE PELIGRO	MEDIO
DATOS ESTRUCTURALES	
255/78, 214/84	
OBSERVACIONES	
EXISTEN AL MENOS 3 CAVIDADES AL SUR Y ORIENTE DE ESTA ESTRUCTURA SE UBICA CERCA DE CANCHA DEPORTIVA,VIVIENDAS Y CAMINO. SON UTILIZADAS COMO DEPOSITO DE BASURA.	
REALIZO	ADRIANA CORDOVA-AGUSTÍN CAZARES




Figura 2. Ejemplo de ficha técnica, utilizada en campo para la verificación de datos de peligros geológicos.

Tabla 2. Clasificación del tipo de discontinuidades de las rocas. (fallas y fracturas)

DISCONTINUIDADES DE LAS ROCAS	
DISCONTINUIDAD	DEFINICIÓN
Fractura	Separación o abertura en la masa rocosa, rompimiento.
Junta	Fractura a lo largo de la cual no ha ocurrido desplazamiento.
Falla	Fractura a lo largo de la cual ocurre un desplazamiento debido a la actividad tectónica.
Planos de deslizamiento	Superficie de falla preexistente; a partir de fallamiento, derrumbes.
Planos de foliación	Las superficies de foliación continua son causadas por la orientación de los minerales durante el metamorfismo.
Cizallamiento o rompimiento de la foliación	Zona de cizalla o ruptura causada por plegamiento o relieves fallados o desplazados.
Clivaje, crucero o exfoliación	Fracturas formadas por plegamiento.
Milonita	Contactos entre rocas sedimentarias.
Cavidades	Zona intensamente resquebrajada.

Fuente: Chávez Aguirre, J.M. 2006

Tabla 3. Clasificación de dureza y resistencia a la compresión de las rocas.

CLASIFICACIÓN DE DUREZA PARA LAS ROCAS INTACTAS			
CLASE	DUREZA	PRUEBA DE CAMPO	RESISTENCIA COMPRESIÓN (Kg/cm ²)
I	Extremadamente Dura	Se requieren varios golpes con un martillo de geólogo para romper una roca fresca o intacta.	Mayor a 2000
II	Muy Dura	Se obtiene una muestra con más de un golpe del martillo.	2000 - 700 700 - 250
III	Moderada	No se raya o desgaja con la navaja. Se obtiene una muestra con un ligero golpe del martillo.	250 - 100
IV	Suave	Puede rayarse o desgajarse con la navaja. Se hacen muescas de 3 mm de profundidad con un ligero golpe de martillo.	100 - 30
V	Muy Suave	Material deleznable con ligeros golpes del martillo, se pueden obtener lascas con una navaja.	30 - 10

Fuente: Chávez Aguirre, J.M. 2006

Tabla 4. Tipos de estructuras kársticas en Yucatán.

ESTRUCTURA KÁRSTICA	DEFINICIÓN
Cenote	Estructura ya sea subterránea o abierta con agua (Aguada)
Dolina	Estructura Kárstica abierta que no contenga agua (Rejollada, Sumidero)
Gruta	Estructura con entrada en superficie pero de extensión horizontal subterránea.

Tabla 5. Morfología de paredes de la estructura kárstica.

EN CUBETA (PAREDES VERTICALES)	EN CUENCA	EN EMBUDO

Tabla 6. Clasificación para el relieve del terreno.

TIPO DE TERRENO	ÁNGULO DEL INCLINACIÓN
Plano	1 a 3°
Ligeramente Ondulado	4 a 7°
Ondulado	8 a 15°
Terreno Inclinado	16 a 30°
Escarpado	31 a 61°
Muy Escarpado	> 61°

Tabla 7. Variables de la caracterización de combustible

ESTRATOS	COMPONENTES	VARIABLES	
		CUALITATIVAS	CUANTITATIVAS
General	La cama de combustible en conjunto	Tipo de vegetación-fisonomía(formas de vida dominante, densidad, tipo, tamaño y fenología de hojas estratificación y continuidad vertical-clase de estructura-asociación florística)	Altura media del estrato dominante
Dosel estrato arbóreo	Árboles vivos	Estado de los árboles muertos en pie-especies dominantes o más comunes	Altura media del dosel(m)-Cobertura del dosel(%)-Altura de los árboles vivos y muertos-Altura de la base a la copa viva
Dosel estrato arbóreo	Árboles muertos en pie	No se raya o desgaja con la navaja. Se obtiene una muestra con un ligero golpe del martillo.	Densidad de árboles vivos y muertos-diámetro de árboles vivos y muertos-
	Combustibles de escalera	Presencia de lianas, musgos, líquenes y plantas epífitas en troncos y ramas de los árboles-cobertura y continuidad horizontal	Amplitud de la copa y densidad específica
Arbustivo	Arbustos(y renuevo de especies arbóreas en el sotobosque)	Estratificación y continuidad vertical - Tipo y fenología de hojas-Hábito de crecimiento-Potencial de inflamabilidad y cobertura y continuidad horizontal	Altura-Cobertura-Proporción de combustible vivo y muerto-Densidad de arbustos-Carga
Herbáceo(vegetación de baja altura)	Pastos hierbas y subarbustos	Tipo de hierbas-Estratificación y continuidad vertical-Tipo y grosos de las hojas-Hábito de crecimiento(anuales y perennes)-Potencial de inflamabilidad-cobertura y continuidad horizontal	Altura-Cobertura-Proporción de combustible vivo y muerto-Densidad de arbustos-Carga-Humedad en combustibles muertos
Material leñoso caído(MLC)	Troncos, leños y ramas-MLC firme-MLC podrido-Tocones	Densidad de MLC en clases de tamaño por tiempo de retardación(1,10,100 y >1000 horas)-Nivel de putrefacción-Apilamientos de residuos	Carga por clase tamaño de putrefacción-Profundidad-Densidad, número de piezas por grado de putrefacción >1000 hr-Largo y ancho de apilamientos
Hojarasca superficial	Hojarasca-Cubierta de líquenes, musgos y plantas rasantes o postradas	Tipo de hojas(acículas, latifolias y otros tipos de material en la hojarasca como restos leñosos, conos, etc)- cobertura y continuidad horizontal-Densidad suelta, compacta o apelmazada)-Profundidad-Acumulación de hojarasca en la base de los árboles	Carga (Mg ha -1) Cobertura (%) Profundidad(cm)
Combustibles de suelo	Capa de fermentación	Densidad suelta, compacta o apelmazada)-Presencia de suelos orgánicos-Tipo de humus-Raíces finas superficiales, raíces en pudrición y troncos podridos enterrados	Carga (Mg ha -1) Profundidad (cm) - Proporción de material leñoso en descomposición (%)

Tabla 8. Tipos de Inundación.

TIPO DE INUNDACIÓN	ORIGEN	PARÁMETRO
Acumulación	Pluvial	Nivel de agua mayor a 35cm
Encharcamiento	Pluvial	Nivel de agua menor a 35cm
Marea de tormenta	Efectos de un ciclón	Cualquier altura de agua por efecto de oleaje

En el apartado de Fallas y Fracturas, la información compilada se realizó con base a interpretación de lineamientos partiendo de rasgos topográficos, geomorfológicos y de geología

estructural, utilizando como herramienta de digitalización el software ArcMap 10. Por otra parte, se obtuvieron la frecuencia o densidad de fracturas por unidad de área (modelo matemático) que posteriormente se aplicaron un modelo geométrico para determinar las áreas de concentración de lineamientos. Como actividad complementaria, se tomaron en cuenta los datos estructurales obtenidos en campo para los temas de remoción en masa y hundimiento, que conjuntándolo con la frecuencia, la longitud total y la intensidad de fracturamiento dan como resultado el grado de fracturamiento. Finalmente se asignaron zonas de influencia de fallas que relacionadas con factores, tales como: pendiente del terreno, precipitación y nivel de erosión, pueden determinar el grado de susceptibilidad del terreno al fenómeno de remoción en masa, donde la población, viviendas y/o vías de comunicación podrían llegar a tener alguna afectación.

En el análisis de ciertos niveles de información se aplicó el método multicriterio, el cual permite orientar la toma de decisiones a partir de varios criterios comunes para evaluar la susceptibilidad de generar algún tipo de peligro por medio de un Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) que permite manejar variables cualitativas y cuantitativas, de manera conjunta. Se compone de varios pasos, siendo los principales: identificación de las variables, ponderación o priorización de las mismas, buscando que se cumpla una consistencia lógica, así como la organización de variables en una Matriz de Comparación Pareada y su respectiva normalización. Posteriormente esto se verifica y una manera de hacerlo es obtener el Índice de Consistencia (IC) y la Proporción o Razón de Consistencia (RC ó PC), que debe ser menor a 0.10 para indicar que es congruente.

A continuación se hace una breve descripción del método de trabajo para cada tema, para ir introduciendo al lector en cada uno. Posteriormente, en los capítulos correspondientes a cada tema desarrollado, se dará una explicación más detallada.

El método de trabajo para los procesos de remoción en masa, consiste en compilar información del área de estudio, se determinan y ponderan los cinco factores que aceleran la inestabilidad de laderas: pendiente, geología, fracturamiento, vegetación y uso de suelo, edafología. Teniendo esta información y utilizando el proceso de Análisis Jerárquico se obtiene el Mapa de Susceptibilidad a los Procesos de Remoción en Masa. La toma de datos en campo para deslizamientos se basa en el formato para estimar el grado de peligrosidad que maneja CENAPRED (2006), en el que se identifican factores: topográficos – geotécnicos (tipo de roca o suelo y aspectos estructurales), geomorfológicos y ambientales (régimen de agua en laderas, tipo de vegetación y el uso de suelo del área estudiada). Para un macizo rocoso se evalúan ciertos parámetros: tipo de roca, grado de intemperismo, resistencia, tamaño de los bloques, espaciamiento, rugosidad, abertura y relleno de discontinuidades, se toman datos estructurales con brújula tipo Brunton para ser después analizados por métodos gráficos (estereogramas).

En el nivel de hundimientos, para el caso particular del estado de Yucatán, entre otros temas, se aborda el de tipo karsticidad (disolución de roca caliza). El método de trabajo consiste básicamente en la recopilación de capas de información que se generan dentro del Atlas para obtener un mapa de Susceptibilidad a Hundimientos, esto se logra con el cruce de cinco niveles de información que son: Geología, Grado de Fracturamiento (Fallas y Fracturas), Densidad de Dolinas, Espesor del Suelo, Hidrogeoquímica y las verificaciones realizadas en campo. Posteriormente, al mapa generado, se le añade la infraestructura vial y las áreas urbanas y aplicando el Proceso de Análisis Jerárquico se obtiene el mapa de Amenaza a Hundimientos.

Para el nivel de sismicidad se cuenta con la Regionalización Sísmica del país que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) realizó, a partir de la cual, de las cuatro zonas posibles, se verifica a que zona corresponde el estado de Yucatán. Por otra parte, de estudio del Servicio Sismológico Nacional, del Catálogo de sismos mayores y la USGS se hace un recuento de los sismos registrados dentro o cerca del área, así como también de los datos no registrados, pero que fueron censados en campo y de los periodos de retorno para aceleraciones del terreno mayores a 0.15 g para el Estado.

Para el caso del nivel de vulcanismo, se aborda el peligro por caída de ceniza donde basándose en la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgo del CENAPRED, se debe realizar un análisis de la actividad volcánica y definir si existen aparatos activos

o no. Una vez descritos los rasgos geológicos – geomorfológicos de la actividad volcánica, se ubicó geográficamente el estado de Yucatán para determinar los posibles peligros derivados de este fenómeno por algún volcán próximo a éste, que, en caso de suscitarse, dependerá de la intensidad de erupción, columna eruptiva, dirección y velocidad de vientos.

Con lo que respecta al tipo de peligros por fenómenos hidrometeorológicos, siendo estos los que mayores afectaciones causan en Yucatán o que influyen para que otros se generen, como por ejemplo los procesos de remoción en masa e incluso los de hundimiento; los trabajos se desarrollaron de la siguiente manera.

En Climatología se realizó el análisis estadístico de estaciones meteorológicas de las variables: Precipitación, Temperaturas máximas, medias y mínimas, días con granizo, días con tormenta; basándose en los métodos que marca la Organización Meteorológica Mundial para cada una de ellas, así como el lapso de años a tomar en cuenta y las estaciones elegir de acuerdo a la cantidad y confiabilidad de la información que contienen, para una buena interpretación de los mismos. La información resultante, así como los mapas generados a partir de los mismos, son utilizados como insumo para el análisis de los diversos temas desarrollados en el presente Atlas.

Para el análisis del fenómeno de Vientos, se realiza una propuesta de Método de trabajo tomando como base la capacidad de procesar toda la información generada por las seis estaciones automáticas del estado de Yucatán y operadas por la Comisión Nacional del Agua para obtener comportamientos anuales del viento, su estadística básica apoyado en la clasificación de la escala de Beaufort y mapas mensuales integrados por estación y periodos de tiempo determinados. La información procesada para la realización de los modelos de comportamiento de los vientos, mejor conocida como rosa de los vientos y su representación cartográfica fue proporcionada por la Comisión Nacional del Agua. Otra consideración que se analiza es la influencia sobre otros fenómenos que ocurren en Yucatán.

En el tema de Erosión se abordan dos métodos, uno con el fin de determinar el tipo y grado de degradación y otro para determinar el grado de erodabilidad, ambos desarrollados y adecuados por el SGM con asesoría de la UADY. La primera se basa en los datos obtenidos de acuerdo a la prospección de los niveles de información: edafología, precipitación, clima, microrelieve, espesor del horizonte O y profundidad del suelo; en función de las condiciones del terreno. El segundo para determinar cuántas toneladas de suelo se pierden por hectárea anualmente de acuerdo a algunas características físicas como: clase textural, porcentaje de materia orgánica, estabilidad de los agregados y porosidad; por medio de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE). Con la conjunción de estos métodos se obtiene la Susceptibilidad a la Erosión y la Susceptibilidad a la erodabilidad de suelos.

Para el desarrollo del apartado de Erosión Costera, se propone una técnica, tomando como base la metodología propuesta por José Ojeda Zújar, (2001), del Departamento de Geografía Física de la Universidad de Sevilla, España; la cual consiste en realizar un análisis de comparación de ortofotos antiguas de la línea de costa con otras más recientes, en un Sistema de Información Geográfica (S.I.G.). Para elaborar el mapa de susceptibilidad se valoraron factores tales como, conservación de la vegetación de duna costera, pendiente, ancho de la playa, tipo de litoral y antropización de la playa, realizándose un plano de cada uno de ellos. Sumando los valores que le fueron asignados y utilizando el método de criterio por peso, una vez homologados los valores, se hizo un análisis espacial en el S.I.G. utilizando el *software Geostatistical Analyst* el cual contiene un módulo llamado *Geostatistical Wizard* que se usa para realizar interpolación de datos, para este caso se utilizó el método de IDW (*Inverse Distance Weighting*) obteniendo la delimitación de áreas con características similares.

Para Inundaciones pluviales el método de trabajo fue propuesto por el SGM debido a que las Guías Metodológicas que maneja CENAPRED son en relación a desborde de cauces, que para el estado de Yucatán de acuerdo a sus características geomorfológicas no aplican. Por lo anterior para análisis del tema se comenzó por identificar zonas bajas, planas y con una relativa depresión

topográfica a partir del Modelo Digital de Elevación y la inclusión de mapas temáticos de: coeficiente de escurrimiento, periodos de retorno de precipitaciones, espesor de suelos e infiltración densidad de dolinas y grado de fracturamiento, así como parámetros obtenidos de las verificaciones de campo. Posteriormente, se analizan estos datos utilizando el Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ) y con ello se obtiene el Mapa de Susceptibilidad del Terreno por Inundaciones Pluviales.

En el tema de Ciclones Tropicales se obtuvieron mapas de frecuencia por categoría y por periodo de tiempo (décadas), a partir del análisis de bases de datos del Programa Busca Ciclones generado por CENAPRED y realizando interpolación de trayectorias y de la cuadrícula de afectación, tomando además en cuenta la escala de Categorías de Ciclones Saffir-Simpson y el Mapa Índice de Peligro por ciclones tropicales de México; como parte complementaria se determinaron los periodos de retorno para algunos municipios del Estado.

Para el apartado de obtención de Peligro por Marea de Tormenta, se consideró la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales (CENAPRED, 2006), tomándose como referencia el trabajo: “Implementación de la Metodología para la Elaboración de Mapas de Riesgo por Inundaciones Costeras por Marea de Tormenta: Caso Isla Arena, Municipio de Calkiní” (CENAPRED, 2008). Para el análisis de datos también se utilizó el programa de Excel proporcionado por CENAPRED, donde se alimentan los parámetros: presión barométrica de los ciclones tropicales de acuerdo a la categoría, la latitud de las zonas urbanas a analizar, ángulo α que se forma entre el rumbo de desplazamiento de los ciclones tropicales, la línea de costa con su factor correctivo y velocidad de desplazamiento de los ciclones tropicales. Cabe mencionar que para determinar áreas de inundación por este tipo de fenómeno es necesario contar con topografía a detalle, lo cual para el caso del estado de Yucatán no fue posible, motivo por el cual, en el presente trabajo sólo se determinó la altura de marea de tormenta para las zonas urbanas localizadas en la costa del Estado.

Para el tema de sequía en el Estado, se contemplaron dos fases, la primera fue determinar el Índice de Severidad de la Sequía, tomando como base la metodología propuesta por la Dra. María Engracia Hernández Cerda, investigadora del Instituto de Geografía de la UNAM, 2007, utilizando los promedios de los valores de precipitación con los cuales se generaron Mapas con el método de Ponderación de Distancia Inversa (IDW) en ArcMap 10; y la segunda que consistió en determinar el Índice de Precipitación Estandarizado donde se analizan las anomalías de precipitación y se realiza un conteo de los periodos de retorno de acuerdo al libro “Análisis de Sequías” de Sandoval y Reyes (2004),

Finalmente, en el desarrollo del tema de Incendios Forestales se hace una propuesta de metodología para obtener Mapas de Susceptibilidad a Incendios Forestales y en base a este, el Mapa de Amenaza por los mismos, tomando en cuenta tres componentes: biótico, meteorológico y socioeconómico. Para este tema también se utilizó el Proceso de Análisis Jerárquico que involucra el índice de Severidad de Sequía, la frecuencia de ciclones tropicales, los puntos de calor (su distribución anual, mensual, espacial, de frecuencia y reincidencia), el modelo de combustible por vegetación, el espesor del horizonte O del suelo y la información estadística de los incendios.

IV.2. Análisis de Vulnerabilidad

En este apartado se hace la descripción del método utilizado para definir y determinar los aspectos de vulnerabilidad aplicados en este Atlas del Estado de Yucatán. Partiendo del concepto de vulnerabilidad, que es la susceptibilidad de los sistemas expuestos a ser afectados como consecuencia de un fenómeno perturbador (CENAPRED, 2004); es necesario conocer el valor económico de las zonas que están expuestas a un fenómeno y así determinar una clasificación de aquellos sectores que presentan mayor o menor susceptibilidad de afectación respecto a dichos fenómenos. En este caso se considero la pérdida de infraestructura urbana.

A continuación se describe de manera particular el método de trabajo de infraestructura de viviendas, edificaciones y vías de comunicación terrestre utilizado para determinar la vulnerabilidad.

IV.2.1. Infraestructura

Debido a su ubicación geográfica, condiciones climáticas y geológicas, así como a problemas de asentamientos humanos irregulares, las ciudades pueden ser vulnerables ante la presencia de los fenómenos naturales. Estos fenómenos, por la magnitud y alcance han provocado severos daños que requieren de una respuesta para reparar los daños y restablecer las condiciones de normalidad social y económica en una región afectada. Para ello, es necesario integrar, analizar y medir los peligros para establecer los mecanismos que ayuden a proponer medidas de mitigación del riesgo y sobre todo es preciso conocer las pérdidas en la infraestructura pública, que requiere atención inmediata ante un evento natural en caso de sufrir daños (Reinoso *et al*, 2010).

Las principales consecuencias de estos desastres son diversos daños a la población, infraestructura y servicios. En general es difícil calcular el costo en materia de infraestructura que originan los desastres naturales. Sin embargo, con la mayor frecuencia de ocurrencia de dichos fenómenos se ha ido creando mayor conciencia y existe un mejor registro de estos eventos. Un elemento clave para el desarrollo sustentable es el conocimiento del riesgo existente y las causas que lo generan, de tal forma que se puedan desarrollar diferentes planes y estrategias encaminadas a la prevención y mitigación de los daños ocasionados por fenómenos naturales (Reinoso *et al.*, 2013). Para ello, es importante conocer los tres componentes que lo definen: amenaza, exposición y vulnerabilidad.

En la realización del presente Atlas para el caso de los componentes de exposición y vulnerabilidad, se presenta un trabajo realizado para calcular las pérdidas estimadas de infraestructura de vivienda, edificaciones y transporte. Cabe mencionar, que esta información únicamente muestra las características de estimaciones probabilísticas de daño a la infraestructura, y los mapas fueron clasificados en tres categorías que permiten conocer las zonas de mayor riesgo en las ciudades y/o localidades para evaluar la pérdida probable con alguna precisión y poder realizar la evaluación de los costos (en caso de pérdida) y beneficios para las medidas de mitigación.

En primera instancia, se diseñó un método de trabajo general para elaborar las tres capas de infraestructura, utilizando datos vectoriales y bases de datos proporcionadas por distintas dependencias de gobierno, mismas que fueron actualizadas y mejoradas para incrementar la precisión de la información para la estimación de pérdidas. Esta información fue organizada y clasificada como Infraestructura de vivienda (población y vivienda), Infraestructura de servicios públicos (escuelas, hospitales, iglesias, etc.) e Infraestructura de vías de comunicación (camino, carreteras, autopistas, líneas de conducción eléctrica etc.) (Figura 3).

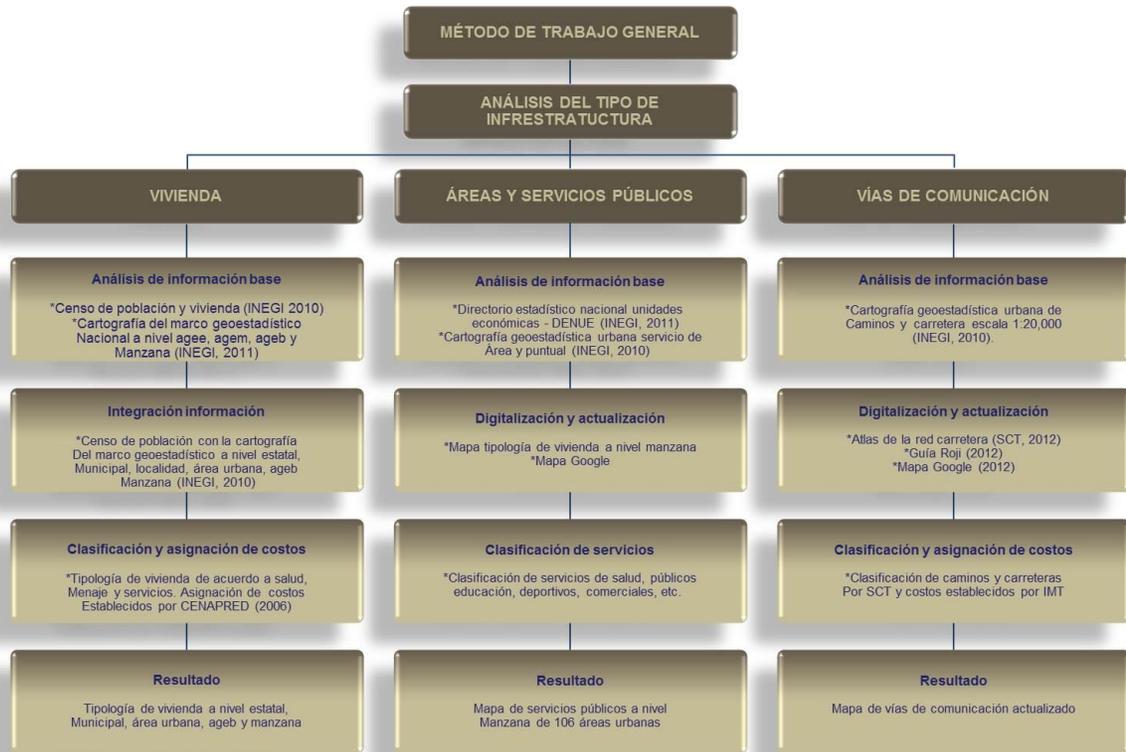


Figura 3. Diagrama de flujo del método de trabajo empleada para Infraestructura.

Posteriormente, para el análisis de cada tipo de infraestructura, se llevó a cabo un método de trabajo más detallado de acuerdo a las características de cada uno, para actualizar la información existente y así obtener resultados mejores y confiables.

IV.2.1.1. Infraestructura de Vivienda

Constantemente el país ha sido afectado por fenómenos naturales de gran poder destructivo como son los huracanes, inundaciones, deslizamientos de laderas, hundimientos del terreno, entre otros, así como fenómenos generados por el hombre (antropogénicos) entre los que destacan explosiones y los incendios. Históricamente en nuestro país, al igual que en gran parte de los países en vías de desarrollo, se observan consistentemente daños en las edificaciones e infraestructura en general ante la incidencia de dichos eventos naturales y/o antropogénicos (CENAPRED, 2006).

Dentro de las edificaciones que resultan afectadas se encuentran principalmente las viviendas de bajo costo, la mayoría de las cuales son consideradas como construcción informal, caracterizadas por emplear materiales de baja calidad y por no tener un diseño estructural formal, resultando altamente susceptibles a ser dañadas.

El tema de la vulnerabilidad de la vivienda es uno de los sectores que resultan con las mayores afectaciones ante la acción de los fenómenos naturales, produciéndose anualmente cuantiosas pérdidas económicas. Para estimar distintos niveles de riesgo, es necesario evaluar la vulnerabilidad, ante cada fenómeno de cada una de las obras construidas por el hombre tales como vivienda, hospitales, escuelas, servicios de emergencia, edificios públicos, vías de comunicación, líneas vitales (electricidad, agua, drenaje, telecomunicaciones, etc.), patrimonio histórico, comercio e industria, sin olvidar tierras de cultivo, zonas de reserva ecológica e incluso turísticas o de esparcimiento. (CENAPRED, 2006).

En el presente método de trabajo se establecen criterios para la identificación de vulnerabilidad física que permite estimar el grado de vulnerabilidad a partir de la ubicación de las

casas, propiedades de los habitantes y las características de las viviendas. La aplicación de la vulnerabilidad física se estima a partir de los bienes y servicios que cuentan las viviendas, conocida como “menaje” o “enseres”. En relación con el término costos, se refiere al presupuesto necesario para reponer lo dañado. Dentro de la definición de lo dañado o el bien expuesto afectado, se puede considerar la pérdida del menaje; y desde luego, el aspecto de mayor importancia, pero de mayor complejidad para su consideración como bien expuesto, es la vida humana (CENAPRED, 2006).

▪ **Objetivo**

Generar un nivel de información de tipo de vivienda para obtener la vulnerabilidad física. Con el objetivo de ubicar e identificar geográficamente las viviendas y/o poblaciones más vulnerables que pueden estar expuestas y/o ser susceptibles a dañarse durante un evento de fenómeno natural y en consecuencia provocar un desastre.

▪ **Método de Trabajo**

La metodología de CENAPRED (2006), establece que para llevar a cabo los criterios de evaluación se requieren hacer una inspección en campo, haciendo levantamientos y clasificando cada vivienda. Así como utilizar planos de cartografía geo-referenciada de las áreas urbanas que permita ubicar cada uno de las zonas geográficas de estudio (predios, manzanas o área geoestadística básica). Para tal fin se utilizó la estructura del marco geoestadístico nacional y la cartografía geoestadística al cierre del Censo de Población y Vivienda, 2010. En este capítulo se describe el uso de la información básica de las características de las viviendas reportadas en el censo de población y vivienda 2010, disponible en el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Esta información permitió realizar una evaluación simplificada y cualitativa de la vulnerabilidad a nivel estatal, municipal, localidad, área urbana, ageb y manzana, utilizando los resultados generales del censo, permitiendo clasificar a la vivienda por el tipo de material de construcción y en este caso para los fines de vulnerabilidad física, fueron de interés los datos de techo, piso, servicios y menaje.

Con lo que respecta al método de trabajo, este se llevó a cabo en cuatro fases: 1) Se realizó la recopilación, análisis y depuración del censo de población y vivienda de INEGI y de la base de datos de la cartografía geoestadística urbana, 2) se hizo la integración de la base de datos del censo de población con la cartografía del marco geoestadístico, 3) se llevó a cabo la clasificación de la tipología de vivienda y asignación de costos de acuerdo a la metodología de CENAPRED (2006) y 4) se realizó el mapa de tipología de vivienda en cuatro niveles de información a nivel localidad, área urbana, ageb y manzana (Figura 4).

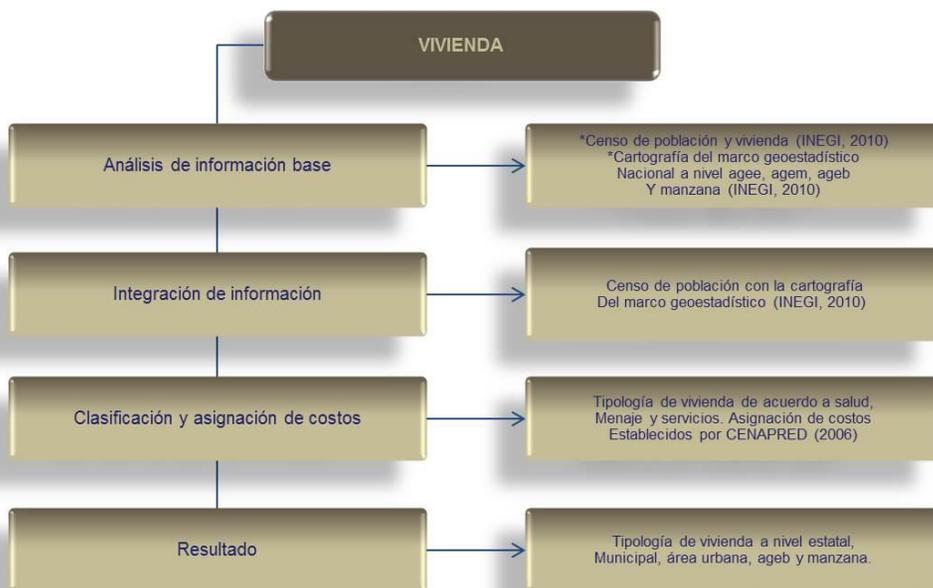


Figura 4. Diagrama de flujo del método de trabajo empleada para infraestructura de vivienda.

▪ Análisis de Información Base

El nivel de información denominado “tipología de vivienda” se generó a partir de los principales resultados por localidad (ITER), y los resultados desagregados hasta nivel de área geoadministrativa básica (AGEB) y manzana urbana del “**Censo de Población y Vivienda 2010**” (INEGI, 2010), el cual contiene un registro de datos geográficos por localidad, ageb y manzana, que expone una selección de 190 indicadores sobre las características sociodemográficas de la población y las viviendas.

Los indicadores incluidos para **población** contienen aspectos como sexo, edad, fecundidad, migración, lengua indígena, discapacidad, características educativas, características económicas, derechohabencia a servicios de salud, situación conyugal y religión. En cuanto al tema de **hogares censales** la información está relacionada con el número de hogares y su población de acuerdo con la jefatura del hogar. En lo que respecta a **vivienda**, contiene información sobre el total de viviendas y ocupantes, material de pisos, número de cuartos, servicios disponibles en la vivienda (energía eléctrica, agua entubada, sanitario, drenaje), así como los bienes con los que cuenta la misma.

Los registros corresponden al total de la entidad federativa y sus respectivos datos acumulados para las localidades con una y dos viviendas. El siguiente registro corresponde al total del primer municipio; y los siguientes a cada una de las localidades que lo integran, seguida esta las localidades urbanas con el total acumulado de las AGEB que las integran. Y finalmente la localidad urbana, se presentan los datos por AGEB y de manzanas.

Es importante señalar, con base al principio de confidencialidad que marca la Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica, esta institución aplica el siguiente criterio: a nivel municipio, localidad de una y dos viviendas y ageb, no es posible generar información para unidades geográficas que tienen menos de tres viviendas, sólo se presenta información en las variables población total (POBTOT), viviendas totales (VIVTOT) y total de viviendas habitadas (TVIVHAB); en el resto de los indicadores aparece en asteriscos, en este caso para nuestra base de datos aparecen con valor cero. (INEGI, 2010).

Por otro lado, para representar estos datos en forma vectorial, se utilizó la información de la “**Cartografía Geoadministrativa Urbana**”, con actualización cartográfica correspondiente al cierre del

Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2010), con el objetivo de ubicar geográficamente las zonas urbanas y las poblaciones con los indicadores correspondientes. Esta cartografía es la representación vectorial en formato digital (SHP-ESR, shape), los principales rasgos urbanos corresponden a las cabeceras municipales y las localidades que cuentan con una población de 2,500 a más habitantes. Caso contrario las localidades menores a 2,500 habitantes están representadas por puntos.

La información está referida a la proyección cartográfica Cónica Conforme a Lamber (CCL) y el Datum ITRF92, época 1988 asociado a GRS80, que es igual a WGS 84 (World Geodetic System of 1984). Esta cartografía geoestadística está conformada por polígonos, líneas y puntos en archivos organizados por localidad urbana (por clave de localidad) conteniendo la siguiente información: Polígonos de localidad urbana (**L**) Área geoestadística básica (**A**), Carreteras (**CA**), Ejes viales (**E**), Polígonos de manzanas (**M**), Etiquetas-nombres de los ejes de vialidad (**T**), Servicios con información complementaria de tipo Área (**SIA** - Áreas verdes, camellones, escuelas, unidades deportivas, panteones etc.), tipo Línea (**SIL** - Ríos, ferrocarril, líneas eléctricas, etc.) y tipo Puntual (**SIP** - Escuelas, iglesias, mercados, parques o jardines, etc.).

▪ Integración de la Información

Para llevar a cabo la integración de la información del Censo de Población y Vivienda con la cartografía de la misma, se utilizó la estructura del “Marco Geoestadístico Nacional” (INEGI, 2011), el cual tiene correctamente referenciada la información estadística de los censos con los lugares geográficos correspondientes, proporcionando la ubicación de las localidades, municipios y entidades del país, utilizando coordenadas geográficas. Dividiendo el territorio nacional en áreas identificables denominadas “Áreas geoestadísticas”, con tres niveles de desagregación: estatal (AGEE), municipal (AGEM) y básica (AGEB), rural o urbana. (Figura 5).

1. **Áreas geoestadística estatal (AGEE).** Contiene todos los municipios pertenecientes a una entidad federativa. El país está conformado por 32 entidades federativas, es decir 32 AGEE, cada una de ellas contiene una clave consecutiva formada por dos números, para el estado de Yucatán corresponde el número 31 (Figura 5).
2. **Áreas geoestadística municipal (AGEM).** Es el área que corresponde a la división municipal de cada entidad federativa, está conformada por todas las localidades urbanas y rurales que pertenecen a cada uno de los municipios. Conformado por tres dígitos, en este caso el número total de Yucatán es de 106 municipios.
3. **Áreas geoestadística básica (AGEB).** Es el área geográfica que corresponde a la subdivisión de las AGEM. Constituye la unidad básica del Marco Geoestadístico Nacional y dependiendo de las características que presentan las AGEGB se clasifican en dos tipos: área geoestadística básica urbana y rural.
 - a. **Área geoestadística básica urbana.** Al interior de estos niveles de desagregación, se encuentran las áreas geográficas que contienen las unidades mínimas de observación del Censo de Población y Vivienda 2010 (habitantes y viviendas) las cuales son **localidad** y **manzana**. Se puede definir como el área geográfica ocupada por un conjunto de manzanas que generalmente son de 1 a 50, perfectamente delimitadas por calles, avenidas, andadores o cualquier otro rasgo de fácil identificación en el terreno y cuyo uso del suelo sea principalmente habitacional, industrial, de servicios, comercial entre otros.
 - i. **Localidad.** Lugar ocupado con una o más viviendas, pueden estar habitadas o no y sus nombres son reconocidos por un nombre dado por la ley o por la costumbre. De acuerdo a sus características y con fines estadísticos, las localidades se clasifican en urbanas y rurales.

- ii. **Localidades urbanas.** Son aquellas que tienen una población mayor o igual a 2,500 habitantes o que sean cabeceras municipales independientemente del número de habitantes.
- iii. **Localidad rural.** Son las que tienen una población menor a 2,500 habitantes y no son cabeceras municipales de acuerdo con el último evento censal.

Cada localidad urbana o rural está codificada con una clave de cuatro dígitos que se asignan de manera ascendente por municipio a partir del 0001 hasta cubrir el total de localidades de cada uno de los municipios que conforman el país, por lo general la clave 0001 corresponde a la cabecera municipal. Todas las localidades urbanas y rurales están incluidas en el Marco Geoestadístico Nacional, las urbanas se presentan en forma de polígono, mientras que las rurales están representadas por un punto. Las que están representadas con un polígono cuentan con un plano independiente, ya sean urbanas o rurales con 100 o más habitantes (Figura 5).

- I. **Manzanas.** Espacio geográfico de forma poligonal y de superficie variable, constituido por una o un grupo de viviendas y/o edificios, predios, lotes o terrenos de uso habitacional, comercial, industrial, de servicios, etc. Está delimitada por calles, andadores, brechas, veredas, cercas, arroyos, límites de parcelas, etc., y que pueden rodearse caminando. La clasificación de las manzanas es urbana o rural, de acuerdo con el ámbito de la localidad a la que pertenecen. Cada una de las manzanas esta codificada por una clave de tres dígitos, asignada de manera ascendente a partir de la 001 hasta cubrir el total de manzanas de la ageb en las localidades urbanas y de la localidad en las rurales (Figura 5).

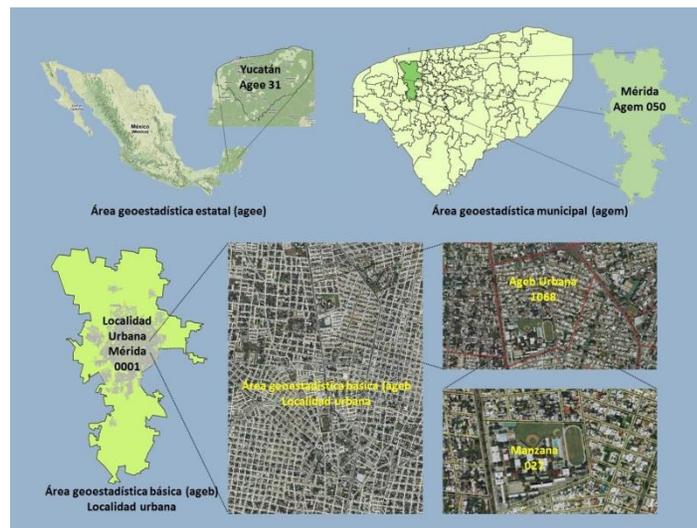


Figura 5. Áreas geoestadística estatal (agee), municipal (agem), básica (ageb) urbana y rural.

- b. **Área geoestadística básica rural.** Es la subdivisión de las Áreas Geoestadísticas Municipales que se ubican en la parte rural, cuya extensión territorial en promedio es de 8,500 hectáreas y se caracteriza por el uso del suelo de tipo agropecuario o forestal, en su interior podemos encontrar localidades urbanas, rurales y extensiones naturales como pantanos, lagos, desiertos, etc. Este nivel cartográfico no está considerado dentro del nivel de tipología de vivienda, por lo que no se hace mucho énfasis a esta clasificación.

La identidad de cada área del Marco Geoestadístico Nacional es única y se expresa con claves numéricas que permiten identificar la referencia geoestadística estatal, municipal, ageb, localidad y manzana. Dicha referencia se conforma con una serie ordenada de claves geoestadísticas, apegadas a una estructura según el nivel de desagregación del área geoestadística de que se trate y que no se repita en todo el país (INEGI, 2011), el orden de estos códigos es el siguiente:

EE es la clave geoestadística de la entidad representada por dos dígitos, **00**
MMM es la clave geoestadística del municipio representada con tres dígitos, **000**
LLLL es la clave geoestadística de la localidad representada con cuatro dígitos, **0000**

Esta descripción también aplica para las claves geoestadísticas de AGEB (EEEMMMLLLLAAA) y manzana (EEMMMLLLLAAAAMMM).

AAAA es la clave geoestadística del AGEB, representada con tres dígitos, un guion y un dígito verificado **0000**.

MMM es la clave geoestadística de manzana, representada con tres dígitos, **000**.

Con estas claves se obtuvo un código que se utiliza en la unión de la base de datos del Censo de Población y Vivienda con la cartografía de la misma (Figura 6).

ENTIDAD	NOM_ENTI	MUNICIPIO	NOM_MUN	LOCALIDAD	NOM_LOC	AGEB	MANZANA	CODIGO PARA SIG	POBTOT	POBMAS
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	001	3100100010107001	44	19
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	002	3100100010107002		
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	003	3100100010107003		
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	004	3100100010107004		
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	005	3100100010107005	26	13
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	006	3100100010107006	17	9
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	007	3100100010107007	27	13
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	008	3100100010107008	59	29
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	009	3100100010107009	12	5
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	010	3100100010107010	0	0
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	011	3100100010107011	34	21
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	012	3100100010107012	44	23
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	013	3100100010107013	0	0
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	014	3100100010107014	12	6
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	015	3100100010107015	7	0
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	016	3100100010107016	63	32
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	017	3100100010107017	67	31
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	018	3100100010107018	48	20
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	019	3100100010107019	0	0
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	020	3100100010107020	24	12
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	021	3100100010107021	0	0
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	022	3100100010107022	0	0
31	Yucatán	001	Abalá	0001	Abalá	0107	023	3100100010107023	21	11

Figura 6. Claves geoestadísticas del censo de población y vivienda 2010.

▪ **Clasificación de la vivienda**

Para realizar la clasificación de la tipología de vivienda, primeramente definiremos el concepto de la misma, utilizando varios puntos de vista de diversos autores, de acuerdo a las necesidades u objetivos a la cual es empleada. Con el objetivo de proporcionar los criterios utilizados para determinar la tipología de vivienda y posteriormente su vulnerabilidad.

Vivienda. Es el lugar cerrado y cubierto que se construye para que sea habitado por personas. Estas edificaciones ofrecen refugio a los seres humanos y les protegen de las condiciones climáticas adversas, además de proporcionarles intimidad y espacio para guardar sus pertenencias y desarrollar sus actividades cotidianas (WordPress, 2013).

Casa, departamento, apartamento, residencia, piso, hogar, domicilio y estancia son algunos de los términos que se usan como sinónimo de vivienda. La utilización de cada concepto depende de ciertas características, generalmente vinculadas al tipo de construcción. De esta forma, las viviendas colectivas reciben nombres como apartamento o departamento, mientras que las viviendas individuales se conocen como casa, chozas, etc. Las viviendas provisionales o precarias también pueden ser denominadas como términos específicos, como chozas como conjunto de viviendas precarias. El acceso a una vivienda digna es un derecho humano propio, ya que un techo inadecuado amenaza de forma directa contra la salud física y mental. La accesibilidad física, la inclusión de servicios básicos como el agua potable, el gas, la electricidad y la seguridad deben formar parte del derecho a la vivienda (WordPress, 2013).

En consecuencia el Programa Sectorial de Vivienda de SEDESOL (2001), precisa que el concepto de vivienda digna se refiere a “el límite inferior al que se pueden reducir las características

de la vivienda sin sacrificar su eficacia como satisfactor de las necesidades básicas, no suntuarias, habitacionales de sus ocupantes. Además señala que este tipo de vivienda deberá cumplir simultáneamente con los siguientes requisitos: a) estar ocupada por una familia, b) no tener más de 2.5 habitantes por cuarto habitable, c) no estar deteriorada, d) contar con agua entubada en el interior, e) contar con drenaje, f) contar con energía eléctrica. Adicionalmente a esta definición, presenta una clasificación programática que hace referencia a cinco tipos de vivienda: “básica”, como la más elemental en una jerarquía que pasa de la “básica” a la económica”, para llegar a la “media”, “media alta” y “residencial”, todas definidas en términos de metros cuadrados o superficie (CESOP, 2006).

En términos de registro y de evaluación, la definición del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática señala: “Vivienda” como el espacio delimitado normalmente por paredes y techos de cualquier material, con entrada independiente, que se utiliza para vivir, esto es: dormir, preparar los alimentos, comer y protegerse del ambiente. Siendo esta es una definición técnica que no alcanza a abarcar las dimensiones social y ética del concepto vivienda (CESOP, 2006).

De acuerdo a CENAPRED (2006), las viviendas podrán clasificarse en cinco niveles de acuerdo con el material y tipo de construcción, para definir su capacidad en caso de una inundación (Tabla 9). Para estimar las funciones de vulnerabilidad para cada tipo de vivienda, CENAPRED (2006), se propone una serie de configuraciones de muebles y enseres menores, posteriormente se realiza una cuantificación del porcentaje de los daños ocasionados en cada caso, en función del nivel que alcance el agua que entra en la casa (Figura 7).

Tabla 9. Índice de vulnerabilidad según el tipo de vivienda.

TIPO DE VIVIENDA	ÍNDICE DE VULNERABILIDAD	COLOR PROPUESTO
I	Alto	Rojo
II	Medio-Alto	Naranja
III	Medio	Amarillo
IV	Medio-Bajo	Verde
V	Bajo	Blanco-Gris

Fuente: CENAPRED, 2006. Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y municipales de Peligros y Riesgos. Tomo Fenómenos Hidrometeorológicos, p. 57.

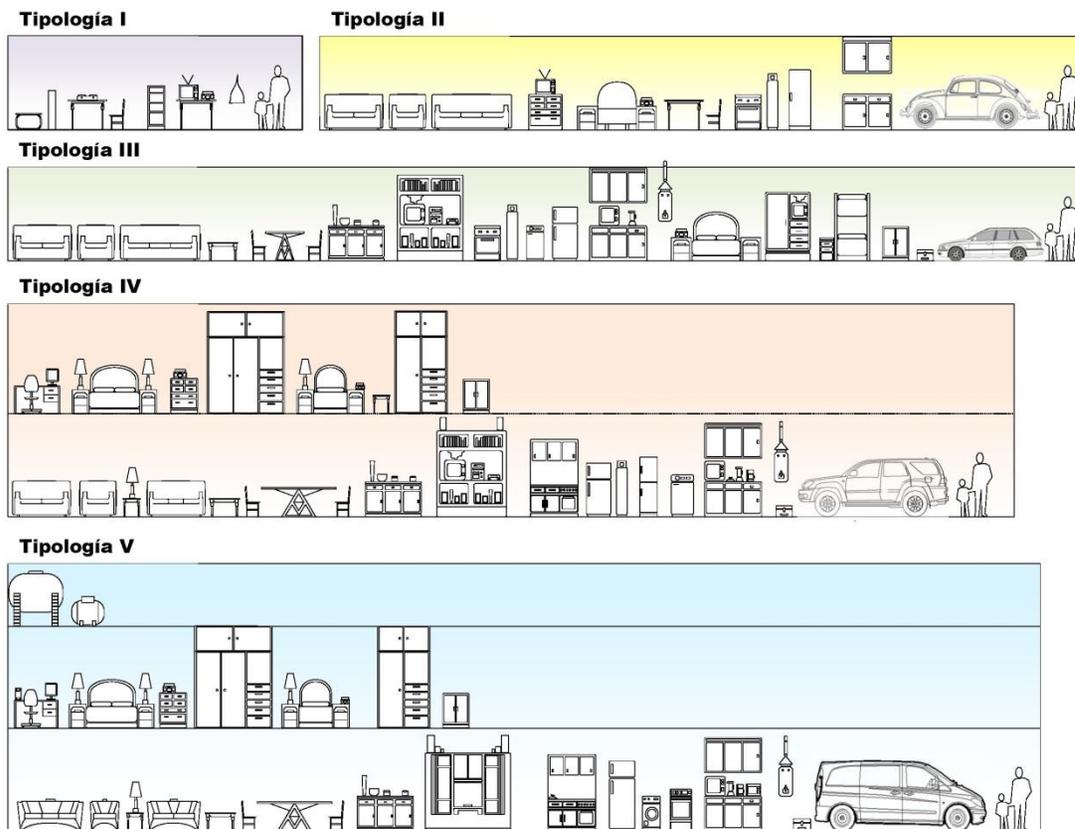
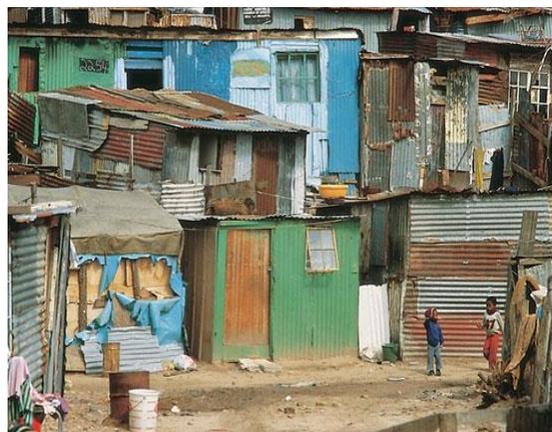


Figura 7. Clasificación de la tipología de vivienda de acuerdo al menaje (CENAPRED, 2006).

Tipo I. Corresponde a los hogares más humildes, una vivienda consta de un solo cuarto multifuncional (Fotografías 1 y 2), construido con material de desecho. Así mismo, el menaje es el mínimo indispensable. Para la vivienda tipo I se cuantifica un menaje con un costo aproximado de \$12;500. En la Figura 7 se muestra el menaje considerado para elaborar la función de vulnerabilidad de una vivienda tipo I.



Fotografía 1. Viviendas humildes son construidas con material de desecho.



Fotografía 2. La mayoría de las viviendas Tipo I, corresponden a zonas marginadas.

Tipo II. El segundo tipo corresponde a hogares de clase baja, vivienda de autoconstrucción o viviendas construidas con materiales de la zona, la mayoría de las veces sin elementos estructurales. Con respecto al menaje, las diferentes habitaciones cuentan con sus muebles propios y están más o menos definidas. Localmente este tipo de vivienda, corresponden a una casa de una sola pieza cubierta por un techo sustentado por postes verticales de horcones gruesos clavados en la tierra y cubiertas con un techo paja de hojas de palma de guano, sus paredes son de varas que son cubiertas con barro (Fotografía 3) y en otros casos las casas son de cal y canto ó piedra caliza (Fotografía 4), (Baños Ramírez Othón, en SEDUMA 2010). Para la vivienda tipo II, se cuantificó un menaje con un costo cercano a los \$50,000 (CENAPRED, 1996). En la Figura 7 se observa el ejemplo del menaje considerado para la vulnerabilidad de una vivienda tipo II.

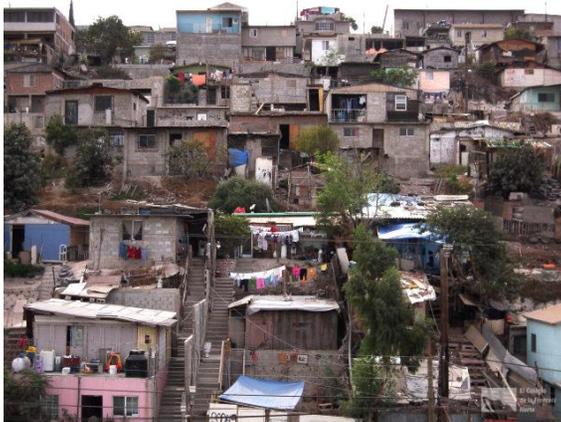


Fotografía 3. Vivienda construida con paredes de barro y techo de hojas de palma de guano.



Fotografía 4. Vivienda construida con paredes de piedra caliza y techo de hojas de palma de guano.

Tipo III. El tercer tipo de vivienda también es clasificado como clase baja, similar al tipo II pero con techos más resistentes, construidas a veces sin elementos estructurales (Fotografía 5). El Menaje corresponde al necesario para las diferentes habitaciones, como en el anterior nivel; sin embargo se consideran de mayor calidad y por lo tanto un mayor costo (Fotografía 6). Para este tipo de vivienda se cuantificó un menaje con un costo aproximado de \$150,500 (Figura 7).



Fotografía 5. Las viviendas de clase baja cuentan con techos sin elementos estructurales.



Fotografía 6. Vivienda tipo III construida con paredes de material rígido y techo de lámina o teja.

Tipo IV. El cuarto tipo de vivienda se identifica como la típica para la clase media, está equiparada con una vivienda de interés social, construida la mayoría de las veces con elementos estructurales (Fotografía 7). El menaje corresponde a una casa típica de una familia de profesionistas que ejercen su carrera y viven sin complicaciones económicas. Para este tipo de vivienda se cuantificó un menaje con un costo del orden de 300,000 (Figura 7).

Tipo V. Finalmente, estep tipo de vivienda, corresponde al tipo residencial, construida con acabados y elementos decorativos que incrementan sustancialmente su valor (Fotografía 8). El menaje está formado por artículos de buena calidad y con muchos elementos de confort. Para este tipo se considera un menaje con un costo del orden de los 450,000 (Figura 7).



Fotografía 7. Las viviendas de clase media, equiparada con viviendas de interés social.



Fotografía 8. Las viviendas de clase alta con acabados de buena calidad y elementos de confort.

Vulnerabilidad de la vivienda

Este apartado muestra el método utilizado para definir, identificar y evaluar la vulnerabilidad física de una vivienda, tomando en cuenta algunos de los indicadores del Censo de Población y Vivienda 2010 y aplicando la metodología de CENAPRED (2006) para peligro hidrometeorológico, específicamente para inundación, donde se plantea una aproximación al tema de la estimación de la vulnerabilidad física asociada a desastres desde una perspectiva cualitativa. Partiendo del concepto de peligro, vulnerabilidad, que es la susceptibilidad de los sistemas expuestos a ser afectados como consecuencia de un fenómeno perturbador, es necesario conocer el valor económico de las zonas que están expuestas a un fenómeno y así determinar una clasificación de aquellos sectores que presentan mayor o menor susceptibilidad de afectación respecto a dichos fenómenos.

Para realizar el análisis de riesgo es necesario abarcar tres grandes campos de estudio: El peligro, la vulnerabilidad y los costos. Se tiene la percepción de que los “**desastres**” se deben exclusivamente a los peligros, pero en realidad es la sociedad en su conjunto la que se expone con su infraestructura física y organización al encuentro de dichos fenómenos, manifestando usualmente diversos grados de vulnerabilidad. Por lo tanto, los desastres no son naturales, es decir, son producto de condiciones de vulnerabilidad y exposición derivados en gran medida por aspectos socioeconómicos y de desarrollo no resueltos, como elevados índices de construcciones informales, marginación, pobreza, escaso ordenamiento urbano y territorial, entre otros (CENAPRED, 2006).

El riesgo de desastres, entendido como la probabilidad de pérdida depende de dos factores fundamentales que son el “peligro” y la “vulnerabilidad”. Sin embargo el riesgo es una variable muy compleja y cambiante en el tiempo que es función de la variabilidad de las amenazas que nos circundan y de la condición también dinámica de la vulnerabilidad y grado de exposición, por ello es necesario comprender y cuantificar los peligros, evaluar la vulnerabilidad y con ello establecer los niveles de riesgo.

La existencia de un riesgo implica la presencia de un **agente perturbador** (fenómeno natural o generado por el hombre) que tenga la probabilidad de ocasionar daños a un **sistema afectable** (asentamientos humanos, infraestructura, planta productiva, etc.) en un grado tal, que constituye un **desastre**. Se entiende por **riesgo**, la probabilidad de ocurrencia de daños, pérdidas o efectos indeseables sobre sistemas constituidos por personas, comunidades o sus bienes, como consecuencia del impacto de eventos o fenómenos perturbadores. La probabilidad de ocurrencia de

tales eventos en un cierto sitio o región constituye una **amenaza**, entendida como una condición latente de posible generación de eventos perturbadores (Figura 8).



Figura 8. Esquema de Riesgo propuesto por CENAPRED (2006).

La forma cuantitativa de riesgo, entendido como la función de tres factores: el peligro, la vulnerabilidad y el valor de los bienes expuestos:

$$\text{Riesgo} = f(\text{Peligro, Vulnerabilidad, Exposición})$$

$$R = f(P, V, E)$$

El **Peligro**, es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado.

La **Vulnerabilidad** se define como la susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por el efecto de un fenómeno perturbador, es decir el grado de pérdidas esperadas. Pueden distinguirse dos tipos: la **vulnerabilidad física** y la **vulnerabilidad social**. La primera es factible de cuantificarse en términos físicos, como la resistencia que ofrece una construcción ante las fuerzas de los vientos producidos por un huracán, a diferencia de la segunda, que es relativa y se valora cualitativamente, y está relacionada con aspectos económicos, educativos, culturales.

La **Exposición o Grado de Exposición** se refiere a la cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio y que son factibles de ser dañados. Por lo general se le asignan unidades monetarias puesto que es común que así se exprese el valor de los daños, aunque no siempre es traducible a dinero. El **grado de exposición** es un parámetro que varía con el tiempo, el cual está ligado al crecimiento y desarrollo de la población y su infraestructura. En cuanto mayor sea el valor de lo expuesto, mayor será el riesgo que se enfrenta. Si el valor de lo expuesto es nulo, el riesgo también será nulo, independientemente del valor del peligro (CENAPRED, 2006).

Por lo anterior, el presente tema, se describe la vulnerabilidad física para determinar el grado de exposición que presentan las localidades, comunidades y/o ciudades, donde se encuentran las personas, bienes y servicios de las poblaciones, localidades y/o del Estado en general, para se tomaron como base el tipo de vivienda y el material de construcción (cartón, lámina, block, cemento, etc.), dicho tipo de vivienda se adecuó según la clasificación propuesta por el CENAPRED (2006) que consiste en la cuantificación del menaje y algunos tipos de materiales de construcción de las viviendas (Tabla 10).

Tabla 10. Tipos de vivienda según su menaje.

TIPO DE VIVIENDA	CARACTERÍSTICAS	VALOR \$
I	Corresponde a los hogares más humildes, una vivienda consta de un sólo cuarto multifuncional, construido con material de desecho. Asimismo, el menaje es el mínimo indispensable.	12,500.00
II	Hogares que pueden ser clasificados como clase baja, donde la vivienda puede ser equiparada como una vivienda de autoconstrucción o viviendas construidas con materiales de la zona, la mayoría de las veces sin elementos estructurales. Con respecto al menaje, la hipótesis es que las diferentes habitaciones cuentan con sus muebles propios y están más o menos definidas.	50,000.00
III	El tercer tipo de viviendas también puede ser clasificado como clase - baja, similar al tipo II, pero con techos más resistentes, construida la mayoría de las veces sin elementos estructurales. El menaje corresponde al necesario para las diferentes habitaciones, como en el anterior nivel; sin embargo, se consideran de mayor calidad y por lo tanto un mayor costo.	150,500.00
IV	El cuarto tipo de viviendas se identifica como la típica para la clase media, es decir, que puede ser equiparada con una vivienda de interés social, construida la mayoría de las veces con elementos estructurales. El menaje que se ha seleccionado corresponde con el de una casa típica de una familia de profesionistas que ejercen su carrera y viven sin complicaciones económicas.	300,000.00
V	Finalmente, el último sector de viviendas, corresponde al tipo residencial, construida con acabados y elementos decorativos que incrementan sustancialmente su valor. El menaje está formado por artículos de buena calidad y con muchos elementos de confort.	450,000.00

Fuente: CENAPRED, 2006.

En esta etapa se muestra las viviendas más vulnerables y más resistentes, incluso se puede observar la distribución del tipo de vivienda y si está sigue algún patrón determinado. Los mapas están asociados al tipo de vivienda y su vulnerabilidad, es decir el porcentaje de pérdidas que se pueden presentar en los diferentes niveles de localidad, municipio, ageb o manzana.

La vulnerabilidad que se maneja se refiere específicamente a los bienes que tiene la población dentro de sus viviendas, conocida como “menaje”. En este caso no se considera la pérdida total de las viviendas ni de vidas humanas. Para obtener la vulnerabilidad física se utilizaron únicamente algunos indicadores del censo de **población** que incluyen los siguientes: su estructura por sexo y edad, así como su derechohabencia a **servicios de salud** como IMSS, ISSSTE, SSA, SSP, entre otros. En el tema de **hogares censales** está relacionado con el número de hogares y su población de acuerdo con la jefatura del hogar. En lo que respecta a las **viviendas**, se ofrece información sobre: total de viviendas y ocupantes, tipo del material del piso y número de cuartos, en cuanto a **servicios disponible** como energía eléctrica, agua entubada, sanitario, excusado, drenaje y **bienes** como son radio, televisor, refrigerador, lavadora, automóvil, computadora portátil o pc, teléfono, celular e internet (Figura 9).



Figura 9. Indicadores del censo de población considerados para calcular la vulnerabilidad física.

Tomando como base las descripciones del CENAPRED para la determinación del nivel de riesgo (probabilidad de ocurrencia de daños, pérdidas o efectos indeseables sobre sistemas constituidos por personas, comunidades o sus bienes como consecuencia del impacto de eventos o fenómenos perturbadores), se deben considerar tres factores que son, la intensidad de un peligro o amenaza, la susceptibilidad de los sistemas afectables, esto es, los diferentes grados de vulnerabilidad y el valor de los bienes expuestos en las diferentes poblaciones del Estado. La combinación de estos factores determina los diferentes valores de riesgo (Tabla 11).

Tabla 11. Clasificación de los niveles de riesgo.

PELIGRO ALTO	Riesgo Medio	Riesgo Medio	Riesgo Alto	Riesgo Alto
PELIGRO MEDIO	Riesgo Bajo	Riesgo Medio	Riesgo Medio	Riesgo Alto
PELIGRO BAJO	Riesgo Bajo	Riesgo Bajo	Riesgo Medio	Riesgo Medio
PELIGRO VULNERABILIDAD	VULNERABILIDAD BAJA	VULNERABILIDAD MEDIA	VULNERABILIDAD ALTA	VULNERABILIDAD MUY ALTA
TIPO DE VIVIENDA	VIVIENDA TIPO IV	VIVIENDA TIPO III	VIVIENDA TIPO II	VIVIENDA TIPO I

Además de determinar el riesgo, también se calculó el número de personas en zonas de peligro (NPE), lo cual se obtuvo como sigue:

$$NPE = (AP) (NP) / ATM$$

En donde:

NPE número de personas expuestas

AP área de peligro

NP número de pers

onas

ATM área total por manzana

Posteriormente se obtiene el valor de viviendas expuesta siguiendo los métodos que a continuación se describen, iniciando con el nivel de manzana. Para lo cual se calcula primero el Número de Viviendas Expuestas (NVE) y se utilizan las siguientes variables:

NV número de viviendas

ATM área total de la manzana

APM área de peligro por manzana

La expresión queda como sigue:

$$NVE = (APM) (NV) / ATM$$

A esto se le llama índice de vulnerabilidad, que junto con las variables que a continuación se mencionan, se obtiene el valor de infraestructura expuesta (VIE) o en peligro, mediante la siguiente expresión:

$$\text{Valor de Infraestructura Expuesta } VIE = (NVE) (CV) / (IV) \text{ a nivel manzana.}$$

En donde:

CV costo por vivienda

IV índice de vulnerabilidad

Tomando en cuenta los tipos de vivienda que son I, II, III, IV y V. Con los datos INEGI se determina el número de viviendas de toda la localidad o comunidad, a nivel azeb y manzana y se aplica la siguiente expresión con las variables de:

NVL número de viviendas

CV costo por vivienda

IV índice de vulnerabilidad

Valor de Infraestructura Expuesta VIE = (NVL) (CV) (IV)

En función de los materiales usados para su construcción y de acuerdo con los indicadores de salud, servicios y bienes, las viviendas se clasifican en cinco niveles (Tabla 12), mismos que fueron utilizados para elaborar los mapas de tipología de vivienda a nivel de localidad, área urbana, ageb y manzana (Figuras 10, 11, 12 y 13).

Tabla 12. Asignación de costos al Índice de vulnerabilidad según el tipo de vivienda.

TIPO DE VIVIENDA	INDICE DE VULNERABILIDAD	COLOR PROPUESTO	VALOR MÁXIMO DE LOS DAÑOS
I	Alto	Rojo	12,500
II	Medio-Alto	Naranja	50,000
III	Medio	Amarillo	150,500
IV	Medio-Bajo	Verde	300,000
V	Bajo	Blanco-Gris	450,000

Fuente: CENAPRED, 2006. Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y municipales de Peligros y Riesgos. Tomo Fenómenos Hidrometeorológicos, p. 57.

Con la aplicación de la metodología arriba descrita y de acuerdo a la clasificación propuesta por CENAPRED (2006), se obtuvo la clasificación de la tipología de vivienda en cuatro escalas diferentes, denominado en este trabajo como tipología a nivel localidad, área urbana, ageb y manzana mismas que están representadas en los siguientes mapas:

Tipología de vivienda a nivel localidad. Se aplicó a un total de 2379 localidades, obteniendo cinco tipos de viviendas (Figura 10).

Tipología de vivienda a nivel área urbana. Se aplicó a 127 áreas urbanas, obteniendo tres tipos de viviendas (Figura 11).

Tipología de vivienda a nivel ageb. Se aplicó a 1301 ageb, obteniendo cinco tipos de viviendas (Figura 12).

Tipología de vivienda a nivel manzana. Se aplicó a un total de 32283 manzanas, obteniendo cinco tipos de viviendas (Figura 13).

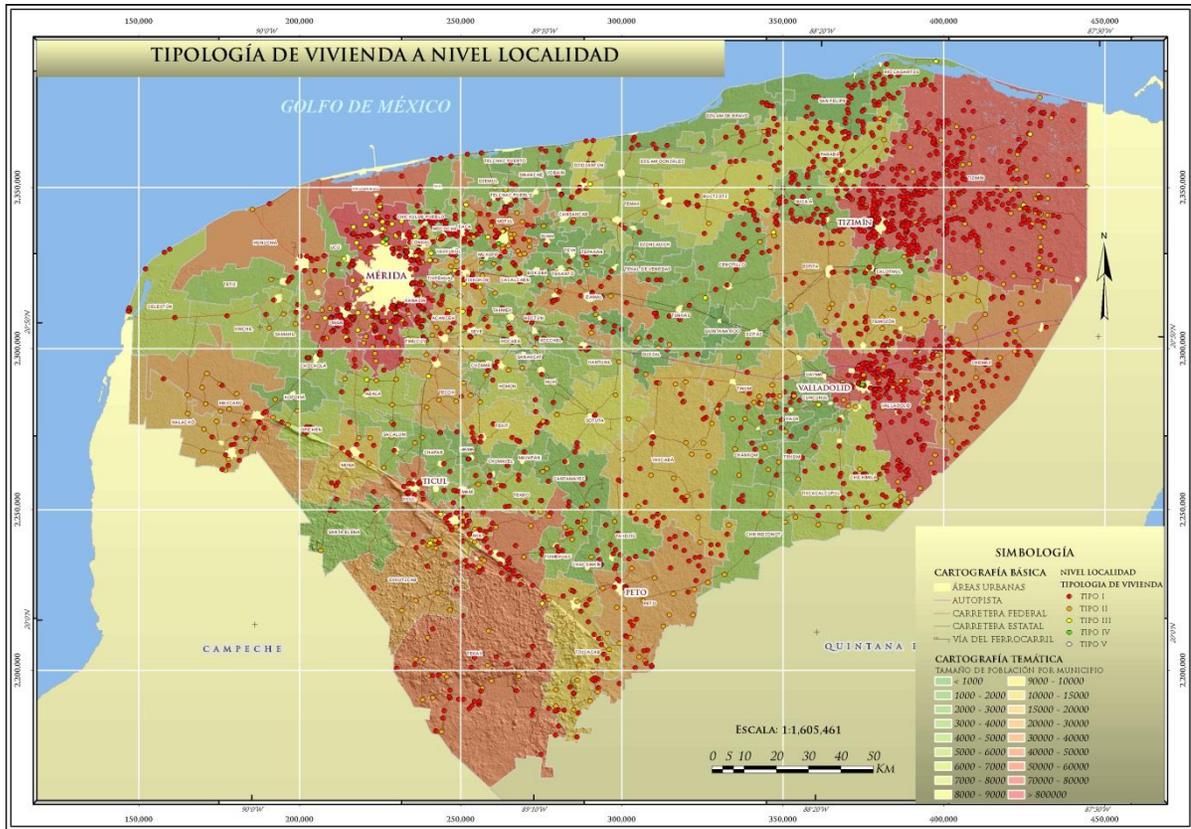


Figura 10. Distribución de las localidades con su tipología de vivienda.

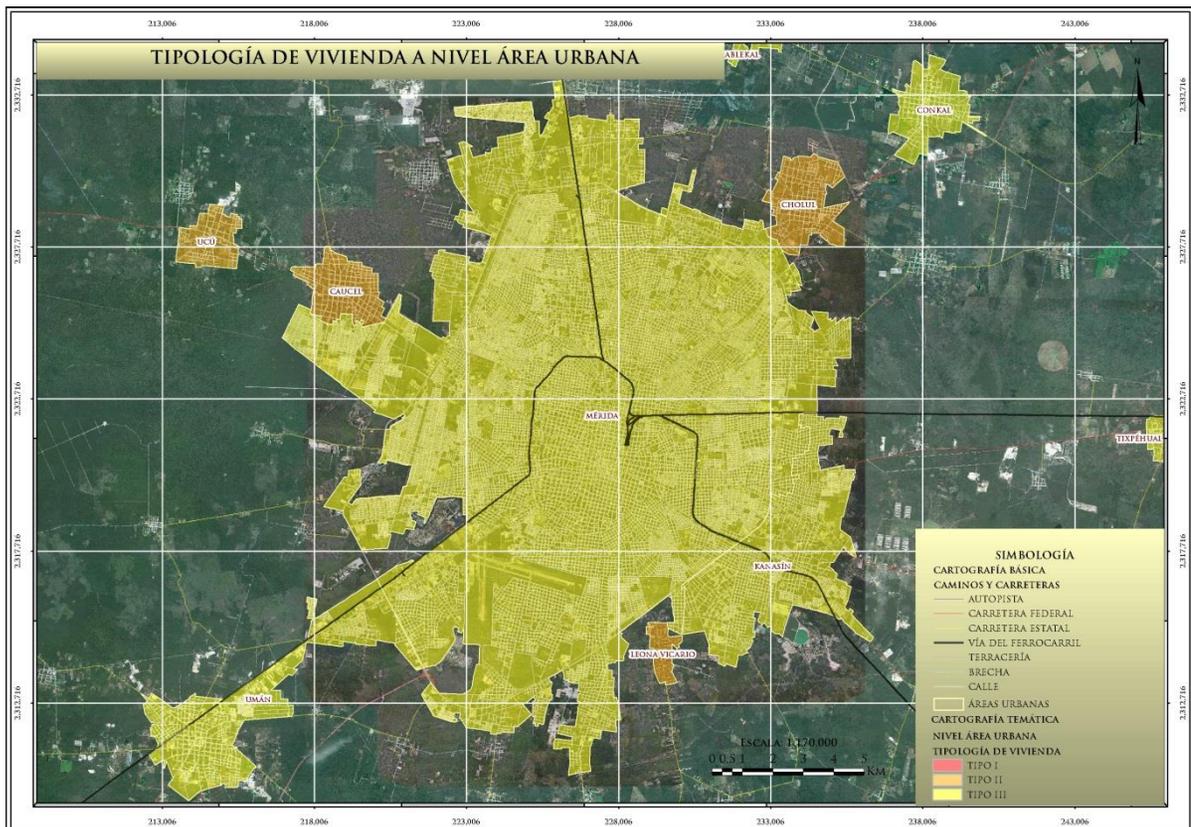


Figura 11. Áreas urbanas de ciudades y/o cabeceras municipales con su tipología de vivienda.

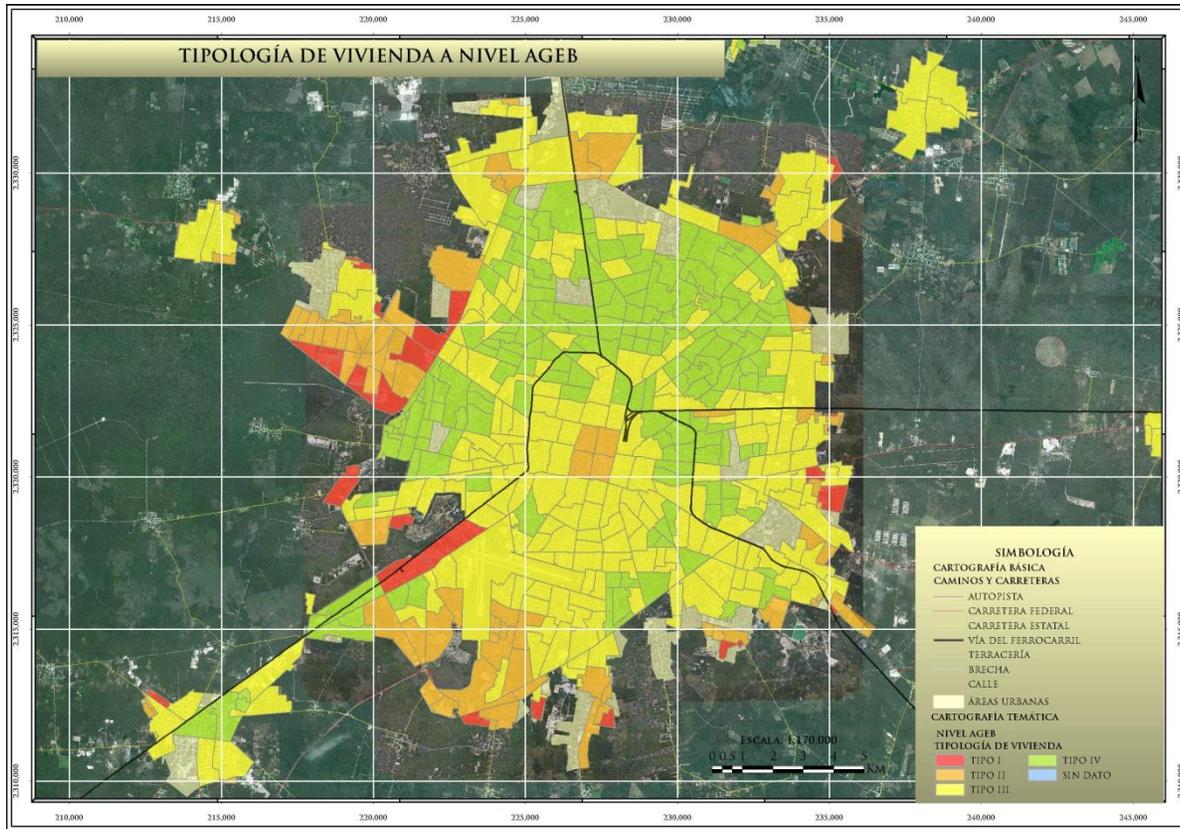


Figura 12. Áreas urbanas divididas por AGEB, muestran la distribución de la tipología de vivienda.

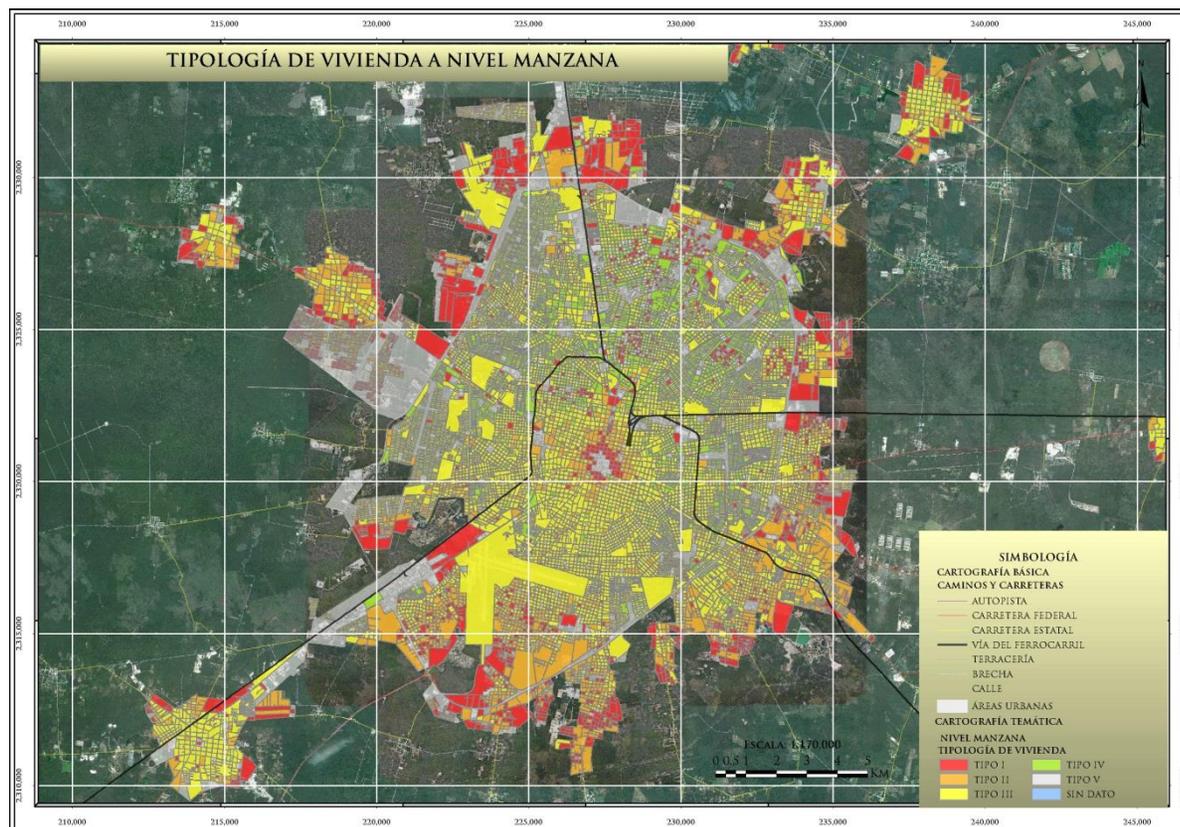


Figura 13. Las Ageb se dividen en manzanas, las cuales muestra a detalle la tipología de vivienda.

IV.2.1.2. Infraestructura de Áreas y Servicios Públicos

La infraestructura es sinónimo de desarrollo económico, social y humano. El crecimiento económico y las oportunidades de bienestar están claramente correlacionados con el grado de desarrollo de su infraestructura. Los desastres naturales se encuentran íntimamente relacionados con los procesos de desarrollo humano, sin embargo el desarrollo humano también puede contribuir a reducir eficazmente los riesgos de desastre (PNUD, 2004).

Los procesos de desarrollo son responsables de que la exposición física se traduzca en desastres naturales. La destrucción de infraestructura y el deterioro de los medios de subsistencia son consecuencias directas de los desastres. Pero existe una interacción entre las pérdidas por desastres y otros tipos de problemas: financieros, políticos, sanitarios y ambientales, de tal forma que tales pérdidas pueden incluso agravar. Las pérdidas por desastre pueden aplazar las inversiones sociales para paliar la pobreza y el hambre, ofrecer acceso a la educación, servicios de salud, vivienda digna, agua potable y saneamiento, o proteger el medio ambiente, así como las inversiones que generan empleo y fuentes de ingresos (PNUD, 2004).

➤ **Objetivo**

Generar un nivel de información de infraestructura donde se identifique las áreas de servicio y sitios públicos, ubicar geográficamente la infraestructura presente en cada ciudad o área urbana, con el objetivo de identificar los sitios que puedan estar expuestas y/o ser susceptibles a dañarse durante un evento de fenómeno natural y en consecuencia provocar un desastre.

➤ **Método de Trabajo**

La metodología de CENAPRED (2006), establece que para llevar a cabo criterios de evaluación se utilice planos de cartografía geo referenciada de las áreas urbanas que permita ubicar cada uno de las zonas geográficas de estudio (predios, manzanas o área geoestadística básica). Y así mismo ubicar la infraestructura de servicios que pueda ser susceptibles a ser dañados. Para tal fin se utilizó la cartografía geoestadística al cierre del Censo de Población y Vivienda, 2010 y el nivel de tipología de vivienda descrito anteriormente.

En la presente trabajo se llevó a cabo únicamente la clasificación de la infraestructura en las áreas urbanas, esta corresponde a las obras construidas por el hombre que prestan un servicio hacia la población como son hospitales, escuelas, servicios de emergencia, edificios públicos, líneas vitales (electricidad, agua, drenaje, telecomunicaciones, etc.), patrimonio histórico, comercio e industria, áreas turísticas o de esparcimiento

En este caso no se llevó a cabo la aplicación de la vulnerabilidad física, ya que se desconoce el costo total de cada una de las obras de infraestructura. Únicamente se clasificaron los sitios y se ubicaron físicamente en la cartografía urbana a nivel manzana. Esta información permitió realizar clasificación de la infraestructura en servicios de salud, educación, deportivos, comerciales, recreativos, turísticos, sitios de interés entre otros.

El método de trabajo se llevó a cabo también en cuatro fases: 1) se realizó la recopilación, análisis y depuración del "DENUE" Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas "y de la base de datos de la cartografía geoestadística urbana, 2) se hizo la integración de la base de datos del DENUE con la cartografía urbana, así como la digitalización y actualización de áreas y/o zonas con infraestructura aun no cartografiada, 3) se llevó a cabo la clasificación de la infraestructura de acuerdo al tipo de servicio que ofrece, y 4) finalmente se creó el mapa de infraestructura de áreas y servicios públicos únicamente a nivel manzana de las 106 áreas urbanas que conforman el estado de Yucatán (Figura 14).



Figura 14. Diagrama de flujo del método de trabajo para la infraestructura de áreas y servicios públicos.

➤ Análisis de la Información Base

El nivel de información denominado “infraestructura” se generó a partir de los resultados del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE, 2011), que contiene información de identificación y ubicación de establecimientos que los censos económicos del 2010 y los resultados desagregados hasta nivel de área geoestadística básica (AGEB) y manzana urbana del “Censo de Población y Vivienda 2010” (INEGI, 2010), el cual contiene un registro de datos geográficos por localidad, ageb y manzana. Para representar estos datos en forma vectorial, se utilizó la información de la “Cartografía Geoestadística Urbana”, con actualización cartográfica correspondiente al cierre del Censo de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2010), con el objetivo de ubicar geográficamente toda la infraestructura. Esta cartografía es la representación vectorial en formato digital (SHP-ESR, *shape*), de todos los principales rasgos de infraestructura del Estado.

➤ Integración y Actualización de la Información

La cartografía geoestadística está conformada por polígonos, líneas y puntos en archivos organizados por localidad urbana (por clave de localidad) conteniendo la siguiente información: Polígonos de localidad urbana (**L**) Área geoestadística básica (**A**), Carreteras (**CA**), Ejes viales (**E**), Polígonos de manzanas (**M**), Etiquetas-nombres de los ejes de vialidad (**T**), Servicios con información complementaria de tipo Área (**SIA** - Áreas verdes, camellones, escuelas, unidades deportivas, panteones etc.), tipo Línea (**SIL** - Ríos, ferrocarril, líneas eléctricas, etc.) y tipo Puntual (**SIP** - Escuelas, iglesias, mercados, parques o jardines, etc.).

Para llevar a cabo la integración de la información del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE, 2011), también se utilizó la estructura del “Marco Geoestadístico Nacional” (INEGI, 2011), el cual tiene correctamente referenciada la información estadística de los censos con los lugares geográficos correspondientes, proporcionando la ubicación de las localidades, municipios y entidades del país, utilizando coordenadas geográficas. Dividiendo el territorio nacional en áreas identificables denominadas “Áreas geoestadísticas”, con tres niveles de desagregación: estatal (AGEE), municipal (AGEM) y básica (AGEB), rural o urbana y descritas anteriormente.

Durante el proceso del análisis de la tipología de vivienda se observó áreas de manzanas en blanco o ausentes (sin información) que no contaban con información cartográfica y a su vez, algunos polígonos de la cartografía del censo de población y vivienda marcaban valor cero. Al analizar esta información con más detalle, se observó que corresponden a zonas de servicio que ocupaban el total de la manzana como son escuelas, unidades deportivas, áreas verdes, hospitales, etc., y por lo tanto no contaban con información sobre datos de vivienda (Figura 15).



Figura 15. Distribución de las manzanas con áreas que carecen de información.

Al nivel de tipología de vivienda se le agrego la cartografía del DENUE, específicamente la información de “Servicios con información complementaria tipo Área” (SIA) áreas verdes, camellones, escuelas, unidades deportivas, panteones etc., y al mismo tiempo se llevó a cabo la actualización y en algunos casos la digitalización de estas zonas en blanco o sin información, se conjuntaron las áreas por manzana de tipología de vivienda con las áreas de servicios e infraestructura generando un solo mapa. Así mismo, se digitalizaron algunas áreas faltantes dentro de la zona urbana, es importante mencionar que no se consideraron las áreas que no cuentan con clave de ageb y de manzana (Figura 16).

➤ Clasificación de servicios

Para realizar la clasificación de la infraestructura, primeramente se definió el concepto de la misma, utilizando varios conceptos, con el objetivo de proporcionar los criterios utilizados para clasificarla. Se denomina infraestructura urbana a aquella realización humana diseñada y dirigida por profesionales de arquitectura, ingeniería civil, urbanistas, etc., que sirven de soporte para el desarrollo de otras actividades y su funcionamiento, necesario en la organización estructural de las ciudades y o comunidades. El vocablo, utilizado habitualmente como sinónimo de obra pública por haber sido el Estado el encargado de su construcción y mantenimiento, en razón de la utilidad pública y de los costos de ejecución, generalmente elevados (Wikipedia, 2013), comprende lo siguiente:

- Las infraestructuras de edificación.
- Comercio.
- Industria.
- Salud: Hospitales, centros de salud.
- Educación: Colegios, institutos y universidades.
- Recreación: Parques y jardines.
- Deportivas: Campos deportivos, unidades deportivas, estadios.
- Transporte: Aeropuertos, línea de ferrocarril y puertos de abrigo.

Con la aplicación de la metodología arriba descrita y de acuerdo a la clasificación de la infraestructura se obtuvieron dos bases de información: la primera con información de infraestructura tipo área-polígono a nivel manzana, que muestra áreas que corresponden algún tipo de servicio, como por ejemplo, escuela, iglesia, centro comercial, unidad deportiva, área verde, etc., las cuales fueron clasificados en cinco clases: infraestructura del transporte, energética, edificaciones y áreas sin infraestructura. Y la segunda correspondiente a infraestructura tipo punto que literalmente contiene la ubicación puntual de la infraestructura (Tabla 13 y Figura 16).

Tabla 13. Infraestructura, según su tipo de servicio.

CLASE	TIPO	NOMBRE
Infraestructura del transporte	Aéreo	Aeropuerto
	Terrestre	Estación de Ferrocarril
	Marino	Puerto Abrigo
Infraestructura energética	Electricidad	Subestación CFE
Infraestructura de edificación	Salud	Hospital, Clínicas
	Educación	Escuela
		Iglesia
	Recreación	Parque
		Área Verde
		Sitio Arqueológico
	Deportiva	Campo deportivo
		Unidad Deportiva
	Comercial	Área comercial
		Centro Comercial
	Servicios	Cementerio
		Zona Militar
		Institución Pública
Industrial	Área Industrial	
	Banco de Material	
Sin Infraestructura	Otros	Área no urbanizada
		Proceso de urbanización

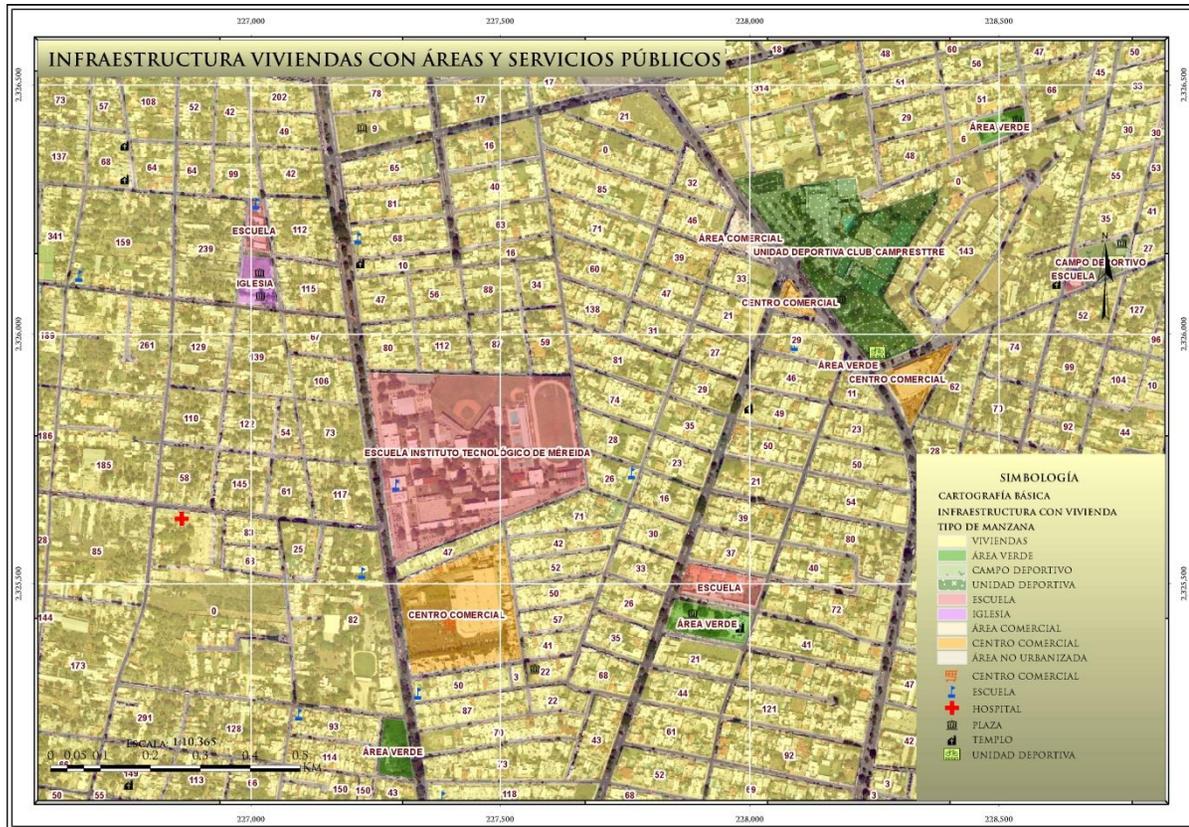


Figura 16. Mapa de tipología de vivienda por manzana con áreas y servicios públicos.

IV.2.1.3. Infraestructura de Vías de Comunicación.

La infraestructura de transporte constituye un elemento indispensable para el crecimiento económico, la competitividad y la integración social. El transporte carretero permite la comunicación y el intercambio, además de ser la principal forma para el desplazamiento de pasajeros y bienes a través del territorio nacional, lo que lo convierte en un instrumento básico para la economía y el bienestar social, como resultado se ven beneficiados todos los sectores tanto de la economía, salud, educación y seguridad. Si la conservación de los caminos y carreteras es la adecuada, los costos de transporte de personas, insumos y productos terminados serán decrecientes y crearán un estímulo para la expansión de mercados. Constantemente nuestro país es afectado por diferentes fenómenos de la naturaleza como son terremotos, incendios, inundaciones provocadas por tormentas o huracanes. Ante esta vulnerabilidad natural el Estado debe estar preparado para mitigar los efectos que impactan negativamente en el desarrollo de la sociedad y es indispensable que cuente con un buen sistema carretero que permita la comunicación entre las comunidades y las principales ciudades para atender las necesidades de las poblaciones en caso de desastre.

➤ Objetivo

Actualizar el nivel de caminos y carreteras federales, estatales, municipales, rurales y de cuota, así como asignar costo por kilómetro de carretera, con el objetivo de determinar la vulnerabilidad de las vías de comunicación de acuerdo a los peligros geológicos expuestos (procesos de remoción en masa y hundimientos) peligros hidrometeorológicos (huracanes, inundación, erosión costera).

➤ Método de Trabajo

El procedimiento para desarrollar el mapa de vías de comunicación está dividido en cuatro etapas: 1) Se hizo en la recopilación de información, integración, revisión y depuración de información proporcionada por INEGI, 2) se realizó la digitalización y actualización de caminos y carreteras recientes con el apoyo de SCT, 3) se asignó la clasificación del tipo de carretera, así como la asignación de costo por kilómetro de carretera con los lineamientos emitidos por la SCT y el IMT y 4) finalmente se obtuvo el mapa de vías de comunicación actualizado (Figura 17).



Figura 17. Diagrama de flujo del método de trabajo empleada para Infraestructura del Transporte.

➤ Análisis de Información

Para el desarrollo del nivel de vías de comunicación, se tomó como base la cartografía geoestadística urbana de caminos y carreteras correspondiente al Cierre Censo de Población y Vivienda 2010, organizada por entidad federativa y a su interior por localidad urbana, la cual está conformada por una base de datos vectoriales de carreteras, ejes viales y servicios con información complementaria de tipo línea (INEGI, 2010), misma que sirvió para generar el mapa preliminar de vías de comunicación.

En la Figuras 18 y 19 se muestra en detalle los distribuidores viales y libramientos aun no considerados dentro de la cartografía de INEGI, 2010.



Figura 18. Cartografía de carreteras federales y estatales de INEGI, 2010.

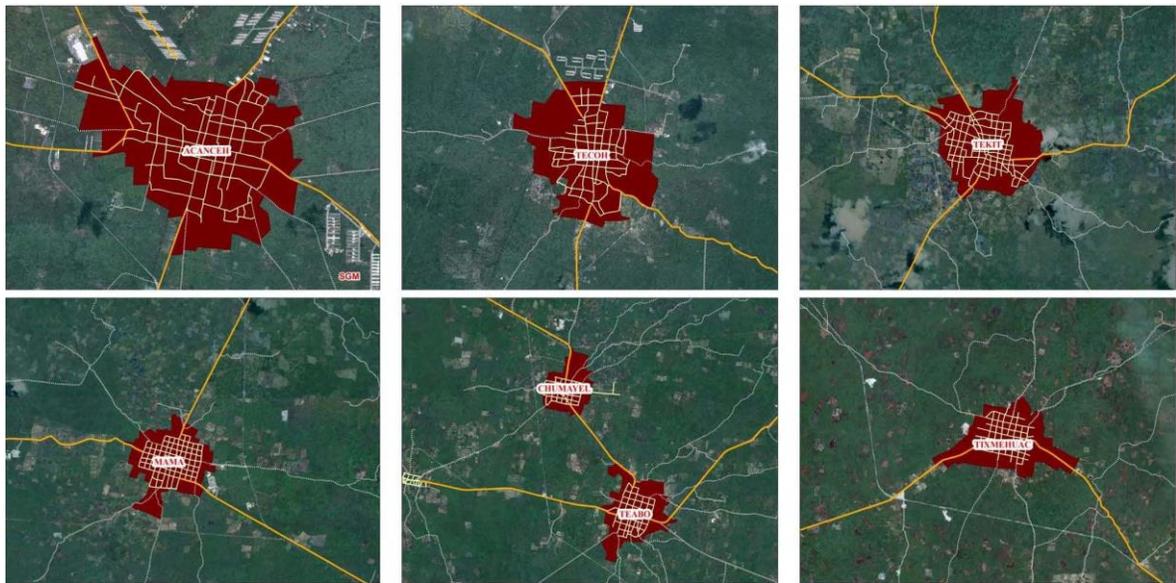


Figura 19. Cartografía de INEGI de la ruta de la carretera Mérida – Peto, INEGI 2010.

➤ Digitalización y Actualización

Para la actualización del mapa de vías de comunicación se llevó a cabo la digitalización de los caminos y carreteras más recientes con el objetivo de contar con un mapa que contenga las características y las condiciones físicas actuales. Como apoyo se utilizó el Atlas de la Red Carretera de México (SCT, 2013) que muestra la situación actual en materia de infraestructura carretera nacional y las principales características de la red carretera de los diferentes estados y municipios del país. También nos basamos en el servidor de Google Maps (2012), que contiene aplicaciones de mapas en la web que ofrece imágenes de mapas desplazables, fotos satelitales del mundo e incluso la ruta entre diferentes ubicaciones o imágenes a pie de calle para llevar a cabo la digitalización. Y como apoyo nos guiamos con un mapa impreso de la Guía Roji (versión 2012) que incluye los caminos y carreteras más recientes del estado de Yucatán.

Con el apoyo de estas herramientas se digitalizaron todos los caminos, carreteras, distribuidores viales y libramientos construidos a la fecha (Figuras 20 y 21).



Figura 20. Digitalización de carreteras, caminos y distribuidores viales, en el estado de Yucatán.

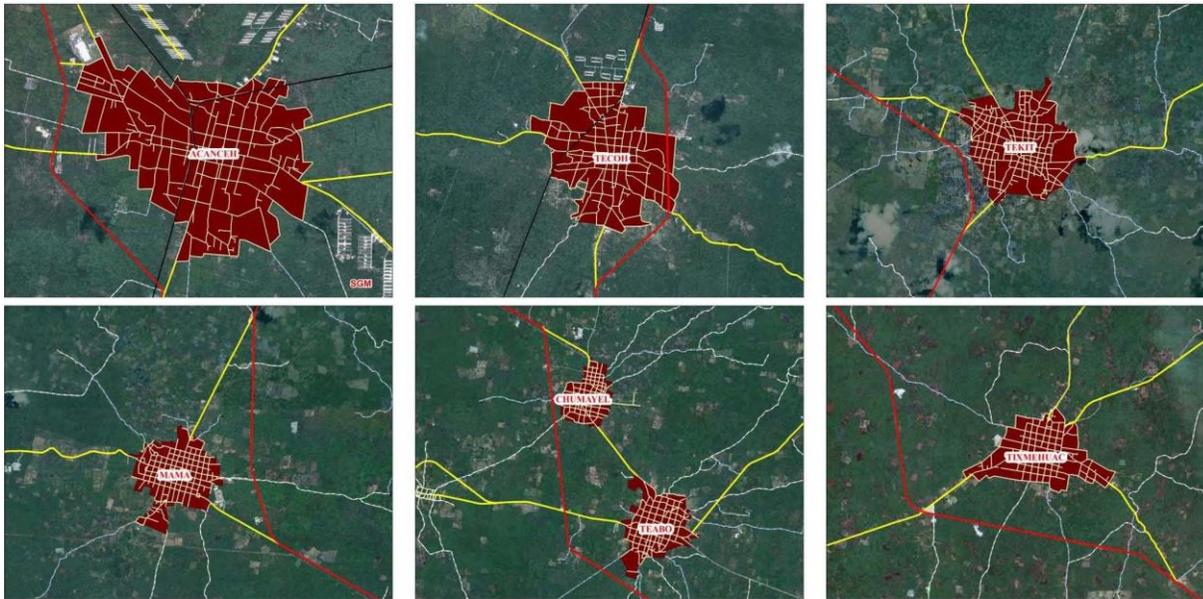


Figura 21. Digitalización de libramientos en zonas urbanas sobre la carretera Mérida - Peto.

➤ Clasificación

Posteriormente se realizó la clasificación de los caminos y carreteras con el apoyo de manuales de procedimientos emitidos por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (1991, 1997, 2008), lo cual incluye la descripción de caminos y carreteras federales, estatales, rurales, municipales y de cuota, así como la clasificación por su transitabilidad, aspecto administrativo, por su función TPDA, su funcionabilidad, así como por su peso y dimensiones. En seguida a los caminos y carreteras se le asignaron costos por mantenimiento acuerdo a los lineamientos establecidos en el Manual Estadístico del Sector de Transporte del Instituto Mexicano del Transporte (IMT, 2009). Donde emite los costos por tipo de carretera y tipo de terreno (plano, lomerío y sierra).

Carreteras. Vías de dominio y uso público proyectadas y construidas para la circulación de automóviles. Algunos denominan caminos a las vías rurales, mientras que el nombre de carreteras se aplica a caminos con características modernas destinadas al movimiento de un gran número de vehículos. La carretera se define como la adaptación de una faja sobre la superficie terrestre que llena las condiciones de ancho, alineamiento y pendiente que permite el rodamiento adecuado de los vehículos para los cuales ha sido acondicionada. En varias partes del mundo se clasifican de diferentes, pero en la práctica mexicana se puede distinguir varias clasificaciones: clasificación por transitabilidad, clasificación por su aspecto administrativo y clasificación técnica u oficial.

Clasificación por su transitabilidad. Corresponde a las etapas de construcción de las carreteras y se divide en:

- **Terracerías.** Cuando se ha construido una sección de proyecto hasta su nivel de subrasante transitable en tiempo de secas.
- **Revestida.** Cuando sobre la subrasante se ha colocado ya una o varias capas de material granular y es transitable en todo el tiempo.
- **Pavimentada.** Cuando sobre la subrasante se ha construido ya totalmente el pavimento o capa asfáltica.

Clasificación por aspecto administrativo. Se realiza de acuerdo a su función administrativa.

- **Federales.** Cuando son costeadas íntegramente por la federación y se encuentran a su cargo. La red de carretera federal es atendida por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) a través de la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC). Se ha dividido de acuerdo a su importancia, en corredores carreteros. La red básica fuera de corredores está conformada por aquellos caminos que comunican las capitales de los estados, las ciudades más importantes, los puertos y los cruces fronterizos. Y la red secundaria está integrada por carreteras y ramales cuyas influencia es regional o local.
- **Estatales.** Cuando son construidas por el sistema de cooperación a razón del 50% aportados por el Estado donde se construye y el 50% por la federación. Estos caminos quedan a cargo de las antes llamadas juntas locales de caminos.
- **Rurales.** Cuando son construidos por la cooperación de los vecinos beneficiados pagando estos un tercio de su valor, otro tercio lo aporta la federación y el tercio restante el Estado. Su construcción y conservación se hace por intermedio de las antes llamadas juntas locales de caminos y ahora sistema de caminos.
- **De cuota.** Las cuales quedan algunas a cargo de la dependencia oficial descentralizada Caminos y Puentes Federales (CAPUFE) y otras como las autopistas o carreteras concesionadas a la iniciativa privada por tiempo determinado, siendo la inversión recuperable a través de cuotas de paso.

Clasificación técnica oficial. Esta clasificación permite distinguir en forma precisa la categoría física del camino, ya que toma en cuenta los volúmenes de tránsito sobre el camino al final del periodo económico y las especificaciones geométricas aplicadas. En México la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) clasifica técnicamente a las carreteras de la siguiente manera:

1. **Clasificación en función al Tránsito Promedio Diario Anual.** De acuerdo a Instituto Mexicano del Transporte (2004), la clasificación para fines de proyecto geométrico en la normativa mexicana más reciente está en función del Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA), así las carreteras se clasifican en (Tabla 14):

Tipo A. Para tránsito promedio diario anual superior a superior a 3,000 vehículos, equivalente a un tránsito horario máximo anual de 360 vehículos o más. Estos caminos requieren de un estudio especial, pueden tener corona de dos o de cuatro carriles en un solo cuerpo designándoles A2 y A4 respectivamente.

Tipo B. Para un tránsito promedio diario anual de 1,500 a 3,000 equivalentes a un tránsito horario máximo anual de 180 a 360 vehículos.

Tipo C. Para un tránsito promedio diario anual de 500 a 1,500 vehículos, equivalente a un tránsito horario máximo anual de 60 a 180 vehículos.

Tipo D y E. Para un tránsito promedio diario anual de 100 a 500 vehículos, equivalente a un tránsito horario máximo anual de 6 a 60 vehículos.

Tabla 14. Clasificación en función al Tránsito Promedio Diario Anual.

CLASIFICACIÓN DE CARRETERAS EN FUNCIÓN DE TPDA
A4, Para un TDPA de 5 mil a 20 mil vehículos
A2, Para un TDPA de 3 mil a 5 mil vehículos
B, Para un TDPA de 1,500 a 3 mil vehículos
C, Para un TDPA de 500 a 1,500 vehículos
D, Para un TDPA de 100 a 500 vehículos
E, Para un TDPA de hasta 100 vehículos

El número de vehículos es total en ambas direcciones y sin considerar ninguna transformación de vehículos comerciales a vehículos ligeros. En México, en virtud a la composición promedio del tránsito en las carreteras nacionales, que arrojan un 50% de vehículos comerciales, de los cuales un 15% está constituido por remolques, se ha considerado conveniente que los factores de transformación de los vehículos comerciales a vehículos ligeros en caminos de dos carriles, sea de dos para terreno plano, de cuatro en lomerío y de seis en terreno montañoso (ITM, 2004).

2. Clasificación de acuerdo a su funcionalidad. Las normativas mundiales anteponen una clasificación funcional con el fin de definir la función deseada para la vía en el contexto de la red nacional de carreteras, proponiendo la siguiente clasificación funcional de las carreteras mexicanas considerando tres categorías: Troncales (o primarias), Arterias (o secundarias) y Alimentadoras (IMT, 2004).

a) Troncales o primarias. Son parte de corredores de transporte que unen centros de población importantes, generalmente de más de cincuenta mil (50,000) habitantes, cuyas actividades generan o atraen viajes de largo itinerario. A su vez, se subdividen en:

Autopistas (AP). Carreteras de sentidos separados físicamente por una faja central o mediana, control total de acceso, dos (2) o más carriles por sentido de circulación y velocidad de proyecto en el rango de ochenta (80) Km/h a ciento diez (110) Km/h. Su TDPA son mayores a cinco mil (5,000) vehículos (IMT, 2004).

Vías rápidas (VR). Carreteras de sentidos separados físicamente por una faja central o mediana, y velocidad de proyecto en el rango de ochenta (80) Km/h a ciento diez (110) Km/h; y que en relación con uno o varios de los demás elementos (control de acceso, número de carriles por sentido, etc.) no cumple con los estándares de las autopistas. Sus TDPA va de tres mil (3,000) a cinco mil (5,000) vehículos (IMT, 2004).

b) Arterias o secundarias. Son vías que unen poblaciones medianas o pequeñas con los nodos de la red troncal, que aportan gran proporción de los viajes de mediano y corto itinerario. Tienen un sólo cuerpo, control parcial de acceso, un carril por sentido de circulación, y velocidad de proyecto en el rango de setenta (70) Km/h a ciento diez (110) Km/h. Su TDPA van de mil quinientos (1,500) a tres mil (3,000) vehículos (IMT, 2004).

c) Alimentadoras. Son aquéllas utilizadas por viajes de muy corto itinerario. Se subdividen en:

Colectoras (C). Carreteras de un sólo cuerpo, control parcial de acceso, un carril por sentido de circulación, y velocidad de proyecto en el rango de sesenta (60) Km/h a cien (100) Km/h. Su TDPA va de quinientos (500) a mil quinientos (1,500) vehículos (IMT, 2004).

Locales (L). Carreteras de un sólo cuerpo, sin control de acceso, un carril por sentido de circulación, y velocidad de proyecto en el rango de cincuenta (50) Km/h a ochenta (80) Km/h. Su TDPA va de cien (100) a quinientos (500) vehículos (IMT, 2004).

Brechas (Br). Carreteras de un sólo cuerpo, sin control de acceso, un carril de circulación, y velocidad de proyecto en el rango de treinta (30) Km/h a setenta (70) Km/h. Su TDPA son menores a cien (100) vehículos (IMT, 2004).

3. Clasificación de acuerdo a pesos y dimensiones. Estas tres categorías (troncales, arterias y alimentadoras) pueden homologarse con las tres categorías (primarias, secundarias y alimentadoras) descrita en el Reglamento de pesos y Dimensiones, donde se clasifican las carreteras en cinco categorías de acuerdo a sus especificaciones (IMT, 2004). Este reglamento clasifica a las carreteras en ET, A, B, C y D (IMT, 2004).

Carreteras Tipo ET. Son aquéllas que forman parte de los ejes de transporte establecidos por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), cuyas características geométricas y estructurales permiten la operación de todos los vehículos autorizados con las máximas dimensiones, capacidad y peso, así como de otros que por interés general autorice la SCT, y que su tránsito se confine a este tipo de caminos (IMT, 2004).

Carreteras Tipo A. Son las que por sus características geométricas y estructurales permiten la operación de todos los vehículos autorizados con las máximas dimensiones, capacidad y peso, excepto aquellos que por sus dimensiones y peso sólo se permitan en las carreteras tipo ET (IMT, 2004).

Carreteras Tipo B. Se refiere a las que conforman la red primaria y que atendiendo sus características geométricas y estructurales prestan un servicio de comunicación interestatal, además de vincular el tránsito (IMT, 2004).

Carreteras Tipo C. Red secundaria.- Son vías que atendiendo a sus características geométricas y estructurales, principalmente prestan servicio dentro del ámbito estatal con longitudes medias, estableciendo conexiones con la red primaria (IMT, 2004).

Carreteras Tipo D. Red alimentadora.- Son las que atendiendo sus características geométricas y estructurales, principalmente prestan servicio dentro del ámbito municipal con longitudes relativamente cortas, estableciendo conexiones con la red secundaria (IMT, 2004).

Asignación de costos de acuerdo al tipo de terreno

A la base de datos se le asignaron los costos de acuerdo a las características del tipo de terreno. En este caso la SCT (1991), describe el tipo de terreno como un factor que influye significativamente en las características geométricas de una carretera, La normativa mexicana considera tres tipos de terreno: plano, lomerío y montañoso. Esta lo define en términos de las pendientes y las posibilidades de los vehículos pesados de circular por ellas. La pendiente sostenida es aquélla que es igual o superior a 3% y que tiene longitud igual o superior a 800 m (IMT, 2004)

Las carreteras propuestas son construidas considerando el relieve del terreno natural donde se alojan, de acuerdo con la siguiente clasificación:

Plano. Es la combinación de alineamientos vertical y horizontal que permite a los vehículos pesados mantener aproximadamente la misma velocidad de los ligeros. Las pendientes están limitadas a 1 o 2 % (IMT, 2004).

Lomerío. Es la combinación de alineamientos vertical y horizontal que obliga a los vehículos pesados a reducir sus velocidades significativamente por debajo de los vehículos de pasajeros o ligeros, sin llegar a la máxima velocidad que pueden alcanzar en pendientes ni ocasionar el que aquellos operen a velocidades sostenidas en rampa por un intervalo de tiempo largo.

Montañoso. Es la combinación de alineamientos vertical y horizontal que obliga a los vehículos pesados a circular a velocidad sostenida en rampa durante distancias considerables o a intervalos frecuentes (IMT, 2004).

Para asignarle costos a las vías de comunicación, se tomó en cuenta el tipo de carretera (Tabla 15), posteriormente se obtuvo la longitud de la misma en zona de peligro y su grado del mismo para obtener el Valor de Infraestructura Expuesto (VIE).

Tabla 15. Clasificación de costos para construcción de carreteras.

COSTOS PROMEDIO DE INFRAESTRUCTURA CARRETERA POR KILÓMETRO DE CARRETERA					
TIPO DE CARRETERA			COSTOS POR TIPO DE TERRENO (EN MILES DE PESOS)		
			PLANO	LOMERÍO	MONTAÑA
Cuatro Carriles	A4	22 m de Corona	22647	43028	73601
Dos Carriles	A2	11 m de Corona	14720	22647	45293
Dos Carriles	B	9 m de Corona	5706	7633	10523
Dos Carriles	C	7 m de Corona	4817	5706	8597
Un Carril	E o Rural	4 m de Corona	482	963	1408

Fuente: SCT-IMT, 2009. Manual Estadístico del Sector Transporte.
Cifras actualizadas mediante el deflactor implícito del PIB. Para las carreteras A4-A2, se realizó una consulta para conocer los precios en 2003.

La determinación del riesgo y el cálculo del valor de la infraestructura expuesta para este Atlas, se realizó con el apoyo de un Sistema de Información Geográfica, con lo que, los factores de vulnerabilidad y costo, se conjuntaron en un sólo factor y se realizó una sobreposición con el nivel de peligro para obtener el riesgo geológico de las zonas y/o localidades del Estado.

Finalmente se obtuvo un mapa de vías de comunicación actualizado a la fecha, que contiene todos los caminos y carreteras del estado de Yucatán (Figura 22).



Figura 22. Mapa de caminos y carreteras actualizado del estado de Yucatán.

IV.3. Elaboración del Sistema de Información Geográfica

Como parte de los trabajos elaborados del Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales del Estado de Yucatán, el Servicio Geológico Mexicano (SGM), la Gerencia de Geohidrología y Geología Ambiental y la Subgerencia de Peligros Geológicos, han realizado a través de los años la puesta en marcha del funcionamiento de Sistemas de Información Geográfica (SIG) mediante la aplicación de ArcGIS en sus diferentes versiones, agrupando un conjunto de herramientas para la captura, análisis, diseño e impresión de información geoespacial, que permiten el fácil manejo y la integración de datos en productos elaborados como mapas temáticos (Peligros Geológicos e Hidrometeorológicos) e imágenes raster (Landsat, Google etc).

IV.3.1. Estructura Cartográfica

La estructura cartográfica es la base para la representación de la información espacial del proyecto que comprende el caneavá, la cuadrícula y la gradícula. Sobre de ella se definen los temas y se construyen de acuerdo al tipo de elementos gráficos requeridos como son puntos, líneas, polígonos o celdas. Una vez construidos cada mapa temático tienen una estructura de sus atributos y en su conjunto conforman una base de datos de acuerdo a la estructura de un sistema de información geográfica (ESRI, 1999 in SEDESOL-COREMI, 2004). (Figura 23).

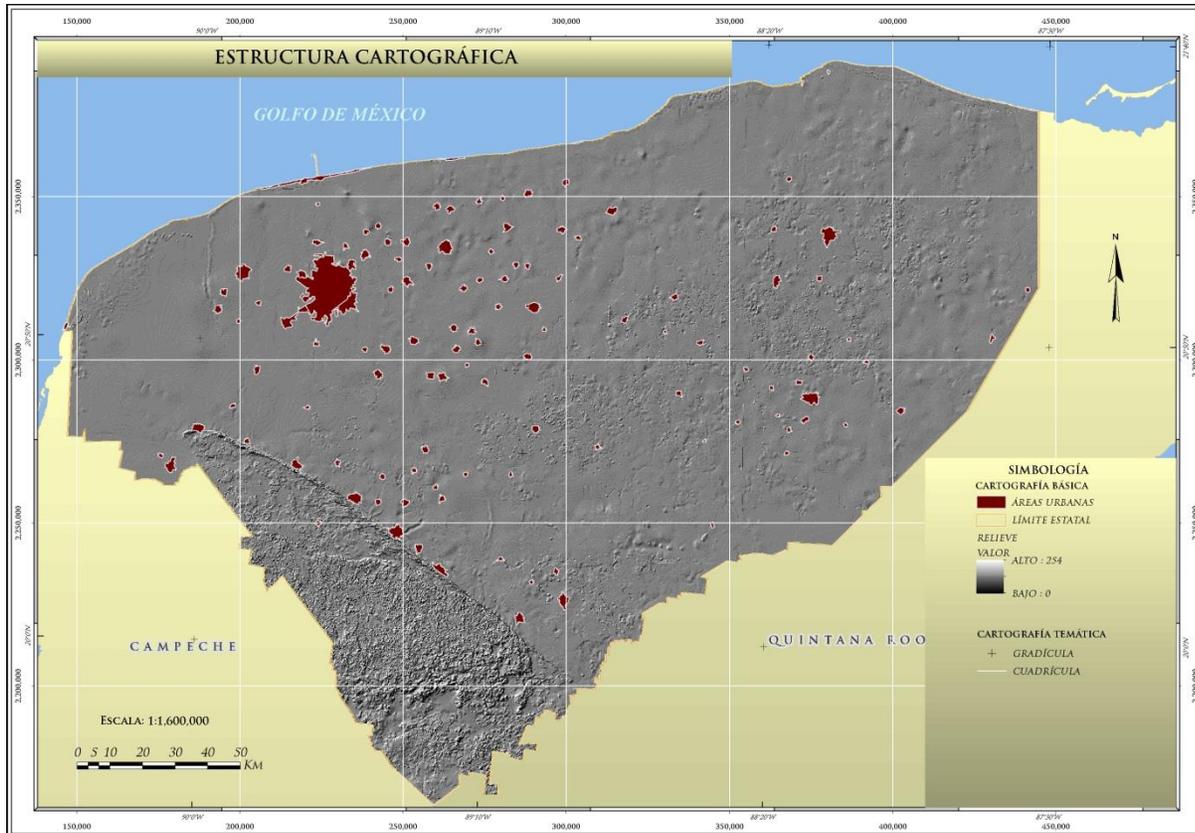


Figura 23. Estructura cartográfica del proyecto que comprende la gradícula, donde se representa por medio de la intersección de cruces de la latitud y longitud mostrada en grados y minutos (sexagesimales) y cuadrícula donde se representa por medio de intersección de líneas que forman cuadrados con áreas iguales que muestran unidades métricas en metros.

▪ Formato Cartográfico

El formato cartográfico para el Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales del Estado de Yucatán como se mencionó antes se tomó de la cartografía del INEGI a escala 1:50,000 con los siguientes parámetros.

▪ Proyección Cartográfica

La proyección utilizada para la cartografía base, temática y de peligros es la *Universal Transverse de Mercator* UTM comprendiendo las zonas 15 y 16 definidas con las siguientes características:

- Unidades en metros
- Zona definida a cada 6° de longitud
- Datum WGS84
- Elipsoide WGS84
- Origen de coordenadas en x: 500,000 metros

▪ Escala del Proyecto

La escala del proyecto para el ingreso de la información es de 1:1,000,000 para los mapas de salida de impresión, derivado de la compilación de las cartas 1:50,000 y la unión de la información vectorial.

▪ Base de Datos, Diccionario y Metadatos

El conjunto de información geoespacial temática de los diversos tipos de fenómenos y peligros a que está expuesto el Estado, se encuentra ordenada en un SIG en formato “*shapefile*”, el cual a su vez está ligado a una base de datos en formatos *.dbf y *.excell, que muestra las características y atributos de cada capa de información considerando algunos datos bibliográficos y los tomados a partir del trabajo de campo por medio de fichas de control (anexo 2). Con lo que respecta a la descripción básica de los metadatos en cada una de las capas de información, esta se ha definido a través del programa que utiliza INEGI: el Metalite.

▪ Canevá

El canevá son límites de la carta o mapa que representan los elementos geográficos del estado de Yucatán, definidos por coordenadas geográficas, las cuales son:

- 21 grados 40 minutos latitud norte
- 19 grados 29 minutos latitud norte
- 90 grados 23 minutos longitud oeste
- 87 grados 30 minutos longitud oeste

Los límites de la carta en sistema UTM en metros son los siguientes:

- X mínima: 143091
- X máxima: 446915
- Y mínima: 2157571
- Y máxima: 2402677

Este dato es muy importante ya que es la base a partir de la cual se construyen y georeferencian cada uno de los mapas temáticos.

▪ Cuadrícula

La cuadrícula es una malla subdividida de manera regular dentro del cuerpo de la carta o mapa y que consiste en líneas paralelas tanto verticales como horizontales separadas a cada 50000 metros en sus ordenadas en X y Y. Esta cuadrícula está definida por medio del datum WGS84 y el elipsoide del mismo nombre. En los mapas las líneas de la cuadrícula son representadas por líneas continuas en color blanco, con su leyenda correspondiente en metros alrededor del mapa.

▪ Gradícula

La gradícula consiste en una serie de puntos de intersección en forma de cruz en color negro que atribuye las coordenadas geográficas del mapa, escritos en los bordes del mismo en color negro representados en unidades sexagesimales (° ‘ ”).

▪ Mapa Base

La base de la representación cartográfica del SIG del Atlas de Peligros de Yucatán, está conformada por la unión de 59 cartas topográficas escala 1:50,000 elaboradas por el INEGI (Figura 24). Además de datos vectoriales de una índole de temas de información como vías de comunicación, manzanas con tipología, localidades, zonas urbanas e infraestructura urbana a nivel estatal en formato “*shapefile*” (.shp). También se incorporó la cartografía temática del SGM como las cartas geológico-minera del Estado a escala 1:250,000.

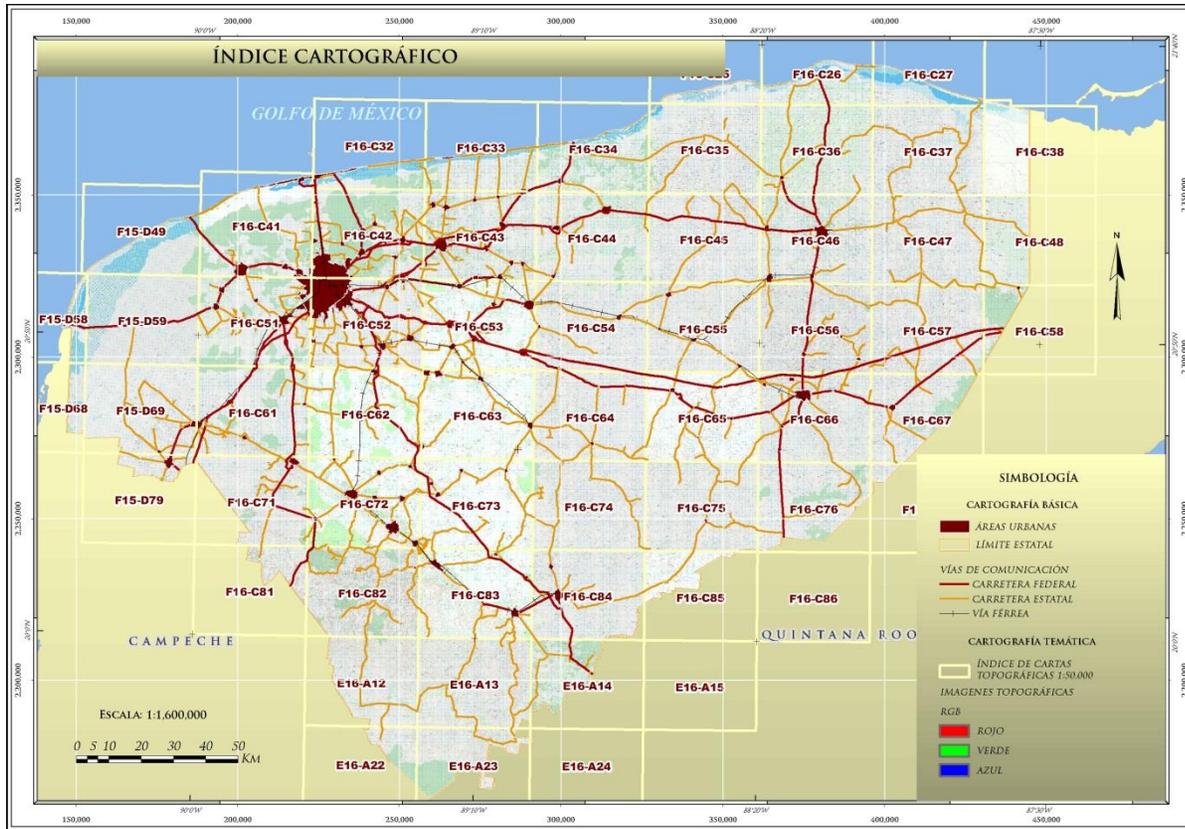


Figura 24. Índice cartográfico que muestra las 59 cartas topográficas que cubren al Estado.

IV.3.2. Interfaz del SIG

El diseño estructural que compone la interfaz gráfica del SIG esta compuesta por los menús principales de: niveles topográficos, niveles temáticos, imágenes, fenómenos geológicos y fenómenos hidrometeorológicos; donde cada uno a su vez contiene diversos subniveles de información (Figura 25)



Figura 25. Estructura del Sistema de Información Geográfica.

■ **Topografía**

En este menú se alojarán los mapas de tipo base como son el mapa de altimetría con sus curvas de nivel correspondientes a cada 10 metros y el relieve hipsométrico y la planimetría con los elementos que conforman las obras hechas por el hombre a nivel del Estado (Figura 26).

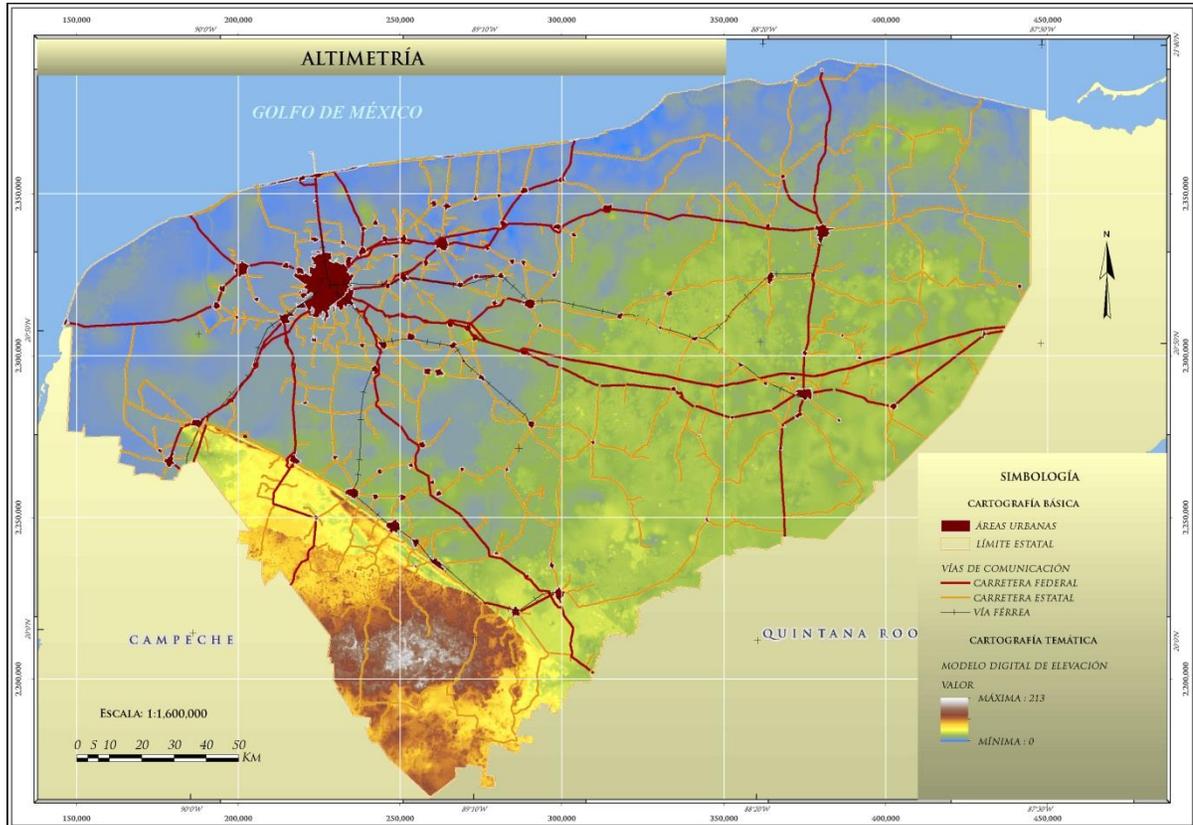


Figura 26. Mapa altimétrico de Yucatán.

■ **Temáticas**

Esta parte contendrá los elementos geográficos del medio físico donde se extienden los procesos dinámicos ambientales que interfieren en el hombre y en sus actividades económicas como son: la geología, edafología, vegetación, cuencas hidrográficas, climas, formas del relieve y fisiografía. Estos factores físicos cuentan con su propia área de georeferenciación única y con su tabla de atributos respectiva.

■ **Imágenes**

Como insumo de gran importancia, se muestran datos de tipo especial desde plataformas aerotransportadas o a nivel satelital, que a su vez los datos son procesados en tierra para dar información en formato *raster* para la realización de estudios y evaluación medioambiental. Entre los productos que se encuentran en este contenido están la imagen google, ortofotografías (Figura 27), sistemas de modelación como el modelo digital de elevación, modelo de pendientes y Landsat escala 1:20000 adquiridas por INEGI entre los años de 1995 a 2005.

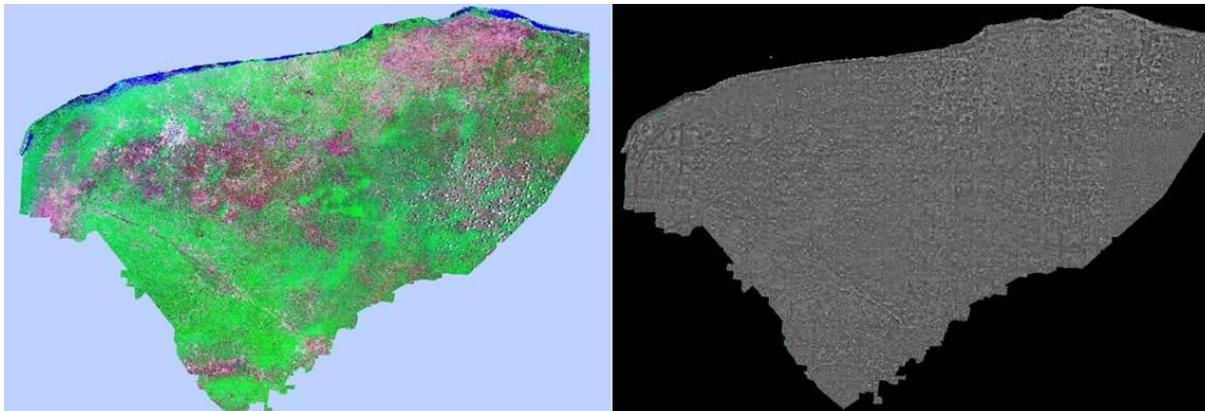


Figura 27. Imagen Landsat y mosaico de ortofotos del estado de Yucatán

▪ Fenómenos Geológicos

Esta estructura tiene por objetivo presentar los diferentes fenómenos geodinámicos que interactúan en la población y en su infraestructura a través de la identificación y ubicación de peligros para su análisis.

Este menú se subdivide en cuatro niveles: el de fallas y fracturas, donde se representa la información del grado de fracturamiento así como su intensidad en la roca; el de hundimientos, donde representa el grado susceptible al colapso de la roca por procesos hidrogeoquímicos, el de procesos de remoción en masa, que presentan la cartografía de las áreas de colapso por caída de bloques y; el de sismicidad donde se ubica el tipo de aceleración sísmica y la ubicación de los diferentes epicentros de la región.

▪ Fenómenos Hidrometeorológicos

En este apartado se asocian los datos georeferenciados que ubican e identifican los diferentes fenómenos atmosféricos que se relacionan al peligro por inundaciones, ciclones tropicales, sequías, incendios forestales, erosión y erosión costera, apoyados por mapas temáticos de importancia como los mapas de precipitación acumulada anuales, temperaturas máxima, media y mínima, granizadas y tormentas

V. ASPECTOS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

V.1. Localización

El estado de Yucatán se ubica al sureste de la República Mexicana, en la Península del mismo nombre. Geográficamente se encuentra entre las coordenadas extremas 21°36' y 19°32' de latitud norte y los meridianos 87°32' y 90°25' de longitud oeste. Está conformado por 106 municipios que se distribuyen en una superficie territorial de 39,524 Km² que representa el 2% de la superficie total del país ubicándolo en el lugar número 21 de los estados de México. La entidad colinda al Norte con el Golfo de México; al Este con Quintana Roo; al Sur con Quintana Roo y Campeche; y al Oeste con Campeche y el Golfo de México (INEGI³, 2011); (Figura 28).



Figura 28. Localización del estado de Yucatán.

V.2. Vías de Comunicación

▪ Carreteras

Yucatán posee una excelente red vial que permite una buena comunicación dentro del Estado y con el resto del país. La red de caminos está conformada por carreteras federales y estatales de dos, cuatro o más carriles, las cuales se interconectan con otros tramos para comunicar todas las poblaciones de la entidad. La longitud total de estas vías es de 12,325 Km de los cuales 5,854 Km son carreteras de dos carriles, 271 Km son de cuatro carriles y 154 Km son autopistas de cuota (SCT¹, 2009; Tabla 16).

Tabla 16. Longitud y características de la red de carreteras del estado de Yucatán.

LONGITUD Y CARACTERÍSTICAS DE LA RED DE CARRETERAS. SEGÚN SUPERFICIE DE RODAMIENTO Y RED CARRETERA TRONCAL DE CUOTA POR ENTIDAD FEDERATIVA SEGÚN NÚMERO DE CARRILES (Km)						
TOTAL	BRECHAS MEJORADAS	REVESTIDA	PAVIMENTADA			CUOTA
			TOTAL	DOS CARRILES	CUATRO A MAS CARRILES	CUATRO A MAS CARRILES
12,325	3,643	2,557	6,125	5,854	271	154

Fuente: SCT¹, 2009. Anuario Estadístico. Infraestructura Carretera.

Una de las principales vías del Estado es la carretera federal No. 180, la cual pertenece a uno de los catorce corredores troncales denominado corredor Puebla-Progreso (SCT¹, 2009). Esta carretera proviene desde Puebla pasando por Córdoba Veracruz, Villahermosa, Tabasco y luego se une al norte con la ciudad de Campeche y en seguida ingresa al Estado por la localidad Halachó, sigue hacia Maxcanú, Chocholá, Umán, llega a Mérida (Fotografía 9), continúa a Kanasín, Tahmek, Kantunil, Piste, Kaua, Cuncunul, se enlaza con Valladolid, después se dirige a Chemax y sale del Estado hacia Cancún, Quintana Roo. En Kantunil se inicia la autopista que enlaza a la entidad con la ciudad de Cancún, con un trazo similar al de la carretera No. 180 (API, 2010).



Fotografía 9. Carretera No 180 comunica a la ciudad de Mérida.

La carretera federal No. 261 llega hasta la ciudad de Progreso pasando por Mérida, Umán, Muna, Santa Elena, e ingresa al Estado por la localidad San Antonio Yaxche, al suroeste de la entidad. La carretera No. 295, se ubica en la porción oriental con una dirección sur a norte, ésta vía comunica las ciudades de Valladolid, Tizimín y termina en Río Lagartos. En la cabecera municipal de Muna se enlaza la carretera federal No. 184 que viene de Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo. En el territorio Yucateco comunica las localidades de Tzucacab, Tekax, Oxkutzcab y Ticul. Otra carretera que cruza por Mérida es la federal No. 281 que inicia en la localidad de Celestún, pasa por Hunucmá y Mérida. La carretera federal No. 176 Inicia en Mérida pasa por Motul, Cansahcab, Dzidzantún, Dzilam de Bravo y Tizimín. Además la entidad tiene una buena red de carreteras estatales y terracerías. La carretera Mérida-Progreso la cual corresponde a un sistema carretero que conecta la capital con el puerto más importante del Estado y remata en el denominado Puerto, permite la operación marítima comercial y turística (Figura 29).



Figura 29. Distribución de vías de comunicación en el estado de Yucatán.

▪ Ferrocarril

La línea de ferrocarril del estado de Yucatán fue concesionada a la compañía Ferrocarriles Chiapas Mayab, S.A. de C.V. (FCCM, 2010), está cruza de norte a sur y de oriente a poniente, comunicando las principales ciudades y puertos de la entidad (Fotografía 10). Esta empresa es una línea de ferrocarril regional ubicada entre los estados de Yucatán, Campeche, Tabasco, Veracruz, Oaxaca y Chiapas. La red principal y sus ramas adyacentes, conectan las poblaciones más importantes tales como Mérida, Campeche y Coatzacoalcos a lo largo de la costa del Golfo de México con Ixtepec, Tapachula y Ciudad Hidalgo a lo largo de la costa del Océano Pacífico (UDLAP, 2011; Admin. C.S., 2009; Figura 30).



Fotografía 10. Ferrocarriles Chiapas Mayab S.A. de C.V.



Figura 30. Distribución de la red ferroviaria en el sureste de México.

De acuerdo a Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT¹, 2009), la concesión de la red ferroviaria del estado de Yucatán fue otorgada a la empresa Ferrocarriles Chiapas Mayab, S.A. de C.V, para servicio de carga durante los próximos 30 años a partir de la fecha autorizada. En la tabla 17 se muestra la vía concesionada, el tipo de servicio que se le permite a dicha vía, la longitud, el monto por el cual fue autorizada y el plazo de ejecución de la concesión (UDLAP, 2011).

Tabla 17. Concesión del sistema ferroviario del sureste de México.

CONCESIONES Y/O ASIGNACIONES OTORGADAS POR LA SCT EN EL SISTEMA FERROVIARIO DEL SURESTE						
CONCESIONARIO	VÍA CONCESIONADA	SERVICIO	KILOMETROS	FECHA	MONTO (MDP)	PLAZO (AÑOS)
Ferrocarril Chiapas-Mayab S.A. de C.V.	Unidad Ferroviaria Chiapas-Mayab	Carga	1,550	26 Agosto de 1999	141	30

Fuente: SCT¹, 2009. Anuario Estadístico. Transporte Ferroviario.

Dentro del Estado la línea de ferrocarril cubre una extensión de 609.4 Km de longitud, de las cuales 544.1 Km corresponden a vías troncales y ramales, 40.9 Km a vías secundarias y 24.4 a líneas particulares (SCT1, 2009), (Tabla 18). La línea férrea proviene de la ciudad de Campeche, corre paralelamente a la carretera federal número 180, entra a la entidad por el suroeste en la estación Halachó, después de pasar por varias estaciones, llega a la ciudad de Mérida. De aquí se prolonga hacia el norte para comunicar a Progreso (API, 2010).

Tabla 18. Longitud y características de las vías del ferrocarril del estado de Yucatán.

LONGITUD DE VÍAS FÉRREAS EXISTENTES EN EL ESTADO DE YUCATÁN SEGÚN TIPO DE VIA (KILOMETROS)			
TOTAL	TRONCALES Y RAMALES	SECUNDARIAS	PARTICULARES
609.4	544.1	40.9	24.4

Fuente: SCT¹, 2009. Anuario Estadístico. Transporte Ferroviario.

▪ Aeropuertos

El aeropuerto internacional “Lic. Manuel Crescencio Rejón” es administrado por ASUR (Aeropuertos del Sureste), se ubica al sur de la ciudad de Mérida, Yucatán. A nivel nacional el aeropuerto de Mérida ocupa el decimo lugar de las terminales aéreas y es considerado el segundo más importante de la región sureste, con un registro de 1’065, 461 pasajeros en el 2009 lo que equivale al 1.4% de la relación nacional (SCT1, 2009). La terminal aérea tiene una extensión de 253 mil metros cuadrados, con una plataforma de 96 mil m² y 90.23 m² de rodaje (SCT1, 2009). Cuenta con dos pistas preparadas para el aterrizaje y despegue de las aeronaves con dimensiones, orientación y espacios aéreos adecuados para las operaciones aéreas. Una pista con orientación casi norte-sur de 2,300 metros de longitud y otra de orientación sensiblemente este-oeste de 3,200 metros de largo, ambas con 45 metros de amplitud (Figura 31).

Sus instalaciones tienen capacidad de pista de 30 operaciones por hora para aviones grandes como el Boeing 747-400 y 777-300 (ASUR, 2011). La torre de control encargada del tráfico aéreo nacional, está bajo la jurisdicción de Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano, la cual proporciona servicios para la ayuda a la navegación aérea de las redes de telecomunicaciones aeronáuticas y del control de tránsito aéreo (SENEAM, 2011).



Figura 31. Aeropuerto internacional de la ciudad de Mérida, Yucatán.

La terminal de pasajeros cubre una superficie de 1,517 m², está compuesta por un edificio de dos plantas con áreas públicas y privadas. La planta baja cuenta con oficinas administrativas de las aerolíneas, mostradores para documentación, módulos de información y atención a clientes (documentación, manejo reclamo de equipaje nacional e internacional). Oficinas de migración y áreas de inspección de pasajeros. Salas de espera con restaurantes, servicios bancarios sanitarios y teléfonos públicos para personas discapacitadas. También cuenta con módulos de seguridad y seis salidas de emergencia, dos en ambos costados del edificio y cuatro en la entrada principal y estacionamiento amplio con espacio para 450 vehículos. La planta superior se encuentra conectada internamente por pasillos de circulación que dan acceso a los vestíbulos, salas de espera, áreas comerciales, control y revisión de equipaje de mano, así como servicios públicos (baños y teléfonos). Las compañías aéreas que operan son Aeromar, Aeroméxico, Aerolitoral, Magnicharters, Viva Aerobus, Volaris, Continental Airlines, Delta Air Lines, Atlantic Southeast Airlines, Neos y Skyservice (ASUR, 2011; Fotografía 11).



Fotografía 11. Aeropuerto Internacional “Lic. Manuel Crescencio Rejón” de Mérida Yucatán.

El aeropuerto internacional de Kaua mejor conocido como la terminal aérea de Chinchén Itzá, se ubica en el pequeño poblado de Kaua a 15 kilómetros al sureste de la zona arqueológica (ASUR, 2011), a 23 kilómetros de Pisté y 29 de Valladolid, exactamente a la altura del kilómetro 132 de la carretera Federal No. 180 Mérida-Valladolid. El aeropuerto tiene una pista de 3.2 kilómetros de largo por 45 metros de ancho con orientación sensiblemente este-oeste, franjas de seguridad de 65 metros de cada lado, plataforma de operaciones con tres posiciones, dos calles de rodaje, caminos de acceso y estacionamiento de vehículos (Figura 32). Sus instalaciones tienen capacidad para operar aviones grandes procedentes de los vuelos nacionales e internacionales (Mérida, 2000).



Figura 32. Aeropuerto Kaua, ubicado en el kilómetro 132 carretera Mérida-Valladolid.

Actualmente el aeropuerto de Kaua se encuentra cerrado y abandonado. La aerolínea Mayair que operaba en estas instalaciones cerró sus operaciones. Solamente se encuentra bajo cuidado del personal de Sagarpa, IMN (Inmigración) y Aduana México ya que el aeropuerto es operado por el gobierno del estado de Yucatán, quien financia todos los gastos generados en el inmueble (FSMEX, 2011; Fotografía 12).



Fotografía 12. Aeropuerto Kaua, ubicado cerca de la zona arqueológica de Chichén Itzá.

▪ Aeródromos

Actualmente sólo dos sitios tienen autorización para el aterrizaje de aviones en el Estado (los aeropuertos de Mérida y Kaua). Sin embargo se tiene registro de por lo menos 20 aeródromos o pistas que funcionaron en las dos últimas décadas y que fueron inhabilitadas por el ejército. Según registros de la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA) y de la Procuraduría General de la República (PGR) a finales de los años setenta, principios de los ochenta y parte de los noventa, la aviación privada tuvo su apogeo en la entidad y se habilitaron varias pistas de aterrizaje en ranchos y comunidades del interior del Estado. Los registros oficiales indican que las aeropistas (ahora desaparecidas), se ubicaban en Maní, Chichén Itzá en Piste, Maxcanú, Tabi, Santa Rosa, Chocholá, Nohalal-Tekax y Tzucacab. También en Tizimín y San Marcos Macari, ranchería cercana a Panabá. En ocasiones se utilizaron caminos rurales como pistas de aterrizaje, entre estos figuran Catmís, Hobonil, Dzonot Carretero, Becanchén, Kakalná comisaria de Tzucacab y ejido Trapiche Justicia Social. Y por último en Misnebalam a 10 Km de la colonia Yucatán en la ciudad de Mérida (Diario de Yucatán, 2011).

▪ Puertos

La margen costera del estado de Yucatán cuenta con una extensión litoral de 378 kilómetros que inicia en Celestún y se prolonga en dirección noreste hacia Yucalpetén, donde línea marginal cambia de dirección sensiblemente hacia el oriente y se extiende hasta El Cuyo. Sobre esta margen costera se distribuyen 12 puertos marítimos destinados para actividades específicas como zonas turísticas, comerciales y pesqueras, estos son de oeste a este: Celestún, Sisal, Chuburná, Yucalpetén, Progreso, Telchac, Chabihau, Dzilam de Bravo, San Felipe, Ría Lagartos, Las Coloradas y El Cuyo (SCT1, 2009 y API, 2009-2014; Figura 33).



Figura 33. Puertos turísticos, comerciales y pesqueros del estado de Yucatán.

El Puerto Progreso es un puerto de altura ya que atiende embarcaciones grandes entre puertos, terminales marinas o nacionales con puertos del extranjero, los puertos de cabotaje se encuentran en Celestún, Sisal, Chuburná, Telchac, Chabihau, Dzilam de Bravo, San Felipe, Río Lagartos y El Cuyo. Los puertos de altura y cabotaje son Yucalpetén, Progreso y Las Coloradas, los puertos que cuentan con terminal para pasajeros son Progreso y Dzilam de Bravo (SCT1, 2009). Los puertos comerciales se encuentran en Puerto Progreso y Las Coloradas; los puertos turísticos-pesqueros son Celestún, Sisal, Chuburná, Yucalpetén, Progreso, Telchac, Chabihau, Dzilam de Bravo, San Felipe, Río Lagartos, Las Coloradas y El Cuyo (SCT1, 2009 y API, 2009-2014; Tabla 19).

Tabla 19. Puertos del estado de Yucatán, según tipo de puerto y actividad portuaria.

SISTEMA PORTUARIO DEL ESTADO DE YUCATÁN								
PUERTO	TIPO DE PUERTOS					PRINCIPAL ACTIVIDAD		
	API	ALTURA	CABOTAJE	ALTURA Y CABOTAJE	TERMINAL	COMERCIAL	PESQUERA	TURÍSTICA
Celestún			x				x	x
Sisal			x				x	x
Chuburná			x				x	x
Yucalpetén		x		x			x	x
Telchac			x				x	x
Progreso	x	x		x	x	x		x
Chabihau			x				x	
Dzilam de Bravo			x		x		x	x
San Felipe			x				x	x
Río Lagartos			x				x	x
Las Coloradas		x		x		x	x	
El Cuyo			x				x	x

Fuente: SCT¹, 2009. Anuario Estadístico. Transporte Marítimo y Puertos.
API, 2009-2014. Programa maestro de Desarrollo de Puerto Progreso y Puertos Pesqueros de Yucatán.

▪ **Puerto Progreso**

El Puerto Progreso con vocación turística y comercial es el más importante del estado de Yucatán, se ubica al norte del Estado en las coordenadas geográficas 21°17' de Latitud Norte y 89°40' de Longitud Oeste, cubre una superficie de 28,540.21 hectáreas y es el puerto hacia mar abierto más largo del mundo (Figura 34). Tiene una profundidad de 12 metros en el canal de navegación y 11.30 en las dársenas de maniobra, permite el acceso a embarcaciones de mayor porte.



Figura 34. Puerto Progreso ubicado al norte del estado de Yucatán.

La terminal remota anterior cuenta con una superficie de 4.3 hectáreas de patios y maniobras y tres posiciones de atraque, su infraestructura permite atracar embarcaciones con 23 pies de calado, lo que significa recibir barcos con hasta 18 mil toneladas de productos. Con la nueva terminal remota con 23 hectáreas tiene espacio para la instalación de terminales especializadas como la terminal de hidrocarburos, terminal granel-agrícola, terminal de contenedores, terminal de fluidos, terminal turística y terminal de usos múltiples, así como un almacén refrigerado, complementado con las modernas instalaciones de la aduana marítima (Fotografía 13). Su infraestructura también incluye rompeolas, bordos, canal de acceso así como cuatro carriles de un viaducto de 4.5 Km y de dos carriles de 2 Km (API, 2010; TCY, 2010; Figura 35).



Fotografía 13. Terminal de Puerto Progreso en el estado de Yucatán.

Por su excelente ubicación ocupa el cuarto lugar a nivel nacional en el tráfico de contenedores, el segundo en el tráfico de granel agrícola y el número uno del golfo en el tráfico de cruceros gracias a los atractivos turísticos que ofrece la península. Además facilita el transporte marítimo y terrestre en el tráfico de mercancías, aporta enlace turístico y frontera abierta al intercambio con el Golfo de México, el Mar Caribe y el Océano Atlántico (API, 2010), así como conectividad entre los mercados comerciales de Europa, Norte, Centro y Sudamérica, con servicios para movimiento de carga, altura y cabotaje. Las rutas marítimas establecidas permiten llegar en solo 36 horas a los mercados más importantes de Estados Unidos, Caribe y Centroamérica, además de conexiones a Sudamérica y Europa, generando un significativo crecimiento en la industria del sureste de México (TCY, 2010).

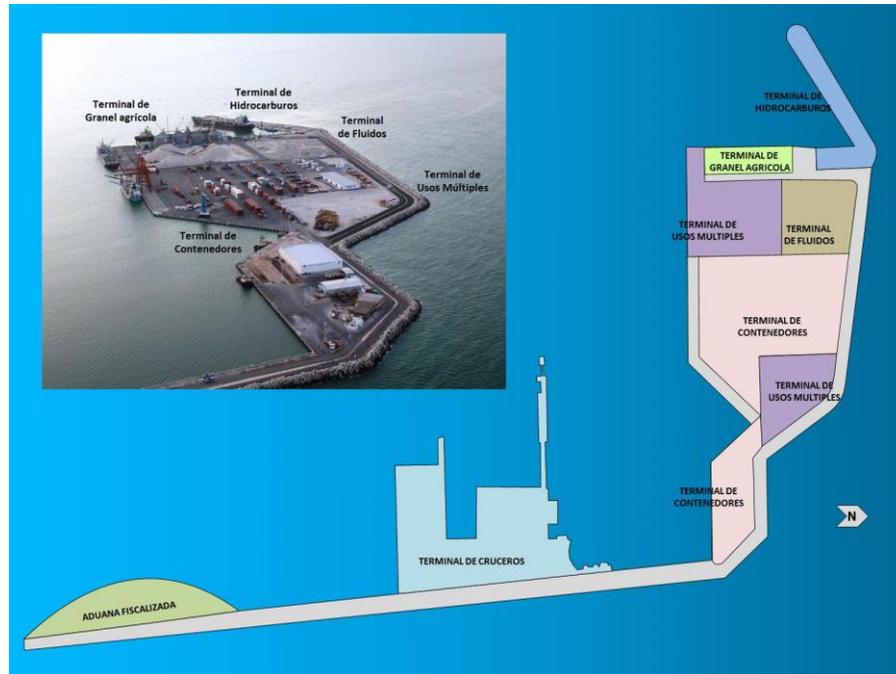


Figura 35. Terminales que operan en Puerto Progreso, en el estado de Yucatán.

a) Terminal de hidrocarburos

La Terminal Marítima de hidrocarburos es operada por Pemex y ubica en el muelle marginal de Puerto Progreso (Figura 35 y Fotografía 14), donde se realizan 95 operaciones de atraque y descarga de combustible de los buques tanques que contienen 40 mil toneladas de productos (Fotografía 15). En promedio se atiende 7.3 embarcaciones por mes para el abasto de combustible a la Península. El transporte de hidrocarburos por tubería se realiza por medio de tres líneas de diesel, gasolina y turbosina que van del muelle marginal de Pemex de la terminal remota del Puerto a la Terminal de Almacenamiento y Reparto (TAR) Progreso, ubicada a 12 kilómetros del citado derecho de vía donde se descarga un promedio diario de 41 mil 393 barriles para su distribución en los estado de Yucatán y Quintana Roo (PEMEX, 2010).



Fotografía 14. Terminal de hidrocarburos de Pemex en Puerto Progreso.



Fotografía 15. Muelle marginal ubicada terminal de hidrocarburos.

La terminal granel-agrícola se ubica en la terminal marginal de Puerto Progreso (Figura 37), es operada por la empresa Multisur especializada en el manejo de carga y descarga a granel y suelta, sus instalaciones cuentan con una buena infraestructura y personal especializado para el manejo de silos, grúas, tolvas, almejas, montacargas y equipo en general que permiten manejar ritmos elevados de descarga con apoyo de sus equipos y almacenes de diferentes capacidades ubicados en la terminal portuaria. Esta terminal recibe embarcaciones de hasta 35 mil toneladas, garantizando la eficiencia de descarga de 8 mil a 20 mil toneladas por día (Fotografías 16 y 17). Por su importante tráfico de gránulos agrícolas, ocupó el segundo lugar del total manejado a nivel nacional (LOGRA, 2007; API, 2010).



Fotografía 16. Terminal granel agrícola en Puerto Progreso del estado de Yucatán.



Fotografía 17. Terminal de granel agrícola opera desde el muelle 7, Puerto Progreso.

b) Terminal de Fluidos

La Terminal Especializada de Fluidos fue concesionada a la empresa Servicombustibles del Caribe, S.A. de C.V. por un periodo de 20 años, con opción de prorrogarse 18 años más. Esta terminal es un proyecto en proceso de construcción, para la operación y almacenamiento de fluidos con las instalaciones e infraestructura portuaria aplicable. Su instalación se ubicará en las obras de ampliación de la Terminal Remota de Progreso al norte del muelle 7, en el interior de la Administración Portuaria Integral de Progreso S.A. de C.V. (Figura 37). Contará con un patio que cubre una superficie de 24,000 m² que será destinado para las actividades de recepción, almacenamiento temporal, carga y descarga, así como el manejo interno de los fluidos (API, 2009-2014; SEMARNAT, 2011). El proyecto de construcción contempla dos superficies, la superficie total del proyecto será de 28,803.04 m² de los cuales 28,603.04 m² corresponden al área de Almacenamiento y 200 m² a la Superficie de Operativa.

La Superficie de Almacenamiento será de 23,801.55 m² para los tanques de almacenamiento y sistema de bombeo de fluidos (más el área de ampliación de 4,801.49 m²). En esta superficie se construirán los 44 tanques (43 tanques verticales y una esfera) para el almacenamiento de los diversos fluidos contemplados como son: Agua, Melaza, Gas L.P., aceite vegetal y sebo vacuno, emulsión asfáltica, combustóleo, combustible y diesel marino, productos petrolíferos y productos químicos (etanol y urea). También se construirán las instalaciones de apoyo como son: área de carga/descarga de auto-tanques, cobertizos de bombas, cobertizo contra incendio, subestación eléctrica, almacenes, laboratorio químico de control de calidad, oficinas generales y la caseta de control de acceso.

La segunda superficie denominada Superficie Operativa, será de 200 m² ubicada a 25 metros del muelle 7, e incluirá la caseta de bombas de operaciones (estación de medición y regulación y regulación de flujo de los buques). Ambas superficies se encuentran libres de construcciones y edificaciones, sin frente de agua, sin ningún tipo de servicio y con acceso terrestre (SEMARNAT, 2011).

c) Terminal de Contenedores

La Terminal de Contenedores fue concesionada a Terminal de Contenedores de Yucatán S.A. (TCY), cuenta con una superficie de 115,000 m² (11.5 ha) y la posibilidad de ampliación de hasta 24,000 m² (2.4 ha). (Figura 36). Sus actividades portuarias operan las 24 horas al día en tres turnos de ocho horas durante todo el año, realizando operaciones marítimas y terrestres - como el mantenimiento y reparación del parque de maquinaria. Gran parte de la industria que se mueve en esta terminal se basa en las maquilas, fábricas y textiles que representan un volumen de tráfico marítimo de unos 60.000 TEU's anuales. El tipo de naves que llegan al Puerto de Progreso son la Línea Peninsular, Maersk Sealand, Melfi Lines entre otras encargadas de transportar contenedores (TCY, 2010).

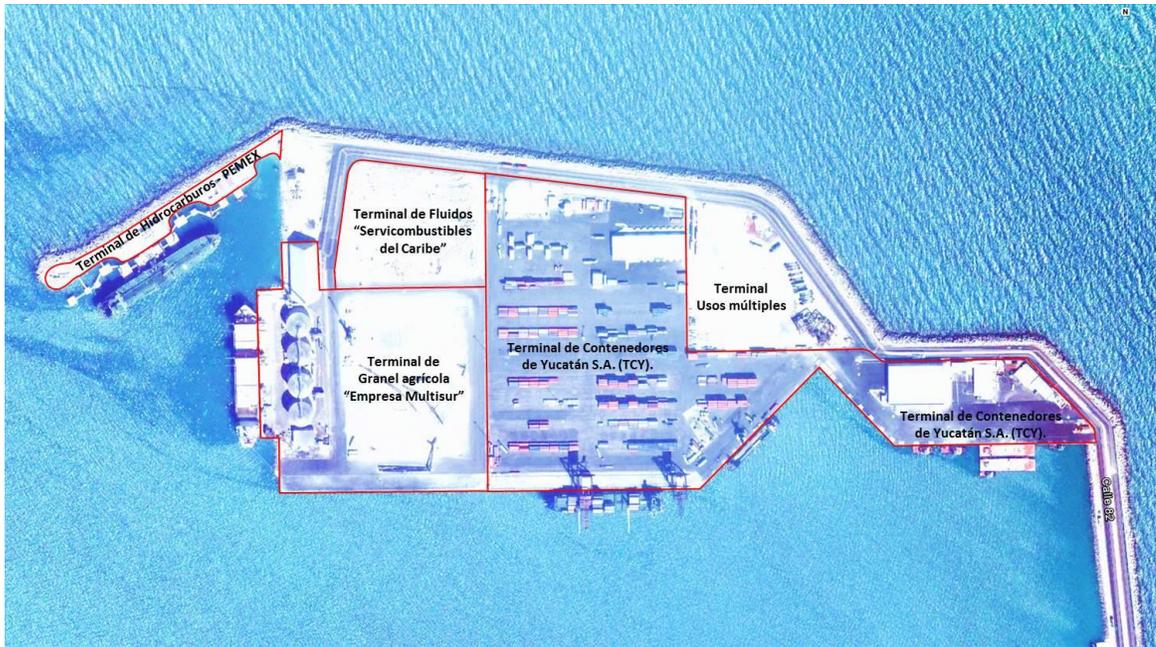
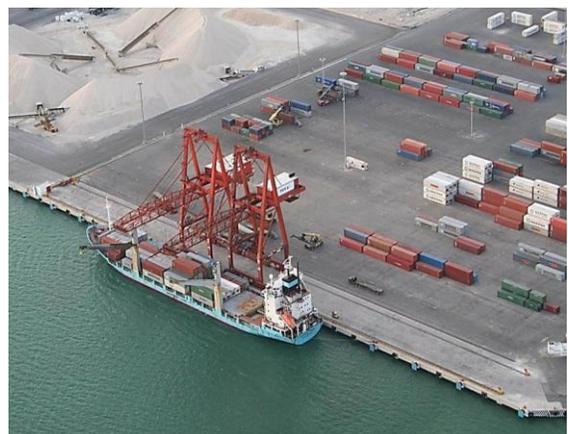


Figura 36. Ubicación de la terminal de contenedores de Yucatán.

Su infraestructura está compuesta por puertas de acceso, explanada, subestación de energía, muelles y maquinarias. Las tres puertas de acceso cuentan con barreras sistematizadas y un sistema informático que registra las entradas y salidas de contenedores, el barco, el número de viaje, el puerto destino y toda la información relacionada con la carga contenerizada. La explanada que tiene una superficie de 115,000 m² (11.5 ha), permite la optimización de la ocupación del espacio y el tiempo de las maniobras de los contenedores haciendo eficiente el flujo de las operaciones (Fotografía 18).



Fotografía 18. Terminal de contenedores de Puerto de Progreso del estado de Yucatán.



Fotografía 19. Grúa panamax de contenedores Yucatán, opera 47 movimientos / hrs.

Cuenta con una Subestación de energía con capacidad de 4,000 Kva, apropiado para los contenedores refrigerados, iluminación y equipamiento portuario. Tiene 480 metros de muelles conocidos como muelle 5 y 6, el primero con 210 y 270 metros de profundidad respectivamente, hasta 11.30 metros de calado. Su maquinaria está compuesta por 2 grúas panamax (Fotografía 19), 1 grúa móvil, 4 reach stackers y 1 Top loader (TCY, 2010).

d) Terminal de Cruceros

La Terminal de Cruceros del Puerto de Progreso es operada por la empresa Cruceros y Transbordadores S.S.A. México S.A. de C.V., tiene un área de 57,000 m² cuenta con 2 posiciones de atraque, con capacidad para atender a 2 mega cruceros de última generación simultáneamente (Figura 37), los muelles norte y sur con 330 metros de longitud y 9 metros de calado, así como 1 posición de atraque para recibir transbordadores con 130 metros de longitud y 6 metros. La terminal cuenta con un patio de 51,000 m² para el estacionamiento de los camiones y vehículos para el transporte de pasajeros (Fotografías 20 y 21). De los cruceros que llegan a Progreso Yucatán uno de ellos cubre la ruta Galveston, Texas - Progreso, Yucatán México y el Caribe Maya (API, 2010; API, 2009-2014; SSA México, 2009).



Fotografía 20. La Terminal de Cruceros en Puerto de Progreso.



Fotografía 21. Los cruceros arriban en los muelles norte y sur de la terminal de Progreso.

e) Aduana Marítima

La Aduana Marítima de Puerto Progreso es la autoridad encargada de vigilar controlar y fiscalizar la entrada y salida de mercancías, así como de los medios que las transportan. Las nuevas instalaciones fueron construidas al norte de la terminal intermedia sobre un terreno ganado al mar y que están destinadas para agilizar las actividades operativas y servicios relacionados con las revisiones aduanales (Fotografía 22). Las instalaciones tienen una plataforma de 30,000 m², estas cuentan con vialidades, patios, cinco casetas de control con circuito cerrado de televisión, tres cobertizo de revisión y una báscula en el kilómetro 5 de la Terminal Remota (API, 2010).

Las nuevas instalaciones de la Aduana Marítima agilizan la tramitación de mercancías de comercio exterior y pasajeros de cruceros, eliminan el cuello de botella que originaba el despacho de mercancías a la entrada al puerto, favorece la circulación de todo tipo de vehículos y permite una rápida revisión a vehículos de carga en los distintos puntos de entrada a la aduana (API, 2010).



Fotografía 22. La aduana marítima de Puerto Progreso, edificada en un terreno ganado al mar.

■ Puertos Pesqueros de Yucatán

El Estado cuenta con 11 puertos pequeños que tienen infraestructura marítimo -portuaria; esos son: Celestún, Sisal, Chuburná, Yukalpetén, Telchac, Chabihau, Dzilam de Bravo, San Felipe, Río Lagartos, Las Coloradas y El Cuyo; Todos estos puertos están concesionados a la API de Progreso con el propósito de integrarlos como un conjunto de unidades productivas, orientadas hacia la pesca y turismo. La infraestructura existente se resume en los cuadros de abajo (Tabla 20; API, 2009-2014).

Tabla 20. Infraestructura de los puertos pesqueros, según tipo, longitud y material de construcción.

PUERTO	DETERMINACIÓN		LONGITUD DE ATRAQUE (m)				TIPO		MATERIAL			
	ALTURA	CABOTAJE	PESCA	TURISMO	COMERCIAL	TOTAL	MARGINAL	ESPIGÓN	CONCRETO	MADERA	METÁLICO	TIERRA
Celestún		x	480	*		480	x	x	x	x		x
Sisal		x	490	*		490	x		x			x
Chuburná		x	545	*		545	x		x			x
Yucalpetén	x	x	2030	1432		3462	x	x	x	x		x
Telchac		x	349	*		349	x		x			x
Chabihau		x	192			192	x		x			x
Dzilam Bravo		x	712			712	x		x			
San Felipe		x	713			713	x	x	x			
Río Lagartos		x	1703	*		1703	x	x	x			x
Las Coloradas	x	x	0		224	224		x			x	
El Cuyo		x	634	*		634	x			x		x
Total		x	8404	1432	224	10060					V	

Fuente: API, 2009-2014. Programa Maestro de Desarrollo Portuario 2009-2014. * Comparte instalaciones pesqueras.

La importancia de estos sitios radica en la actividad pesquera y turística principalmente, y en el caso de Las Coloradas en la producción de sal, que es la fuente de ingresos más importante para los habitantes de dicho lugar. Asimismo Yukalpetén fue habilitado por el Ejecutivo Federal como puerto de altura y cabotaje, mediante decreto publicado en el Diario Oficial de la federación el 1 de febrero del 1994; su vocación es principalmente ligada con la pesca y el turismo náutico (API, 2009-2014).

▪ Celestún

El puerto de abrigo se encuentra a 93 Km de Mérida, la principal actividad es la pesca y el turismo ya que se encuentra dentro del Parque Natural Ría Celestún. El canal de navegación tiene un ancho de plantilla de 45.0 m y 2.60 m a 2.80 m de profundidad; 2 dársenas de 500 m² con profundidades promedio entre 1.6 y 2.5 metros (Fotografía 23). Las obras de atraque son muelles marginales de 480 m de longitud, no existe una determinación ni denominación oficial de las posiciones de atraque. Las obras de protección son dos escolleras de enrocamiento denominadas Norte y Sur de 369 y 282 m, respectivamente. Las áreas de tierra adyacentes al frente de agua ocupan una superficie total de 133 hectáreas. Del total, 16.2 ha están asignadas como zona de reparaciones, 44.25 ha se destinan a industrias y cooperativas pesqueras y el resto, 72.55 ha para industrias conexas, zonas comerciales y vialidades (API, 2009-2014).



Fotografía 23. Puerto pesquero y turístico de Celestún.

El señalamiento marítimo consta de un faro (Fotografía 24), dos balizas de situación y dos de enfilación. El puerto presenta dos problemas principales: el primero, asociado al sistema operativo debido a la carencia de un ordenamiento en el uso de los frentes de agua y las áreas de tierra colindantes (existencia de construcciones informales adyacentes al muelle marginal), así como del elevado número de embarcaciones existentes. El segundo se refiere al transporte litoral, es intensa y propicia la formación de bajos en la entrada del canal de navegación demandando la realización constante de dragados de mantenimiento (API, 2009-2014).



Fotografía 24. Faros del puerto pesquero de Celestún.

- **Sisal**

Se ubica a 63 Km de Mérida y a 40 Km por mar del puerto de Progreso o a 96 Km por carretera. El refugio pesquero se comunica con el pueblo de Sisal, por un tramo de 1 Km. El refugio tiene acceso protegido por escolleras: el oriente tiene una longitud de 271 m; y el poniente de 218 m. Las áreas de agua están integradas por un canal de navegación de 30 m de plantilla y 3.6 m de profundidad, y una dársena interior de 25 mil metros cuadrados incluyendo 3 zonas de fondeaderos (Fotografía 25). Dispone de atraque total de 490 m distribuidos en tres muelles, uno marginal y dos en peine (API, 2009-2014).



Fotografía 25. Puerto turístico y pesquero de Sisal.

Dadas las características de la flota que opera en el puerto, no presenta mayores problemas en sus sistemas operativos. En tierra, en las zonas de muelles existen construcciones informales de pescadores para almacenar materiales y equipo de pesca. Hay 5 cooperativas pesqueras registradas, de las cuales únicamente operan 3.

La vialidad que da acceso al lado sur (muelles de peine) necesita mejorar los trazos. El señalamiento marítimo consta de un faro de concreto armado (Fotografía 26) y dos balizas de situación ubicados en las escolleras de acceso al puerto (API, 2009-2014).



Fotografía 26. Faro de concreto de Sisal puerto.

▪ Chuburná

El puerto de Chuburná se encuentra a 10 Km de Progreso y a 55 Km de Mérida (Fotografía 27). Su actividad es netamente pesquera. Cuenta con dos escolleras de protección de enrocamiento, con longitudes totales de 440 m y 120 m, para el oriente y poniente, respectivamente. El canal de navegación tiene un ancho de plantilla de 30 m, y 1.80 m de profundidad; presenta un importante azolvamiento derivado del transporte litoral. Cuenta con servicio de alumbrado, pero carece de abastecimiento de agua. El señalamiento marítimo consiste en dos balizas de situación localizadas en las escolleras que delimitan el acceso al puerto (API, 2009-2014).



Fotografía 27. Puerto pesquero y turístico de Chuburná.

▪ Puerto de Yucalpetén

El puerto de Yucalpetén se encuentra a 1 Km del puerto de Progreso y a 34 Km de Mérida. Cuenta con un área para embarcaciones mayores de pesca y de captura ribereña; una marina para yates, instalaciones para deportes acuáticos tanto en la laguna de Chelem, como en mar abierto. Cercana al puerto, existe una pista de canotaje, construida por el Gobierno del Estado. Cuenta con dos escolleras de enrocamiento construidas en 1977, la oriente con 550 metros de longitud y la poniente con 110 metros adyacente a la escollera oriente, se da acceso a un desarrollo náutico construido en la playa que se formó posterior a la construcción del puerto (API, 2009-2014).

El canal de acceso, de 80 m de plantilla y 2.20 m de profundidad y la dársena de operaciones, conforman las áreas de agua. Cuenta con una amplia comunicación al estero (Fotografía 28). Por lo que respecta al señalamiento marítimo cuenta con un faro con estructura de aluminio, dos balizas de situación localizadas sobre las escolleras de acceso y dos balizas de enfilación en el interior del puerto. Los muelles del puerto asignados a la actividad pesquera son marginales con una longitud de atraque total de 1,432 m, son utilizados por embarcaciones medianas y grandes sin un ordenamiento formal. Las embarcaciones de pesca ribereña y para el servicio público turístico utilizan el muelle marginal noreste de 2,030 m de longitud, también sin un ordenamiento formal (API, 2009-2014).



Fotografía 28. Puerto turístico y pesquero de Yucalpetén.

En el Club de Yates se dispone de *slips* para embarcaciones turísticas y recreativas privadas (Fotografía 29). El estado físico de los muelles es bueno, la cercanía con Progreso y el importante movimiento del puerto ha favorecido una mayor asignación de recursos para la conservación de la infraestructura. Los terrenos adyacentes al recinto fueron originalmente comercializados por FONDEPORT, para la industrialización de productos pesqueros y otras actividades conexas como la construcción y reparación de embarcaciones. Se asientan en las áreas de tierra, la novena zona naval, oficinas federales y administrativas, una zona de pesca ribereña y turística de uso público así como un área de reserva portuaria (API, 2009-2014).



Fotografía 29. Puerto de Yucalpetén tiene instalaciones para yates, pesca y la marina.

▪ Telchac

El puerto de Telchac se encuentra a 42 Km de Progreso y a 75 Km de Mérida por vía terrestre y a 45 Km de Progreso por mar (Fotografía 30). Presenta una actividad pesquera, aunque recientemente se han realizado considerables inversiones en el ámbito turístico, incluyendo la construcción de la carretera de altas especificaciones y un hotel de 5 estrellas. Es importante resaltar el crecimiento de la actividad turística e inmobiliaria en la zona. Es un puerto de dimensiones importantes; el canal de acceso se comunica con el estero, tiene dos escolleras de protección de bolsacreto, con longitudes totales de 382 m y 170 m para el oriente y poniente, respectivamente. El canal de navegación tiene un ancho de plantilla de 30 m y una profundidad de 2.0 metros. Dispone de un muelle marginal en el lado sur de 349 m de concreto armado, utilizado por embarcaciones de pesca ribereña que por su número, saturan los frentes de atraque. La dársena tiene una superficie de aproximadamente, 1,500 m² (API, 2009-2014).



Fotografía 30. Puerto turístico y pesquero Telchac.

El puerto tiene un faro con estructura de concreto y tabique (Fotografía 31), así como dos balizas de situación localizadas en las escolleras y dos balizas de enfilación ubicadas en el interior del puerto. El puerto cuenta con 7 cooperativas pesqueras, una fábrica de hielo, una empacadora, suministro de combustible, agua, la mayoría de los productos se comercializa en Mérida. En los alrededores existen diversos atractivos turísticos como son la Laguna Rosada, que es un refugio ecológico de aves migratorias; Xcambó una zona arqueológica con varias pirámides, caminos mayas y plataformas habitacionales, así como las playas del lugar (API, 2009-2014).



Fotografía 31. Cerca de la playa de puerto Telchac se encuentra en faro de concreto y tabique.

▪ Chabihau

El puerto de abrigo también conocido como San Crisanto, se encuentra a 105 Km de Mérida y a 60 Km por mar del puerto de Progreso, o a 63 Km por carretera (Fotografía 32). La población de Chabihau, se localiza a 6 Km del puerto de abrigo. Los pobladores de ésta y los de San Crisanto se dedican, principalmente, a la pesca y a la extracción de sal, tanto para el consumo de la población, como para el salado del pescado y su venta en Mérida y otras poblaciones cercanas. El acceso al refugio está protegido por dos escolleras de piedra de 298 m para la este y de 292 m en la oeste, con una cota al nivel de corona de 4.0 m.



Fotografía 32. Puerto pesquero Chabihau.

La plantilla del canal de acceso es de 30 m, cuenta con una dársena de aproximadamente 400 m, con un muro marginal de concreto para el muelle de 192 m. Además cuenta además, con una rampa para sacar y meter las embarcaciones para su mantenimiento y reparación (Fotografía 33). El puerto carece de sistema de señalamiento y de defensas en los muelles. El señalamiento marítimo consiste en dos balizas localizadas en las escolleras de acceso al puerto. En el puerto operan cinco cooperativas y la Capitanía del Puerto; el producto de la pesca se comercializa inmediatamente a los poblados cercanos o directamente a Mérida (API, 2009-2014).



Fotografía 33. Puerto pesquero de Chabihau, tiene muelle marginal de 192 metros.

▪ Dzilam de Bravo

Se localiza a 106 Km de Mérida y a 81 Km de Progreso por carretera. El puerto pesquero cuenta con una entrada protegida en sus extremos por escolleras de enrocamiento, el oriente y el poniente con una longitud de 240 m cada una.

Las áreas de agua están integradas por el canal de navegación de 15 m de plantilla y una dársena interior de 20 mil metros cuadrados aproximadamente, con una profundidad promedio de 1.20 m (Fotografía 34). Cabe hacer notar que la escasa profundidad es debido a la condición rocosa del subsuelo que demanda de fuertes inversiones para su profundización. El señalamiento marítimo consiste en un faro construido en concreto armado y dos balizas de enfilación. Frente a la costa existe una barrera natural sumergida de cerca de 2 Km de longitud, que proporciona protección natural (API, 2009-2014).



Fotografía 34. Puerto pesquero y turístico Dzilam de Bravo.

Cuenta con un muelle marginal de 712 m de longitud y no presenta áreas de tierra asociadas formalmente a la actividad portuaria; el tamaño de la flota local es de 785 embarcaciones (751 de pesca, 32 de recreo y 2 especiales), con la presencia de empresas pesqueras con su propia flota que operan de manera más organizada y el uso de los muelles es más eficiente (Fotografía 35). En tierra hay un malecón de doble circulación con un muro de concreto que lo separa de la playa. En la parte turística existen los petenes, uno en donde existen lagartos y Flamingos y otro a 5 min del cenote (API, 2009-2014).



Fotografía 35. Puerto Dzilam de Bravo, cuenta con un malecón y un faro de concreto armado.

▪ San Felipe

El puerto de San Felipe se encuentra a 193 Km de Mérida y a 251 Km de Progreso. La población cercana más importante es Tizimín, distante 65 Km. El puerto pesquero se ubica en el estero, el acceso a este punto y el puerto está protegido por dos escolleras de bolsacreto: la primera de 93 m del lado oeste, que se continúa hacia el interior con un bordo de 235 m sobre el manglar oeste y la segunda de 332 m, del lado este. El canal de acceso tiene un ancho de plantilla de 90 m y el canal que llega hasta las instalaciones del puerto tiene 50 m de ancho de plantilla y una longitud de unos 500 m hasta la zona del malecón (Fotografía 36). Ambos canales presentan una profundidad promedio de 1.80 m debido a sus condiciones geológicas; el canal de navegación presenta problemas en las entrada, así como la bocana se encuentra azolvada en marea alta a 0.70 m API, 2009-2014).



Fotografía 36. Puerto pesquero San Felipe.

Cuenta con un muro de concreto, que forma parte del malecón y se extiende a lo largo del lado este. Un muro de atraque del lado oeste de 300 m de largo aproximadamente. En la parte central del muro se localizan 2 muelles de concreto en espigón de aproximadamente 40 m de longitud cada uno. Existen también 2 muelles rústicos de madera (Fotografía 37). El señalamiento marítimo está formado por 7 balizas: 2 en la entrada de las escoleras, 2 en el canal interior, 2 en los muelles y una más de situación ubicada en la capitanía; se atiende a 247 embarcaciones menores, debido al bajo calado no pueden ingresar embarcaciones medianas (API, 2009-2014).



Fotografía 37. Muelles del Puerto pesquero San Felipe.

▪ Río Lagartos

Se encuentra dentro de la Reserva Natural Ría Lagartos, a 217 Km de Mérida y a 231 Km de Progreso (Fotografía 38). La población de Tizimín está a 53 Km y la más próxima es San Felipe a escasos 10 Km. La actividad principal es la pesca y en menor medida el turismo.

Cuenta con oficinas de la Capitanía del Puerto y un destacamento de la Secretaría de Marina. Las obras de protección consisten en dos escolleras de bolsacreto y elementos aislados de concreto, con 156 m de longitud en el lado oeste y 445 m en el lado este. El ancho de plantilla del canal de acceso es de 30 m y tiene una longitud total de 600 m hasta la zona del malecón. El atraque se hace en un muro marginal de concreto de 1703 m; cuenta con un muelle en espigón de aproximadamente 50 metros y muelles de madera (API, 2009-2014).



Fotografía 38. Puerto turístico y pesquero Río Lagartos.

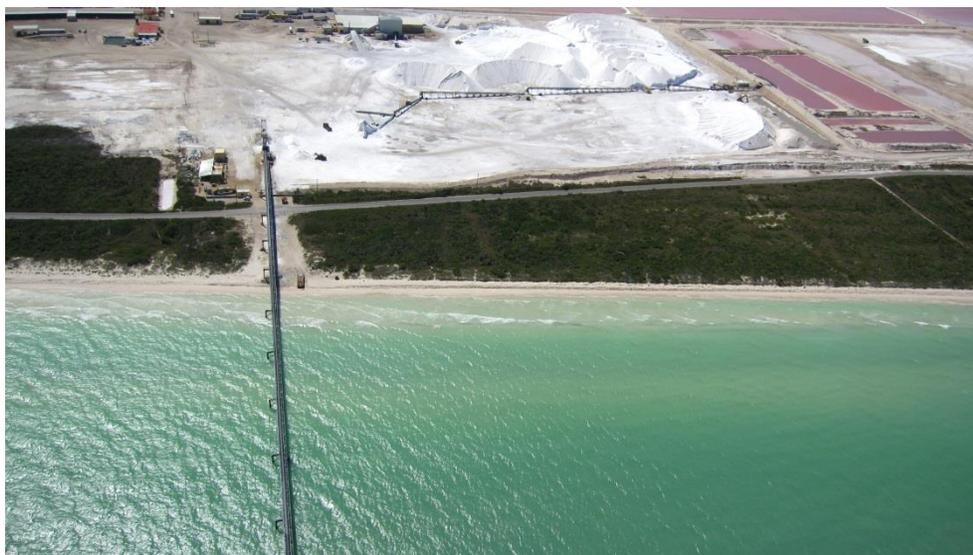
El principal atractivo turístico de la zona es el refugio faunístico y botánico de Ría Lagartos, parque natural protegido por decretos presidenciales y bajo resguardo de la SEMARNAT. Frente al malecón, a unos 500 m de distancia se forman unos manglares donde se tiene un área natural de resguardo de embarcaciones entre el malecón y el mar abierto. El señalamiento marítimo consiste en un faro construido en concreto armado, dos balizas de situación localizadas sobre las escolleras de acceso al puerto y 4 balizas en el canal de navegación (Fotografía 39). El puerto atiende a 380 embarcaciones de pesca ribereña, 45 de ellas son de recreación turística y 2 dos de mediana altura. API, 2009-2014).



Fotografía 39. Faro de concreto armado sobre sale en el puerto pesquero Río Lagartos.

Las Coloradas

Se encuentra dentro de la reserva natural Ría Lagartos, a 229 Km de Mérida y a 243 Km de Progreso; la población importante más cercana es Tizimín a 65 Km y la más próxima es Río Lagartos, a escasos 12 Km. Su población es de alrededor de 800 a 850 habitantes, la cual se dedica principalmente a la industria salinera, una cuarta parte a la pesca y en menor medida al comercio (Fotografía 40). El principal atractivo turístico son los recorridos por las marismas de la Ría Lagartos, parque natural protegido por decreto presidencial y bajo el resguardo de la SEMARNAT. Este puerto se ubica en mar abierto y no cuenta con obras de atraque y protección para embarcaciones menores, haciendo sus arribos directamente en la playa (API, 2009-2014).



Fotografía 40. Puerto industrial-comercial Las Coloradas.

Para el señalamiento marítimo se cuenta con un faro y una boya de recalada de la Industria Salinera de Yucatán S.A. de C.V. También cuenta con oficinas de la Capitanía del Puerto y un área destinada de la Secretaría de Marina Las embarcaciones mayores que se ocupan para la industria salinera son atendidas en mar abierto, contando con una banda para la carga y descarga del producto (Fotografía 41). La sal tiene una mayor demanda para el tráfico de cabotaje que el de altura. Existen tres cooperativas, hay servicio de luz y teléfono, pero se carece de fábrica de hielo y suministro de gasolina. No se le da importancia al impulso del turismo (API, 2009-2014).



Fotografía 41. El Puerto Las Coloradas descarga de sal a las embarcaciones.

■ El Cuyo

La población de El Cuyo con 2,900 habitantes, se encuentra dentro de la Reserva Natural Ría Lagartos a 284 Km de Progreso y 251 Km de Mérida (Fotografía 42). La población importante más cercana es Tizimín a 84 Km y la más próxima es Río Lagartos a 50 Km. Cuenta con un destacamento de la Secretaría de Marina y una oficina de la Capitanía de Puerto. Las obras de protección consisten en dos escolleras de bolsacreto y elementos aislados de concreto, con 169 m de longitud en el lado oeste y 366 m en el lado este. Por las condiciones del transporte litoral en la zona, se forman bajos en la bocana. El ancho de plantilla del canal de acceso y de navegación es de 30 m, con una longitud total de 600 m desde la entrada hasta la zona del malecón (API, 2009-2014).



Fotografía 42. Puerto pesquero y turístico El Cuyo.

Las obras de atraque están integradas por un muro marginal de concreto de 634 m de longitud, que cubre por completo el malecón de la población; el lado este y sur carecen de bitas y defensas, mientras que en la parte norte hay 9 bitas; 1 muelle de espigón de aproximadamente 50 metros, y muelles de madera en regular estado de conservación (Fotografía 43). El muro de la dársena este es de los más nuevos y forma una escuadra de 50 m y 50 m; carece de defensas y de argollas de amarre, la rampa con que cuenta es de arena fina. Se amplió un muro al final del canal de navegación. Existe una rampa de botado para embarcaciones menores (API, 2009-2014).



Fotografía 43. Muelle de madera en el puerto pesquero y turístico El Cuyo.

El señalamiento marítimo consiste en un faro construido en concreto armado, dos balizas de situación localizadas en las escolleras que delimitan el acceso al puerto y dos balizas de enfilación. El puerto cuenta con 2 fábricas de hielo y 3 cooperativas pesqueras. Los servicios existentes son: agua potable en cárcamos a la entrada, gasolinera, etc.; en cuestión de energía eléctrica se cuenta únicamente con las plantas generadoras. El pueblo es relativamente nuevo con escasa urbanización. La población se dedica totalmente a la pesca ribereña comercializando sus productos en Tizimín. Se ocupan 370 embarcaciones menores para esta actividad (API, 2009-2014).

V.3. Población

De acuerdo al II Censo de Población y Vivienda (INEGI², 2011), Yucatán cuenta con 1'955,577 habitantes que representa el 1.7% de la población nacional y que se distribuyen en 3,363 localidades dentro de 106 municipios lo que representa una densidad poblacional de 49.5 habitantes/Km². El 50.74% de la población yucateca está compuesta por mujeres y corresponde a 992,244 personas, mientras que 963,333 corresponde a hombres y representa el 49.26% del total de la población, esto equivale a 97 hombres por cada 100 mujeres (INEGI^{1,4}, 2010, 2011). El municipio más poblado corresponde a Mérida con 830,732 habitantes, seguido de Kanasín, Valladolid y Tizimín que tienen más de 70,000 habitantes, en contraste con aquellos que tienen menos de 1,000 habitantes como el municipio de Quintana Roo (Tablas 21 y 22). Los municipios más importantes son Mérida, Kanasín, Valladolid, Tizimín, Progreso y Umán.

Tabla 21. Población según sexo y número de habitantes por cabecera municipal.

CLAVE	MUNICIPIO	TOTAL MUNICIPAL	CABECERA MUNICIPAL	POBLACIÓN MASCULINA	POBLACIÓN FEMENINA
001	Abalá	6,356	Abalá	3,254	3,102
002	Acanceh	15,337	Acanceh	7,599	7,738
003	Akil	10,362	Akil	5,104	5,258
004	Baca	5,701	Baca	2,819	2,882
005	Bokobá	2,053	Bokobá	1,053	1,000
006	Buctotz	8,637	Buctotz	4,336	4,301
007	Cacalchén	6,811	Cacalchén	3,483	3,328
008	Calotmul	4,095	Calotmul	2,080	2,015
009	Cansahcab	4,696	Cansahcab	2,327	2,369
010	Cantamayec	2,407	Cantamayec	1,255	1,152
011	Celestún	6,831	Celestún	3,493	3,338
012	Cenotillo	3,701	Cenotillo	1,765	1,936
013	Conkal	9,143	Conkal	4,584	4,559
014	Cuncunul	1,595	Cuncunul	815	780
015	Cuzamá	4,966	Cuzamá	2,493	2,473
016	Chacsinkín	2,818	Chacsinkín	1,417	1,401
017	Chankom	4,464	Chankom	2,276	2,188
018	Chapab	3,035	Chapab	1,509	1,526
019	Chemax	33,490	Chemax	16,797	16,693
020	Chichimilá	7,952	Chichimilá	3,982	3,970
021	Chicxulub Pueblo	4,113	Chicxulub Pueblo	2,123	1,990
022	Chikindzonot	4,162	Chikindzonot	2,103	2,059
023	Chocholá	4,530	Chocholá	2,318	2,212
024	Chumayel	3,148	Chumayel	1,552	1,596
025	Dzán	4,941	Dzán	2,399	2,542
026	Dzemul	3,489	Dzemul	1,777	1,712
027	Dzidzantún	8,133	Dzidzantún	4,115	4,018
028	Dzilam de Bravo	2,463	Dzilam de Bravo	1,262	1,201
029	Dzilam González	5,905	Dzilam González	3,027	2,878
030	Dzités	3,540	Dzités	1,813	1,727
031	Dzoncauich	2,772	Dzoncauich	1,401	1,371
032	Espita	15,571	Espita	7,928	7,643
033	Halachó	19,072	Halachó	9,609	9,463
034	Hocabá	6,061	Hocabá	3,033	3,028
035	Hoctún	5,697	Hoctún	2,816	2,881
036	Homún	7,257	Homún	3,688	3,569
037	Huhí	4,841	Huhí	2,471	2,370

.....Continuación de Tabla 21

CLAVE	MUNICIPIO	TOTAL MUNICIPAL	CABECERA MUNICIPAL	POBLACIÓN MASCULINA	POBLACIÓN FEMENINA
038	Hunucmá	30,731	Hunucmá	15,330	15,401
039	Ixil	3,803	Ixil	1,946	1,857
040	Izamal	25,980	Izamal	12,887	13,093
041	Kanasín	78,709	Kanasín	39,102	39,607
042	Kantunil	5,502	Kantunil	2,764	2,738
043	Kaua	2,761	Kaua	1,419	1,342
044	Kinchil	6,571	Kinchil	3,301	3,270
045	Kopomá	2,449	Kopomá	1,255	1,194
046	Mama	2,888	Mama	1,366	1,522
047	Maní	5,250	Maní	2,560	2,690
048	Maxcanú	21,704	Maxcanú	10,860	10,844
049	Mayapán	3,269	Mayapán	1,676	1,593
050	Mérida	830,732	Mérida	401,340	429,392
051	Mocochá	3,071	Mocochá	1,548	1,523
052	Motul	33,978	Motul de Carrillo Puerto	16,817	17,161
053	Muna	12,336	Muna	6,061	6,275
054	Muxupip	2,755	Muxupip	1,341	1,414
055	Opichén	6,285	Opichén	3,201	3,084
056	Oxkutzcab	29,325	Oxkutzcab	13,947	15,378
057	Panabá	7,461	Panabá	3,718	3,743
058	Peto	24,159	Peto	12,025	12,134
059	Progreso	53,958	Progreso	26,925	27,033
060	Quintana Roo	942	Quintana Roo	470	472
061	Río Lagartos	3,438	Río Lagartos	1,749	1,689
062	Sacalum	4,589	Sacalum	2,368	2,221
063	Samahil	5,008	Samahil	2,532	2,476
064	Sanahcat	1,619	Sanahcat	813	806
065	San Felipe	1,839	San Felipe	956	883
066	Santa Elena	3,833	Santa Elena	1,855	1,978
067	Seyé	9,276	Seyé	4,733	4,543
068	Sinanché	3,126	Sinanché	1,622	1,504
069	Sotuta	8,449	Sotuta	4,336	4,113
070	Sucilá	3,930	Sucilá	1,994	1,936
071	Sudzal	1,689	Sudzal	890	799
072	Suma	1,876	Suma	946	930
073	Tahdziú	4,447	Tahdziú	2,281	2,166
074	Tahmek	3,609	Tahmek	1,841	1,768
075	Teabo	6,205	Teabo	3,071	3,134
076	Tecoh	16,200	Tecoh	8,160	8,040
077	Tekal de Venegas	2,606	Tekal de Venegas	1,313	1,293
078	Tekantó	3,683	Tekantó	1,830	1,853
079	Tekax	40,547	Tekax Álvaro Obregón	19,975	20,572
080	Tekit	9,884	Tekit	4,965	4,919
081	Tekom	3,100	Tekom	1,553	1,547
082	Telchac Pueblo	3,557	Telchac	1,803	1,754
083	Telchac Puerto	1,726	Telchac Puerto	906	820
084	Temax	6,817	Temax	3,425	3,392
085	Temozón	14,801	Temozón	7,494	7,307

.....Continuación de Tabla 21.

CLAVE	MUNICIPIO	TOTAL MUNICIPAL	CABECERA MUNICIPAL	POBLACIÓN MASCULINA	POBLACIÓN FEMENINA
086	Tepakán	2,226	Tepakán	1,141	1,085
087	Tetiz	4,725	Tetiz	2,313	2,412
088	Teya	1,977	Teya	972	1,005
089	Ticul	37,685	Ticul	18,593	19,092
090	Timucuy	6,833	Timucuy	3,496	3,337
091	Tinum	11,421	Tinum	5,788	5,633
092	Tixcacalcupul	6,665	Tixcacalcupul	3,362	3,303
093	Tixkokob	17,176	Tixkokob	8,500	8,676
094	Tixméhuac	4,746	Tixméhuac	2,411	2,335
095	Tixpéhual	5,388	Tixpéhual	2,660	2,728
096	Tizimín	73,138	Tizimín	36,468	36,670
097	Tunkás	3,464	Tunkás	1,774	1,690
098	Tzucacab	14,011	Tzucacab	7,102	6,909
099	Uayma	3,782	Uayma	1,944	1,838
100	Ucú	3,469	Ucú	1,744	1,725
101	Umán	50,993	Umán	25,443	25,550
102	Valladolid	74,217	Valladolid	36,624	37,593
103	Xocchel	3,236	Xocchel	1,660	1,576
104	Yaxcabá	14,802	Yaxcabá	7,646	7,156
105	Yaxkukul	2,868	Yaxkukul	1,443	1,425
106	Yobaín	2,137	Yobaín	1,103	1,034

Fuente: INEGI1, 2011. Perspectivas Estadísticas Yucatán 2011. INEGI4. Anuario estadístico de Yucatán, 2010. INEGI5, Catálogo de Claves de Entidades Federativas, Municipios y Localidades, 2009.

Tabla 22. Población según sexo y número de habitantes por municipio.

DISTRIBUCIÓN DE LA POBLACIÓN POR SEXO Y NÚMERO DE HABITANTES						
ENTIDAD YUCATÁN			TOTAL	PORCIENTO	HOMBRES	MUJERES
RANGO	CLAVE	MUNICIPIO	1,955,577	100%	963,333	992,244
< 800,000	050	Mérida	830,732	42.48%	401,340	429,392
80,000 70,000	041	Kanasín	78,709	4.02%	39,102	39,607
	102	Valladolid	74,217	3.80%	36,624	37,593
70,000 50,000	096	Tizimín	73,138	3.74%	36,468	36,670
	059	Progreso	53,958	2.76%	26,925	27,033
50,000 30,000	101	Umán	50,993	2.61%	25,443	25,550
	079	Tekax	40,547	2.07%	19,975	20,572
	089	Ticul	37,685	1.93%	18,593	19,092
	052	Motul	33,978	1.74%	16,817	17,161
30,000 20,000	019	Chemax	33,490	1.71%	16,797	16,693
	038	Hunucmá	30,731	1.57%	15,330	15,401
	056	Oxkutzcab	29,325	1.50%	13,947	15,378
	040	Izamal	25,980	1.33%	12,887	13,093
20,000 10,000	058	Peto	24,159	1.24%	12,025	12,134
	048	Maxcanú	21,704	1.11%	10,860	10,844
	033	Halachó	19,072	0.98%	9,609	9,463
	093	Tixkokob	17,176	0.88%	8,500	8,676
	076	Tecoh	16,200	0.83%	8,160	8,040
	032	Espita	15,571	0.80%	7,928	7,643
	002	Acanceh	15,337	0.78%	7,599	7,738
	104	Yaxcabá	14,802	0.76%	7,646	7,156
	085	Temozón	14,801	0.76%	7,494	7,307
	098	Tzucacab	14,011	0.72%	7,102	6,909
	053	Muna	12,336	0.63%	6,061	6,275
	091	Tinum	11,421	0.58%	5,788	5,633
003	Akil	10,362	0.53%	5,104	5,258	

.....Continuación de Tabla 22.

ENTIDAD YUCATÁN			TOTAL	PORCIENTO	HOMBRES	MUJERES
RANGO	CLAVE	MUNICIPIO	1,955,577	100%	963,333	992,244
10,000 9,000	080	Tekit	9,884	0.51%	4,965	4,919
	067	Seyé	9,276	0.47%	4,733	4,543
	013	Conkal	9,143	0.47%	4,584	4,559
9,000 8,000	006	Buctzotz	8,637	0.44%	4,336	4,301
	069	Sotuta	8,449	0.43%	4,336	4,113
	027	Dzidzantún	8,133	0.42%	4,115	4,018
8,000 7,000	020	Chichimilá	7,952	0.41%	3,982	3,970
	057	Panabá	7,461	0.38%	3,718	3,743
	036	Homún	7,257	0.37%	3,688	3,569
7,000 6,000	090	Timucuy	6,833	0.35%	3,496	3,337
	011	Celestún	6,831	0.35%	3,493	3,338
	084	Temax	6,817	0.35%	3,425	3,392
	007	Cacalchén	6,811	0.35%	3,483	3,328
	092	Tixcacalcupul	6,665	0.34%	3,362	3,303
	044	Kinchil	6,571	0.34%	3,301	3,270
	001	Abalá	6,356	0.33%	3,254	3,102
	055	Opichén	6,285	0.32%	3,201	3,084
	075	Teabo	6,205	0.32%	3,071	3,134
6,000 5,000	034	Hocabá	6,061	0.31%	3,033	3,028
	029	Dzilam González	5,905	0.30%	3,027	2,878
	004	Baca	5,701	0.29%	2,819	2,882
	035	Hoctún	5,697	0.29%	2,816	2,881
	042	Kantunil	5,502	0.28%	2,764	2,738
	095	Tixpéhual	5,388	0.28%	2,660	2,728
	047	Maní	5,250	0.27%	2,560	2,690
5,000 4,000	063	Samahil	5,008	0.26%	2,532	2,476
	015	Cuzamá	4,966	0.25%	2,493	2,473
	025	Dzán	4,941	0.25%	2,399	2,542
	037	Huhí	4,841	0.25%	2,471	2,370
	094	Tixméhuac	4,746	0.24%	2,411	2,335
	087	Tetiz	4,725	0.24%	2,313	2,412
	009	Cansahcab	4,696	0.24%	2,327	2,369
	062	Sacalum	4,589	0.23%	2,368	2,221
	023	Chocholá	4,530	0.23%	2,318	2,212
	017	Chankom	4,464	0.23%	2,276	2,188
	073	Tahdziú	4,447	0.23%	2,281	2,166
	022	Chikindzonot	4,162	0.21%	2,103	2,059
	4,000 3,000	021	Chicxulub Pueblo	4,113	0.21%	2,123
008		Calotmul	4,095	0.21%	2,080	2,015
070		Sucilá	3,930	0.20%	1,994	1,936
066		Santa Elena	3,833	0.20%	1,855	1,978
039		Ixil	3,803	0.19%	1,946	1,857
099		Uayma	3,782	0.19%	1,944	1,838
012		Cenotillo	3,701	0.19%	1,765	1,936
078		Tekantó	3,683	0.19%	1,830	1,853
074		Tahmek	3,609	0.18%	1,841	1,768
082		Telchac Pueblo	3,557	0.18%	1,803	1,754
030		Dzitas	3,540	0.18%	1,813	1,727
026		Dzemul	3,489	0.18%	1,777	1,712
100		Ucú	3,469	0.18%	1,744	1,725
097		Tunkás	3,464	0.18%	1,774	1,690
4,000-3000		061	Río Lagartos	3,438	0.18%	1,749
	049	Mayapán	3,269	0.17%	1,676	1,593
	103	Xocchel	3,236	0.17%	1,660	1,576
	024	Chumayel	3,148	0.16%	1,552	1,596

.....Continuación de Tabla 22.

ENTIDAD YUCATÁN			TOTAL	PORCIENTO	HOMBRES	MUJERES
RANGO	CLAVE	MUNICIPIO	1,955,577	100%	963,333	992,244
4,000-3000	068	Sinanché	3,126	0.16%	1,622	1,504
	081	Tekom	3,100	0.16%	1,553	1,547
	051	Mocochá	3,071	0.16%	1,548	1,523
	018	Chapab	3,035	0.16%	1,509	1,526
3,000 2,000	046	Mama	2,888	0.15%	1,366	1,522
	105	Yaxkukul	2,868	0.15%	1,443	1,425
	016	Chacsinkín	2,818	0.14%	1,417	1,401
	031	Dzoncauich	2,772	0.14%	1,401	1,371
3,000 2,000	043	Kaua	2,761	0.14%	1,419	1,342
	054	Muxupip	2,755	0.14%	1,341	1,414
	077	Tekal de Venegas	2,606	0.13%	1,313	1,293
	028	Dzilam de Bravo	2,463	0.13%	1,262	1,201
	045	Kopomá	2,449	0.13%	1,255	1,194
	010	Cantamayec	2,407	0.12%	1,255	1,152
	086	Tepakán	2,226	0.11%	1,141	1,085
	106	Yobaín	2,137	0.11%	1,103	1,034
2,000 1,000	005	Bokobá	2,053	0.10%	1,053	1,000
	088	Teya	1,977	0.10%	972	1,005
	072	Suma	1,876	0.10%	946	930
	065	San Felipe	1,839	0.09%	956	883
	083	Telchac Puerto	1,726	0.09%	906	820
	071	Sudzal	1,689	0.09%	890	799
	064	Sanahcat	1,619	0.08%	813	806
	014	Cuncunul	1,595	0.08%	815	780
	060	Quintana Roo	942	0.05%	470	472

Fuente: INEGI¹, Fuente: INEGI¹, 2011. Perspectivas Estadísticas Yucatán.

Vivienda

INEGI1 (2011) reporta un total de 502,948 viviendas particulares habitadas. Para el tipo de vivienda denominada “Casa Independiente” cubre el 98.8% mientras que el 0.5% corresponde a “Departamento en Edificio”. El 43.1% de las viviendas cuentan con cuatro o más cuartos y tienen disponibilidad de servicios básicos. De estos servicios básicos el 93.7% se abastecen de agua entubada, el 79.7% cuenta con drenaje, el 97.4% tiene energía eléctrica y el 62.5% cuenta con los tres servicios. El 92.0% de las viviendas disponen de televisión y el 76.9% de refrigerador, el 68.5% cuentan con lavadora. El 25.8% de los hogares cuentan con computadora y solo el 18.3% dispone de internet, el 33.7% de la población cuenta con automóvil o camioneta (Tabla 23).

Educación

La infraestructura educativa de Yucatán está conformada por un total de 3,811 planteles que cumplen con las necesidades de educación desde nivel preescolar hasta nivel superior; de los cuales, 3,215 son centros escolares que cubren el nivel básico que comprende preescolar, primaria y secundaria; 247 son planteles de educación media superior que incluye profesional técnica y bachillerato, 149 corresponde a instituciones de educación superior que comprende universidades, normales, tecnológicas y postgrados y finalmente cuenta con 200 colegios de capacitación para el trabajo (Tabla 24).

Salud

Los servicios médicos son proporcionados por instituciones públicas tales como el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (ISSSTE) y Secretaría de Marina (SEMAR) para población asegurada y la Secretaría de Salud (SSA) e IMSS-Oportunidades para la población no asegurada. El Estado cuenta con 330 unidades médicas de las cuales 310 ofrecen servicio de consulta externa y 20 son hospitales (Tabla 25).

Tabla 23. Total de viviendas particulares habitadas y disponibilidad de servicios.

CARACTERÍSTICAS DEL TIPO DE VIVIENDAS PARTICULARES HABITADAS Y DISPONIBILIDAD DE SERVICIOS	
CONCEPTO	ENTIDAD
Total de viviendas particulares habitadas	502,948
Tipo de vivienda	
Casa independiente	98.8
Departamento en edificio	0.5
Disponibilidad de servicios básicos	
Agua de la red pública	93.7
Drenaje	79.7
Energía eléctrica	97.4
Con los tres servicios	62.5
Material de construcción	
Con piso diferente de tierra	96.4
Disponibilidad de espacios	
Con excusado o sanitario	88.5
Con tres y más cuartos	43.1
Disponibilidad de bienes	
Con televisión	92.0
Con refrigerador	76.9
Con lavadora	68.5
Con computadora	25.8
Con Internet	18.3
Con automóvil o camioneta	33.7
Fuente: INEGI ¹ , 2011. Perspectivas Estadísticas Yucatán.	

Tabla 24. Características del sector educativo del estado de Yucatán.

CARACTERÍSTICAS DEL SECTOR EDUCATIVO, PERIODO ESCOLAR 2008-2009				
NIVEL EDUCATIVO	ESCUELAS	ALUMNOS (Miles)	MAESTROS	ALUMNO/MAESTRO
Estado de Yucatán	3,811	572.3	33,528	17.1
Educación básica Preescolar, Primaria y Secundaria	3,215	430.2	21,256	20.2
Educación media superior Profesional técnica y bachillerato	247	71.4	4,933	14.5
Educación superior Normal, universidad, tecnológica y posgrado	149	55.4	6,385	8.7
Capacitación para el trabajo	200	15.3	954	16.0
Fuente: INEGI ¹ , 2011. Perspectivas Estadísticas Yucatán.				

Tabla 25. Total de unidades médicas de Instituciones públicas de Salud.

UNIDADES MÉDICAS DE CONSULTA EXTERNA Y HOSPITALARIAS DE LAS INSTITUCIONES PÚBLICAS DE SALUD POR TIPO DE POBLACIÓN BENEFICIADA		
DESCRIPCIÓN	TOTAL	PORCENTAJE
Total de unidades médicas	330	100.0
Población asegurada	48	14.5
Población no asegurada	282	85.5
De consulta externa	310	100.0
Población asegurada	40	12.9
Población no asegurada	270	87.1
Hospitalarias	20	100.0
Población asegurada	8	40.0
Población no asegurada	12	60.0
Fuente: INEGI ¹ , 2011. Perspectivas Estadísticas Yucatán.		

El 61.2% de la población es derechohabiente mientras que el 38.8% corresponde a una población no asegurada. Así mismo, el Estado cuenta con un total de 3,519 médicos de los cuales 3,147 están en contacto con el paciente y son médicos generales, especialistas y médicos en formación (comprende pasantes de medicina y de odontología, internos de pregrado y residentes), mientras que el resto 976 se dedican atender otras labores (personal en labores administrativas, de enseñanza e investigación, epidemiológicos, anátomo-patólogos y otras labores). Los servicios médicos otorgados corresponden a consultas externas generales, especialidades, urgencias y odontológicas, así como, estudios específicos para asignar diagnósticos, tratamientos, intervenciones quirúrgicas entre otros (Tabla 26).

Tabla 26. Total de personal médico, paramédico y servicios de atención interna.

PERSONAL MÉDICO, PARAMÉDICO Y SERVICIOS SELECCIONADOS DE LAS INSTITUCIONES PÚBLICAS DE SALUD SEGÚN TIPO DE POBLACIÓN BENEFICIARIA			
DESCRIPCIÓN	TOTAL	% POBLACIÓN ASEGURADA	% POBLACIÓN NO ASEGURADA
Personal médico	3,519	61.2	38.8
En contacto con el paciente	3,147	59.8	40.2
Generales	882	53.7	46.3
Especialistas	1,289	68.2	31.8
Médicos en formación	976	54.2	45.8
En otras labores	372	72.6	27.4
Personal paramédico	9,106	61.0	39.0
Enfermeras	4,359	56.0	44.0
Servicios auxiliares diagnóstico y tratamiento	754	68.7	31.3
Trabajo Social	637	87.0	13.0
Otro personal	3,356	60.8	39.2
Fuente: INEGI ¹ , 2011. Perspectivas Estadísticas Yucatán.			

El análisis estadístico de los servicios médicos de instituciones públicas de salud, 2009 del estado de Yucatán (INEGI1, 2011), reporta que por cada mil habitantes se tienen 1.6 médicos de los cuales 0.5 corresponden a médicos generales o familiares, 0.7 médicos especialistas, apoyados con 2.1 enfermeras por cada mil habitantes. Por cada cien mil habitantes, el Estado cuenta con 16.1 unidades de consulta externa que incluyen clínicas de primer nivel (consulta externa), pero no incluyen módulos urbanos del IMSS-Oportunidades. Así mismo, por cada cien mil habitantes se tienen 1.0 unidades de especialidades y 2.6 quirófanos. Por cada diez mil habitantes se cuenta con 5.8 consultorios y por cada mil habitantes se cuenta con 0.9 camas censables para hospitalización (Tabla 27).

Tabla 27. Total de recursos humanos y físicos por habitantes de instituciones públicas de salud.

INDICADORES DE SERVICIOS MÉDICOS DE LAS INSTITUCIONES PÚBLICAS DE SALUD		INDICADOR
Recursos humanos		
Médicos por cada mil habitantes a/		1.6
Médicos generales o familiares por cada mil habitantes		0.5
Médicos especialistas por cada mil habitantes		0.7
Enfermeras por cada mil habitantes a/		2.1
Enfermeras por médico general a/		1.3
Recursos físicos		
Unidades de consulta externa por cada cien mil habitantes b/		16.1
Unidades de especialidad por cada cien mil habitantes c/		1.0
Camas censables por cada mil habitantes		0.9
Consultorios por cada diez mil habitantes		5.8
Quirófanos por cada cien mil habitantes		2.6
a. Contacto con el paciente. b. Unidades primer nivel proporciona servicio de consulta externa c. Incluye unidades híbridas.		
Fuente: INEGI ¹ , 2011. Perspectivas Estadísticas Yucatán.		

El análisis estadístico de la infraestructura, recursos y servicios hospitalarios del sector privado del estado de Yucatán (INEGI1, 2011), reporta que por cada cien mil habitantes se tiene 1.7 establecimientos que corresponde a 32 unidades médicas privadas. De las cuales 28 son hospitales generales que cubre 1.5 y cuatro hospitales de especialidades que representa en 0.2 por cada cien mil habitantes (Tabla 28).

Tabla 28. Total de unidades médicas de Instituciones privadas de salud.

UNIDADES MÉDICAS Y HOSPITALARIAS DE LAS INSTITUCIONES PRIVADAS DE SALUD		
DESCRIPCIÓN	TOTAL	POR CIENTO MIL HABITANTES
Total de establecimientos	32	1.7
Hospital General	28	1.5
Hospital del especialidades	4	0.2
Fuente: INEGI ¹ , 2011. Perspectivas Estadísticas Yucatán.		

Las unidades médicas del sector privado cuenta con un total de 934 médicos de los cuales 928 están en contacto directo con el paciente y están divididos en 102 médicos generales, 793 especialistas (Gineco-obstetras, pediatras, cirujanos, internistas, anesthesiólogos y otros especialistas) y 33 médicos residentes, pasantes y odontólogos. El análisis muestra que por cada cien mil habitantes el estado cuenta con 48.6 médicos de servicio privado. De los cuales el 48.3 son médicos en contacto con el paciente y se divide en 5.3 médicos generales, 41.3 especialistas y 1.7 residentes y pasantes. Así mismo por cada cien mil habitantes, el Estado cuenta con 6.5 consultorios, 23.3 camas censables para hospitalización, 2.9 quirófanos y 0.7 laboratorios de análisis clínicos (Tabla 29).

Tabla 29. Total de recursos humanos y físicos por habitantes de instituciones privadas de salud.

INDICADORES DE SERVICIOS MÉDICOS DE LAS INSTITUCIONES DEL SECTOR PRIVADO		
DESCRIPCIÓN	TOTAL	POR CIENTO MIL HABITANTES
Personal médico	934	48.6
Médicos en contacto directo con el paciente	928	48.3
Generales	102	5.3
Especialistas	793	41.3
Otros	33	1.7
En otras labores	6	0.3
Recursos Físicos		
Consultorios	125	6.5
Camas censables	448	23.3
Laboratorios de análisis clínicos	13	0.7
Quirófanos (salas)	56	2.9
Fuente: INEGI ¹ , 2011. Perspectivas Estadísticas Yucatán.		

V.4. Hidrografía

De acuerdo a la Comisión Nacional del Agua, el estado de Yucatán se encuentra en la Región Hidrológica No 32 y administrativamente se localiza en la Región XII de Península de Yucatán que abarca a todo el Estado. Existen dos regiones hidrológicas denominadas Región Yucatán Norte y Región Yucatán Este. La Región Hidrológica Yucatán Norte, es la principal en el Estado y ocupa el 97.04% de la superficie de la entidad. Dentro de esta Región, la Cuenca Yucatán es la que domina, con 95.82% de la superficie del Estado, mientras que la Cuenca Quintana Roo, sólo ocupa algunas porciones al este de la entidad con 1.22%. La Región Hidrológica Yucatán Este, sólo ocupa 2.96% de la superficie estatal y se localiza al sur e incluye solamente la Cuenca Cerradas (INEGI6 2011), (Tabla 30 y Figura 37).

Tabla 30. Regiones hidrológicas y sus cuencas del estado de Yucatán

REGIÓN HIDROLÓGICA		CUENCA		PORCENTAJE DE LA SUPERFICIE ESTATAL
RH32	Región Yucatán Norte (Yucatán)	A	Quintana Roo	1.22
		B	Yucatán	95.82
RH33	Región Yucatán Este (Quintana Roo)	B	Cuencas Cerradas	2.96

Fuente: INEGI⁶, Carta Hidrológica Aguas Superficiales, 1:250 000,000.

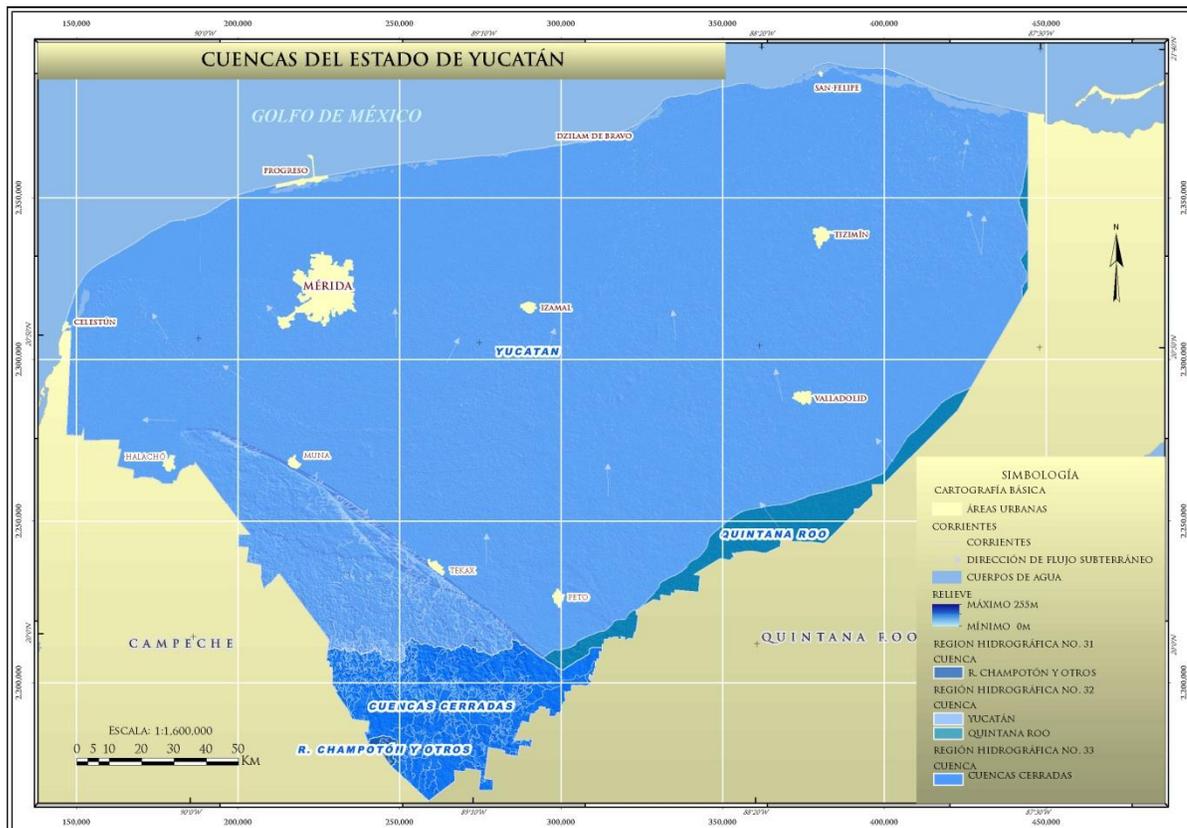


Figura 37. Regiones hidrológicas del estado de Yucatán.

En Yucatán no existen cuerpos acuíferos superficiales como ríos, arroyos o lagos, sin embargo debido a las características del subsuelo, la karstificación propicia el almacenamiento y el movimiento del agua subterránea a través de una red de cavidades interconectadas con fracturas, conductos de disolución, oquedades y cavernas localizadas a diferentes profundidades (Villasuso y Méndez, 2000).

Está red de corrientes subterráneas se manifiestan a lo largo y ancho de la geografía estatal en forma de grutas y aguadas llamadas cenotes que son acuíferos subterráneos expuestos, formados por el hundimiento total o parcial de la bóveda calcárea, estos cuerpos a nivel del manto freático están conectados con otros flujos laminares subterráneos no expuestos que forman un sistema donde sus niveles varían de 130 metros en el vértice del sur del Estado a dos a tres metros en el cordón litoral, donde se realiza la descarga natural del acuífero rumbo a Celestún, Dzilam de Bravo y San Felipe, que desembocan a manera de ríos y fluye hacia las lagunas costeras alimentando los esteros y lagunas costeras (INEGI6, 2011).

Las costas de Yucatán se limitan al Golfo de México, que en realidad, son playas de bajo nivel sobre el mar constituidas por bancos de arena, submarinos o visibles, que dificultan la navegación marítima notablemente. El litoral que separa al territorio estatal comienza desde el municipio de Celestún y culmina en los límites orientales de Río Lagartos y Tizimín; con una longitud aproximada de 378 Km, representando el 3,8% del total de litorales en México (Wikipedia, 2011).

En el territorio yucateco existe una ausencia de corrientes superficiales de agua, pero están presentes unos cuerpos de agua superficiales conocidos como Los Esteros Celestún, Yucalpetén, Río Lagartos, El Islote y Yolvé y las Lagunas Flamings y Rosada (Tabla 31). Así mismo se cuenta con acuíferos subterráneos y acuíferos subterráneos expuestos (Tabla 32).

Tabla 31. Cuerpos de agua superficiales en el estado de Yucatán.

CUERPOS DE AGUA	
NOMBRE	UBICACIÓN
Estero Celestún	RH32B
Estero Yucalpetén	
Estero Río Lagartos	
Estero Islote	
Laguna Flamings	
Laguna Rosada	
Fuente: INEGI ⁴ , 2011. Anuario estadístico de Yucatán, 2010.	

Tabla 32. Principales rasgos hidrográficos de las corrientes de agua del estado de Yucatán.

CORRIENTES DE AGUA		
CORRIENTES SUPERFICIALES	ACUÍFEROS SUBTERRÁNEOS	ACUÍFEROS SUBTERRÁNEOS EXPUESTOS
Ausencia total	Frecuentes y voluminosos, forman un sistema de vasos comunicantes que desembocan al mar, con profundidades de niveles freáticos que varían de 2 a 3 metros en el cordón litoral hasta 1300 metros en el vértice sur.	Existen en el centro y noroeste, por hundimiento total o parcial de bóveda calcárea, se denominan localmente: cenotes, rejolladas y aguadas.
Fuente: Duch Gary Jorge. La Conformación Territorial del Estado de Yucatán, 1988.		

V.5. Fisiografía

El Estado se encuentra en la porción Norte de la **Provincia Fisiográfica Península de Yucatán** la cual se caracteriza por ser una gran plataforma de rocas calcáreas marinas que ha venido emergiendo de las aguas desde hace muchos millones de años, siendo su parte norte la más reciente, esta provincia presenta una superficie plana y pequeñas cadenas montañosas orientadas NW-SE, con elevaciones del orden de los 300 m.s.n.m. Esta provincia se subdivide en dos subprovincias: **Carso Yucateco** en donde se ubica casi el 88% del Estado y **Carso y Lomeríos de Campeche**, en la parte sur de la entidad que cubre el 12% del territorio yucateco. (INEGI³, 2011). Estas subprovincias están claramente divididas por la sierra de Ticul (Figura 38).

Sierra de Ticul

Contrastando con la topografía plana de la Península a 60 Km al sur de Mérida, la Sierra de Ticul es uno de los rasgos más notables, corresponde a una delgada cadena de lomas bajas que se expone en 110 Km de longitud y con un rumbo de NW-SE y se extienden desde Maxcanú hasta Peto, Yucatán. Está compuesta por un conjunto de lomas, cuya altura varía de 50 a 100 m con respecto a la planicie y sólo en las cercanías de Tekax llega a tener elevaciones de 150 m. De las laderas de la Sierrita, la del NE desciende con mayor pendiente, formando escarpes de poca longitud, en tanto que la pendiente de la ladera puesta es ligera y da origen a un terreno sensiblemente ondulado.

Al norte, este y sureste de dicha cadena, los terrenos son bastante planos y con suelos predominantemente someros sobre una plancha endurecida calcárea llamada "roca laja"

La amplia planicie Mérida –Valladolid-Puerto Juárez

Comprende la parte norte de Yucatán, desde la sierrita de Ticul hasta el Golfo de México, se extiende con una pendiente suave de Norte a Sur, elevándose sólo unos cuantos metros del nivel del mar. En la península se ha integrado una enorme red cavernosa subterránea por la que escurre el agua, en general hacia el norte, lo que explica la carencia de ríos. Pozos naturales de disolución, los cenotes son comunes y abren a la red de drenaje subterráneo, abundan también las grutas.

Planicie Central

Corresponde a una extensa área ubicada al Sur y Suroeste de la Sierrita de Ticul, donde predominan terrenos de cerros bajos con terrenos planos de suelos muy arcillosos, originalmente lechos de antiguas lagunas costeras, estos terrenos planos en parte ligeramente rugoso y ondulado según las rocas aflorantes no tiene orientación fija, a excepción de algunas lomas en la parte Sur y SE de Quintana Roo que se unen y forman pequeñas cadenas orientadas de Norte a Sur (INEGI6, 2011).

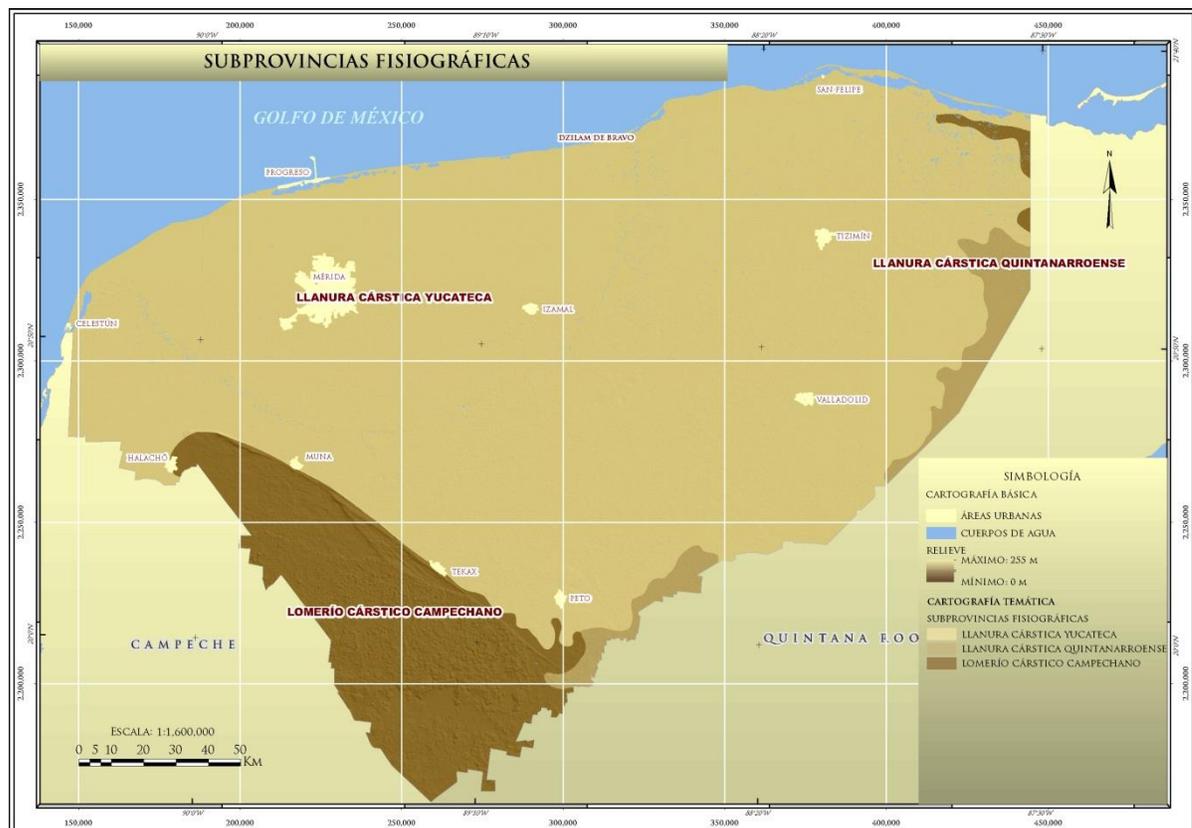


Figura 38. Subprovincias fisiográficas del estado de Yucatán.

V.6. Vegetación

En términos generales, la vegetación tropical de la Península de Yucatán se ha adaptado a la escasez de lluvia y a las altas temperaturas, en un clima seco del tipo BS0 y BS1 que no rebasan los 700 mm en promedio y con temperatura media de 30 °C hasta 48°C (Flores G. y Kantún B., 2009 en Durán R. y M. Méndez. 2010). Estas comunidades se manifiestan a través de distintos tipos de vegetación y asociaciones terrestres y son clasificadas en diez tipos: 1. Vegetación de dunas costeras, 2. Manglar, 3. Selva baja caducifolia, 4. Selva mediana subcaducifolia, 5. Selva mediana subperennifolia, 6 Selva baja inundable, 7 Sabanas, 8. Petenes, 9. Comunidades de hidrófilas y 10. Vegetación secundaria (Durán R. y M. Méndez. 2010).

Vegetación de Dunas Costeras

Es un tipo de vegetación halófila que se desarrolla en suelos arenosos calcáreos con alto contenido de sales solubles que se desarrollan a lo largo de la línea de costa, este tipo suelo forma dunas arenosas que tienen una dinámica eólica provocando su desplazamiento paulatino, según la fuerza y dirección del viento La vegetación se extiende a lo largo del litoral, abarcando una angosta franja que cubre una extensión aproximada de 290 Km² con un ancho puede variar de 50 a 300 m. Se desarrolla sobre un ambiente extremo, con poca precipitación anual (300 a 400 mm) y altas temperaturas (29° y 30°C). Cubre las playas y costas arenosas no inundables de las localidades de Celestún, Sisal, Progreso, Telchac, Dzilam de Bravo, Río Lagartos y El Cuyo (Durán R. y M. Méndez. 2010). Las plantas que cubren las dunas costeras están adaptadas a los suelos salinos y poca disponibilidad de agua dulce, por lo que en su mayoría son halófitas. En la zona más cercana al mar (zona de pioneras), sus formas de crecimiento son preferentemente herbáceas, rastreras, enredaderas o arbustos muy ramificados con escasa altura. Sin embargo en los extremos oriente y poniente del litoral, el matorral de dunas alcanza su mayor desarrollo y los árboles pueden alcanzar tallas de 6 m o más (Durán R. y M. Méndez. 2010).

La zona de pioneras se encuentra cerca de las playas y crece sobre arena móvil. En ella se desarrollan plantas herbáceas y arbustivas, tolerantes a medios de extrema salinidad, vientos fuertes y a la acción de mareas altas. La mayoría de las especies que se establecen en esta zona presenta poco crecimiento vertical y más bien son de hábito prostrado (Fotografía 44), (Espejel, 1984; Campos y Durán, 1991 en SEDUMA, 2010). Las especies más comunes son: *Atriplex canescens*, *Sesuvium portulacastrum*, *Ipomoea pes-caprae*, *Cakile lanceolata*, *Euphorbia buxifolia*, *Canavalia rosea*, *Suriana marítima*, entre otras. La **zona de matorrales** se encuentra en el interior de la duna, donde la arena se encuentra fija y el suelo presenta mayor cantidad de materia orgánica, en esta área dominan arbustos y árboles. Los matorrales tienen una altura variable, los de menor altura se encuentran en las zonas más áridas y expuestas (Sisal y Telchac), los de mayor altura se desarrollan en las zonas más protegidas y de mayor humedad (Celestún, Las Coloradas y El Cuyo). Las especies más comunes son: *Agave angustifolia*, *Bravaisia berlandieriana*, *Acanthocereos tetragonus*, *Metopium brownei*, *Capparis incana*, entre otras (Durán R. y M. Méndez. 2010) (Fotografía 45).



Fotografía 44. Duna costera en la zona de pioneras. (Foto Durán R. y Méndez, 2010).



Fotografía 45. Matorral de duna costera en Uaymitún. (Foto Durán R. y Méndez, 2010).

Manglar

Esta comunidad se extiende a lo largo del litoral yucateco, donde se les encuentra formando parte de lagunas costeras, ciénagas, petenes y playas. Su estructura presenta algunas variantes dependiendo del lugar donde se encuentre, en Celestún el manglar se encuentra de franja en las riadas y bordes de lagunas, en tanto que en los blanquizales se presenta en forma achaparrada. Los manglares mejor desarrollados se encuentran en Ría Lagartos, Ría Celestún y las Bocas de Dzilam. El clima es tipo BS y AW₀. Los suelos son de origen calcáreo y contienen mucha turba, casi siempre permanecen inundados, pero muchos de ellos se secan durante la época de sequía, formando los llamados blanquizales que presentan suelos hipersalinos (Zaldívar-Jiménez y otros, 2004 en Durán R. y Méndez, 2010).

El manglar llamado también bosque salado, se fija al suelo mediante un complejo sistema de raíces que le da una mejor estabilidad en el fango. Su follaje es forma de sombrilla da un aspecto fisonómico aerodinámico que le permite resistir el embate de vientos fuertes, como los que se presentan en huracanes. Los bosques de manglar tienen una estrecha relación con las descargas de agua subterránea, siendo ésta una condición local que determina su productividad primaria, fisonomía y trayectorias de restauración ecológica. Las características cársticas de la Península de Yucatán favorecen que el agua fluya formando una compleja red de ríos subterráneos con flujos dominantes hacia los extremos oriente y poniente de la zona conocida como “anillo de cenotes”. La geohidrología de la costa norte determina el desarrollo de escenarios de manglar que pueden ser de tipo húmedo o seco (Zaldívar-Jiménez y otros, 2004 en Durán R. y Méndez, 2010), (Figura 39).

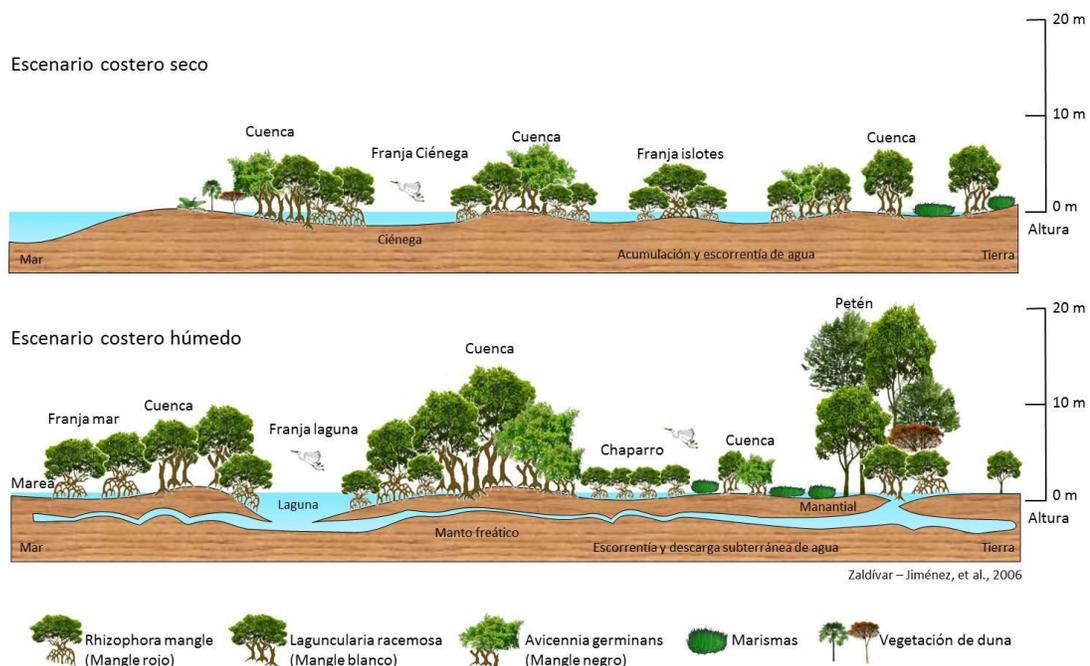


Figura 39. Escenarios de manglar húmedo y seco.

Los manglares húmedos y secos resultan de la interacción del humedal de manglar y las zonas de descarga del anillo de cenotes (Zaldívar-Jiménez *et al*, 2006 en Durán R. y Méndez, 2010).

a) El **escenario húmedo** se caracteriza por la función del anillo de cenotes de concentrar y dirigir el agua subterránea hacia sitios de intercepción con la costa, de los cuales, los dos principales son: la laguna Celestún-Palmar y las Bocas de Dzilam. Estos sitios están sujetos a un régimen hidrológico que combina la acción de la marea y la descarga del agua subterránea. Su vegetación está dominada por *Rhizophora mangle* (mangle rojo) y *Laguncularia racemosa* (mangle blanco).

b) El **escenario seco** se caracteriza por que la inundación y los aportes de agua dulce están fuertemente influenciados por la estacionalidad de la precipitación, de manera que sus sedimentos son hipersalinos y con baja concentración de nutrientes, dando como resultado una estructura forestal de ambientes áridos, dominada por *Avicennia germinans* (mangle negro) Este escenario de manglar es dominante en sitios como Sisal, Progreso, Telchac y Río Lagartos. A escala local, cada escenario de manglar es definido por su estructura forestal e hidroperíodo: tipo de franja, cuenca, chaparro y petén. Las especies se encuentran: *Conocarpus erectus* (mangle botoncillo), *Salicornia sp.* y *Batis marítima*, mientras que especies como *Achrosticum sp.* (Helecho), *Typha domingensis* y *Cladium jamaicensis* se encuentran rodeando a los petenes (Zaldívar-Jiménez y otros, 2004 en Durán R. y Méndez, 2010).

En el estado de Yucatán se encuentran las cuatro especies arbóreas: *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Avicennia germinans* (mangle negro), *Laguncularia racemosa* (mangle bobo o blanco) y *Conocarpus erectus* (botoncillo). Las tres primeras se distribuyen en suelos que permanecen inundados durante largos períodos (Durán R. y Méndez, 2010).

1. Manglar de franja. Se localiza principalmente en la línea de costa (Dzilam de Bravo) y lagunas costeras (Celestún), recibe diariamente la influencia de la marea y está expuesto a fuertes vientos; la especie dominante es *Rhizophora mangle* (Herrera-Silveira y otros, 1998 en Durán R. y Méndez, 2010), (Fotografía 46).

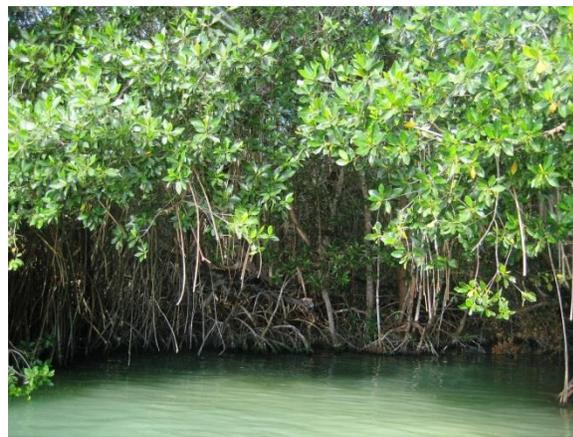
2. Manglar de cuenca. Se localiza detrás del manglar de franja hacia tierra adentro en depresiones topográficas. Recibe una influencia menor de las mareas que el de tipo de franja. El predominio de una especie depende de la salinidad y concentración de nutrientes: bosques mono específicos o combinados de *Avicennia germinans* (Sisal) si el sitio registra salinidades mayores a 40 g/kg, *Laguncularia racemosa* (Dzemul) si la salinidad es menor a 35 g/kg (Herrera-Silveira y otros, 1998 en Durán R. y Méndez, 2010).

3. Manglar chaparro o achaparrado. Se localiza en el escenario húmedo, con una altura promedio de entre 1.5 y 2.5 m en zonas donde prevalecen condiciones de limitación de nutrientes en el sedimento y elevada salinidad (Celestún) (Herrera-Silveira y otros, 1998 en Durán R. y Méndez, 2010) (Fotografía 47).

4. Manglar de petén. Está asociado a cuerpos de agua, conocidos como “ojos de agua” o “manantiales”. Adquiere alturas promedio de 15 metros, debido a las elevadas concentraciones de nutrientes, baja salinidad y suelos con una gruesa capa de materia orgánica. *Rhizophora mangle* y *Laguncularia racemosa* son las especies dominantes, particularmente frecuentes en Celestún, El Palmar y Dzilam de Bravo (Herrera-Silveira y otros, 1998 en Durán R. y Méndez, 2010).



Fotografía 46. Manglar de franja. (Foto Durán R. y Méndez, 2010).



Fotografía 47. Manglar achaparrado *Rhizophora mangle*. (Foto S. Flores en Durán R. y Méndez, 2010).

Selva Baja Caducifolia

Es la comunidad más extensa que se distribuye en el Estado con una extensión aproximada de 20,000 Km² y es la que tipifica junto con la selva mediana subcaducifolia, la fisionomía del paisaje yucateco. Esta vegetación se desarrolla sobre suelos calcáreos con afloramientos de rocas y se extiende como una franja no uniforme desde la parte nororiental del estado de Yucatán hasta introducirse en Campeche. Se desarrolla en zonas con climas secos y subhúmedos con lluvias en verano, especialmente en los subtipos Aw₀ y Aw₁ que registran una precipitación promedio anual que va de 728.2 a 1000 mm con una temperatura promedio que oscila entre 26 y 27.6°C. La selva baja caducifolia está constituida por un estrato arbóreo que rebasa los 12 m de altura registra un estrato herbáceo donde abundan gramíneas compuestas y euphorbiáceas. (Durán R. y Méndez, 2010). Además se presentan lianas leñosas de la familia Bignoniaceae y algunos bejucos y trepadoras de las familias Leguminosae, Convolvulaceae y Cucurbitaceae. En sus árboles se posan epífitas de las familias Orchidaceae y Bromeliaceae.

Esta comunidad tiene como característica especial el hecho de que un alto porcentaje de los árboles dejan caer sus hojas en la época seca (Durán R. y Méndez, 2010). Entre las especies representativas de estas son: *Ceiba aesculifolia*, *Jatropha gaumeri*, *Metopium brownei*, *Alvaradoa amorphoides*, *Bursera simaruba*, *Chlorophora tinctoria*, *Senna emarginata*, *Bauhinia divaricata*, *Plumeria rubra*, *Caesalpinia gaumeri*, *Cochlospermum vitifolium*, *Caesalpinia yucatanensis*, *Mimosa bahamensis*, *Havardia albicans*, *Guazuma ulmifolia*, *Leucaena leucocephala*, *Gyrocarpus americanus*, *Diospyros cuneata* y *Plumeria obtusifolia*, entre otras (Durán R. y Méndez, 2010), (Fotografía 48).



Fotografía 48. Selva baja caducifolia (Foto M. Casillas en Durán R. y Méndez, 2010).

Selva Baja Espinosa

Es un tipo de selva muy peculiar también conocida como selva baja con cactáceas candelabriformes. Se distribuye a lo largo del litoral desde el puerto de Sisal hasta las inmediaciones de Río Lagartos como una franja de vegetación que se extiende tierra adentro y que bordea la parte sur de humedales en forma paralela a la costa norte del Estado (Miranda, 1958; Bravo-Hollis y Sánchez –Mejorada, 1991 en Durán R. y Méndez, 2010).

Se desarrolla en un clima cálido y seco y sobre suelos muy someros con afloramientos rocosos en forma de lajas y alta pedregosidad, lo que determina sus condiciones de extrema aridez durante gran parte del año. Esta comunidad arbórea es de baja altura, los mayores alcanzan de 8 a 9 m y el resto tiene en promedio de 5 a 6 m (Fotografía 49). La selva baja espinosa está dominada por árboles de las familias Leguminosae y Cactaceae, así como por herbáceas de las familias Rubiaceae y Cactáceae y Leguminosae. Durante la época de secas, los elementos arbóreos y arbustivos tiran sus hojas (Durán R. y Méndez, 2010).



Fotografía 49. Selva baja espinosa (Foto Durán R. y Méndez, 2010).

Las especies de esta comunidad presentan espinas en sus tallos, ramas y hojas, además de un elevado número de especies de cactáceas, varias de las cuales son endémicas, desde el punto de vista fisonómico, sobresalen las cactáceas columnares nativas de Yucatán (Fotografía 50); (Durán R. y Méndez, 2010).

Esta comunidad constituye una de las cuatro zonas de endemismo que se presentan en el Estado, a la cual se le ha denominado “Zona Seca de Yucatán” (Espadas y otros, 2003 en Durán R. y Méndez, 2010). Los árboles dominantes son *Acacia pennatula*, *Acacia farnesiana*, *Acacia gaumeri*, *Acacia collinsi*, *Bursera simaruba*, *Havardia albicans*, *Gymnopodium floribundum*, *Mimosa bahamensis*, *Pithecellobium unguis-cati*, *Pithecellobium dulce*, *Piscidia piscipula* y *Senna emarginata*, además algunas especies de cactáceas: *Pterocereus gaumeri*, *Stenocereus laevigatus*, *Acanthocereus tetragonus*, *Opuntia dillenii*, *Nopalea gaumeri* y *Nopalea innaperta* (Durán R. y Méndez, 2010).



Fotografía 50. Cactáceas columnares en selva baja. (Foto Durán R. y Méndez, 2010).

Selva Mediana Subcaducifolia

Es una de las comunidades más representativas del Estado, se extiende en una amplia franja que se origina al noreste del Estado y se prolonga con rumbo suroeste, pasando por el centro hasta internarse en la porción norte del estado de Campeche. Tipifica junto con las selvas bajas, la fisonomía vegetal de Yucatán, ocupando una extensión aproximada de 29,309 Km². Se distribuye en climas cálidos subhúmedos con lluvias en verano, la precipitación oscila entre 1078 y 1220 mm al año, con una temperatura media anual de 25.9 a 26.6°C. Se desarrolla sobre suelos pedregosos, pero que contienen una delgada capa de materia orgánica. Está conformada por un estrato arbóreo cuya altura promedio oscila entre 10 y 15 metros y en la época de secas de 50 a 75% de sus árboles dejan caer sus hojas. (Durán R. y Méndez, 2010).

Las especies características de esta selva mediana (Fotografía 51), se encuentran los árboles más corpulentos: *Enterolobium cyclocarpum*, *Ceiba pentandra* y algunas especies *Ficus*. Las especies de árboles más comunes son: *Acacia cornígera*, *Acacia pennatula*, *Annona reticulata*, *Bursera simaruba*, *Bucida buceras*, *Cedrela odorata*, *Cochlospermum vitifolium*, *Gliricidia maculata*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Caesalpinia gaumeri*, *Guazuma ulmifolia*, *Gymnopodium floribundum*, *Gyrocarpus americanus*, *Havardia albicans*, *Lysiloma latisiliquum*, *Mimosa bahamensis*, *Metopium brownei*, *Sapindus saponaria*, *Piscidia piscipula*, *Pithecellobium dulce*, *Simarouba glauca*, *Sphinga platyloba*, *Spondias mombin*, *Trema micrantha* y *Vitex gaumeri* (Durán R. y Méndez, 2010).



Fotografía 51. Selva mediana subcaducifolia. (Foto S. Flores en Durán y Méndez, 2010).

Selva Mediana Subperennifolia

Es la comunidad más extensa en la Península de Yucatán, es la selva chiclera. Sin embargo, en el estado de Yucatán sólo está representada en su extremo nororiental en el municipio de Tizimín (Colonia Yucatán) y en el cono sur en los municipios de Tekax, Peto y Tzucacab que limitan con el estado de Quintana Roo (Durán R. y Méndez, 2010).

Crece en sitios con suelos profundos y con altos contenidos de materia orgánica. En esta comunidad encontramos la mayor complejidad y diversidad de especies; los árboles alcanzan una altura de 15 a 20 metros y el 25% de ellos deja caer sus hojas en época seca (Fotografía 52). Las especies arbóreas dominantes en Yucatán son: *Ceiba pentandra*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Manilkara zapota*, *Piscidia piscipula*, *Lysiloma latisiliquum*, *Gliricidia maculata*, *Alvaradoa amorphoides*, *Brosimum alicastrum*, *Bursera simaruba*, *Swartzia cubensis*, *Alseis yucatanensis*, *Lonchocarpus castilloi*, *Platymiscium yucatanum*, *Sweetia panamensis*, *Spondias mombin* y *Cordia dodecandra*, entre otras (Durán R. y Méndez, 2010).



Fotografía 52. Selva mediana subperennifolia (Foto S. Flores en Durán y Méndez, 2010).

Selva Baja Inundable

Se encuentra poco representada en Yucatán, forma manchones tanto en la parte sur (cono sur) como en la parte norte (costa noroeste del Estado). Ocupa suelos denominados por los mayas como *akalches*, los cuales tienen menor contenido de materia orgánica y son más pobres puesto que están inundados durante largos períodos, carecen de afloramientos rocosos, son de color gris oscuro, su drenaje es muy lento y en la época seca se observa que tienen mucho perifiton. Esta selva se encuentra formando parches de poca extensión y en climas del tipo Aw_0 , Aw y Aw_2 y sus árboles alcanzan entre 5 y 6 metros de altura. En Yucatán esta comunidad está dominada por leguminosas, como *Haematoxylum campechianum*, *Dalbergia glabra*, *Acacia riparia*, *Mimosa bahamensis*, *Acacia farnesiana*. Además de otras especies, como *Metopium brownei*, *Byrsonima crassifolia*, *Bursera simaruba* y *Croton flavens* (Durán R. y Méndez, 2010).

Sabanas

Están dominadas por gramíneas y ciperáceas, pero comúnmente existe un estrato de árboles bajos de 3 a 6 metros que se pueden encontrar esparcidos o bien agrupados en una especie de islotes adoptando el aspecto de parque. A menudo los árboles tienen troncos retorcidos y la presencia de hojas coriáceas es frecuente. No son comunes las plantas trepadoras, pero puede haber especies epífitas como bromelias y orquídeas (Fotografía 53).

En Yucatán, las sabanas están asociadas a humedales costeros e interiores, inundándose temporalmente durante la época de lluvia.



Fotografía 53. Vegetación de la Sabana (Foto R. Durán en Durán R. y Méndez, 2010).

Las sabanas costeras se desarrollan en un tipo de suelo somero, ya sea del tipo histosol o litosol con influencia marina. Su distribución a lo largo de la costa es uniforme, asociándose a manglares, petenes y selva baja inundable. Los elementos arbóreos característicos son: *Crescentia cujete*, *Byrsonima crassifolia* y *Coccoloba barbadensis*. Los elementos herbáceos predominantes pertenecen a las familias *Poaceae* y *Cyperaceae*, entre las que destacan *Distichlis spicata*, *Spartina spartinae*, entre otras. Las ciperáceas más comunes son: *Fimbristylis spadicea*, *F. cymosa* y *Eleocharis geniculata*. Las sabanas interiores se desarrollan sobre suelos profundos del tipo vertisol sin influencia marina. Se distribuyen a manera de islas en el cono sur del Estado en los municipios de Tekax y Tzucacab, ocupando una superficie reducida.

En este tipo de vegetación se presentan especies características de la selva baja caducifolia y de la selva baja inundable, como *Havardia albicans* y *Gymnopodium floribundum*,. Dispersos en ciertas áreas están presentes arbustos. (Durán R. y Méndez, 2010).

Petenes

Se les denomina petenes a las islas de vegetación arbórea que se encuentran inmensas en una vegetación baja inundable, llamada marisma. Estas marismas se desarrollan en terrenos bajos y pantanosos cerca de la costa, razón por la cual se ven influenciados por la salinidad del mar.

El término petén proviene del vocablo maya *pet* que significa redondo o circular. Barrera (1982) los define como "Islas circulares en las cuales las diferentes asociaciones vegetales se distribuyen en círculos concéntricos de tal modo que el tular o el manglar, según sea el caso, quedan en la periferia, cuando no lo hacen así los elementos de la sabana, para dar lugar a una selva, o bien, a una interesante mezcla de elementos selváticos y de manglar" Tun-Dzul y otros en Durán R. y Méndez, 2010). En general, en el centro de cada petén se presenta un manantial de agua dulce, pero en algunas ocasiones el manantial no se observa a flor de tierra, Trejo-Torres (1993) señala que la surgencia del manto freático a manera de manantial dentro de un medio palustre ocasiona la formación de comunidades a semejanza de islas, las cuales poseen características hidrológicas, edáficas y de vegetación que son muy particulares y en conjunto se reconocen como petén (Tun-Dzul y otros en Durán R. y Méndez, 2010).

Se distribuyen a lo largo de toda la costa en los terrenos de origen geológico reciente que constituyen los humedales costeros, siendo particularmente abundantes en las zonas de Dzilam de Bravo y Río Lagartos en la costa oriente del Estado, y en la región de los petenes en el poniente que incluye a Celestún y el norte de Campeche. Se desarrollan en materiales sedimentarios de origen reciente y de naturaleza calcárea, los suelos predominantes es el gleysol mólico, teniendo como suelos secundarios el solonchak órtico y el regosol calcárico. Los suelos de los petenes se caracterizan por ser muy jóvenes, son orgánicos, profundos y frecuentemente están saturados de agua, presentan una capa superficial rica de materia orgánica que descansa sobre una capa de marga formada a partir de caliza (Tun-Dzul y otros en Durán R. y Méndez, 2010).

Constituyen asociaciones vegetales *sui géneris* que caracterizan a la península, como islas de vegetación constituidas por asociaciones de árboles con una estructura de la selva mediana perennifolia. Pero conformada por una mezcla de especies de manglar selvas subperennifolia o una mezcla de ambos. La vegetación arbórea sobresale en un contorno constituido por una vegetación baja pero puede en algunos casos encontrarse dentro de una matriz medianamente arbolada (Fotografía 54).

Los petenes son muy variados, en algunos predominan las especies de mangle como *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* o *Avicennia germinans*. En otros dominan especies selváticas como *Manilkara zapota*, *Sabal japa*, *Swietenia macrophylla*, *Metopium brownei*, *Annona glabra*, *Bursera simaruba*, entre otras. También existen petenes en los que se observa una mezcla de mangles con especies de selva. En la vegetación de los petenes pueden distinguirse estratos o capas de vegetación. En cada uno de los estratos se observa una fuerte dominancia de dos o tres especies, tanto en la abundancia de individuos como de su biomasa (Tun-Dzul y otros en Durán R. y Méndez, 2010).



Fotografía 54. Vista panorámica de un peten (isla de vegetación). (Foto M. Andrade en Durán R. y Méndez, 2010).

Comunidades de Hidrófilas

Se asocian a depósitos de agua como cenotes, aguadas y rejolladas. Son abundantes en las tierras bajas de la Península de Yucatán. En el estado de Yucatán se encuentran en manchones dispersos que se localizan tanto en Tekax como en Tizimín. Los suelos que ocupan estos depósitos de agua son de color oscuro, pardo oscuro, negro y gris rojizo y oscuro. Los hidrófilos están adaptados al agua y forman asociaciones de vegetación herbácea, anuales o perennes arbustivas y algunas veces pueden ser asociaciones puras (Durán R. y Méndez, 2010; Fotografía 55). Las diversas cavidades formadas en el karst, como los cenotes, haltunes o sartenejas, rejolladas y cavernas, tienen características microclimáticas y ecológicas que permiten el desarrollo de una vegetación adaptada a la humedad y a poca luz (Flores-Guido J. en Durán R. Méndez, 2010; Figura 40).



Fotografía 55. Vegetación típica en haltunes o sartenejas o cavidades pequeñas (Foto Durán R. Méndez, 2010).

En los cenotes la vegetación presenta características fenotípicas diferentes a la que se encuentra alrededor de ellos. En general los cenotes se ubican en las selvas baja caducifolia y mediana subcaducifolia, y las especies de la periferia de estos cuerpos de agua son de selva perennifolia, es decir, mantienen las hojas en la época seca. En los cenotes se reconocen algunas especies vegetales como indicadores de humedad, entre ellas, especies de la familia Moraceae de los géneros *Ficus* y *Brosimum*, así como la familia Boraginaceae en especial *Erethia tinifolia* y muchas leguminosas.

Las rejolladas son cavidades parecidas a los cenotes y se originan a partir de ellos al perderse el espejo de agua o a la disolución de carbonatos. Se presenta una gran diversidad de plantas, donde los árboles tienen mayor altura, cobertura y diámetro que las especies que la rodean. Por la alta humedad, estos ecosistemas tienen especies que sólo existen en latitudes de mayor precipitación pluvial, de las cuales se encuentran *Brosimum alicastrum*, *Pouteria sapota*, *Castilla elastica*, así como helechos, musgos y sellaginelas. Esto hace que la entidad tenga especies que en suelos sin estas características no existirían (Figura 40), (Flores-Guido J. en Durán R. Méndez, 2010).



Figura 40. Vegetación en las rejolladas. 1. Ficus yucatanensis. 2. Melicoccus bijugatus. 3. Sabal japa. 4. Chrysophilum cainito. 5. Brosimum alicastrum. 6. Pouteria sapota. 7. Cocos nucifera. 8. Mangifera indica. 9. Theobroma cacao. 10. Citrus sinensis. 11. Citrus limonia. 12. Musa paradisiaca. 13. Xanthosoma yucatanense. 14. Bursera simaruba. 15. Annona muricata (Flores-Guido J. e Durán R. Méndez, 2010).

Los haltunes (agua en piedra) o sartenejas son cavidades pequeñas formadas a partir de la disolución de la caliza, que en época de lluvia se llena de agua, pero no tienen contacto con el manto freático, por lo que el agua es estacional, pero dependiendo de su tamaño y profundidad, puede tener agua durante la época de secas. En estos cuerpos de agua tan pequeños se han encontrado especies como *Lemna minor* y *Pistia stritcr*, otras plantas acuáticas de las familias *Nymphaeaceae*, *Typhaceae* y helechos como *Acrostichum aureum* (Flores-Guido J. en Durán R. Méndez, 2010).

Vegetación Secundaria

Para terminar se puede decir que en las diferentes comunidades vegetales que fueron utilizadas para actividades agrícolas y luego abandonadas se ha generado una sucesión secundaria. Por esta razón, actualmente el Estado constituye un mosaico de diferentes etapas seriales de vegetación secundaria derivada de esas comunidades, cuya diversidad se refleja en las especies herbáceas (Durán R. Méndez, 2010); (Fotografías 56 y 57).



Fotografía 56. Vegetación hidrófita (helechos). (Foto S. Flores en Durán R. Méndez, 2010).



Fotografía 57. Vegetación secundaria derivada de selva baja caducifolia (Foto S. Flores en Durán R. Méndez, 2010).

V.7. Clima

El clima es el estado promedio de la atmosfera de las capas de aire más cercanas a la superficie terrestre y presenta variaciones de un lugar a otro. El clima del estado de Yucatán es uno de los más cálidos de México. Lo anterior se explica por la combinación de diferentes factores: su posición geográfica, en la que tres de sus flancos están rodeados por mares, así como por su relativa cercanía al Trópico de Cáncer y a la Celda Anticiclónica Bermuda Azores, además de la ausencia de orografía considerable (Orellana *et al.*, 2009) y su escasa altitud representada por relieve plano o escasamente ondulado. De acuerdo con Orellana y sus colaboradores (1999), la distribución de los climas de Yucatán está regida principalmente por las interacciones de los factores climáticos que inciden sobre la región y que son los siguientes:

a. Corrientes marinas. Las corrientes marítimas que bordean la Península de Yucatán son derivados de la Corriente Ecuatorial Norte del Atlántico, formando la corriente del Caribe que deriva en la del Canal de Yucatán y a su vez en la corriente del Golfo de México. Se trata de corrientes cálidas que fluyen de modo importante en los vientos cálidos húmedos o secos (Figura 41).

b. Circulación del este o vientos alisios. Durante el verano, estos vientos cargados de humedad provienen de la Celda Bermuda Azores y depositan más precipitación conforme se adentra al interior de la península. Los vientos alisios penetran con fuerza entre los meses de mayo a octubre y son el principal aporte de lluvia estival en el Estado (Figura 42).



Figura 41. Corriente Ecuatorial Norte y del Golfo de México.

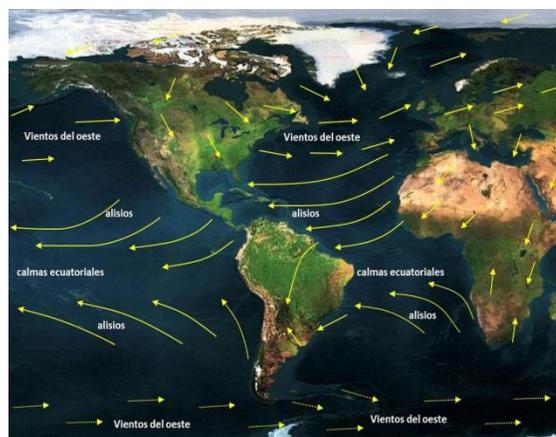


Figura 42. Circulación de vientos alisios durante el verano.

c. Ondas tropicales. Se producen en el cinturón de los vientos alisios. Son líneas de flujo onduladas superpuestas a los vientos del este. Apuntan la baja presión hacia el norte y tienen una dirección este-oeste. Es posible que sean los principales contribuyentes de la lluvia durante el verano.

d. Depresiones o tormentas tropicales. Se producen en el seno de las ondas tropicales y son zonas de baja presión temporal que se forman por el calentamiento del océano y pueden llegar a crecer hasta formar huracanes en las diferentes categorías. Las tormentas tropicales que afectan a Yucatán se generan en el Atlántico Oriental (Cabo Verde) o en el Mar de las Antillas.

e. Los frentes fríos, nortes o masas de aire polar. Se generan por el choque de vientos circumpolares con los vientos del oeste. A veces ocasionan una bajada abrupta de temperatura con vientos fuertes y en ocasiones lluvias ligeras a muy fuertes.

Clasificación del Clima

Las clasificaciones climáticas agrupan características relacionadas a las condiciones atmosféricas, los elementos climáticos más importantes son, por lo regular, la temperatura y la precipitación pluvial. A través de las clasificaciones climáticas se describe el comportamiento de estos elementos a lo largo del año, comparando unas regiones con otras. La descripción del clima de una zona o región, sintetiza en forma de letras o siglas sus características más importantes.

La clasificación de climas de mayor difusión es aquella propuesta en 1936 por el climatólogo alemán Wilhelm Köppen. A partir de 1964, la investigadora Enriqueta García adaptó la clasificación mundial de W. Köppen para las condiciones climáticas específicas de la República Mexicana. Inicialmente esta clasificación se basaba sólo en dos elementos fundamentales: la temperatura y la humedad, posteriormente se le agregaron otros como el viento y la presión, hasta llegar a la clasificación actual.

Esta clasificación ha recibido el denominativo de sistema de Köppen modificado por García (Tabla 33) y ha sido utilizada oficialmente en el país, cuyos mapas, a varias escalas, han sido publicados por el actual INEGI y la CONABIO (Orellana *et al.*, 2009).

Tabla 33. Sistema de clasificación climática de Köppen modificado por García.

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE KÖPPEN MODIFICADO POR GARCÍA						
POR SU HUMEDAD	HÚMEDOS				RÉGIMEN DE LLUVIAS	
	f		m			
TEMPERATURA					De verano, V	
			Am(f)		Intermedio, I	
CÁLIDO T. media anual de 22 a 26°C						
POR SU HUMEDAD	SUBHÚMEDOS					RÉGIMEN
	EL MÁS HÚMEDO		INTERMEDIO		EL MÁS SECO	
TEMPERATURA		Aw2		Aw1	Aw0	V
		Aw2(w)		Aw1(w)	Aw0(w)	
		Aw2(x')		Aw1(x')	Aw0(x')	I
		Aw2(x')w2		A(x')w1	Ax'(w0)	
CÁLIDO T. media anual de 22 a 26°C						
POR SU HUMEDAD	SEMIÁRIDOS		ÁRIDOS		MUY ARIDOS	RÉGIMEN
TEMPERATURA						V
		BS1(h)'		BS0(h)'		
CÁLIDO T. media anual de 22 a 26°C		BS1(h')h		BS0(h')h		
Fuente: SEDUMA, 2010. Atlas de escenarios de Cambio Climático en la Península de Yucatán. Dr. Roger Orellana Lanza.						

Básicamente, el sistema modificado consiste en que a la clasificación original se adicionaron algunos parámetros fundamentales para diferenciar los climas en México, los que se organizaron en grupos, tipos, subtipos y variantes climáticas.

Los grupos climáticos originales de Köppen son: A cálidos húmedos tropicales; B subdivididos en los subtipos BW secos desérticos y BS secos esteparios; C templados; D templados fríos, y E subdivididos en ET fríos de tundra o páramos y EF muy fríos con nieves permanentes. Los regímenes de lluvia posibles en México son con lluvias en verano (w); abundantes todo el año (f); escasas todo el año (x'), y con lluvia en invierno (s). La combinación del grupo climático y del régimen de lluvia dan como resultado los diferentes tipos de clima (Orellana *et al.*, 2009), (Figura 43).

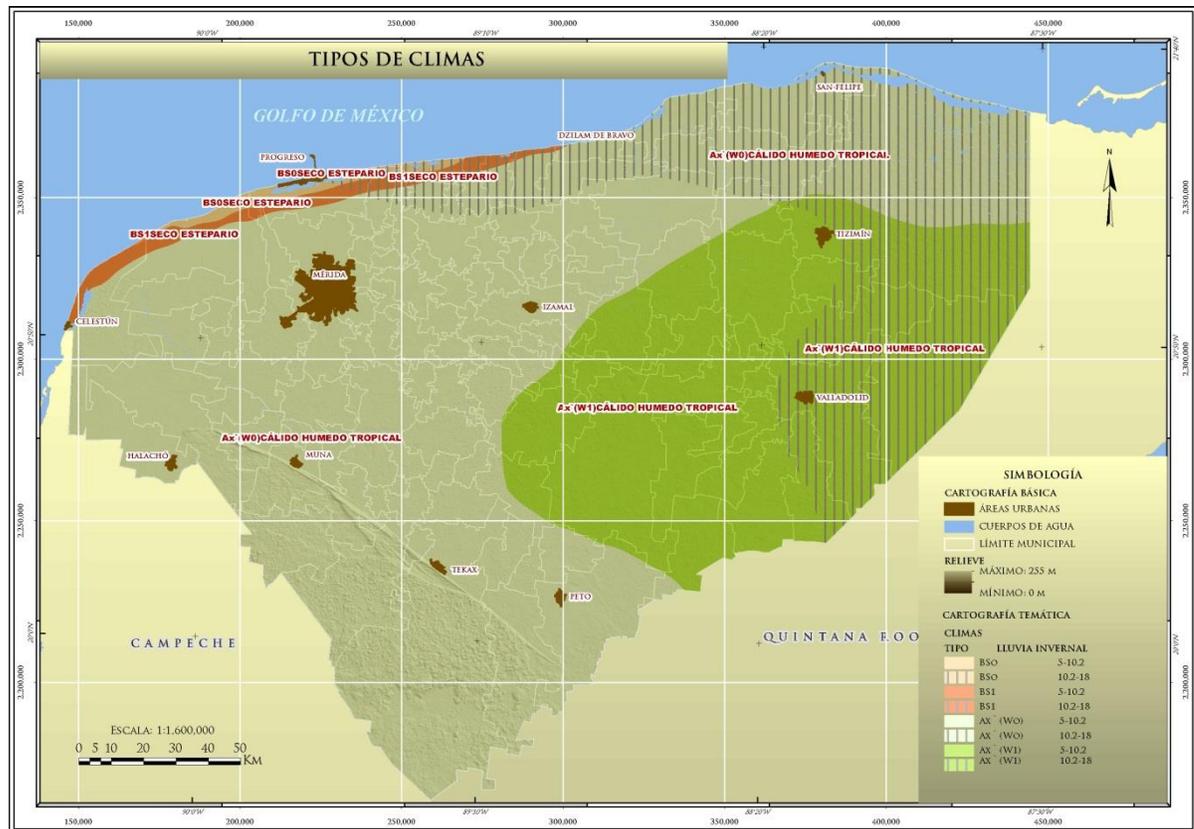


Figura 43. Mapa de Climas Köppen, modificado por Orellana.

Debido a que el territorio mexicano es mayoritariamente montañoso, presenta una amplia superficie de litoral, se encuentra situado entre dos océanos y se localiza entre la zona seca y templada del Norte y la cálida y húmeda en el Sur, la clasificación original de Köppen es insuficiente, ya que no describe en detalle la gran cantidad de climas de transición que se presentan (Orellana *et al.*, 2009).

De acuerdo a lo anterior, se tiene por ejemplo el caso de la península de Yucatán, en donde siguiendo el sistema original de Köppen, se presentarían solamente dos tipos de climas: el seco estepario en el Noroeste y en todo el resto, el cálido con lluvias en verano. Sin embargo, se puede observar que la realidad es otra y que se presenta un importante gradiente de lluvia, mismo que además se denota por la transición de vegetación desde selva baja en el Norte a selva alta en el Sur (Orellana *et al.*, 2009).

Las adiciones hechas al sistema modificado por E. García son las siguientes (se mencionan únicamente aquellas que aplican a la península de Yucatán): límites en las condiciones de temperatura, índice de Lang o P/T (precipitación total anual entre temperatura media anual), porcentaje de lluvia invernal (determina los regímenes de lluvia), sequía intraestival (define los límites para las condiciones de temperatura de los climas semiáridos y áridos), oscilación térmica (diferencia de temperatura entre el mes más cálido y el mes más frío). Algunas de las letras que aparecen en el sistema modificado se encuentran entre paréntesis para diferenciarlo del original de Köppen.

A continuación, para su mayor comprensión, se explica brevemente los colores y las siglas utilizadas para el caso del presente estudio (Orellana *et al.*, 2009).

En la península de Yucatán están representados dos grupos climáticos que se dividen en varios tipos (grupo y régimen de lluvias) y subtipos (variantes climáticas con condiciones de temperatura y régimen de lluvias, canícula, oscilación térmica y marcha de la temperatura) (Orellana *et al.*, 1999). Los símbolos climáticos representados en el estado de Yucatán son:

- A. Grupo de climas cálido-húmedos con temperatura media del mes más frío mayor a 18°.
- B. Grupo de climas secos. Los límites entre los secos y los húmedos se establecen por medio de fórmulas que relacionan la precipitación anual con la temperatura y con el régimen de lluvias.

Símbolos de tipos y subtipos del grupo A:

Aw Cálido subhúmedo con lluvias en verano; de acuerdo con su grado de humedad se divide en:

- **Aw0** Es el más seco de los cálidos subhúmedos.
- **Aw1** Intermedio en cuanto al grado de humedad, con lluvias en verano.

Una (**x'**) a continuación de la w indica un porcentaje de lluvia invernal con respecto a la anual mayor de 10.2.

Una (**x'**) antes que la w indica que el sitio tiene un régimen de lluvias intermedio, en el que no se cumple el requisito de 10 veces mayor cantidad de lluvia en el mes más húmedo que en el mes más seco.

Símbolos de tipos y subtipos del grupo B:

BS Tipo de clima semiárido que se subdivide en dos subtipos de acuerdo con su grado de humedad:

- **BS0** Es el más seco de los semiáridos, con un cociente P/T menor de 22.9.
- **BS1** Es el menos seco de los BS con un cociente P/T mayor de 22.9.

w Régimen de lluvias de verano; por lo menos 10 veces mayor cantidad de lluvia en el mes más húmedo de la mitad caliente que en el mes más seco. Porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2 de la total anual.

w(x') Régimen de lluvias de verano, con un porcentaje de lluvia invernal mayor de 10.2 respecto a la anual.

(x')w Régimen de lluvias uniformemente repartido o intermedio con un porcentaje de lluvia invernal entre 10.2 y 18.

(h') Muy calido, temperatura media anual mayor de 22° C y del mes más frío mayor de 18° C.

i Isotermal, oscilación de la temperatura (mes más cálido menos mes más frío) menor de 5° C.
(i') con poca oscilación entre 5° y 7° C.

g Marcha de la temperatura tipo Ganges, lo que significa que el mes más cálido se presenta antes del solsticio de verano.

Como resultado de la interacción de todos los factores climáticos que inciden sobre Yucatán, Orellana y sus colaboradores (1999, 2010a) proponen la distribución de los siguientes climas (de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García):

BS₀ (h') x' i. Es el más seco de los semiáridos, cálido con lluvias intermedias o irregulares con tendencia a distribuirse hacia el verano; máximo de temperatura cercana al solsticio de verano e isotermal. En este clima se desarrollan comunidades vegetales de especies xerofíticas.

BS₁ (h') w i. Este clima es el menos seco de los semiáridos, cálido con régimen de lluvias de verano; máximo de temperatura después de mayo e isotermal. En este clima, que rodea al mencionado anteriormente, se presentan comunidades de selva baja decidua con cactáceas candelabriformes.

Aw₀ (i') g. Cálido el más seco de los subhúmedos, con lluvias en verano y porcentaje regular a bajo de lluvia invernal, con poca oscilación térmica y máximo de temperatura antes del solsticio de verano. Es el clima que ocupa la porción occidental del Estado y en el que originalmente se distribuyó la selva más seca de la baja caducifolia.

Aw₀ (x') (i') g. Cálido, el más seco de los subhúmedos, con lluvias en verano, así como alto porcentaje de lluvia invernal, poca oscilación térmica y máximo térmico antes del solsticio de verano. Este clima se presenta en una amplia zona al oeste y noroeste del Estado, que ha sido ocupada por una transición de selva mediana y baja caducifolia, ligeramente más húmeda que la del clima descrito arriba.

Aw₁ (i') g. Cálido, subhúmedo, con lluvias en verano y bajo porcentaje de lluvia invernal, poca oscilación térmica y máximo de temperatura antes del solsticio de verano. Este es el clima predominante en el "cono sur" del Estado, donde predominaba la selva baja-mediana subcaducifolia.

Aw₁ (x') (i') g. Cálido, subhúmedo, con lluvias en verano, pero alto porcentaje de lluvia invernal mayor de 10.2, poca oscilación térmica y máxima temperatura antes del solsticio de verano. Este clima se presenta en una porción al pie del Puuc y el extremo oriental del Estado, donde predominaba la selva baja y mediana subcaducifolia.

VI. GEOLOGÍA

VI.1. Marco Geológico Regional de la Península de Yucatán

El área de estudio se localiza aproximadamente entre los paralelos 19°30' a 22° latitud Norte y 7°30' a 90°30' de longitud Oeste (Figura 44), está limitada al este por el estado de Quintana Roo al oeste y norte por el Golfo de México y al sur por los estados de Campeche y Quintana Roo.

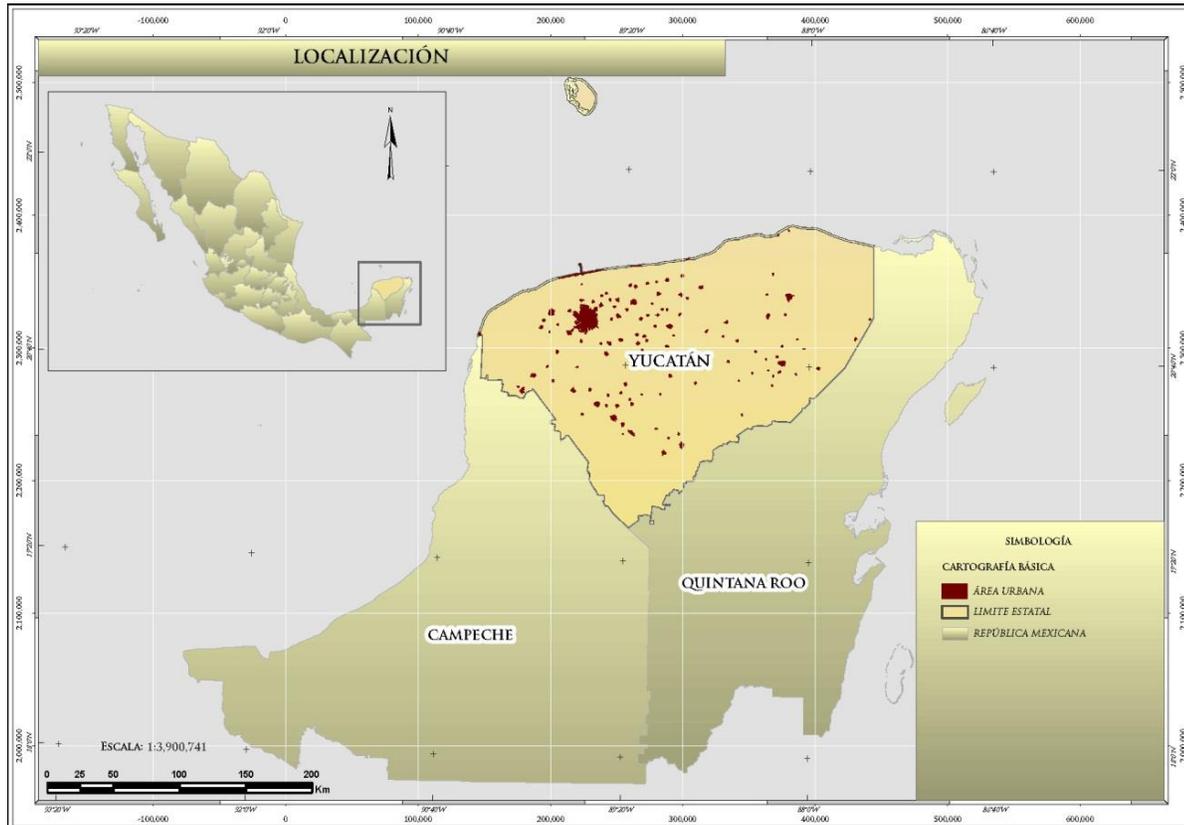


Figura 44. Localización del área de estudio.

El marco geológico regional está en función de las unidades estratigráficas distribuidas dentro de la Provincia Geológica Plataforma de Yucatán (Figura 45), sin embargo a su vez se limita al territorio geográfico de los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo. Cabe señalar que parte de esta provincia se extiende a los países vecinos de Guatemala y Belice.

VI.1.1. Geología Superficial

Las unidades litológicas distribuidas en la provincia geológica de la Plataforma de Yucatán en resumen, consiste de evaporitas y carbonatos principalmente del Terciario y Cuaternario. La descripción de los elementos geológicos y estructurales se limitan a afloramientos que aparecen dentro del territorio mexicano específicamente en los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo, sin embargo se menciona de manera general algunos afloramientos que se consideran parte de la secuencia estratigráfica de la Plataforma de Yucatán, tal es el caso de depósitos de edad Cretácico que afloran en la Republica de Belice que es importante considerar debido a que corresponde con el inicio del desarrollo marino en esta porción del país. Estos depósitos consisten de calizas, calizas dolomíticas, dolomías con fauna lagunar a post arrecifal con fragmentos principalmente de rudistas (Flores, 1952 y Sapper, 1986 in López-Ramos, 1973) que afloran al sur de las Montañas Maya en Belice.

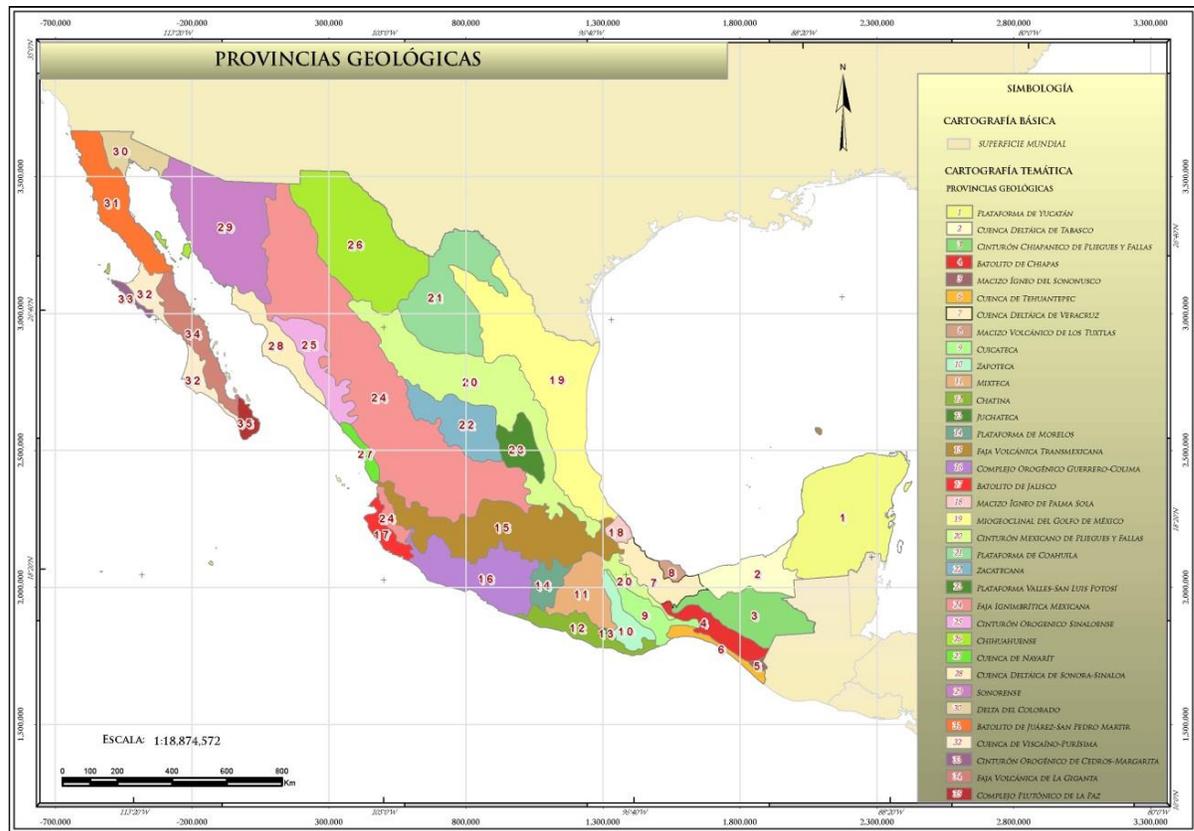


Figura 45. Provincias geológicas de la República Mexicana. Tomado y modificado de Ortega-Gutiérrez *et al.*, (1992).

Dentro del territorio mexicano aflora la secuencia del terciario al reciente y está representado por seis unidades. Estas unidades están constituidas principalmente por calizas, yesos, margas y dolomías; que consiste de la base a la cima por las formaciones Icaiché (Paleoceno), Chichen Itzá (Eoceno), depósitos de calizas y coquinas (Oligoceno), Bacalar y Estero Franco (Mioceno) y Carrillo Puerto (Mioceno-Plioceno) respectivamente (Figura 46).

El Cuaternario sobreyace discordantemente al Terciario y está representado por depósitos consolidados a no consolidados de arenas, areniscas, calizas fosilíferas, depósitos lacustres, palustres y de litoral localizados principalmente hacia el borde continental (COREMI, 2004, Carta geológico-minera Chetumal, escala 1:250,000; SGM, 2005, Carta geológico-minera Tizimín, escala 1:250,000; SGM, 2005, Carta geológico-minera y geoquímica Mérida, escala 1:250,000; SGM, 2005, Carta geológico-minera Felipe Carrillo Puerto, escala 1:250,000).

La relación de unidades cretácicas y terciarias hasta el Eoceno señala posiblemente una evolución tectónica asociada con subsidencia paulatina de la plataforma, determinada con base al espesor de la secuencia de carbonatos que varía de 1300 hasta más de 3150 m, esto último detectado mediante la perforación de pozos principalmente en el norte de Yucatán (López-Ramos, 1973).

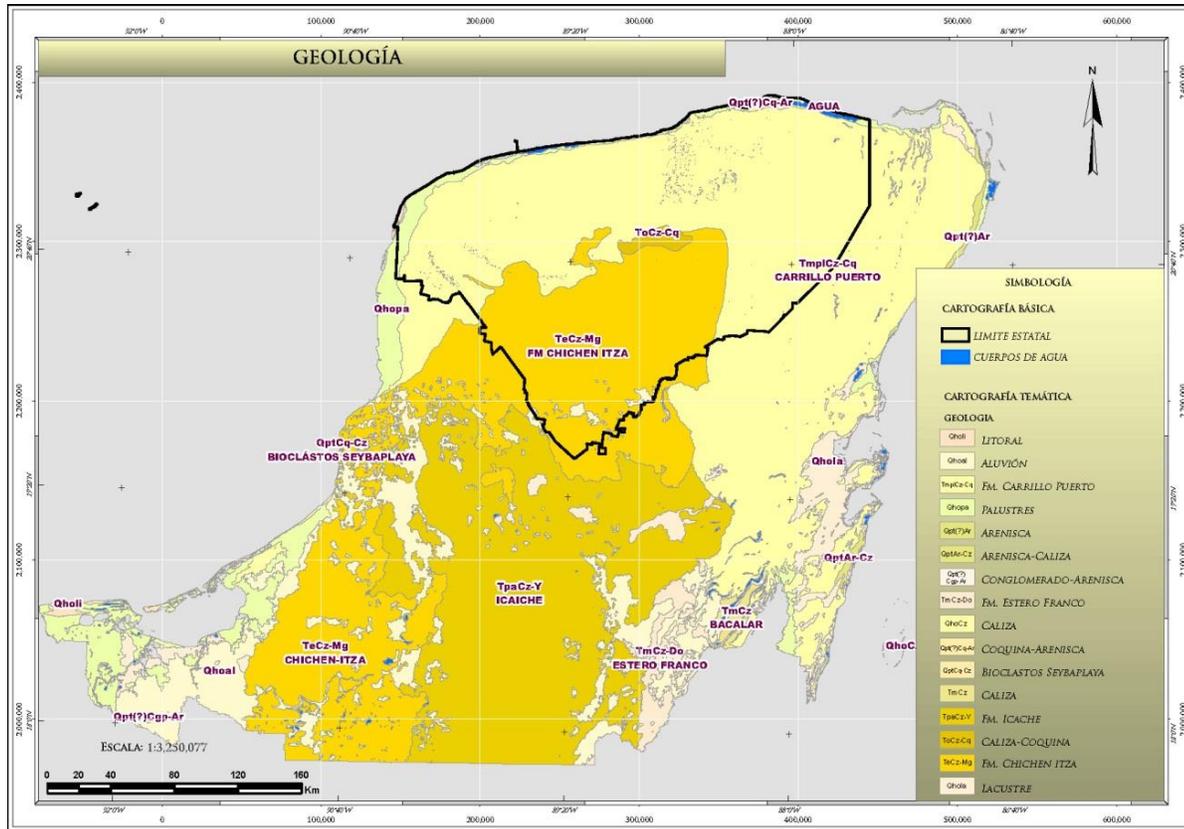


Figura 46. Mapa geológico de la península de Yucatán. Modificado de SGM (2007).

VI.1.2. Geología del Subsuelo

El basamento no aflora en el territorio de la Península de Yucatán, sin embargo, con base a perforaciones de pozos realizadas por PEMEX, la geología del subsuelo se encuentra relativamente bien definida; aunque la información se consideró pobre en algún tiempo, se sabe de la presencia de esquistos, cuarcitas y derrames volcánicos(?) y pórfido riolítico; este último fechado como del Paleozoico tardío (410 ma.) mediante el método Rb-Sr con posible metamorfismo a 330 ma., el cual aparentemente está alojado en el esquisto (López-Ramos, 1973; Lugo-Hubp, 1997).

Sobreyaciendo discordantemente a la secuencia anterior aparecen depósitos de capas rojas constituidas por lutitas, limolitas, areniscas de grano grueso y gravas consideradas como continentales, sin embargo en algunos pozos (Yucatán 1, Yucatán 4, Yucatán 6, Sacapuc 1 y Chicxulub 1) se cortaron capas de calizas dolomíticas intercaladas que se han interpretado como una transgresión marina dentro de la misma secuencia y es considerada por López-Ramos (*op. cit.*) como del Triásico-Jurásico con base a su posición estratigráfica (sobreyace a la secuencia de esquistos e infrayace a las Evaporitas Yucatán) y por comparación con capas rojas que afloran en Guatemala y en el estado de Chiapas, nombrando tentativamente a estas capas rojas como Formación Todos Santos (Viniestra, 1981 in SGM, 2005, Carta geológico-minera Tizimín, escala 1:250,000; López-Ramos, *op. cit.*).

Las Evaporitas de Yucatán formalmente nombradas por López-Ramos (1973) consisten de una secuencia de anhidritas, yesos, bentonita, tobas y calizas delgadas distribuidas en toda la Península de Yucatán hasta el norte del Banco de Campeche así como en localidades en las inmediaciones de Cuba y al SE de los Estados Unidos de Norte América; la unidad es interpretada como depositada bajo condiciones de alta evaporación o en plataforma muy somera, determinándosele una edad del Albiano-Cenomaniano con base al registro fósil. Sobreyace discordantemente a lechos rojos de la Formación Todos Santos e infrayace a depósitos de edad Turoniano caracterizados principalmente por la presencia de capas de anhidritas con yesos, calizas

con abundantes rudistas y horizontes de caliza oolítica y pseudoolítica que López-Ramos (*op. cit.*) denomina “Horizonte de Rudistas” que posiblemente se correlacione por sus características con la Formación Cobán descrita por Vinson y Brineman (1962) en Cobán, Alta Verapaz, en la cuenca Petén Itzá de Guatemala.

Finalmente para el Cretácico tardío se depositó un horizonte mayormente de anhidrita intercalado con escasas capas de caliza esparítica y poca dolomía en ocasiones micrítica; que en conjunto su edad es considerada como del Maestrichtiano determinada con base a su contenido faunístico. López-Ramos (1973) nombra a esta secuencia “Horizonte Valvulina” e infrayace discordantemente a la Formación Icaiché del Paleoceno-Mioceno inferior y sobreyace concordantemente al “Horizonte de Rudistas”. Las unidades geológicas post-Maestrichtiano detectadas por pozos, son descritas detalladamente en el capítulo correspondiente a estratigrafía dentro de este estudio.

VI.2. Estratigrafía

El estado de Yucatán tiene las mismas características geológicas que los otros estados que componen la Península de Yucatán, que consiste de una secuencia de rocas evaporíticas y carbonatadas que abarcan desde el Terciario al Reciente. Desde el punto de vista estratigráfico, se presenta una columna que comprende ocho unidades que van desde el Eoceno al Holoceno con diferentes formas de depósitos litológicos tales como: Caliza-Marga, Caliza-Coquina, Arenisca-Coquina y sedimentos recientes: Palustre, Lacustre, Litoral y Aluvión (Figura 47).

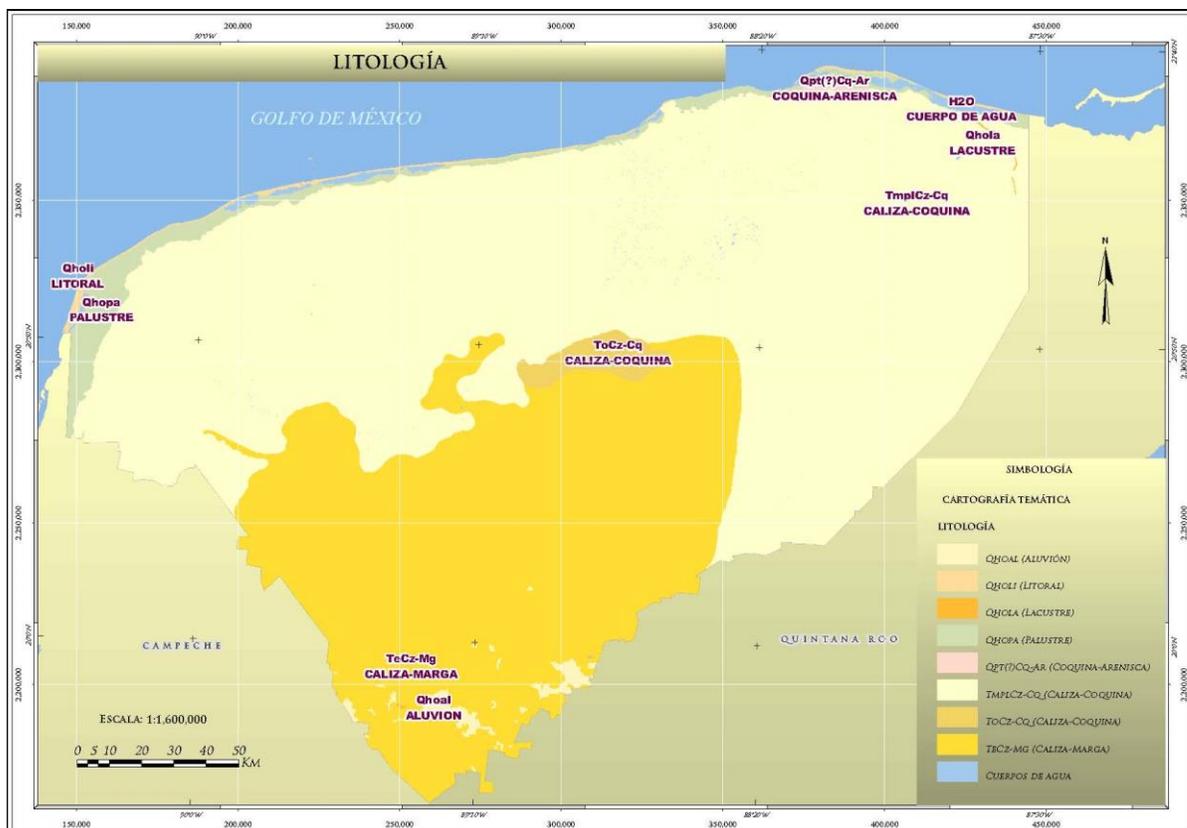


Figura 47. Mapa litológico del estado de Yucatán.

En seguida se hace una descripción de las principales características de cada unidad litológica que aflora en el Estado, en orden cronológico de la más antigua a la más reciente, cuya distribución se observa en la Figura 48. La información fue tomada de las Cartas Geológico-Mineras escala 1:250,000 (2004-2005) del estado de Yucatán y del Léxico Estratigráfico de México, elaboradas y publicadas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM).

DEPÓSITOS TERCIARIOS

Formación Chichén Itzá (Te Cz-Mg)

Butterlin y Bonet en el año 1963 le asignan el término de Chichén Itzá a la unidad que se ubica en las inmediaciones de la zona arqueológica del estado de Yucatán. La definen como una caliza fosilífera, con base a sus variaciones geológicas la dividieron en tres miembros, miembro Xbacal, Pisté y Chumbec. PEMEX en 1988 describe esta unidad como un wackestone a packstone en partes dolomitizadas con intercalaciones de grainstone oolítico y textura sacaroides.

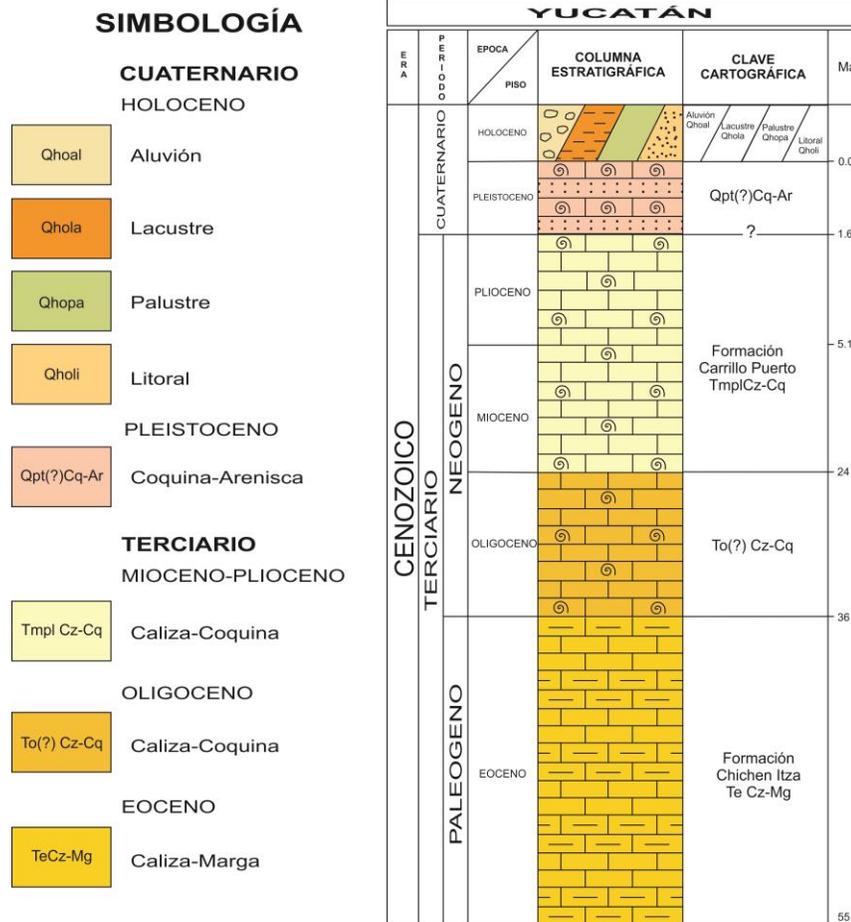


Figura 48. Columna estratigráfica del estado de Yucatán.

El Consejo de Recursos Minerales (Actualmente Servicio Geológico Mexicano) realizó las cartas geológicas mineras escala 1:250,000 con claves cartográficas: Calkiní F15-9-12 (2004); Felipe Carrillo Puerto E16-1 (2005); Mérida F16-10 (2005); Tizimín F16-7 (2005); Cozumel F16-11 (2005) y Cancún F16-8 (2005), se describen como una sola unidad ya que litológicamente no se observa características para establecer dicha división.

PEMEX en 1988 reporta un espesor de 25 a 180 m, en el subsuelo midió un espesor de 285 m en el Pozo Chicxulub-1; en la carta geológico-minera Carrillo Puerto (2005) reporta un espesor de 100 m, en la carta geológico minera Calkiní, López R.E., (1973) determina un espesor de 700 a 780 m.

Esta unidad se ubica en la parte centro sur del Estado, comprende un área aproximada de 12,911.65 Km², lo que equivale al 32.65% del territorio estatal. Está unidad aflora en las inmediaciones de las áreas urbanas de: Sotuta, Cantamayec, Tekax de Álvaro Obregón, Tixméhuac,

Peto, Mama, Kaua, Hocabá, Dzitás, Dzán, Chumayel, Chapab, Chankom, Yaxcabá, Xocchel, Tzacacab, Pisté, Tinúm, Ticul, Kancab, Sanahcat, Sacalum, Maní, Chikindzonot, Chacsinkín, Akil, Abalá, Teabo, Tahdziú, Santa Elena, Oxkutzcab, Mayapán, Muna y Homún.

Butterlin y Bonet en 1963 definen el contacto inferior como concordante y transicional sobre una secuencia carbonatada y evaporítica de la Formación Icaiché. En la carta geológica minera Mérida a escala 1:250,000 con clave F16-10 realizada por el SGM en 2005, el contacto superior infrayace de forma concordante a la caliza y coquina del Oligoceno, sin embargo también llegan a ser de forma discordante con la caliza-coquina del Mioceno-Plioceno. Describen también la microfauna del Miembro Xcabal, constituida por: Operculinoides catenula, Discocyclina, discociclyna dislis, floridanus cole, Helicostegina Dimorpha, Coskinolina elongata cole, Nonion sp., Rotalidae. El Miembro Pisté está representada por: algas calcáreas Cypleina, Valvulinidae, Coskolina floridana (fósil guía) y para el Miembro Chumbec son: Operculinoides willcoxi, Lepidocyclina (Pliolepidina), Pustulosa douville, Amphistegina sp. Con base a su contenido faunístico se le asigna una edad del Eoceno (Butterlin y Bonet, 1963; López-Ramos, 1979)

López-Ramos, 1973, interpreta a los depósitos carbonatados en un ambiente marino de plataforma somera con zonas lagunares y cuencas tranquilas. Sin embargo PEMEX, 1988 considera que en base a la litología y contenido fosilífero, el ambiente varía de nerítico interno a externo en la porción noroeste y en el extremo suroeste presenta influencia de plataforma evaporítica hacia la base. Esta unidad se correlaciona con la Lutita Nanchital de la Cuenca Sureste, Guayabal, Aragón de la Cuenca de Veracruz, con las formaciones Jackson, Yegua, Queen City, Recklaw y Weches (Galloway *et al.*, 1991 en Léxico Estratigráfico, 2011).

Para conocer con mejor detalle esta unidad, a continuación se describen en forma de síntesis algunas localidades y secciones que se ubican en el estado de Yucatán.

En las secciones Benito Juárez - Salvador Alvarado, Hunto - Chac a Nohal y Bencanchén - Xkuil, aflora caliza con intercalación de brecha calcárea, la textura varía de mudstone a wackestone, estas en general presentan una coloración beige, crema y en ocasiones blanquecino al fresco y tonos amarillento, rojizo y grisáceo a la intemperie, presenta una estructura compacta y en estratos que van de gruesos a masivos, ocasionalmente se observan de 0.3 a 1 m de espesor con fósiles quinqueloculina, gasterópodos y foraminíferos. La brecha presenta una coloración beige al fresco y gris oscuro a la intemperie, estructura compacta con fragmentos angulosos de 2 a 15 cm. En general está unidad presenta líneas estilolíticas y carsticidad tipo lapiaz.

En las secciones: Kambul; Uxmal - Cantamayec; Dzan - sur de Xul, aflora una secuencia de caliza y brecha calcárea, la textura varía de grainstone a wackestone con variación a mudstone, ocasionalmente se llega a tener intercalación de marga. Presentan una coloración beige con ligera variación a rojizo al fresco, mientras que a la intemperie son: gris, amarillento y castaño. Presenta estructura compacta con estratificación de 0.10, 0.70 y 1 m de espesor, ocasionalmente se observan masivas, con contenido de oolitas, bioclásticos y miliólidos. La brecha presenta una coloración beige, rojizo y gris al fresco y rojizo, amarillento y blanquecino a la intemperie, su estructura es compacta con estratificación que varía de 0.03 a 1.5 m, ocasionalmente se observa masiva, los clastos varían de 0.05 a 0.30 cm. En general presentan una karsticidad tipo lapiaz.

En las secciones Norte de Tibilón - Timul; Peto - Muchucuxcah y Peto - Chikindzonot, aflora una secuencia de caliza y brecha calcárea, con textura que varía de mudstone a grainstone, de color beige y castaño al fresco y coloración gris y rojizo a la intemperie, estructura compacta con estratificación que varía de 0.10 a 1.0 m con contenido de foraminíferos, pelecípodos y gasterópodos. La brecha es una estructura compacta, con estratificación que varía de 0.50 a 0.80 m y en ocasiones se presenta de grueso a masivo con contenido de fragmentos angulosos de 0.01 a 0.08 m, en general presenta una karsticidad tipo lapiaz.

En las secciones: sur de Nohalal; Nohalal - Tigre Grande y Xanlah - Tinum, aflora una secuencia de caliza y brecha calcárea, con textura mudstone, de color beige, crema, castaño y blanquecino al fresco y una coloración amarillo, rojiza y gris a la intemperie, estructura compacta,

estratificación de 0.05 a 1.0 m y en ocasiones varía de grueso a masiva, con contenido de calcita, microfósiles, fragmentos de bivalvos, foraminíferos, miliólidos y pelecípodos. La brecha presenta un color beige, rojizo y gris claro al fresco y una coloración amarillenta, rojiza, blanquizca y gris oscuro a la intemperie, estructura compacta, estratificación que va de gruesa a masiva con contenido de fragmentos angulosos de dolomita de 0.1 a 0.3 m. presenta líneas estilolíticas y karsticidad tipo lapiaz.

En las secciones: Zavala – Tixcacaltuyub – Xpechil y Libre Unión – Sahcabá Nuevo, aflora una secuencia de caliza, marga y brecha calcárea, con textura que varía de packstone a grainstone, de color beige al fresco y de coloración gris y castaño claro a la intemperie, estructura compacta, estratificación de 0.05 a 1.2 m, con contenido de oolitas, foraminíferos, pelecípodos y gasterópodos. La brecha es de color rojiza, castaño y beige al fresco, a la intemperie presenta una coloración beige, castaño, amarillo y gris, estructura deleznable, estratificación que va de grueso a masivo con contenido de fragmentos angulosos de 0.01 a 0.15 m. generalmente presenta karsticidad tipo lapiaz.

En las secciones: Abalá – Muna – San Simón y Maxcanú – Tzucacab, aflora una secuencia de caliza y brecha calcárea, con textura grainstone, de color beige a rosado al fresco y una coloración rosado a castaño a la intemperie, estructura compacta con estratos de 0.10 a 1.0 m, con contenido de oolitas, miliólidos, gasterópodos y cefalópodos. La brecha presenta un color gris claro al fresco y rojiza a grisácea a la intemperie, estructura compacta, estratificación de 0.15 a 0.40 m y ocasionalmente masiva con contenido de fragmentos angulosos que varían de 0.05 a 0.30 m. Presenta una karsticidad tipo lapiaz.

En la sección Nohalal – Pocoboch, aflora una secuencia de caliza y brecha calcárea, de color beige a crema al fresco y gris claro a rojiza a la intemperie, estructura compacta, estratificación de 0.10 a 1.0 m con contenido de foraminíferos y oolitas. La brecha es de color crema al fresco y gris oscuro a la intemperie, compacta con estratificación de gruesa a masiva, con contenido de fragmentos angulosos de 0.01 a 0.10 m.

En la sección Tigre Grande – Xcimey, aflora una secuencia de caliza y brecha calcárea, de color beige a castaño al fresco y de coloración gris oscuro a la intemperie, estructura compacta, estratificación de 0.10 a 1.0 m, con contenido de oolitas y foraminíferos. La brecha es de color beige a rojiza al fresco y de coloración gris a crema la intemperie, estructura compacta, estratificación que varía de gruesa a masiva con contenido de fragmentos angulosos de 0.01 a 0.02 m. en general presenta karsticidad tipo lapiaz.

En la sección Libre Unión – Kava, aflora una secuencia de caliza y brecha calcárea, de color beige al fresco y una coloración gris a la intemperie, estructura compacta con estratificación de 0.40 a 1.5 m con contenido de gasterópodos, pelecípodos y foraminíferos. La brecha presenta un color beige tanto al fresco como a la intemperie, estructura compacta de estratificación masiva con fragmentos angulosos que varían de 0.05 a 0.15 m. En general presenta una karsticidad tipo lapiaz.

Unidad To (¿?) Cz-Cq

Esta unidad carece de nombre formacional, sin embargo López Ramos en 1973 la divide en Oligoceno inferior y superior, en el 2005, el SGM realiza la carta Geológico Minera Mérida F16-10 escala 1:250,000, la cual la separa de las formaciones Chichén Itzá y Carrillo Puerto, argumentando que esta unidad contiene fósiles diferentes a las formaciones antes mencionadas.

López Ramos (1973) describe que personal de PEMEX ubica un afloramiento que la divide en dos, una como Oligoceno inferior, que consiste en una calcarenita pulverulenta, quebradiza, suave en partes, blanca y rosada con caliche, en bancos que subyacen a la caliza superficial alterada, mal estratificada, sin echado definido, y Oligoceno superior, caliza y calcarenita pulverulenta, coquinoide, con abundancia de restos de moluscos y briozoarios, en color crema y blanco que subyace a la caliza superficial alterada.

La localidad tipo se encuentra al sureste de la ciudad de Mérida, entre Acanceh y Homún, el espesor encontrado en superficie es de 1 a 1.5 m, mientras que perforaciones de PEMEX han reportado espesores menores a los 150 m (López R. E., 1973). Está unidad sobryace concordantemente a rocas de la Formación Chichén Itzá y de igual manera subyace a rocas de la Formación Carrillo Puerto.

Los fósiles que predominan son considerados del Oligoceno inferior los cuales son: *Eulepidina favosa* (Cushman), *Lepidocyclina* (pliolepidina), *maldonadoe* (Cushman), *Lepidocyclina sp. Camerina sp. Gypsina cf G. pilari* Brady. *Nephrolepidina radista* (Martín). *Eponides sp. Rotalina mexicana* (Nuttall). Algas *sp* indet. Para el Oligoceno superior está representada por la siguiente fauna: *Miogypsina guten* (colle). *Miogypsina antillea* (Cushman), *Amphistegina lessoni* (Órbigny), *Numulitides sp. Meterostegina antillea* (Cushman), *Camerina sp.*, algas y corales. *Miogypsina gunteri* Cole. *Myogypsina gunteri* Cole, y *Heterostegina sp.*, (López R. E., 1973 en Carta Geológica Minera Mérida a escala 1:250,000 clave F16-10, 2005).

Su ambiente de depósito es de plataforma somera, lo que dio el ambiente propicio para el desarrollo de estos organismos. Está unidad se correlaciona con las formaciones La Laja y Horcones en la cuenta de Veracruz, (Carta Geológica Minera Mérida, 2005).

Esta unidad se ubica en la parte central del Estado, comprende un área aproximada de 447.75 Km², lo que equivale al 1.13% del territorio estatal. Aflora ampliamente en las inmediaciones de las localidades de: Holcá, Yaxhá, Chakán Ebulá, San Juan, Chumbec, San Antonio Chuc, Nuevo Tzalam, San Ramón, San Bernardino y Onichén.

En la sección Holca, aflora roca caliza de textura mudstone, grainstone y bounstone, los dos primeros presentan un color beige al fresco y de coloración gris a la intemperie, de estructura compacta con estratos de 0.40 a 1.0 m, constituida por fragmentos de gasterópodos y pelecípodos recristalizados. El bounstone presenta color beige al fresco e intemperiza a castaño claro, estructura compacta en estratos de 0.20 a 0.30 m, constituido por nimulítidos, equinodermos, gasterópodos y pelecípodos. Presenta karsticidad tipo lapiaz.

Formación Carrillo Puerto (Tmpl Cz-Cq)

En 1958 Butterin define una secuencia de caliza dura y blanda que afloran en la Península de Yucatán, siendo su localidad tipo el kilómetro 112 de la carretera Carrillo Puerto-Peto y Quintana Roo. El autor no define con precisión el espesor de esta unidad, mientras que PEMEX (1988) le asigna un espesor de 5 a 25 m (Léxico estratigráfico 2011).

La unidad se extiende ampliamente en la porción centro, norte, oriente y poniente del Estado, comprende un área aproximada de 24326.51 Km², lo que equivale al 61.52% del territorio estatal. Aflora ampliamente en los alrededores de las áreas urbanas de: Hunukú, Mérida, Leona Vicario, Kimbilá, Cuzamá, Dzidzantún, Valladolid, Motul de Carrillo Puerto, Tixpéhual, Tixkokob, Muxupip, Yaxkukul, Ixil, Mochochá, Chicxulub Pueblo, Izamal, Tekit, Umán, Maxcanú, Kopomá, Kinchil, Kantunil, Kanasín, Texán de Palomeque, Hunucmá, Hocabá, Cepeda, Halachó, Dzilam González, Chichimilá, Chemax, Cenotillo, Calotmul, Cacalchén, Buctzotz, Baca, Acanceh, Yalcobá, Ucú, Tixcacalcupul, Tinum, Timucuy, Tepakán, Temozón, Telchac, Tecoh, Suma, Sudzal, Sinanché, Samahil, San José Tzal, Chablekal, Huhí, Hochtún, Espita, Dzoncauich, Dzemul, Chocholá, Cuncunul, Conkal, Cansahcab, Bokobá, Abalá, Yobaín, Popolá, Kanxoc, Uayma, Popolnáh, Tizimín, Teya, Tetiz, Temax, Tekom, Tekantó, Tekal de Venegas, Tahmek, Sucilá, Quintana Roo, Campestre Flamboyanes, Panabá, Opichén, Komchén, Cauce, X-Can, Cholul, Seyé y Tunkás.

Con base en la cartografía realizada por el SGM (2004, 2005), hacia la parte inferior, la unidad sobryace de forma concordante a la caliza y coquina del Oligoceno, pero a la vez de forma discordante con la Formación Chichén Itzá. Hacia la parte superior infrayace de forma discordante a depósitos pleistocenos de coquina-arenisca. Bonet y Butterlin, 1959 definen un periodo de sedimentación prolongado y de amplia extensión, PEMEX, 1988 la define como un ambiente nerítico interno con variación a nerítico medio, el SGM (2004-2005) la define en un ambiente de plataforma somera (Léxico Estratigráfico 2011). De acuerdo al contenido faunístico se le asigna una edad del

Mioceno tardío al Plioceno. Se le correlaciona con la Formación La Laja, formaciones Depósito y Encanto de la Cuenca de Veracruz (carta Carrillo Puerto, 2005).

En las secciones y localidades: Santa Julia – Santa María; La Granja; Yaxche; Kikteil; Framboyanes – Mérida; Timul; Yobaín; San José Díaz; San Felipe – Panabá; Panabá y Chunchucmil, aflora depósitos carbonatados de roca caliza, de textura boundstone, de color beige, crema, ocre, amarillo, rojizo y pardo al fresco y una coloración gris, amarillento, beige, rojiza y pardo negruzco a la intemperie, estructura compacta y en algunos lugares porosa, estratificación de 0.20 a 0.40 m, y ocasionalmente masiva, constituida por gasterópodos, pelecípodos, bivalvos, corales, ostrácodos, conchas y moluscos.

En las secciones y localidades de: Kinchil – Tixpéhual; Ucú; Xcuyúm; Santa Clara; Dzidzantún; Dzilan de Bravo – Yalsihon; Chacan – Hu; Yalsihon; Xualtes; Tahcabo y Sucopo. Afloran depósitos carbonatados de roca caliza de textura grainstone, de color beige, ocre, gris, crema y ocasionalmente verdoso y una coloración gris oscuro, amarillento y pardo a la intemperie, estructura compacta pero también se llega a observar porosa, estratificación de 0.10 a 1.0 m, ocasionalmente se llega a observar masiva, constituida por gasterópodos, ostras, bivalvos, moluscos, crustáceos y cefalópodos. Generalmente presenta karsticidad tipo lapiaz.

En las secciones y localidades de: Chocholá – Unidad agrícola Vicente Guerrero; Hunucmá – Sisal; Dzemul – San José Grande; Telchac Puerto; Chabihau – Teya; Dzilam de Bravo – Tekal de Venegas; Ox – Huadz; Santa Librada – Tukián; X- Bella y Chancalotmul. Afloran depósitos carbonatados de roca caliza de textura grainstone con variación a boundstone, de color beige, crema, amarillento y en ocasiones café al fresco y de coloración gris oscuro y blanquizco a la intemperie, estructura principalmente porosa, sin embargo también se llega a presentar compacta, con estratificación de 0.20 a 0.50 m, constituida por coral, pelecípodos, gasterópodos, bivalvos, cefalópodos y moluscos.

En las secciones de: San Francisco – Yohactún – El Cuyo; Tixkokob – Quintana Roo; Tinum – Valladolid – X-Alaú; Tizimín – Valladolid – Chibilub; Pocoboch – Tikuch; Chichimilá – Yalchén; Chamul – Ekpedz; Tekom – Tepich – Francisco I Madero. Aflora una secuencia de caliza y brecha calcárea, de textura mudstone con variación a wackestone, de color beige a crema al fresco y una coloración gris a blanquizco a la intemperie, estructura compacta, la estratificación varía de 0.20 a 1.20 m, también se llegan a observar de forma masiva, constituida por miliólidos, turrítelas, bivalvos, gasterópodos, pelecípodos, corales y conchas. La brecha es de color beige a crema al fresco y gris con tonos rojizos a la intemperie, estructura compacta, con estratificación de 0.20 a 0.50 m y ocasionalmente varía de gruesa a masiva, constituida por fragmentos de 0.05 a 0.40 m. generalmente presenta karsticidad tipo lapiaz.

En las localidades y secciones de: Temax; Tepakán; Buctzotz; Sucuna; Xbec; San Antonio Cámara y Loché – Tizimín. Aflora caliza de textura packstone con variación a grainstone de color crema al fresco y una coloración gris a blanquizco a la intemperie, estructura porosa y cavernosa con estratificación de 0.40 a 1.0 m, ocasionalmente masiva, constituido por pelecípodos y gasterópodos. Generalmente presenta karsticidad tipo lapiaz.

En las secciones de: Dzonot Boch – Dzonot Carretero y Tzonotemezo – El Álamo. Aflora caliza con intercalación de una brecha calcárea, textura mudstone con variación a packstone de color beige a crema al fresco y una coloración gris a amarillento a la intemperie, estructura compacta, estratificación que varía de grueso a masivo y en ocasiones se observa de hasta 1.0 m, constituido por miliólidos, turrítelas, pelecípodos y gasterópodos. La brecha presenta es de color beige a crema al fresco e intemperiza a gris rojizo, estructura compacta, estratificación masiva, constituida por fragmentos angulosos de 0.05 a 0.10 m. en general presenta karsticidad tipo lapiaz.

En las secciones de: Chemax – Chan Cenote y Teya – Hochtún – Citilcum. Aflora una secuencia de caliza y brecha calcárea, de textura wackestone con variación a grainstone y boundstone de color beige al fresco y gris a blanquizco a la intemperie, estructura compacta, estratificación de 0.80 m, y en ocasiones varía de gruesa a masiva, constituida por pelecípodos, gasterópodos, corales,

bivalvos y miliólidos. La brecha es de color beige a ocre al fresco y una coloración gris con variación a rojizo y amarillento a la intemperie, estructura compacta, estratificación que varía de gruesa a masiva, constituida por fragmentos angulosos de 0.02 a 0.20 m. Presenta disolución tipo lapiaz.

En las secciones de: Caucel – Chuburná Puerto y Celestún – Carretera No 281. Aflora roca caliza de textura bounstone con variación a wackestone, de color crema a beige al fresco y una coloración gris, blanquizco, pardo a la intemperie, estructura compacta, con estratificación de 0.20 a 0.40 m, constituidos por bivalvos, moluscos, ostras, cefalópodos, gasterópodos, y pelecípodos. Presenta disolución tipo lapiaz.

En las secciones de: Buenos Aires y Tizimín – Calotmul. Aflora una secuencia de caliza y brecha calcárea, de textura mudstone, de color crema al fresco y gris a la intemperie, estructura compacta, estratificación de 0.15 a 0.30 cm, constituida por sorites, pelecípodos, gasterópodos y corales. La brecha es de color crema al fresco y coloración parda a la intemperie, estructura compacta, estratificación media, constituida por fragmentos angulosos de 0.01 a 0.30 m. Presenta disolución cavernosa.

En las secciones de: Yaxchéncú – Buena Esperanza; Tixcancal – Kan Cabichén; San José Montecristo – San Manuel; Teapa – La Libertad; San Hipólito – Francisco Villa; Kanasín – Tecoh – Tekit; Panabá – Espita y Río Lagartos – Loché. En estas localidades es factible encontrar alguna o varias de las texturas que a continuación se mencionan: mudstone, wackestone, packstone o grainstone, en general presentan un color beige con variación a crema al fresco y una coloración gris, amarillenta y blanquizca a la intemperie. Estructura compacta y en ocasiones cavernosa, estratificación de 0.05 a 1.0 m, por lo general predomina de forma masiva, constituida por bivalvos, pelecípodos, gasterópodos y miliólidos. La brecha es de color beige, crema, anaranjado y ocre al fresco y una coloración gris, rojizo, blanquizco y amarillento a la intemperie. Estructura compacta con cavernosidad, estratificación masiva constituida por fragmentos angulosos de 0.02 a 0.40 m. Presenta disolución tipo lapiaz.

En las secciones y localidades de: Umán – Sihunchén; Yaxkukul; Sinanché; Santo Domingo; La Candelaria; Chan Eden; Chun Tzalam; Sucilá; Yodzonot; Chan San Antonio; Holcáh; Tizimín; Aflora brecha calcárea de color beige, crema y blanquizco al fresco y una coloración gris, crema y blanquecino moteado a la intemperie. Estructura compacta y ocasionalmente porosa, estratificación masiva constituida por fragmentos angulosos de 0.02 a 0.20 m. Generalmente presenta disolución tipo lapiaz.

DEPÓSITOS CUATERNARIOS

Depósitos continentales producto de procesos sedimentarios asociados a zonas lagunares, palustres y litorales.

Coquina – Arenisca Qpt (?) Aq-Ar

Unidad cartografiada por el SGM en la Carta Geológica Minera Tizimín a escala 1:250,000 clave F16-7 (2005), conformada por arenisca poco consolidada y deleznable, ocasionalmente con estratificación cruzada y estratos delgados, con fragmentos de conchas, gasterópodos, ostras, coral y algas, cementados en material calcáreo arenoso. Esta unidad se ubica como una pequeña porción en la parte nororiente del Estado, comprende un área de 61.05 Km², lo que equivale al 0.15% del territorio estatal. El contacto superior es cubierto por depósitos recientes, mientras que el contacto inferior se infiere que es concordante con la Formación Carrillo Puerto. Por la posición estratigráfica se le asigna una edad del Pleistoceno. Los depósitos son de ambiente lagunar de plataforma somera (Carta Tizimín, 2005). En las inmediaciones de las localidades de: San José Tizimín; Santa Rita; Santa Teresa; La Costa; San Ángel; San José Dos; San Francisco; Paraíso; San Antonio; Río Lagartos (Estación SEDESOL) y al sur de San Felipe y Río Lagartos. Aflora roca de color crema parda al fresco y gris blanquecino a la intemperie, textura clástica fina, en estratos de 0.10 a 0.20 m de aspecto bandeado con apariencia de arenisca mal consolidada, se intercalan horizontes de conchas y bandas de travertino de color pardo.

Litoral (Qho li)

Se ubica en la parte norte y paralela a la línea de costa del Estado, comprende un área aproximada de 181.59 Km², lo que equivale al 0.45% del territorio estatal. Unidad constituida principalmente por fragmentos redondeados de 2 a 20 mm de coral, espículas de equinodermos, ostrácodos y esponjas. Se localiza en las inmediaciones de las localidades de: Chuburná Puerto; Puerto Chuburná; Telchac Puerto; Santa Clara; Dzilam de Bravo, Punta Holchit; Industria ISYSA, El Cuyo y Celestún – Sisal. Aflora una arena de color blanca a beige, constituido por grano fino y fragmentos de corales, espículas de equinodermos, bivalvos, moluscos y calcita, se han llegado a observar espesores de hasta 5.0 m.

Palustre (Qho Pa)

Esta unidad se ubica en la parte norte y paralela a la línea de costa del Estado, comprende un área aproximada de 1089.00 Km², lo que equivale al 2.75% del territorio estatal. Unidad que consiste de restos vegetales mezclados con limos y arcillas, fango calcáreo, lodo plástico, arena fina, arcilla y limo. En las localidades Chuburná; Puerto Progreso; Chicxulub Puerto; Telchac Puerto, Santa Clara; Dzilam de Bravo, Río Lagartos y Halachó. Afloran depósitos de arenas, limos y arcillas, lodo plástico y fango calcáreo de color oscuro y olor fétido, mezclado con tallos y raíces en estado de descomposición. Éstos depósitos llegan alcanzar los 5.0 a 8.0 m de espesor, el tirante de agua varía de los 0.15 a 0.40 m.

Lacustre (Qho la)

Esta unidad se ubica en una pequeña porción de la parte nororiente del Estado, comprende un área aproximada de 10.37 Km², lo que equivale al 0.02% del territorio estatal. Depósitos constituidos por arena, limo, arcilla y lodo calcáreo. Esta unidad se localiza en las inmediaciones de: El Perdido; Chan José; San Pedro Sacboc; Las Hermanitas; Lilian Analí; Tres Hermanas; San José; San Pedro Tres; Guadalupe; San Marcos; El Limonar; Nuevo León y Nuevo Tezoco. Estos depósitos están constituidos por arcilla, lodo calcáreo, arena y limo de color negro con alto contenido de materia orgánica, mezclado con tallos y raíces. Se desarrolla en zonas de lagos con influencia de agua dulce.

Aluvión (Qho al)

Esta unidad se ubica en la parte sur del Estado, comprende un área aproximada de 251.88 Km², lo que equivale al 0.63% del territorio estatal. Material detrítico no consolidado, constituido por grava, arena, limo y arcilla. Esta unidad se localiza en los alrededores de las localidades: Sudzal Chico; San Cristóbal de Pixoy; Ayim Dos; San Rufino; San Manuel; Mesatunish; Santa Lucia; Nueva Santa Cruz; San Isidro Yaxché; El Rincón; San Cosme; Santo Domingo; Justicia Social y Santa Rosa. Estos depósitos consisten de sedimentos y fragmentos no consolidados de limo, arena, arcilla, grava, cristales de calcita, sílice, litos, óxidos y/o material calcáreo suelto, de fragmentos angulosos a subangulosos, desde el mm al cm, en colores variados que intemperizan en tonos grises y rojizos (oxidados), ubicados en zonas bajas, conformando valles, en donde son utilizados para la agricultura.

VI.3. Tectónica

Tectónicamente la península de Yucatán presenta elementos geológicos que suponen una paleogeografía continental que evoluciona a una plataforma desarrollada desde el cretácico hasta la actualidad. Algunas publicaciones sustentan que la plataforma de Yucatán o Bloque de Yucatán propiamente dicho representa un bloque exótico asociado con la apertura del Golfo de México (Molina-Garza *et al.*, 1992; Dickinson y Lawton, 2001; Bird *et al.*, 2005; Cobiella-Reguera, 2008). Algunos estudios establecen que el inicio de la apertura del golfo sucedió durante el Jurásico Temprano a Medio (Cobiella-Reguera *op. cit.*) y que el Bloque de Yucatán posiblemente se encontraba en su posición actual ya para el Oxfordiano (Molina-Garza *op. cit.*).

La cinemática y palinspática sobre el desarrollo del Golfo de México permanece aún en discusión; en este sentido existen teorías que sugieren que el movimiento del Bloque de Yucatán fue mediante movimientos laterales dextrales (Bird *et al.*, *op. cit.*), siniestros (Molina-Garza *et al.*, 1992) mientras que estudios recientes señalan movimiento relacionado con el desarrollo de una cuenca trasarco asociada con subducción que dio origen al Arco Nazas (Stern and Dickinson, 2010) de edad Jurásico Inferior (Barboza-Gudiño *et al.*, 2008). Como señala Molina-Garza y colaboradores (1992), el bloque de Yucatán aparentemente se encontraba para el Oxfordiano en su posición actual sin embargo el registro fósil determinado en los depósitos sobreyacentes sugieren de manera general condiciones subaéreas que prevalecieron hasta el Cretácico inferior a superior (?) con posterior subsidencia o transgresión marina en la plataforma, generando condiciones de alta evaporación desarrollando depósitos de anhidritas durante el Albiano – Cenomaniano hasta el Mioceno-Plioceno, a partir de donde se marca una regresión que aparentemente expone depósitos calcáreo-evaporíticos principalmente en la parte SW (López-Ramos, 1975 in Lugo-Hubp *et al.*, 1992) y depósito o formación de capas calcáreas en la parte N-NE que ha continuado hasta la actualidad (López-Ramos, 1973; Lugo-Hubp, *et al.*, 1992).

Cabe mencionar que dentro de la historia geológica en esta área, resalta la presencia de un cráter de impacto de un meteorito localizado al N de la península al cual se le ha denominado como Cráter de Chicxulub; observado por primera vez con base a anomalías gravimétricas concéntricas, determinadas por Cornejo-Toledo y Hernández-Osuna (1950 in Sharpton *et al.*, 1996). Son extensos los estudios realizados al respecto y se ha confirmado la presencia de dicha estructura (Sharpton *et al.*, 1996; Collins *et al.*, 2002; Campos-Enríquez *et al.*, 2004; Nakano *et al.*, 2008) de aproximadamente 200 Km de diámetro (Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 2004), a este meteorito se le ha hecho responsable de la extinción en masa de la biodiversidad y aparentemente ocurrió en el límite Cretácico-Terciario (límite K/T) (Schulte *et al.*, 2010), sin embargo Keller *et al.*, (2004a) y Keller *et al.*, (2004b) con base a estudios sedimentológicos, bioestratigráficos, magnetoestratigráficos, isotópicos y de iridio señalan que el impacto del meteorito no sucedió en dicho límite sino aproximadamente 300,000 años previos al final del Cretácico. La secuencia terciaria aparentemente no presenta deformación tectónica, sin embargo, Lugo-Hubp *et al.*, (1992) señala la presencia de eventos de deformación neotectónica de la plataforma de Yucatán la cual dividió en dos unidades en términos geomorfológicos. La primer unidad ubicada en el norte-noreste de la península y la otra en el sur-suroeste las cuales corresponden con una planicie y planicie intercalada con lomeríos (de hasta 400 msnm), representadas por depósitos calcáreos neógenos y oligocénicos respectivamente. Con base a esto, menciona la existencia de un levantamiento “tectónico” de las unidades a partir del Oligoceno-Mioceno principalmente en el SW de la península y que continuó hasta el Plioceno-Cuaternario en el NNE; lo anterior sustentado por levantamiento provocado por erosión diferencial de las unidades, es decir que las unidades del SW de la plataforma presentan mayor grado de erosión y por consiguiente un levantamiento relativamente mayor, mientras que las zonas de planicie donde existen secuencias más jóvenes y con tiempo de exposición menor a las condiciones atmosféricas, están elevadas en menor grado. Este mismo autor señala que la morfología de las costas del Mar Caribe están posiblemente controladas por fracturas y que algunos de estos sistemas de fracturamiento especialmente en el centro, norte y noreste de la península son aparentemente generados por la intrusión de domos evaporíticos, provocando porosidad secundaria a las unidades calcáreas y por consecuencia aumentar la susceptibilidad a la generación de Karst. En este sentido definió un patrón de fracturamiento orientado principalmente NE-NW en la parte central de la plataforma y NNE en la costa oriental.

VI.4. Geología Estructural

En general, la geología estructural del estado de Yucatán es relativamente sencilla. Las capas expuestas en la entidad consiste principalmente de tres unidades diferenciadas en la cartografía del Servicio Geológico Mexicano con base al contenido faunísticos como las formaciones Chichen Itzá , unidad de caliza-coquinas y Carrillo Puerto de edad Eoceno, Oligoceno y Mioceno-Plioceno respectivamente, que son sobreyacidas discordantemente por unidades semiconsolidadas a no consolidadas del Cuaternario ubicadas en la zona costera.

De acuerdo con los datos de campo, algunos autores coinciden en que las capas de calizas presentan rumbos aparentemente horizontales a sub horizontales, incluso en algunas zonas es difícil reconocer la estratificación debido al intemperismo de las rocas, pero de manera general se interpreta un ligero basculamiento de las capas hacia el NNE (López-Ramos, 1973; SGM, 2005 carta geológico minera Tizimín escala 1:250,000).

Lugo-Hubp *et al.*, (1992), señala que efectivamente existe este basculamiento y sugiere que esta deformación de las unidades terciarias puede obedecer en parte a erosión diferencial de las secuencias debido al tiempo de exposición a la atmosfera, es decir que las unidades más antiguas aparentemente con tiempo de exposición mayor presentan rasgos que se asocian a texturas kársticas que señalan una alta erosión provocando levantamiento primeramente en el SSW dentro de la Plataforma de Yucatán, y es en este sentido que las unidades geográficamente más cercanas a la costa norte presentan una morfología de planicies que suponen una erosión relativamente menor. La edad de este basculamiento se determinó que inició posiblemente en el Mioceno hasta el Cuaternario (Lugo-Hubp, *op. cit.*).

El SGM (2005) en el informe de la carta geológico-minera Mérida escala 1:250,000, señala que dicho basculamiento podría estar asociado a tectónica extensiva reciente. Asociando a esta deformación se establece el origen de la Falla Ticul la cual es una falla de tipo normal de rumbo general NW-SE con bloque hundido al NE, que se localiza al SW del Estado (Figura 49). Esta falla es una de dos estructuras mayores que afectan a la secuencia terciaria y pone en contacto discordante a las unidades Carrillo Puerto con la Chichen Itzá aunque mayormente afecta a esta última unidad. La falla se expone sobre la Carretera Federal 184 y se desarrolla desde el poblado de Maxcanú hasta el de Tzucacab en el oeste y el sur del Estado respectivamente.

Por otra parte, a partir de imágenes de radar, se ha interpretado la continuación de dicha falla hasta el estado de Quintana Roo (COREMI, 2005, Carta geológico minera Felipe Carrillo Puerto escala 1: 250,000) y posiblemente presente una longitud de aproximadamente de 245 Km. De acuerdo con la interpretación realizada por INEGI (1998) con base al modelo digital de elevación utilizando información de cartas en escala 1:50,000 dentro del estado de Yucatán, infieren un lineamiento el cual es subparalelo al rumbo de la Falla Ticul, este lineamiento presenta un rumbo NW-SE tendiendo al W y presenta una longitud de aproximadamente 90 Km, desarrollándose desde el poblado de Álvaro Obregón (estado de Yucatán) hasta Calkiní (estado de Campeche).

Es importante señalar que las unidades que afloran en la entidad, presentan intenso fracturamiento el cual parece concentrarse principalmente en la parte NE, sin embargo se observan algunos lineamientos en el centro y sur donde la densidad baja considerablemente, mientras que en la parte NNW el fracturamiento está casi ausente (INEGI, 1998). Lugo-Hubp *et al.* (*op. cit.*), asocia este fracturamiento al levantamiento basculado de la plataforma de Yucatán que tuvo mayor intensidad en el sur generando sistemas fracturamiento orientados preferencialmente NNE.

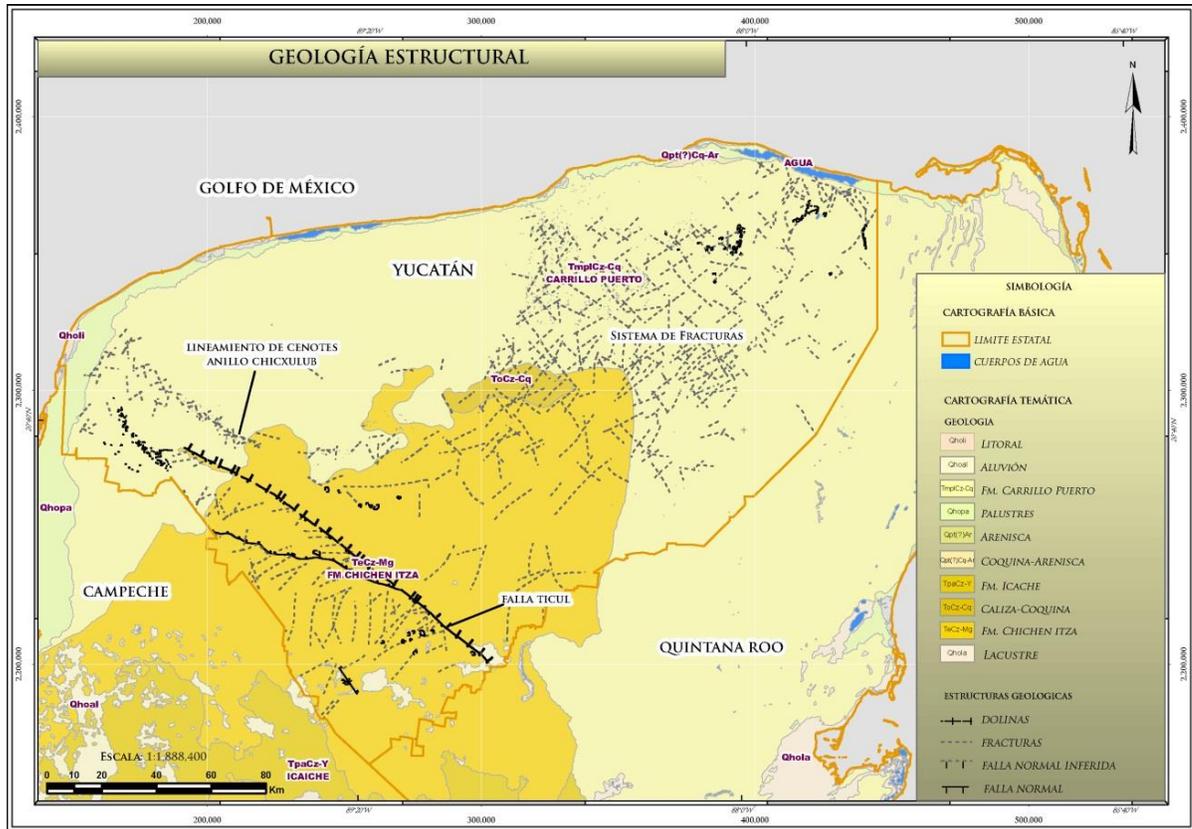


Figura 49. Mapa geológico estructural del estado de Yucatán.

De acuerdo con las cartas geológico-mineras escala 1:250,000 editadas por el Servicio Geológico Mexicano, infieren la traza del denominado anillo de cenotes Chicxulub con base a una serie de cenotes alineados afectando principalmente a la formación Carrillo Puerto (SGM, 2006, carta Tizimín; SGM, 2006 carta Mérida), que coinciden con la interpretación de lineamientos realizada por INEGI (1998). Se desconoce la relación de la alineación de cenotes respecto a la estructura de Chicxulub dado que este está marcado como desarrollado en el límite Cretácico-Terciario, y las unidades donde se desarrolló del anillo de cenotes es relativamente más joven, sin embargo López-Ramos (1975 in Lugo-Hubp, *et al.*, 1992) señala que existe una estrecha relación de la generación de fracturamiento con la intrusión de cuerpos diapíricos de yeso en las unidades terciarias y que gran parte de la deformación frágil está posiblemente condicionada por estructuras previas desarrolladas en el subsuelo.

VII. PELIGROS POR FENÓMENOS GEOLÓGICOS

Los peligros geológicos se pueden definir como los procesos, situaciones o sucesos que pueden generar un daño económico o social a una comunidad o población. El estado de Yucatán por su ubicación geográfica, distribución morfológica y geología asociada a las unidades litoestratigráficas que afloran, presenta características propias que lo hacen vulnerable a los peligros por fenómenos geológicos. Estos están presentes de manera natural pero, en parte, son acelerados por factores hidrometeorológicos y antropogénicos.

VII.1. Causales Detonantes de Peligro

Existe una gran variedad de factores o causales detonantes de peligro, en términos generales se dividen en internos y externos, los primeros están directamente relacionados con el origen y las propiedades físicas del material original, como son: fallas, fracturas y erosión; mientras que los segundos son aquellos que perturban su estabilidad, ya sean fenómenos naturales como lluvias intensas, sismos, actividad volcánica, o actividades antropogénicas.

Estos factores contribuyen a acelerar los procesos que se vienen dando de manera natural a través de millones de años, para así originarse procesos remoción en masa y sistemas de estructuras cársticas, estos últimos se manifiestan principalmente en dolinas (cenotes) y grutas, estas estructuras fueron formadas principalmente por la acción vertical de la disolución y por el paso del agua a lo largo de los sistemas de fallas y fracturas.

VII.1.1. Fallas y Fracturas como condicionantes en la generación de procesos de remoción en masa y subsidencia del terreno.

Las fallas y fracturas geológicas, son el reflejo de esfuerzos a los que se someten las rocas producidos por la dinámica externa e interna de la tierra, la cual es responsable de la desintegración de la corteza terrestre. Dichos fragmentos se denominan placas tectónicas, en cuyos límites se produce esfuerzos de tensión y compresión, siendo en estas zonas donde existen fallas activas.

VII.1.1.1. Conceptos Básicos (Definición y Clasificación).

En términos de geología estructural, “**falla**” se refiere a la fragmentación de un bloque en dos o más apartes con desplazamiento relativo entre estos mediante los planos generados y que a su vez los limitan, pudiendo ser este movimiento a lo largo de planos con tendencia a la horizontal o vertical. Por otro lado el término “**fractura**” se refiere a la fragmentación de un bloque rocoso sin que exista movimiento o desplazamiento entre ellos.

Las fracturas aparecen generalmente en grupos denominados sistemas, los cuales se caracterizan principalmente por tener un mismo rumbo. Las fallas se clasifican en tres tipos en función de los esfuerzos que las originan y de los movimientos relativos de los bloques como sigue:

Falla de desgarre o Transversal. En estas estructuras el desplazamiento dominante es horizontal y paralelo a la dirección de la superficie de la falla (Tarbuck y Lutgens, 2000). Se distinguen dos tipos de fallas de desgarre: derechas e izquierdas, (Figura 50C). En el Estado no se presenta este tipo de estructura, al menos a nivel superficial.

Falla inversa y cabalgamientos. Son fallas con desplazamiento vertical en las cuales, el bloque de techo se mueve hacia arriba con respecto al bloque del muro. Una falla inversa tiene buzamientos superiores a 45° y los cabalgamientos son inferiores a 45° (Tarbuck y Lutgens, 2000). Este tipo de fallas se genera por compresión (Figura 50A). Este tipo de estructuras no se han identificado en el estado de Yucatán, al menos en superficie.

Falla normal. Las fallas con desplazamiento vertical se clasifican como fallas normales, cuando el bloque de techo se desplaza hacia abajo en relación con el bloque de muro. La mayoría de las fallas con desplazamiento vertical tienen buzamientos de unos 60° , que tienden a disminuir con la profundidad (Tarbuck y Lutgens, 2000). Son generadas por esfuerzos de tensión (Figura 50B).

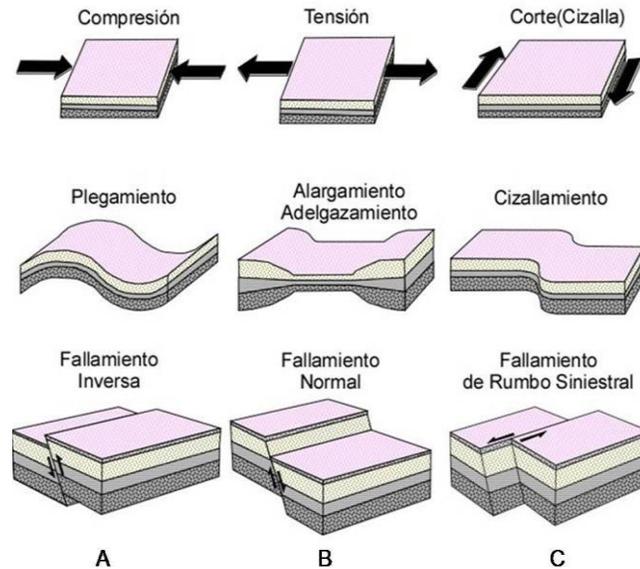


Figura 50. Clasificación de fallas geológicas.

En el poniente del estado de Yucatán, se ha reconocido una estructura de tipo normal y de dimensiones regionales denominada falla Ticul. En la zona de deformación, se observan fragmentos angulosos de 0.01 a 0.05 m, en matriz areno-arcillosa (Carta Geológico-Minera Mérida clave F16-10 a escala 1:250,000), el rumbo preferencial es NW-SE con inclinación al NE, tiene una longitud dentro del Estado de 150 Km aproximadamente, afectado principalmente a la Formación Chichén Itzá y hacia la porción NW a la Formación Carrillo Puerto.

Por otro lado el Cráter de Chicxulub, o también denominado Cráter de Impacto o Anillo de Cenotes es una estructura geológica que se ubica en la porción NNW del estado de Yucatán, se presenta como un rasgo topográfico semicircular con un diámetro de aproximadamente 165 Km. La concentración de cenotes y dolinas se alinean con la forma semicircular del cráter, este último interpretado en el subsuelo con técnicas geofísicas (Campos-Enríquez *et al.*, 2004).

Diferentes estudios se han realizado para corroborar la existencia de esta estructura de impacto; el cual fue observado por primera vez con base a anomalías gravimétricas concéntricas [Cornejo-Toledo y Hernández-Osuna, (1950 *in* Sharpton *et al.*, 1996)], alta concentración de iridio (Álvarez *et al.*, 1980); minerales con metamorfismo de choque (Hildebrand *et al.*, 1991; Sharpton *et al.*, 1992); química de la roca fundida y su similitud con el vidrio K/T de otras regiones (Sigurdsson *et al.*, 1991; Kring *and* Boynton, 1992); espesores de material eyectado en relación al tamaño y ubicación del Chicxulub (Hildebrand *and* Boynton, 1990; Hildebrand, *et al.*, 1991; Vickery *et al.*, 1992); impacto de un tsunami generado por el depósito de las olas en el Golfo de México (Hildebrand *and* Boynton, 1990; Smit *et al.*, 1992; Álvarez *et al.*, 1992); y la edad radiométrica (6.5 ma) de la roca fundida y las tectitas (Swisher *et al.*, 1992 *in* Pope *et al.*, 1993).

En el estado de Yucatán, debido a sus condiciones geológicas e hidrológicas se han desarrollado varios sistemas de estructuras kársticas, Rebolledo-Vieyra (2009) menciona que: Tanto dolinas como cenotes fueron formados principalmente por la acción de la disolución vertical producto del paso del agua hacia zonas del nivel estático durante los períodos glaciales en lineamientos que van desde Cabo Catoche hasta Chetumal en el estado de Quintana Roo, y que dichas estructuras revelan que las calizas han estado sujetas a una disolución vertical significativa. La posición actual del nivel medio del mar se considera interglacial y en ella el drenaje vertical hasta el nivel freático es de sólo unos cuantos metros. (Rebolledo-Vieyra, *op. cit.*).

Por otro lado, aunque los rasgos estructurales son poco evidentes a nivel península, existen algunas estructuras descritas en la Carta Geológico-Minera Cozumel, escala 1:250,000, con base en el análisis de imágenes de satélite, ortofotos, modelo digital de elevación e imagen de radar, donde el SGM (2005) interpretaron lineamientos que podrían corresponder a fallas normales con dirección NE-SW derivados de una tectónica distensiva. Este sistema de lineaciones conforma la Depresión Ignacio Zaragoza-Chumpón, de aproximadamente 73 Km de longitud, y 19 Km de ancho en la porción norte, mientras que en la porción sur mide aproximadamente 42 Km. Esta estructura se presenta principalmente al poniente del estado de Quintana Roo, en los alrededores de las comunidades de San Eusebio, Solferino, San Ángel, Kantunilkin, Sabana Mirafior, El Edén, Guadalupe, Vicente Guerrero, Ignacio Zaragoza, El Ideal, Santa Rita, Santa Martha, Yokdzonot, Piedras Negras, San Pedro, Chanchén, Leona Vicario, Agua Azul, Juárez, San Lorenzo, Victoria, Constituyentes, Chachalacas y Tulum.

Otros lineamientos en estas mismas áreas como El Ideal, Yokdzonot, San Luis, Punta Laguna, San Pedro, Chanchén, se encuentran de forma paralela con los límites del estado de Quintana Roo y Yucatán, en los alrededores de las comunidades de San Eusebio, Solferino, San Ángel, Kantunilkin, El Cedral El Ideal, Santa Martha, Yokdzonot, Laguna Luz, Piedras Negras, San Pedro y Chanchén.

A continuación se describe de manera general algunas de estas fallas de tipo normal señaladas en la bibliografía:

El lineamiento El Ideal.- Presenta un rumbo preferencial NE 25°-30° SW, con longitud de 81.5 Km aproximadamente, afecta a la Formación Carrillo Puerto. Se ubica en los alrededores de las comunidades de San Eusebio, Solferino, San Ángel, Kantunilkin, El Cedral, El Ideal y Santa Rita.

Lineamiento San Luis.- Es una lineación de rumbo preferencial NE 30° SW, con longitud de 9.5 Km, afecta a la Formación Carrillo Puerto. Se localiza en los alrededores de las comunidades de San Román, San Luis, Naranja y San Cosme.

Lineamiento Yokdzonot.- Se localiza en las inmediaciones de las comunidades de Santa Martha y Yokdzonot. Presenta un rumbo preferencial NE 38° SW, con longitud de 18 Km, afecta a la Formación Carrillo Puerto.

Lineamiento Punta Laguna.- Tiene rumbo preferencial de NE 35° SW, con longitud de 13 Km, afecta a la Formación Carrillo Puerto. Se localiza en las inmediaciones de las comunidades de Punta Laguna y Campamento Hidalgo y Cortez

Lineamiento San Pedro.- Presenta rumbo preferencial de NE 40° SW, con longitud de 32 Km, afecta a la Formación Carrillo Puerto. Se localiza en las inmediaciones de las comunidades de Luz, San Pedro y Chanchén.

Lineamiento Chan Chén.- Exhibe rumbo preferencial de NE 32° SW, con una longitud de 33.5 Km, afecta a la Formación Carrillo Puerto. Se localiza en las inmediaciones de Yaxche y Chanchén Palmar.

VII.1.1.2. Antecedentes

El grado de fracturamiento juega un papel importante ya que puede favorecer la susceptibilidad a algunos procesos geológicos que representen una amenaza a la población, como es el caso de los hundimientos asociados a karsticidad, donde las discontinuidades en las rocas calcáreas funcionan como zonas de alta permeabilidad secundaria que condicionan la generación, propagación y desarrollo preferencial de las estructuras kársticas (Brook y Allison, 1984; Marsico, *et al.*, 2004; Adriani, *et al.*, 2005; Florea, 2005; Delle Rose y Parise, 2002), y debido a que concentran el flujo del agua subterránea (Brook y Allison, *op. cit.*).

Para el caso de procesos de remoción en masas existen diversos trabajos como el de Carlos-Valerio *et al.* (2007) que señala que la geología y las estructuras geológicas (fallas y fracturas entre otras) influyen en la generación de dichos procesos y hasta controlan el tipo de mecanismo que puede originarse. Muñiz-Jauregui y Hernández-Madrigal (2012), relacionan a la densidad de fracturamiento con registros de inestabilidad en procesos de deslizamiento traslacional.

VII.1.1.3. Método de Trabajo

Dentro de las guías metodológicas para evaluación de fenómenos geológicos de CENAPRED (2006) no se estipula a las fallas y fracturas como un nivel de información, sin embargo, al ser un parámetro importante en términos de procesos por fenómenos de remoción en masa y hundimientos, en el presente estudio se hizo un análisis detallado de dicha variable acorde con la escala de trabajo. En la Figura 51, se muestra un diagrama que simplifica el método utilizado para la elaboración del mapa de densidad de fracturamiento el cual se considera como un indicador en términos de susceptibilidad a la karsticidad.

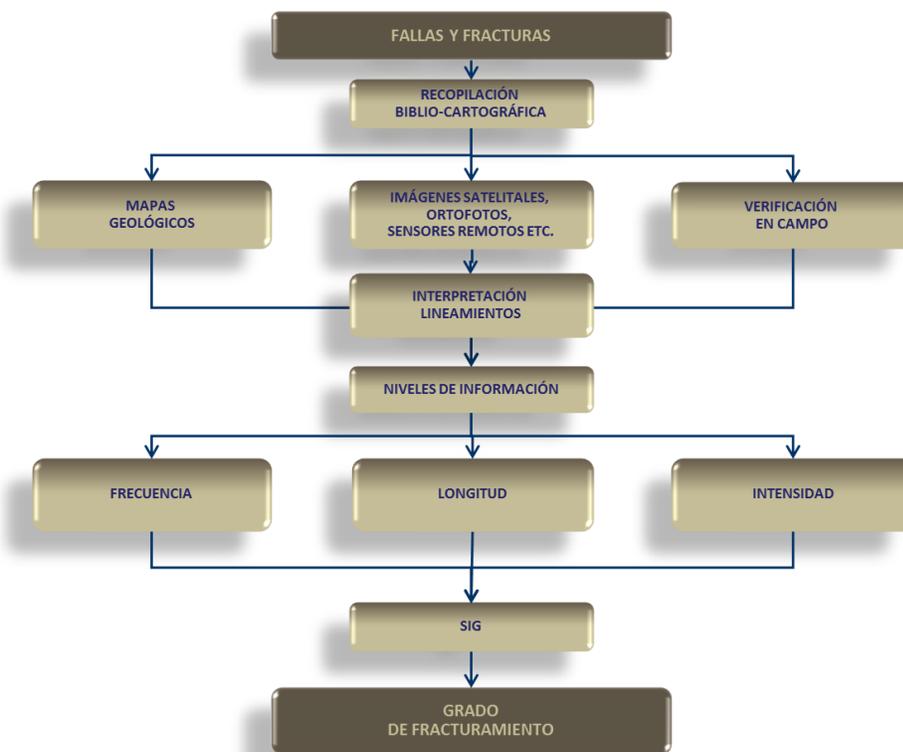


Figura 51. Diagrama de flujo considerado para la obtención del mapa (capa de información) de Grado de Fracturamiento.

Para realizar el análisis de intensidad de fracturamiento, el trabajo se dividió en dos fases, una de gabinete y otra de campo. Con lo que respecta a la primera fase, esta consistió específicamente en recopilación de información cartográfica digital e impresa, y análisis de imágenes de satélite, modelo digital del terreno, modelo del relieve, imágenes de Google *Earth* y de radar donde se interpretaron lineaciones a partir principalmente de rasgos topográficos y geomorfológicos. En una primera instancia se consultó la base de datos estructurales correspondientes a los informes finales de las cartas Geológico-Mineras Calkiní clave F15-9-12 (CRM, 2004), Tizimín F16-7 clave (SGM, 2005), Mérida clave F16-10 (SGM, 2005), Carrillo Puerto clave E16-1 (SGM, 2005), Cancún clave F16-8 (SGM, 2005) y Cozumel clave F16-11 (SGM, 2005), todas a escala 1:250,000. Esta información geológica-estructural fue migrada a un sistema de información geográfica.

Los modelos digitales del relieve y de elevación empleados, se obtuvieron a partir de datos vectoriales de 59 cartas topográficas de INEGI escala 1:50,000, la resolución obtenida de estas imágenes es de 30 m, las cuales cubren en su totalidad el territorio del Estado. Así mismo se utilizó el modelo digital de elevación obtenido a partir de SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) generado en el año 2000 y actualizado en el 2006. También se utilizó el mosaico de cartas topográficas de INEGI escala 1:50,000 que cubren el Estado y además de un mosaico de imágenes Google Earth.

Las interpretaciones fueron realizadas en ArcMap versión 10, donde se digitalizaron las lineaciones. De la información cartográfica de INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), se obtuvo información de estructuras geológicas, curvas de nivel, límite estatal, conjunto de datos geológicos vectoriales en escala 1:50,000. Información geológica estructural fue obtenida de cartas geológico-mineras escala 1:250,000, de las bases de datos del SGM (Servicio Geológico Mexicano).

El análisis de lineaciones se basó en los modelos 1) matemáticos, 2) geométricos y 3) analógicos propuestos por SEDESOL (2004) en su "Guía metodológica para la elaboración de atlas de peligros naturales a nivel de ciudad (identificación y zonificación)", así como los métodos propuestos por Durán-Valsero (2002 *in* Ayala-Salcedo y Olcina-Cantos, 2002); lo anterior con la finalidad de obtener modelos para el análisis de fracturas. A partir del método matemático se determinó la frecuencia o la densidad de fracturas por unidad de área. Con el modelo geométrico se definieron índices de susceptibilidad en función de la densidad de fracturamiento y por último, con apoyo de la fotointerpretación, estadísticas históricas de daños y el trabajo de campo se creó un modelo analógico para validar el modelo final conceptual.

Para la fase de campo, se llevó a cabo el levantamiento de algunos datos estructurales principalmente de fallas y fracturas relacionado con los niveles de información remoción en masa y hundimiento, utilizándose las respectivas fichas técnicas propuestas por el SGM en el marco de este proyecto. El modelo final obtenido a partir de las interpretaciones de las imágenes antes mencionadas consistió en un mapa de lineaciones (Figura 52).

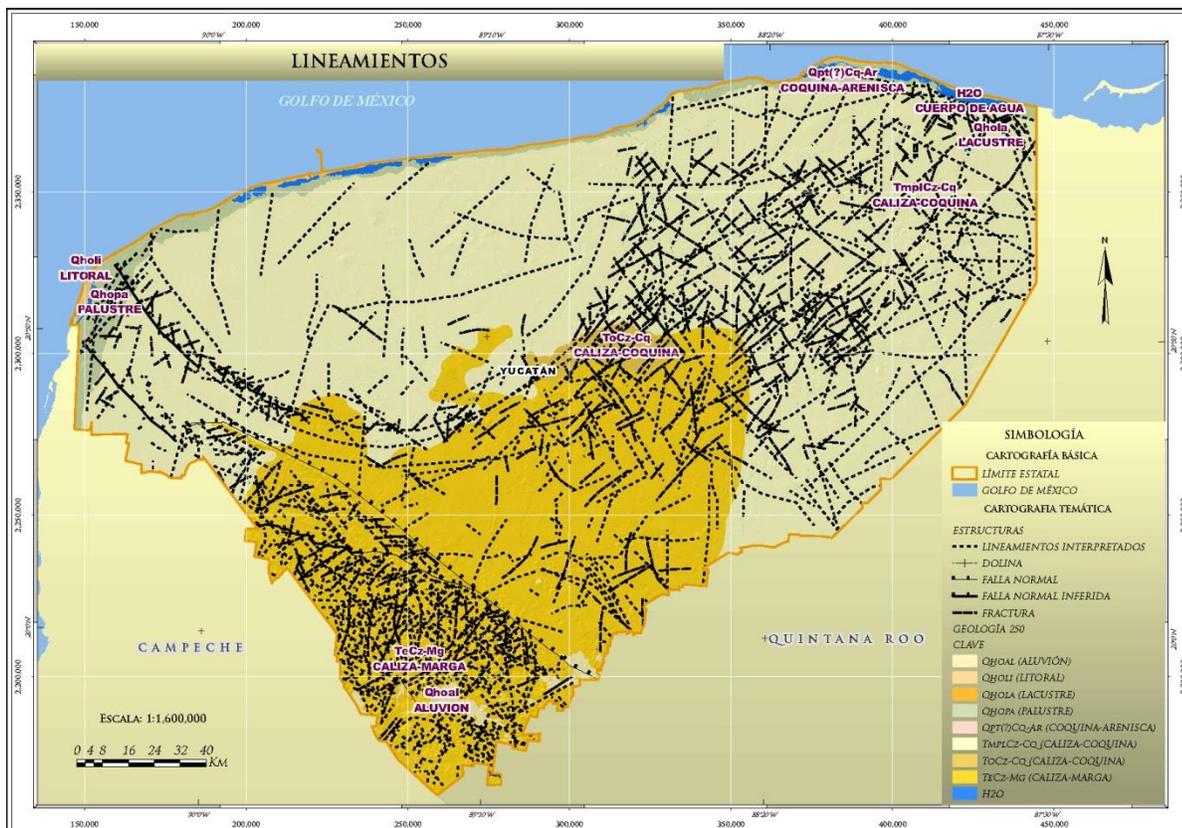


Figura 52. Mapa de lineaciones.

Una vez obtenidas las lineaciones, se realizó un proceso de análisis matemático y geométrico con la finalidad de definir zonas de mayor concentración de lineamientos. Es importante comentar que esta metodología se aplica considerando la falta de información debido a la naturaleza geológica y tectónica en esta zona de la plataforma de Yucatán, es decir este análisis se realiza con la finalidad de crear un escenario que se acerque a la realidad en sentido de la influencia del fracturamiento en el material rocoso, cabe señalar que los planos de estratificación, sistemas de fracturas y fallas son por mucho el mayor condicionante en la generación del karst debido a que el ataque químico de la roca (soluble) comienza en las zonas de mayor porosidad existiendo una estrecha relación entre la densidad de dolinas o cenotes con la densidad de fracturamiento (Brook y Allison, 1981).

A continuación se describe a detalle los modelos obtenidos a partir de la interpretación de lineaciones de imágenes, dichos modelos son frecuencia de fracturamiento, intensidad de fracturamiento y longitud total de fracturamiento. La sumatoria de estos subproductos al hacer la intersección de las capas de información, se obtiene el mapa final denominado grado de fracturamiento, el cual es la herramienta a utilizar como capa de información para los análisis de hundimientos y procesos de remoción en masa.

VII.1.1.4. Análisis de Información y Generación de Mapas Base.

Posterior a la interpretación de las imágenes antes descritas, y considerando que los lineamientos obtenidos teóricamente pueden corresponder con estructuras o discontinuidades tectónicas en la roca, estas pueden ser utilizadas arbitrariamente para realizar mapas que representan una aproximación al grado de fracturamiento presente en un área o región, partiendo del criterio de que las fracturas y fallas controlan en gran medida el desarrollo de Karst (Delle Rose y Parise, 2002). En este sentido se utilizan las lineaciones como un modelo análogo a la presencia de fallas y fracturas en la roca, basado en los criterios empleados por SEDESOL (2004), Esquivel y Uribe (inédito).

Para obtener dicho mapa se realiza una zonificación con base al análisis de lineamientos, en el cual se denotan parámetros como: el número de lineamientos por unidad de área, longitud total de lineamientos por unidad de área y por último la cantidad de intersecciones por unidad de área, denominándose **1) frecuencia de fracturamiento**, **2) longitud total de fracturamiento** e **3) intensidad de fracturamiento** respectivamente. Para dicho análisis se estableció una malla adecuada a la escala de trabajo, la selección de la longitud de las celdas que componen el mallado fue arbitraria verificando con diferentes superficies, estableciéndose celdas con áreas de 9 Km² (3x3 Km) debido a que los parámetros calculados muestran una mejor representatividad espacial. En este sentido el uso de mallas de menor tamaño provocan que los datos se aproximen a cero, lo que hace difícil una clasificación espacial, tal efecto es denominado “Efecto *Nugget*” (se presenta como producto de errores de medición y variaciones sobre distancias mucho más pequeñas que los intervalos de muestreos utilizados), y por el contrario en mallas de mayor tamaño las clases generan distribuciones espaciales de gran área no representativas.

En el caso del mapa de frecuencia de fracturamiento (Figura 53), se contabiliza el número de lineaciones por unidad de área, para ello se realiza una intersección de las lineaciones con el mallado antes descrito, obteniéndose por resultado una tercer capa de información, la cual contiene el dato de identificación de cada celda y las lineaciones que pasaron por cada una de ellas, con lo cual se realiza la sumatoria del número de segmentos de línea que existe en cada celda, y esta suma se anexa a la base de datos del segmento.

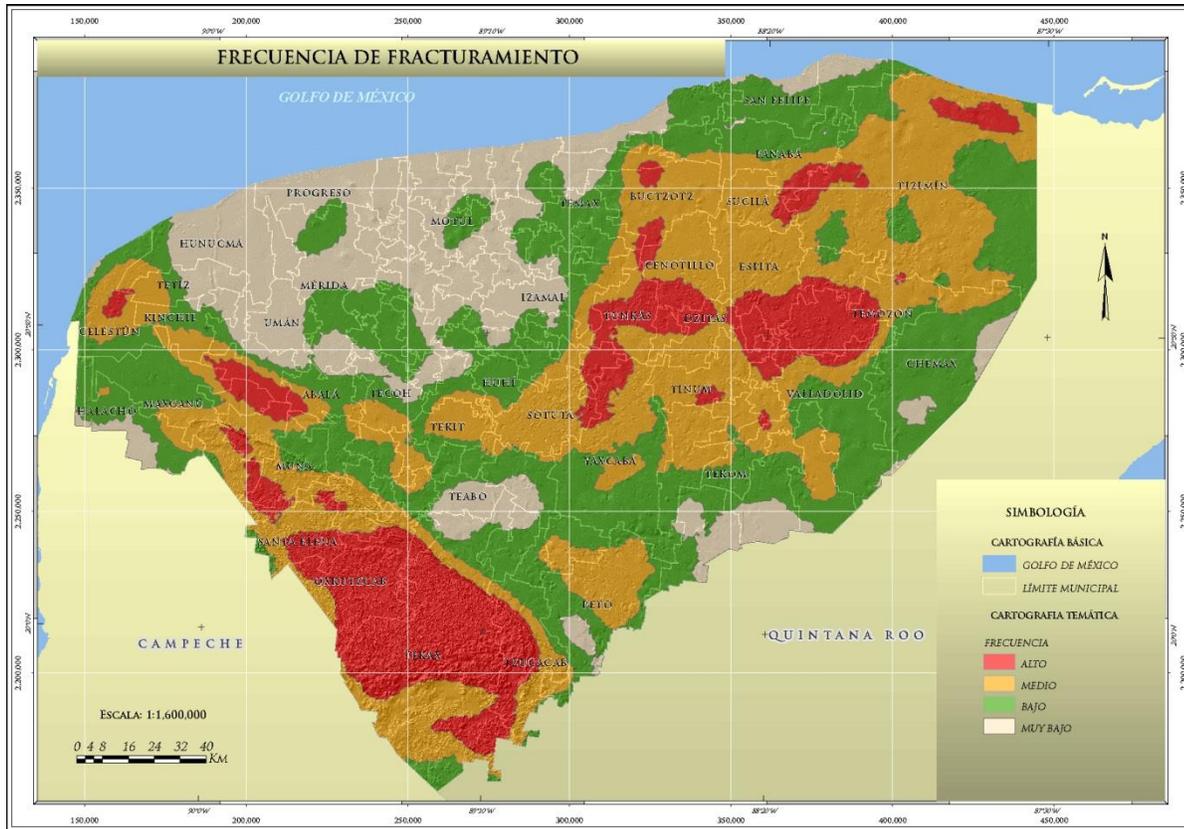


Figura 53. Mapa de frecuencia de fracturamiento.

A partir del nivel de información del mallado se calcula un punto en el centro de cada celda, y dicho punto representará el segmento y se le asignará el valor del dato numérico obtenido de líneas por celda.

Al archivo de puntos se le realiza un proceso de “*Kriging* Ordinario” dicho procedimiento permite interpolar de forma espacial y obtener estadísticamente zonas con mayor o menor concentración de lineaciones; dichas zonas varían desde “muy bajo” (valores menores a la unidad), hasta las zonas de mayor concentración (valores con un rango entre 3 y 19 líneas), recordando que dicho proceso da como resultado una imagen *raster* con celdas de 9 Km².

Con lo que respecta al mapa de Intensidad de fracturamiento (Figura 54), se realizó partiendo del número de intersecciones entre lineamientos en cada celda. Para esto, se coloca un punto en cada intersección de dos o más lineamientos; posteriormente se sobreponen los puntos con el mallado de muestreo, dando por resultado un nuevo archivo que contiene en sus bases de datos los puntos que representan las intersecciones de los lineamientos con el identificador del segmento en la que se localizan espacialmente.

Con los datos obtenidos de las intersecciones, se contabiliza cuantas veces aparece un punto en cada celda. Una vez que se tiene este censo, se genera un punto el cual representará dicha área, que se relaciona con la base de datos del conteo de las intersecciones, posteriormente los puntos que representan los centros de los segmentos sometido a un proceso de *Kriging* mediante el cual se interpolan los valores de las intersecciones. El resultado es una imagen *raster* donde se clasifican las clases en muy bajo, bajo, medio y alto, en las cuales se distribuyen valores que van desde cero hasta once.

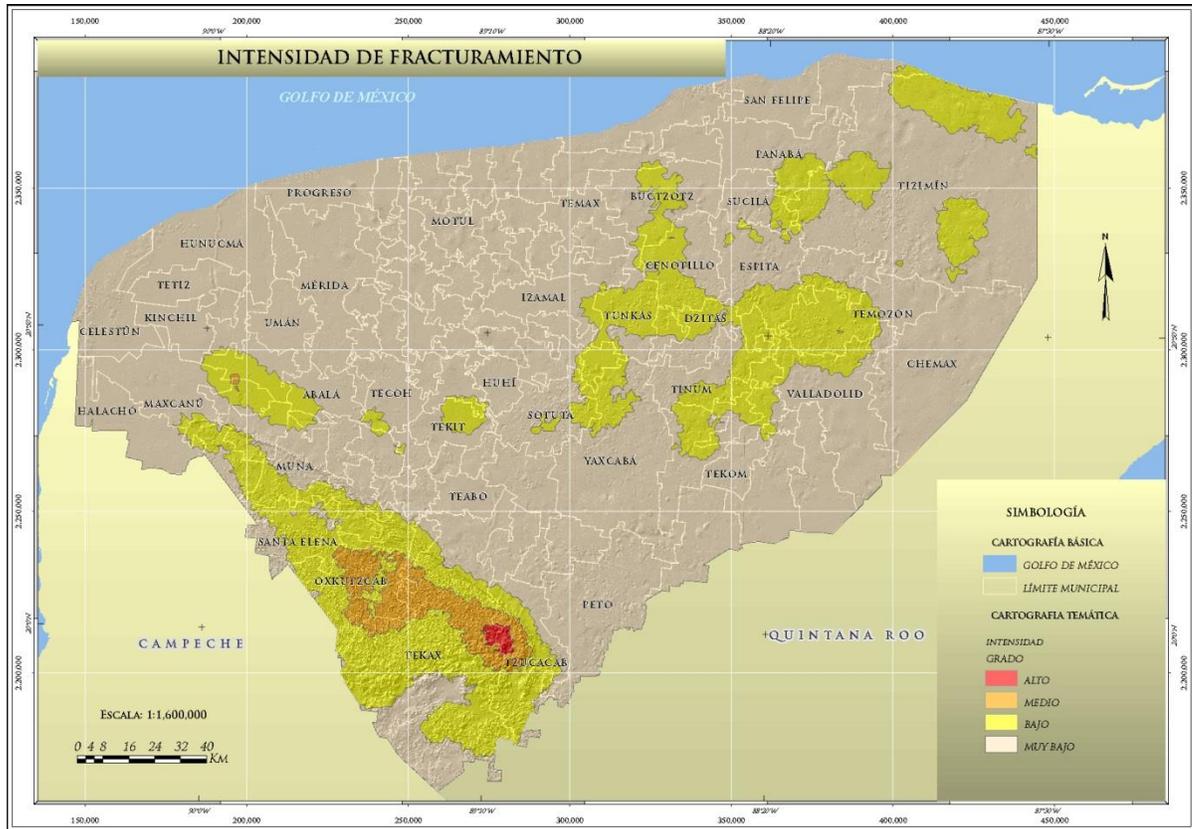


Figura 54. Mapa de intensidad de fracturamiento.

A la sumatoria de las longitudes de las lineaciones dentro de cada celda se denomina Longitud total. Para la obtención de estos parámetros se fragmentan las lineaciones que según coinciden con cada límite de celda del mallado de muestreo.

Una vez que los lineamientos son divididos y se les agregan los identificadores de las celdas en las que se ubican espacialmente se calcula la distancia de cada segmento de línea, posteriormente se realiza una sumatoria de las longitudes de los lineamientos por cada celda y se genera un punto en el centro de cada segmento al cual se le asigna el valor de dicha suma, estos puntos son interpolados mediante un proceso de *Kriging*, como resultado se tiene un archivo con zona en las que el porcentaje lineal de lineaciones que contiene son similares, este archivo es de tipo *raster* y se convierte a uno de tipo vectorial en el que se realiza una clasificación de 4 zonas como se muestra en la Figura 55.

Finalmente se obtiene el mapa del **grado de fracturamiento** a partir de la intersección de los mapas antes descritos. Mediante el proceso de “Unión” en ArcMap Versión 10, se sobreponen los polígonos con sus bases de datos y se genera uno nuevo donde se generan segmentos que adquieren las características de las áreas que coinciden espacialmente, así se realiza una sumatoria de los parámetros calculados para cada zona y se reclasifican dichos polígonos. Como resultado se obtiene un mapa que expresa el grado de fracturamiento (Figura 56).

En color rojo aparecen las áreas donde se determinó que existen mayores condiciones de fracturamiento clasificado como grado “muy alto”; en naranja grado “alto”; en amarillo grado “medio”; en verde el “bajo” y en crema áreas clasificadas como “muy bajo”.

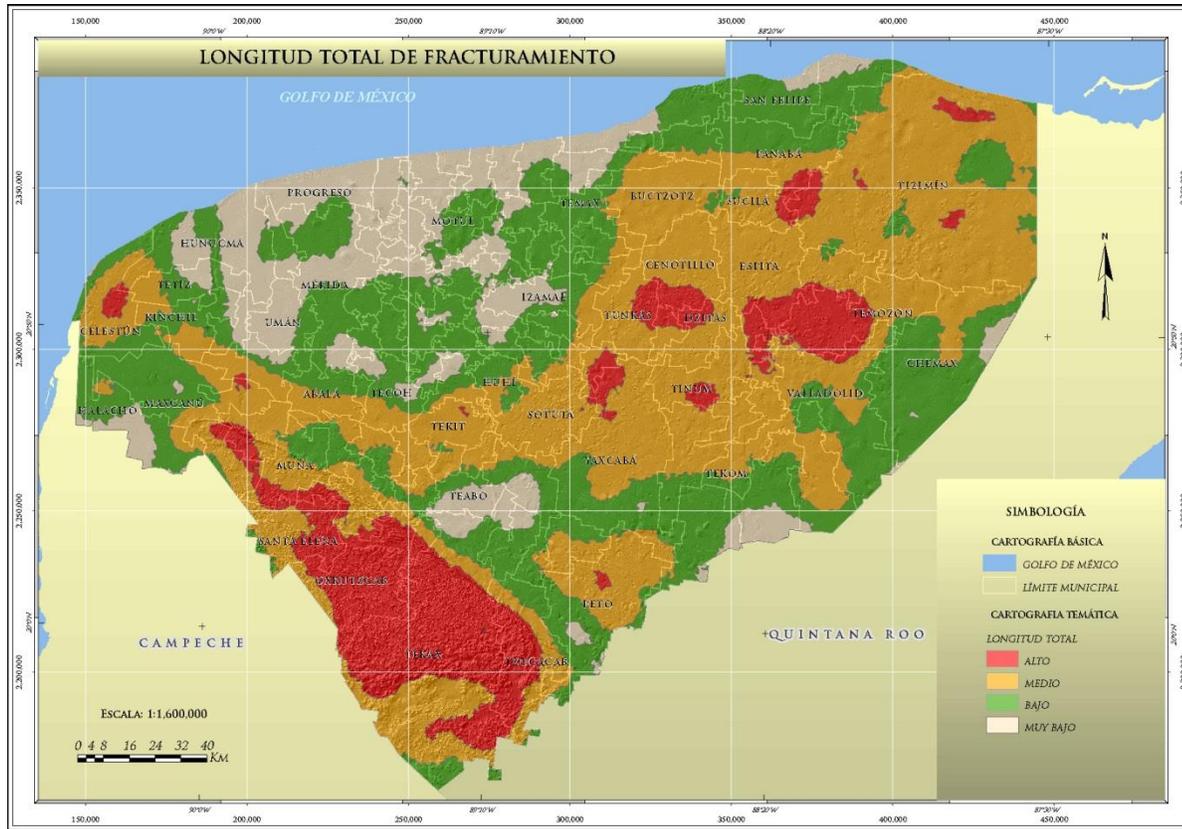


Figura 55. Mapa de longitud total.

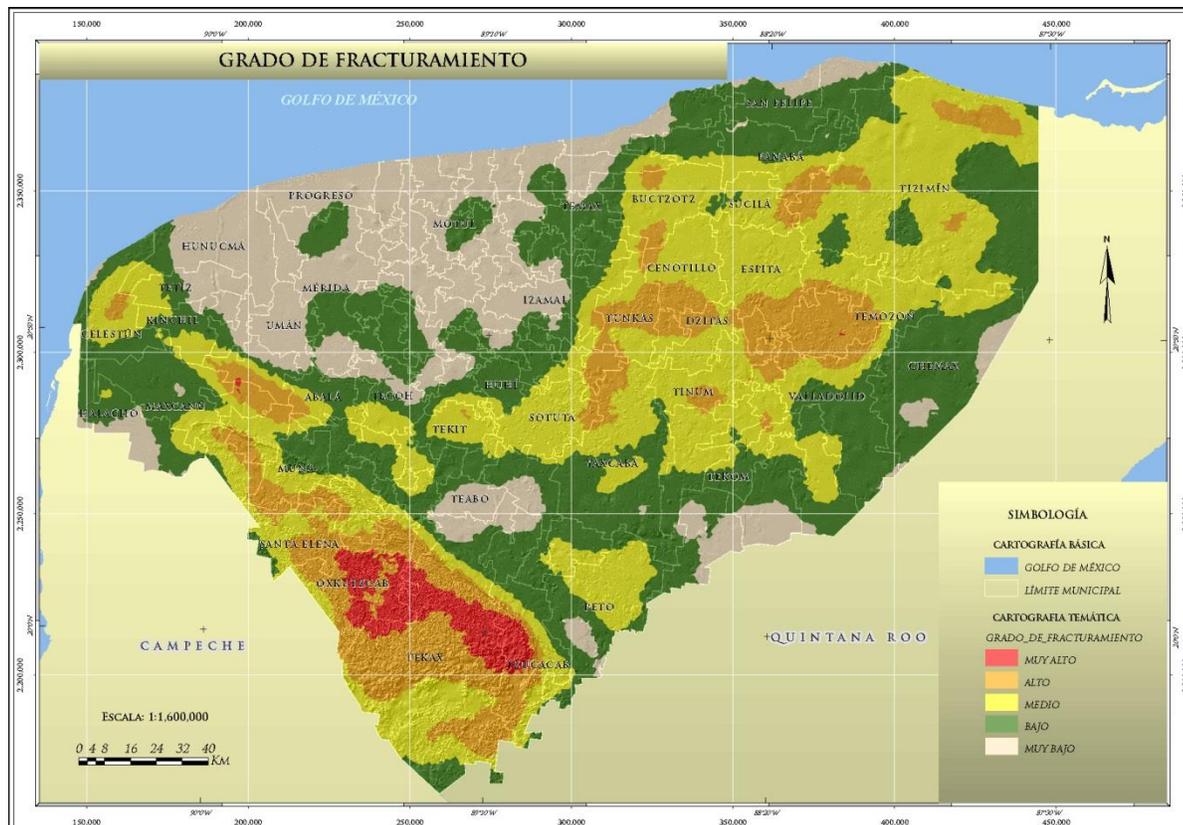


Figura 56. Mapa de Grado de fracturamiento.

En el mapa se puede observar que en la zona que corresponde al anillo de cenotes de Chicxulub, el registro de los parámetros considerados para determinar el grado de fracturamiento, no es de gran importancia, sin embargo, si se puede apreciar este arreglo circular debido al contraste entre zonas. Hacia el centro-orientado se aprecian zonas marcadas de color rojo, a la altura de las zonas urbanas de Panabá, Sucilá, Cenotillo, Tunkás, Quintana Roo, Hunukú, Temozón y Yalcobá por mencionar algunas, las cuales coinciden con el área de mayor concentración de cenotes a nivel Estado. Otra zona de gran importancia corresponde a la Sierrita de Ticul (sur del Estado), en la cual por tener mayor expresión topográfica se pudo interpretar un mayor número de lineaciones. Cabe señalar que en esta zona afloran las rocas más antiguas del territorio estatal y es considerada como una zona asociada con levantamiento “tectónico” de las unidades geológicas a partir del Oligoceno-Mioceno aparentemente provocado por erosión diferencial (Lugo-Hubp *et al.*, 1992).

La concentración de discontinuidades consideradas grado muy alto, se ubican en los alrededores de las cabeceras municipales de Oxkutzcab, Akil, Tekax, Tzucacab, así como de las localidades de Sahcahmucuy, X-Kobenhaltún, Yaxhachén, Xul, Bombahaltún, Nohcacab (en el municipio de Oxkutzcab), San Arturo, Kunchehaltún, Baxac (en el municipio de Tekax) y Sacbecán (en el municipio de Tzucacab). Cabe señalar que la gran concentración de lineaciones en la parte sur del Estado se relaciona al desarrollo de poljes, úvalas y dolinas, los primeros con gran extensión territorial.

Por otro lado, la concentración de discontinuidades de grado alto se distribuyen principalmente en las zonas S, NW, Centro-Este-SE y NE del Estado en los alrededores de las cabeceras municipales de: Santa Elena, Oxkutzcab, Akil, Tekax, Tzucacab y algunas localidades como: Emiliano Zapata (municipio de Oxkutzcab), Manuel Cepeda Peraza, Alfonso Cazo, Ticum, Benito Juárez, Becanchén y Kantemó (ambos municipios de Tekax).

Las concentraciones de grado medio se tienen en las inmediaciones de las cabeceras municipales de Maxcanú, Opichén, Abalá, Santa Elena, Ticul, Oxkutzcab, Akil, Tekax, Tzucacab y las localidades de: San Diego Buena Vista, Nueva Santa Cruz, Santa Lucía, Víctor Saucedo, San Juan Tekax, Mesatunich, San Cristóbal, Xcunyá, Tres Hermanitas, Nohalal, Poccheil, San Rufino, San Manuel, Santa Rita, Anexo Nohalal, San Pedro Xtokil, Huntochac, San Jorge y Chun Wuitz (ambos municipios de Tekax), Temozón, Cenotillo, Tinum, Temozón, Quintana Roo, Tunkás, al norte de Sucilá y sur de Panabá, algunas localidades de: X-Calakooop (municipio de Tinum), Tres Reyes, Chan José (municipio de Tizimín) y Libre Unión (municipio de Yaxcabá), así como las localidades de Mahzucil, X-Kanchakán, San Antonio Xpakay y San José (ambos del municipio de Tecoh);

Otra zona importante de grado medio, comprende la cabecera municipal de Mama y las localidades de San Federico (municipio de Maní) y Xaybé (municipio de Chapab); otra de las concentraciones se tiene al sureste del Estado, comprende la cabecera municipal de Tahdziú y las localidades de Papacal, Tixhualatún, San Bernabé, Xcabanché, San Nicolás Yoactún, Dzonotchel y San Dionisio (todas pertenecientes al municipio de Peto). Otro polígono y de los de mayor extensión se ubica en las cabeceras municipales de Sotuta, Yaxcabá, Tinum, Chankom, Kaua, Cuncunul, Uayma, Tinum, Dzitás, Valladolid, Espita, Calotmul, Sucilá, Panabá, y algunas localidades de Las Palmas, San Pedro, San Antonio, San Lorenzo, San Isidro Dzonot Carretero y La Espuela (municipio de Tizimín). Otra concentración no menos importante se ubica en las inmediaciones de las localidades de San Román, Mirafior (municipio de Chemax y San Andrés y Chan Tres Reyes (municipio de Tizimín). Las áreas de grado medio, se distribuyen en una franja semicircular estrecha en la parte NW y de gran amplitud en la parte Centro-Este, así como en la parte S-SW.

Lugo-Hubp y colaboradores (1992), elaboran el mapa de morfoisohipsas de la península de Yucatán, en la cual muestra dos unidades morfológicas principales, la primera se ubica en la parte sur del estado de Yucatán, con orientación al norte y una ligera flexión al oeste, la segunda en la porción norte del Estado, con una orientación al nor-noreste. Lo que apoya el concepto de dos grandes estructuras geológicas, que corresponden a dos etapas de formación del relieve a partir del Mioceno al Cuaternario. De acuerdo con este concepto, la Sierrita de Ticul se encuentra ubicada en la unidad morfológica que se ubica en la porción sur del Estado y regionalmente forma parte del límite entre estas dos unidades morfológicas.

Finalmente, el grado de fracturamiento bajo que es el de mayor distribución, se dispersa en la porción NE así como en el S y NW del Estado. Las principales poblaciones y localidades dentro de esta zona son: Halachó, Chocholá, Muna, Sacalum, Ticul, Dzán, Maní, Chumayel, Chapab, Tekit, Mayapán, Cantamayec, Tixméhuac, Chacsinkín, Peto, Kantunil, Temax, Dzoncauich, Buctzotz, Tizimín, Valladolid, Chichimilá, Tekom y Tixcacalcupul (ambas cabeceras municipales), la afectación es a la caliza, marga y coquina de las formaciones Carrillo Puerto y Chichén Itzá, sin embargo existe una zona donde el grado de fracturamiento es muy bajo. Esta zona se observa en la parte norte aunque se observan pequeñas áreas asociadas de grado bajo.

VII.1.1.5. Descripción e Interpretación de Lineamientos.

La mayor concentración de lineaciones se asocia principalmente con la caliza y marga de la Formación Carrillo Puerto y en menor proporción con la caliza y coquina de la Formación Chichén Itzá (Figura 52).

Con base a la distribución y disposición de las lineaciones se determinaron cinco zonas (Figura. 57), que se pueden asociar con rasgos geológicos y geomorfológicos como sigue: Interior del anillo de Cenotes (Zona A), anillo de Cenotes (Zona B); Sierrita de Ticul (Zona C); Noreste del estado de Yucatán (Zona D) y por último la Depresión Ignacio Zaragoza-Chumpón (Zona E).

Las unidades cenozoicas que comprenden la plataforma de Yucatán se caracterizan por presentar deformaciones que sugieren una relativa estabilidad tectónica, toda vez que la estratificación apenas manifiestan ligeras inclinaciones con tendencia a la horizontal, y fracturas que se pueden interpretar únicamente como basculamiento originados por una aparente tectónica distensiva reciente, (SGM, 2005, informes de las cartas Geológico-Mineras Mérida F16-10, Cancún F16-8 y Cozumel F16-11, escala 1:250,000).

A continuación se describen de manera general la zonificación obtenida a partir de esta interpretación: En las Zonas A y B, se ubica la estructura geológica conocida como Cráter de Impacto, Cráter de Chicxulub o Anillo de Cenotes, esta estructura se localiza en la porción NNW del estado de Yucatán, se observa de forma semicircular con un diámetro de 165 ± 5 Km, truncado por la costa. En la periferia de esta estructura se ubican más de 2,000 cenotes con un rango de 50 a 500 m de diámetro y de 2 a 120 m de profundidad (Hall, 1936; Soki *et al.*, 1984, en Pope, 1993). Cabe señalar que la Zona A carece de lineamientos significativos sin embargo de los pocos determinados, la mayoría tienen un rumbo preferencial NE-SW y NW-SE, en general de gran longitud, mientras que la Zona B consiste de lineamientos en arreglo ortogonal de relativamente pocas dimensiones pero numerosos, que se concentran en una franja semicircular coincidente con la distribución de los cenotes.

Geológicamente en la **Zona A** afloran estratos de caliza caracterizados por presentar ondulaciones que varían de rumbo preferencialmente hacia el NW-SE y NE-SW e inclinaciones subhorizontales de hasta 23° (SGM, 2006, Carta Geológico-Minera Tizimín, escala 1:250,000), por otro lado los lineamientos presentan dirección preferencial al NE-SW, N-S y NW-SE, como se muestra en la roseta de direcciones correspondiente a la Figura 60A, elaborada a partir de 49 datos relacionados principalmente a la Formación Carrillo Puerto. En esta zona las lineaciones se presentan de forma aislada con longitudes que varían de 6 a 40 Km, rara vez llegan a ser de forma conjugada. Estas lineaciones se observan en su gran mayoría asociadas a la Formación Carrillo Puerto y a una pequeña extensión de la Formación Chichén Itzá (Figura 57).

La Zona B, se distribuye de manera parcial a totalmente en el territorio de los municipios de Celestún, Chocholá, Sotuta, Sacalum, Opichén, Muna, Mayapán, Maxcanú, Mama, Kopomá, Kinchil, Kantunil, Huhí, Dzilam González, Dzilam de Bravo, Chumayel, Chapab, Tunkás, Tetiz, Tekit, Tecoh, Sudzal, Cenotillo, Buctzotz, Abalá, Kopomá.

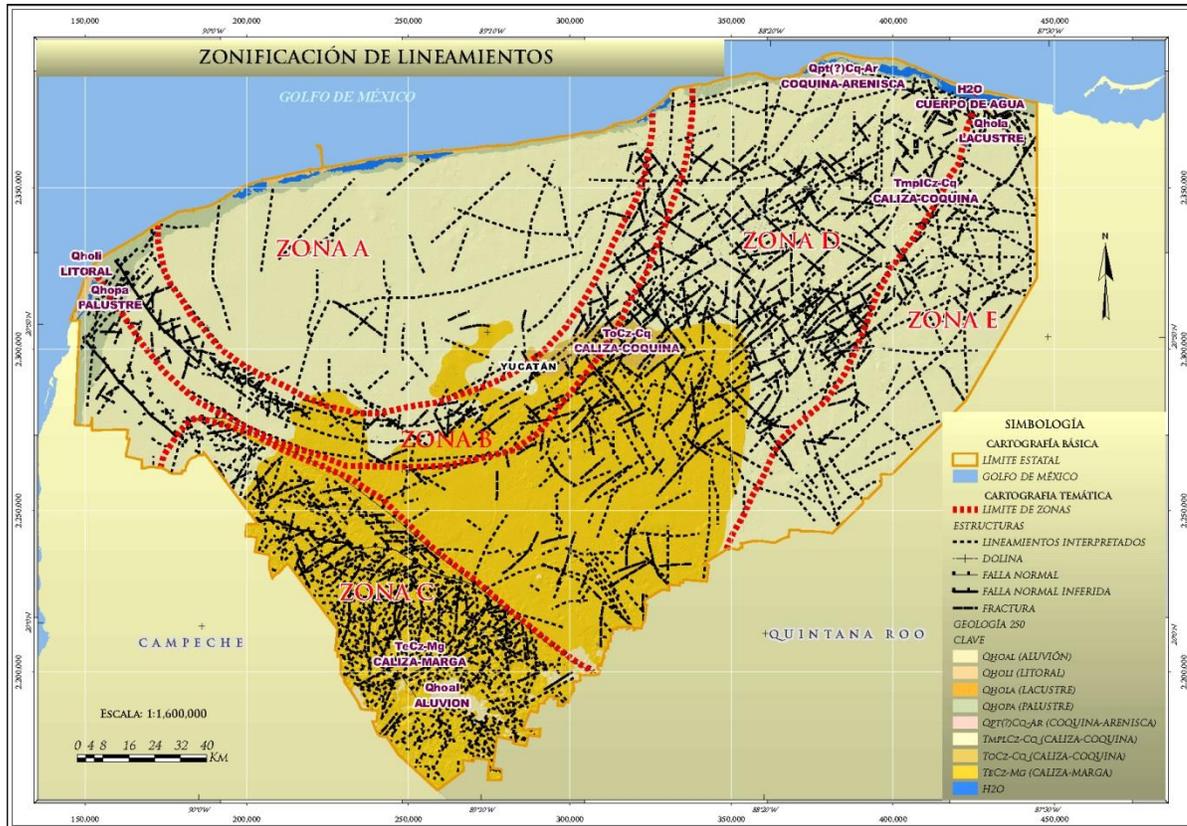


Figura 57. Lineamientos y geología del estado de Yucatán (Fuente SGM, 2007).

Geológicamente en esta zona los estratos presentan ligeras ondulaciones con dirección preferencial NW-SE y NE-SW e inclinaciones subhorizontales las cuales oscilan de 01° a 22°, los lineamientos presentan una dirección preferencial NE-SW y NW-SE. En la Figura 32 se observa cierta similitud al comportamiento de la “Zona A”, sin embargo la dirección principal toma valores que varían de NE 60° a 75° SW, estimado con base a la roseta (Figura 58B) elaborada a partir de 113 datos de lineamientos que en conjunto forman una estructura de grandes dimensiones, de forma semicircular de aproximadamente 271 Km lineales. La relación de las lineaciones es de forma conjugada y ocasionalmente se presentan de forma aislada, la longitud de estas estructuras varía de los 6 Km a los 30 Km delimitando burdamente el contacto entre las formaciones Carrillo Puerto y Chichen Itzá, mientras que en la porción norte solo relacionada con la primera unidad.

La **Zona C**, comprende la porción SSW del estado de Yucatán, se caracteriza por presentar un relieve de planicies y lomeríos con elevaciones de hasta 200 msnm en rocas calcáreas de la Formación Chichén Itzá. Comprende los municipios de Santa Elena, Oxkutzcab, Opichén, Muna, Maxcanú, Tzucacab, Ticul, Tekax, Akil y una pequeña porción del municipio de Peto.

Geológicamente los estratos en esta zona se observan ligeramente deformados, con capas que varían de rumbo al NE-SW y NW-SE e inclinaciones subhorizontales que oscilan entre 03° y 35° (SGM, 2006, Carta Geológico-Minera Tizimín, escala 1:250,000; SGM, 2006, Carta Geológico-Minera Mérida, escala 1:250,000). Una de las estructuras geológicas regionales, se localiza en el extremo NE de la Sierrita de Ticul, la cual es conocida como Falla Ticul, ésta presenta su mejor exposición a lo largo de la carretera federal No 184 desde el poblado de Maxcanú, Opichén, Muna, Ticul; Pustunich, Yotholin, Guadalupe San Diego, Independencia, Tekax de Álvaro Obregón, Ticum, al sur de Tzucacab, Catmís y sur de Justicia Social, dicha estructura presenta una buena expresión que se evidencia en la imagen de satélite, ortofotos, modelo digital de elevación e imagen de radar, modelo digital de relieve y curvas de nivel que permiten definir su traza a lo largo de aproximadamente 150 Km, cruzando el Estado con un rumbo NW-SE (Figura 58).

La estructura se manifiesta en la localidad de Calcehtok (municipio de Opichén) asociada a brecha cataclástica de 4 m de ancho constituida por fragmentos calcáreos angulosos de 1 a 5 cm, soportados por matriz areno arcillosa con abundantes óxidos de hierro. Pone en contacto tectónico en la región de Maxcanú-Opichén, específicamente en el Cordón Puc a las formaciones Carrillo Puerto y Chichén Itzá, en el resto de su traza solo afecta a la Formación Chichén Itzá (Carta Geológica-Minera Mérida F16-10).

Los lineamientos presentes en la Sierrita de Ticul, tienen una dirección preferencial NE-SW y NW-SE (Figura 58C), en esta zona se determinó gran densidad de lineaciones respecto del resto del Estado; estas lineaciones son del orden de 5 a 30 Km de longitud, la relación entre ellas es de forma conjugada, sin embargo se llegan a presentar de forma aislada relacionadas con rocas carbonatadas de la Formación Carrillo Puerto (Figura 57).

La **Zona D**, comprende la parte NE del estado de Yucatán, se caracteriza por presentar una gran concentración de estructuras de origen kárstico dentro de la entidad, mismo que se puede corroborar con el mapa generado por el SGM (ver capítulo de hundimiento), en donde ubica los principales dolinas y cenotes, tomando como base las cartas topográficas escala 1:50,000 e imágenes de satélite Google Earth. Comprende de forma total o parcial los municipios de Chichimilá, San Felipe, Río Lagartos, Panabá, Kaua, Espita, Quintana Roo, Dzitás, Chikindzonot, Chemax, Chankom, Yaxcabá, Valladolid, Tizimín, Tixcacalcupul, Tinum, Temozón, Tekom, Sucilá, Cuncunul y Calotmul.

A nivel de esta zona e incluyendo parte del estado de Quintana Roo, geológicamente los estratos presentan ligeras ondulaciones que varían de rumbo NW-SE y NE-SW, con capas subhorizontales que oscilan de 01° a 16° de inclinación. De acuerdo a la interpretación los lineamientos presentan un arreglo conjugado con rumbos que oscilan en NE 45°- 60° SW y en segundo lugar otra familia con orientación NW de 45° a 60° SE como se observa en la Figura 60D, estas llegan a tener longitudes que varían desde los 5 Km a los 80 Km, siendo los municipios de Quintana Roo, Espita, Valladolid, Uayma, Tunkás, Tizimín, Tinum, Temozón, Sucilá, Cenotillo y Calotmul, con mayor concentración de lineaciones. López-Ramos (1975), menciona que en esta zona existe un mínimo gravimétrico que puede corresponder a una serie de cuerpos diapíricos relacionados a las Evaporitas Yucatán. Por otro lado Lugo-Hubp (1992), señala que las zonas de mayor concentración de formas cársticas corresponden con zonas de alto fracturamiento, en lo cual podría tener influencia los domos de evaporitas cretácicas que penetran a las capas superiores terciarias y originan fracturas que alcanzan la superficie.

La **Zona E**, comprende la parte NE de la entidad, se ubica entre los límites del estado de Yucatán y Quintana Roo. Geológicamente, las estructuras presentes en la zona, pueden estar influenciadas por la zona tectónicamente activa (dentro del territorio del estado de Quintana Roo) denominada Depresión Ignacio Zaragoza-Chumpón la cual corresponde a un sistema de fallas tipo normal con rumbo N-S y NE-SW en su porción sur, derivado de una tectónica distensiva (carta Geológica-Minera Cancún F16-8, Cozumel F16-10). Estas estructuras se ubican en las inmediaciones de las localidades de Nuevo León, San Isidro, Emiliano Zapata Primero, San Antonio, Popolnáh (ambos municipio de Tizimín); La Esperanza, X-can, Santa María, Chemax y Chulután (ambos municipio de Chemax) y Xuilub (municipio de Valladolid). La principal afectación es a la caliza y coquina de la Formación Carrillo Puerto.

La secuencia carbonatada en esta zona se distingue por la ausencia de estructuras que denoten deformación significativa y está constituida por estratos que conservan una actitud horizontal, sin embargo es común observar basculamientos en las capas sin que esto signifique plegamiento, solo ligeras inclinaciones que varían de NE-SW y NW-SE e inclinaciones subhorizontales que oscilan de 02° a 11° (SGM, 2006, Informe de la Carta Geológico-Minera Mérida, escala 1:250,000; SGM, 2006, Carta Geológico-Minera Cancún, escala 1:250,000 SGM, 2006, Carta Geológico-Minera Cozumel, escala 1:250,000). Los principales lineamientos interpretados corresponden a una orientación NE 45°- 60° SW y en segundo orden una orientación NW 45°- 60° SE. En la Figura 58E se representa un análisis estadístico en forma de roseta de direcciones elaborado a partir de 53 datos.

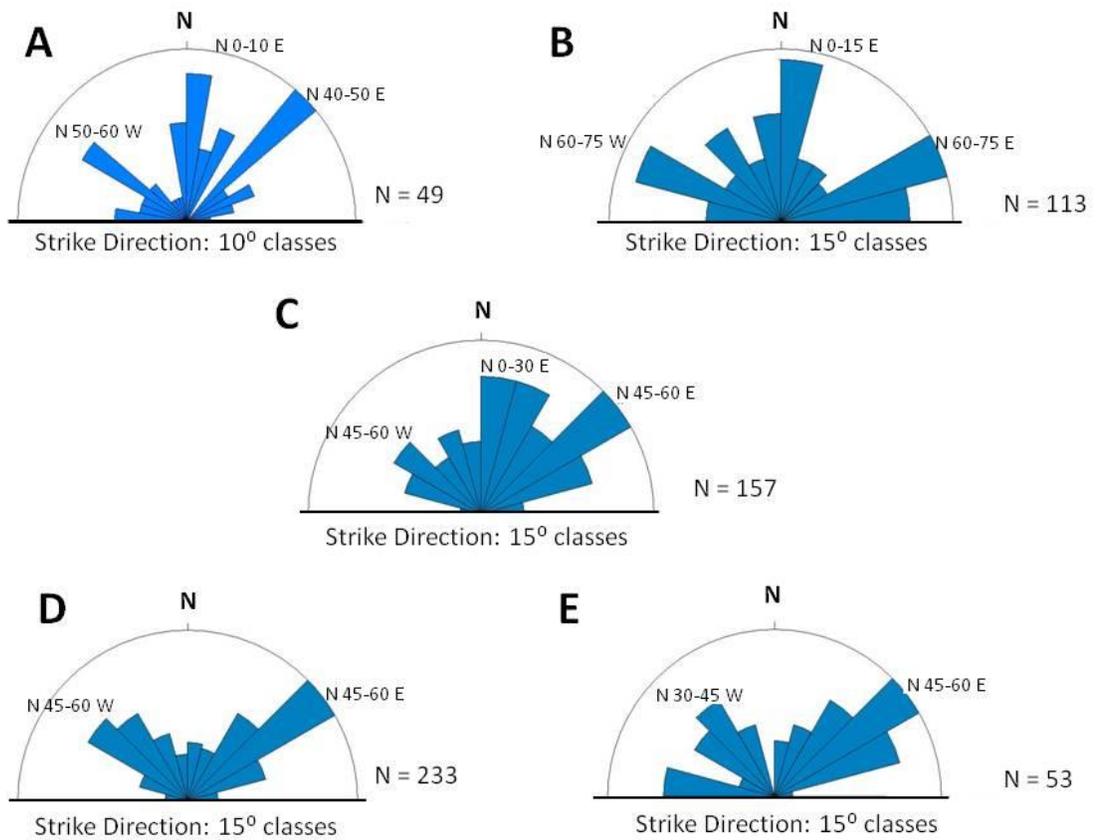


Figura 58. Roseta de direcciones por Zonas “A,B,C,D,E”, ver Figura 57 como referencia.

VII.2. Remoción en Masa

El fenómeno de inestabilidad de laderas o Procesos de Remoción en Masa (PRM), en las últimas décadas es considerado como uno de los riesgos de mayor relevancia en nuestro país, debido al alto grado de afectación en cuanto a daños materiales, infraestructura y vidas. Dicho fenómeno ocurre con frecuencia en zonas donde se tiene un relieve accidentado. Si bien es cierto que la manifestación de este fenómeno está en función de factores internos o condicionantes tales como: tipo de roca, y/o condiciones estructurales del macizo rocoso entre otros. Así como; por factores externos o desencadenantes, tales como la incidencia de eventos naturales como lluvias extremas, diversos tipos de actividades antrópicas, como la generación de asentamientos humanos irregulares en zonas de montaña, que contribuyen a acelerar los procesos de remoción en masa, por mencionar algunos.

En México las pérdidas socioeconómicas debido a los deslizamientos y sus efectos secundarios son cada vez mayores debido al crecimiento de la población que se expande hacia zonas de laderas y cantiles inestables y también al desarrollo de nuevas obras de infraestructura. Una proporción significativa de las pérdidas de vidas humanas y económicas incide principalmente en tres ámbitos: vías de comunicación, de servicios y en los urbanos (Herrera, 2002).

En la regionalización de los deslizamientos de la República Mexicana, propuesta por Herrera, (2002), se establece una regionalización nacional que considera el riesgo o potencial de incidencia de deslizamientos, de acuerdo con cuatro niveles de peligro (muy alto, alto, medio y bajo); que se sustenta en las características geológicas, topográficas, de clima y sismicidad en el país. Dentro de esta regionalización, la Península de Yucatán cae dentro del nivel bajo por inestabilidad de laderas. Indica también que el clima influye tanto en los procesos antecedentes como en los detonadores de los deslizamientos, es el principal causante del intemperismo de las rocas que trae como consecuencia la formación de suelos residuales y también proporciona los elementos para que actúen los agentes de la erosión, principalmente el agua. El estado de Yucatán está agrupado en el clima de tipo *cálido húmedo y semihúmedo*, en estas condiciones climáticas se favorece la alteración de las rocas. La producción de suelos residuales es mayor en extensión y espesor debido a la constante humedad que prevalece en el ambiente (Herrera, *op. cit.*).

Debido a la topografía del Estado, las afectaciones por PRM, que tienen impacto en la población, en la infraestructura y en las actividades productivas de la región, son mínimas. A pesar de lo anterior, y de acuerdo a la escala de trabajo, es posible considerar la zona suroeste del territorio (Sierrita de Ticul) como área de valoración ante este fenómeno. En el marco del presente estudio se analizan las afectaciones que se observaron en los reconocimientos superficiales, y éstos corresponden a trazos carreteros distribuidos sobre lo que se conoce como la Sierrita de Ticul hacia el sur del Estado, la estructura tiene una orientación NW-SE. Los taludes tienen elevaciones de hasta 10 m de altura, formados por rocas calizas estratificadas, en general con pocas afectaciones a las vías de comunicación.

VII.2.1. Conceptos Básicos

Los procesos de remoción en masa ocurre cuando se rompe o pierde el equilibrio de una porción de los materiales que componen una ladera o talud y se deslizan ladera abajo por acción de la gravedad (CENAPRED, 2006). Se entiende como movimiento de ladera, al desplazamiento de una masa de roca, suelo o derrubios, en sentido descendente (Cruden, 1991). Se incluye cualquier tipo de movimiento en masa (se excluye por tanto la erosión), excepto la subsidencia y el hundimiento kárstico (Fernández, 2001; Varnes, 1978).

Otra definición que se manifiesta en términos análogos es la aportada por Corominas y García, 1997, donde definen a los movimientos de ladera como movimientos o desplazamientos del terreno que afectan a los materiales en laderas o escarpes. Estos desplazamientos se producen hacia el exterior de las laderas y en sentido descendente como consecuencia de la fuerza de la gravedad (Corominas, 1997).

El fenómeno de Remoción en Masa o movimientos de ladera engloba diferentes tipos de procesos, tales como deslizamientos, flujos, caída de bloques, reptaciones, avalanchas y movimientos complejos, estos últimos resultan de la combinación de uno o más procesos (CENAPRED, 2006).

Los tres tipos básicos de procesos por remoción de masas son: caída de bloques, deslizamientos y flujos, estas inestabilidades se caracterizan porque los materiales que componen la masa fallada se mueve por una superficie de falla (CENAPRED, 2006).

Caída de bloques. Para que se produzca la caída de muchos bloques de roca “en un solo evento” requiere que haya ocurrido un debilitamiento de la masa rocosa, debido a la fragmentación y a la ausencia de soporte lateral de las laderas o taludes. El tipo de movimiento depende de la disposición de los planos de discontinuidades y puede cubrir en un solo momento varios planos. De acuerdo con **Suárez, 1998**, en general se tienen tres tipos principales de mecanismos por caída de bloques; por **Volteo** (los planos de discontinuidad en sentido contrario a la ladera), por **Falla Plana** (los planos de la discontinuidad son paralelos a la inclinación de la ladera) y por **Cuña** (se forman con la intersección de dos o más planos de discontinuidad con inclinaciones en sentido al corte de la ladera) (Figura 59).

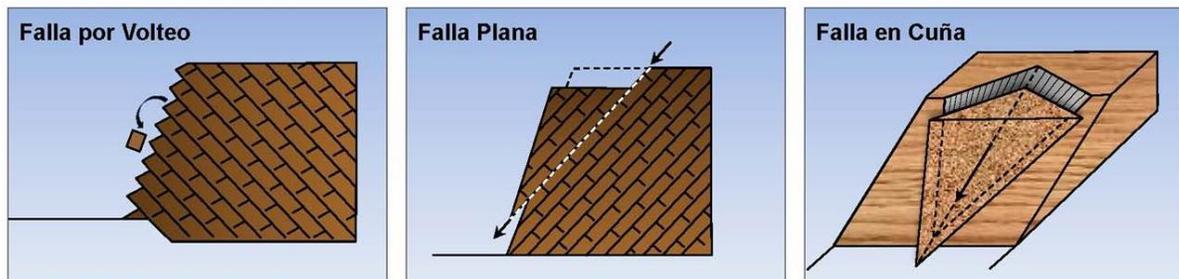


Figura 59. Principales mecanismos por caída de bloques.

Deslizamientos. Se definen como movimientos de una masa de materiales térreos pendiente abajo, sobre una o varias superficies de falla delimitadas por la masa estable o remanente de una ladera (Figura 60) se distinguen:

- **Deslizamiento rotacional.** La superficie de falla es formada por una curva con centro de giro por encima del centro de gravedad de la masa de material, el movimiento se considera rotacional. Tienden a ocurrir de forma lenta.
- **Deslizamiento traslacional.** Cuando el movimiento de masas se efectúa hacia fuera o hacia abajo en una superficie relativamente plana u ondulada se considera de tipo traslacional. En este no existe un movimiento de giro o volteo. Pueden ocurrir de forma lenta o repentina.

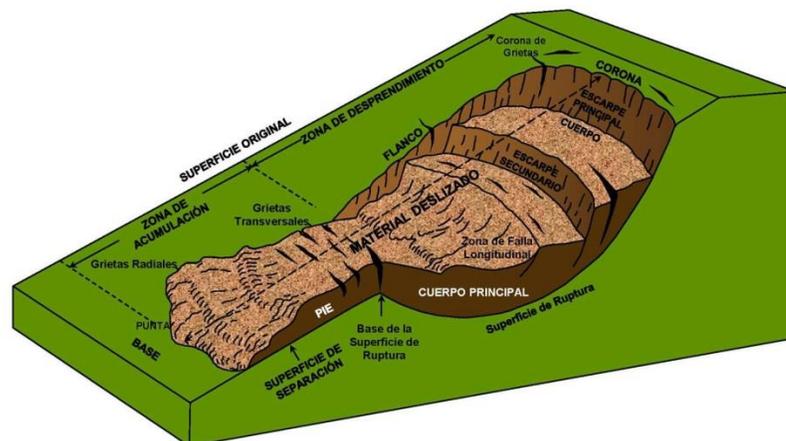


Figura 60. Nomenclatura de las diferentes partes que conforman un deslizamiento (Suárez, 1998).

Flujos. Movimientos de suelos y/o fragmentos de rocas pendiente abajo de una ladera, en donde sus partículas, granos o fragmentos tienen movimientos relativos dentro de la masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla (Figura 61) (CENAPRED, 2006). Los flujos pueden ser de muy lentos a muy rápidos, así como secos o húmedos; pueden distinguirse:

- **Flujos de lodo.** Masa de suelo y agua que fluye pendiente abajo muy rápidamente, y que contiene por lo menos 50% de granos de arena y limo, y partículas arcillosas.
- **Flujos de tierra o suelo.** Masa de suelo y agua que fluye pendiente abajo muy rápidamente, y que contiene por lo menos 50% de granos de grava, arena y limo.
- **Flujos o avalancha de detritos.** Movimiento rápido de una mezcla en donde se combinan suelos no cohesivos, fragmentos de rocas, y vegetación con aire y agua entrampados, formando una masa viscosa o francamente fluida que fluye pendiente abajo.
- **Creep o flujo muy lento.** A diferencia de los casos anteriores, este es un movimiento constante pero muy lento de suelo y roca pendiente abajo, en el que no se define con precisión la superficie de falla.
- **Lahar.** Flujo de suelos o detritos que se origina en las laderas de un volcán, generalmente disparado por lluvias intensas que erosionan depósitos volcánicos, deshielo repentino por actividad volcánica, o bien por rotura o desbordamiento de represas de agua.

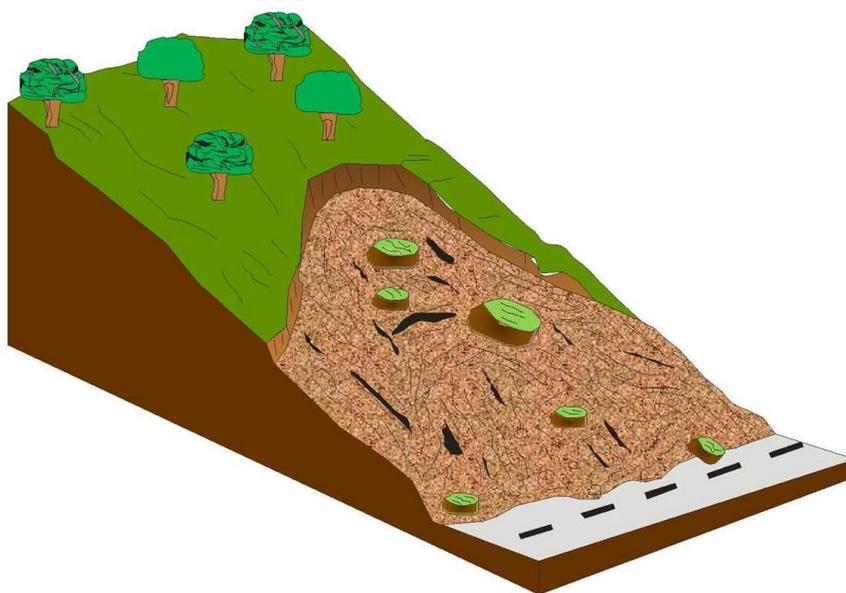


Figura 61. Representación esquemática de los Flujos, asociada a un talud.

Existen diversos factores que favorecen la inestabilidad de laderas. Principalmente influyen las modificaciones a la geometría de la ladera, por erosión o excavaciones artificiales, efectos de sismos de gran magnitud, explosiones para construcción o minería, lluvias intensas y prolongadas, debilitamiento de la capa superficial del suelo por deforestación, etc. Las causas que disparan los deslizamientos también están relacionadas con las características geológicas y geomorfológicas del sitio (pendiente, altura, agrietamiento, grado de alteración de las rocas, etc.), así como propiedades mecánicas de los materiales propensos a la falla. En términos generales las causas o factores que propician los deslizamientos se pueden dividir en:

Factores condicionantes (internos). Existen una variedad de factores condicionantes que inciden en los procesos de inestabilidad de laderas y son relativos a la propia naturaleza o características de la ladera, esos factores pueden ser:

- **Geológicos.** Representan un factor de inestabilidad permanente: la litología, la estratigrafía de la roca (orientación y ángulo de inclinación), discontinuidades estratigráficas y estructurales y la alteración de las rocas (alteración hidrotermal y/o meteorización).
- **Hidrológicos e hidrogeológicos.** Aumento en la escorrentía superficial, variación en el nivel freático del aguas subterráneas, alternancia de permeabilidad, presiones de poros o hidrostáticas y el comportamiento geomecánico (resistencia a la deformabilidad, compresibilidad, cohesión, etc.).
- **Geomorfológicos.** Áreas con altas pendientes, geometría de los taludes, topografía irregular. Cualquier pendiente mayor a 15% conlleva a riesgos de erosión.
- **Climáticos.** Alternancia de épocas de sequía, lluvia, hielo-deshielo.
- **Vegetación.** Ausencia o escasez de vegetación que sujete el terreno.

Factores desencadenantes (externos). Son aquellos sistemas ajenos a la ladera que perturban su estabilidad y producen un incremento de los esfuerzos cortantes, sin que la resistencia del material que compone el talud cambie (Figura 62). Una causa desencadenante pequeña puede ser suficiente para provocar la inestabilidad, esos factores pueden ser:

- **Naturales.** Precipitaciones típicas o atípicas, inundaciones, filtración de agua al subsuelo, variaciones de temperatura, Terremotos, cambios en el volumen de terreno por hielo-deshielo, humedad- desecación y erupciones volcánicas.
- **Antrópicos o inducidos.** Deforestación, quemas e incendios forestales, cortes de taludes para construcción de carreteras u otro tipo de infraestructura, acumulación de escombros o rellenos mal consolidados utilizados para asentamientos humanos, la actividad minera, etc.

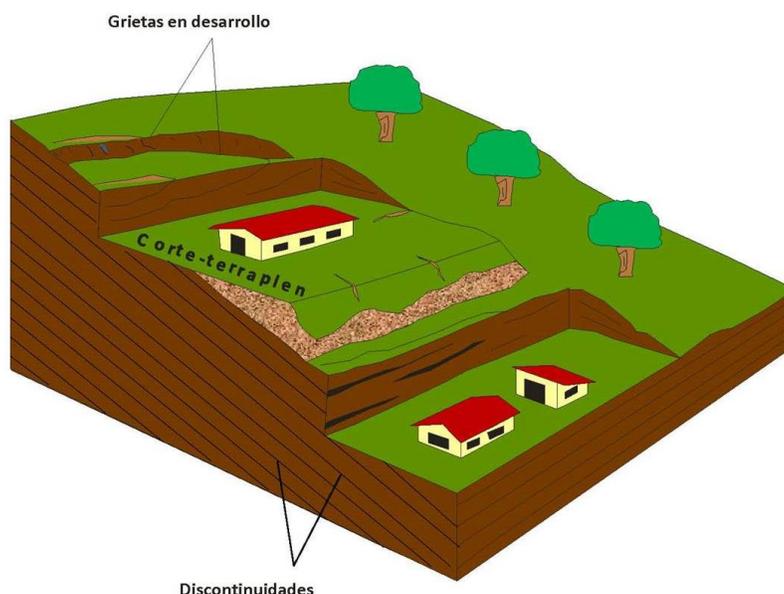


Figura 62. Inestabilidad de ladera, asociada a actividades antrópicas.

VII.2.2. Antecedentes

De acuerdo a la metodología empleada por CENAPRED (2006), en su Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales, los factores que propician los problemas de PRM se dividen en internos y externos; y tienen que ver directa o indirectamente con los esfuerzos cortantes actuantes y resistentes que se desarrollan en la potencial superficie de falla. La distinción de los rasgos geotécnicos, geológicos y geomorfológicos que indican la posibilidad de un deslizamiento, se agrupan en una ficha de campo, asignándoles valores numéricos cuya magnitud indique el grado de amenaza.

Navarro (2012), evalúa la susceptibilidad y la amenaza de movimientos de ladera dentro de un SIG, en el municipio de Berlín, El Salvador; que integra factores condicionantes de la inestabilidad de laderas y técnicas de evaluación multicriterio. Sus variables que utilizó para el cálculo de la susceptibilidad fueron: pendiente, orientación, curvatura, rugosidad, litología, geotécnia y uso del suelo.

El estado de Yucatán tiene una extensión de 39,537 Km², de los cuales solo 5,217 Km² que representa el 13.2 % de la superficie Estatal, se encuentra en condiciones de presentar problemas por PRM (Figura 63). Los municipios que están dentro de la zona de estudio son: Halachó, Maxcanú, Kopomá, Opichén, Muna, Santa Elena, Ticul, Oxkutzcab, Akil, Tekax, Tzucacab, Peto, Sacalum, Dzán y Maní.

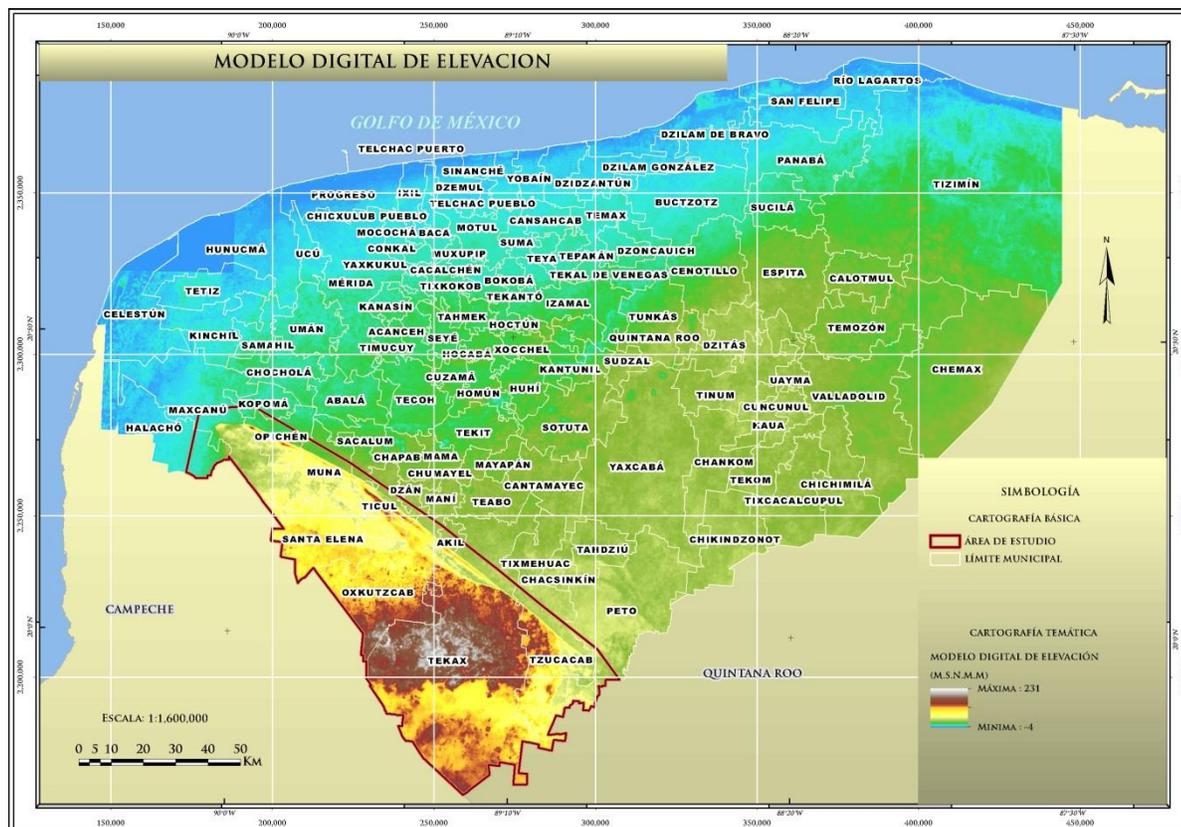


Figura 63. Modelo Digital de Elevación del estado de Yucatán, la línea en color rojo delimita el área propensa a Procesos de Remoción en Masa.

El Estado se encuentra dentro de la provincia fisiográfica Península de Yucatán. La topografía tiene poco contraste en altitud, resultando así singular dentro del contexto nacional, carece de una red fluvial, el escurrimiento es casi en su totalidad subterráneo, lo que ha dado origen a un gran sistema de formas cársticas desarrolladas en rocas sedimentarias paleogénicas al reciente; donde predominan las planicies.

En el occidente del Estado, en un relieve de planicies y lomeríos, se localiza la Sierrita de Ticul; ésta consiste en dos crestas paralelas, de aproximadamente 100-150 m de altitud, 200 como máximo, separadas por un valle, es una zona de mayor energía del relieve (Lugo, 1992).

Éste relieve se ha interpretado como el resultado de fallas, o desplazamientos de la corteza terrestre. Tiene una longitud aproximada de 100 Km y está orientada NW-SE, presenta las rocas más antiguas que corresponden a la época del Paleoceno-Eoceno indiferenciado, y se encuentran dolomitizadas, silicificadas o recristalizadas (García G. G. y Granjel C. E, 2010).

VII.2.3. Método de Trabajo

Las primeras fases de planeación y desarrollo de una metodología son primordiales. Para la evaluación de los peligros por procesos de Remoción en Masa se tomaron y adaptaron algunos de los criterios postulados por CENAPRED (2006) en la “Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos”

Tomando como base lo anterior, el método de trabajo para este tipo de peligro se dividió en tres fases (Figura 64):

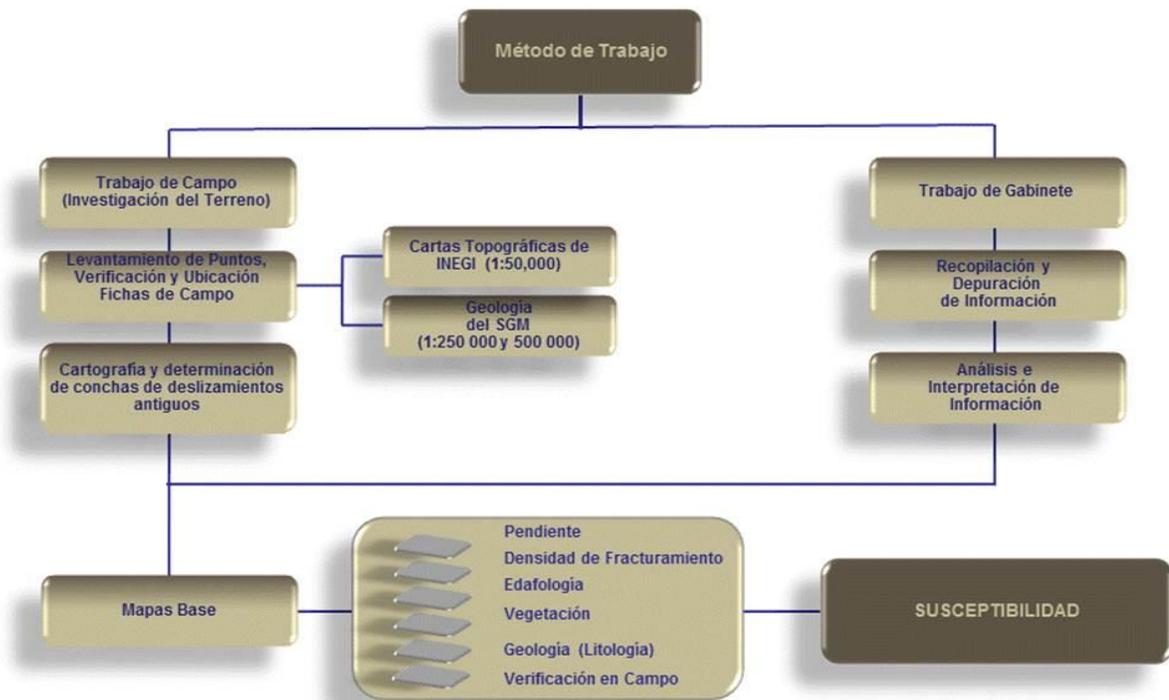


Figura 64. Diagrama de flujo, del método de trabajo empleado en la determinación de susceptibilidad peligro por remoción en masa.

La primera fase de trabajos de gabinete, consiste en la recopilación, revisión y depuración de la información existente en libros, revistas, periódicos, y artículos de investigación; elección de escala de trabajo y delimitación de la zona de estudio (debido a que el estado de Yucatán es, en su mayoría zonas planas) y preparación de mapas base.

De acuerdo con esto último se empleó la información cartográfica de INEGI, escala 1:50,000 (F15-D69 Chunchucmil, F15-D79 Calkiní, F16-C61 Opichén, F16-C71 Muna, F16-C72 Ticul, F16-C81 Bolonchen, F16-C82 Xul, F16-C83 Tekax, E16-A12 Benito Juárez, E16-A13 Becanchen, E16-A14 Dziuche, E16-A22 Iturbide, E16-A23 Othon P. Blanco). Además de mapas geológicos del Servicio

Geológico Mexicano (SGM) a escala 1:250,000 F15-9-12 Calkiní, F16-10 Mérida, E16-1 Felipe Carrillo Puerto. A partir de dicha información, se programó la prospección en campo con la finalidad de verificar la litología, discontinuidades en la roca tales como fallas y fracturas, entre otros rasgos.

Por otro lado se integró información geomorfológica, que indica el tipo de rasgos morfológicos en la superficie del terreno; relieve, para detectar cicatrices de antiguos deslizamientos; y edafología, para verificar el tipo y uso de suelo, así como analizar las zonas donde se concentra la población y sus actividades.

Una vez integrada la información de la cartografía básica se procede a la verificación de sitios asociados con la infraestructura donde pudieran existir problemáticas de PRM. Con base a esto, se realiza la segunda fase, donde se proponen inspecciones de campo que consisten en realizar el inventario de lugares afectados por PRM, previamente ubicados y en los cuales se recaba la información para el llenado de dos fichas técnicas, modificadas por el SGM,

La primera ficha (Figura 65) contiene características tales como: localización, tipo de roca, grado de intemperismo, resistencia, tamaño de bloques, espaciamiento, rugosidad, abertura, relleno, entre otras. Así como el levantamiento de datos estructurales de las discontinuidades encontradas en el macizo rocoso mediante el empleo de brújula tipo Brunton.

Los datos obtenidos son azimut de la dirección del echado y su ángulo de inclinación, donde si es posible recabar más de 100 datos por sitio se analizan mediante la proyección estereográfica en el diagrama de áreas iguales de Schmidt. De esta manera se definen él o los tipos de fallas o mecanismos de inestabilidad encontrados en el talud, en algunos casos los mecanismos potenciales de movimiento de los bloques fueron establecidos a partir de los datos de orientación de las discontinuidades con respecto al frente del talud.

La segunda ficha de campo modificada de CENAPRED 2006 (Figura 66), contiene datos más generales del sitio a evaluar, analizando los factores topográficos e históricos, inclinación de la ladera, altura del talud o ladera, antecedentes de deslizamientos, identificando los factores topográficos-geotécnicos (tipo de roca o suelo y aspectos estructurales), así como geomorfológicos y ambientales (régimen de agua, vegetación y uso del suelo), a cada parámetro se le asigna un valor que estará en función de su influencia en la generación de inestabilidad de laderas y así la sumatoria nos dará el grado de amenaza en el sitio; también este resultado se utilizó para determinar los tipos de susceptibilidad que hay en la zona de estudio, debido a las características topográficas del estado de Yucatán.

En la tercera fase con el análisis e interpretación de la información generada, tanto en campo como en gabinete, y con la ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se procede a la integración y análisis de la información, con la finalidad de generar mapas de peligros a los procesos de remoción en masa.

ATLAS DE PELIGROS POR FENOMENOS NATURALES DEL ESTADO DE YUCATÁN
CAÍDA DE BLOQUES

UBICACIÓN

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

PUNTO DE CONTROL YPRM05

FECHA 04/02/2012

ESTADO YUCATÁN MUNICIPIO MUNA

LOCALIDAD A 1 KM DE MUNA

CARTA TOPOGRÁFICA MUNA F16-C71

COORDENADAS UTM WGS84

LATITUD X 215087 LONGITUD Y 2266619

ELEVACIÓN Z 53



CARACTERÍSTICAS DEL SITIO

AFLORAMIENTO		DISCONTINUIDAD	
TIPO DE ROCA	CALIZA	TIPO DE DISCONTINUIDAD	FRACTURAS
GRADO DE INTEMPERISMO	DEBILMENTE INTEMPERIZADA	ESPACIAMIENTO	MODERADO A AMPLIO
RESISTENCIA	MODERADA	RUGOSIDAD	ONDULADA
TAMAÑO DE LOS BLOQUES	MEDIANOS A GRANDES	ABERTURA	ENTREABIERTA CON RELLENO
DATO ESTRUCTURAL DE LA LADERA Y/O TALUD	116°/71°	TIPO DE RELLENO	CALCITA PORCENTAJE 20%
FACTORES TOPOGRÁFICOS E HISTÓRICOS		FACTORES GEOTÉCNICOS	
INCLINACIÓN DE LA LADERA O TALUD	DE 35 A 45° 1.8	TIPOS DE SUELO O ROCA	ROCAS SEDIMENTARIAS 0.4
ALTURA	< A 50 M 0.6	ESPESOR DE SUELO DE LA CAPA RESIDUAL	< DE 5 M 0.5
ANTECEDENTES DE DESLIZAMIENTOS EN EL SITIO O LA REGIÓN	NO SE SABE 0.3	ASPECTOS ESTRUCTURALES EN LAS FORMACIONES ROCOSAS	
FACTORES GEOMORFOLÓGICOS Y AMBIENTALES		ECHADO DE LA DISCONTINUIDAD	
EVIDENCIAS GEOMORFOLÓGICAS DE "HUECOS" EN LADERAS CONTIGUAS	INEXISTENTES 0.0	ÁNGULO ENTRE EL ECHADO DE LAS DISCONTINUIDADES Y EL RUMBO DEL TALUD	> A 10° 0.3
VEGETACIÓN Y USO DE LA TIERRA	VEGETACION MODERADA 0.8	ÁNGULO ENTRE EL RUMBO DE LAS DISCONTINUIDADES Y EL RUMBO DE LA DIRECCIÓN DEL TALUD	> A 31° 0.2
REGIMÉN DEL AGUA EN LA LADERA	NIVEL FREÁTICO 0.0	GRADO DE AMENAZA BAJA 6.1	

OBSERVACIONES

CAMINO PAVIMENTADO QUE CONDUCE DE MUNA A UXMAL, ROCA CALIZA DE COLOR EN TONOS OCRE, QUE INTEMPERIZA EN TONOS AMARILLOS - ROJIZOS DE ESTRUCTURA MASIVA, CON POCO FRACTURAMIENTO, TALUD DE 9 M DE ALTURA.

REALIZO JUAN PABLO MORENO Y DANIEL BARAJAS.



Figura 65. Ficha de campo para evaluar macizos rocosos conforme a los lineamientos señalados por la ISRM 1979.

Subdirección de Recursos Minerales Gerencia de Hidrogeología y Geología Ambiental Atlas de Peligros Naturales del Estado de Yucatán Deslizamientos								
FICHA DE PELIGROS NATURALES: Clave: _____ Fecha: _____ Localidad: _____ Municipio: _____ Coordenadas UTM X: _____ Y: _____ Z: _____ Altura: _____ Carta 1:250,000 _____ Carta 1:50,000 _____ Otra: _____ Fotografías: _____								
FACTORES TOPOGRÁFICOS E HISTÓRICOS								
Factor	Intervalos o categorías	Atributo relativo	Observaciones	Calificación del sitio				
Inclinación de la ladera o talud	Mayor a 45°	2.0	Estimar el valor medio. Usar clinómetro	1	2	3	4	5
	35° a 45°	1.8						
	25° a 35°	1.4						
	15° a 25°	1.0						
	Menor a 15°	0.5						
Altura	Menor a 50 m	0.6	Desnivel entre la corona y el valle o fondo de la cañada. Usar nivelaciones, planos o cartas topográficas y GPS.					
	50 a 100 m	1.2						
	100 a 200 m	1.6						
Antecedentes de deslizamientos en el sitio o región	Mayor a 200 m	2.0	Reseñas verosímiles de lugares					
	No se sabe	0.3						
	Algunos sismos	0.4	Si, incluso con fechas					
		0.6						
FACTORES GEOTÉCNICOS								
Tipos de suelo o roca	Suelos granulares medianamente compactados a sueltos. Suelos que se reblanecen con la absorción de agua. Formaciones poco consolidadas (gl. Toba intertemporada)	1.5 a 2.5	Vulnerabilidad la erosión; blandía					
	Rocas metamórficas (pizarra, filita, mica, etc.) poco a muy impermeables	1.2 a 2.0						
	Suelos arcillosos consistentes o arenolimosos compactos	0.5 a 1.0	Multiplicar por 1.3 si está agrietado					
	Rocas sedimentarias (arenisca, conglomerado, etc) y toba competente.	0.3 a 0.6	Multiplicar por 1.2 a 1.5, según el grado de meteorización					
	Roca ígnea sana (granito, basalto, rolla, etc)	0.2 a 0.4	Multiplicar de 2 a 4 según el grado de meteorización					
Espeesor de la capa de suelo residual	Menos de 5m 5 a 10 m 10 a 15 m 15 a 20 m	0.5 1.0 1.4 1.8	Revisar cortes y cañadas o bien, recurrir a la exploración manual					

Echado de la discontinuidad	Menor a 10°	0.3	Considerar planos de contacto entre formaciones, grietas, juntas y planos de debilidad en general				
	Mayor a 35°	0.6					
Ángulo entre el echado de las discontinuidades y la inclinación del talud	Mayor a 10°	0.3	Ángulo diferencial positivo si el echado se encuentra a mayor inclinación del talud Fig-1				
	10° a 10°	0.5					
	10° a 10°	0.7					
	Menor a 10°	0.8					
Ángulo entre el rumbo de las discontinuidades y el rumbo de la dirección del talud	Mayor a 31°	0.2	Considerar las direcciones de las discontinuidades más representativas				
	10° a 30°	0.3					
	Menor a 10°	0.5					
FACTORES GEOMORFOLÓGICOS Y AMBIENTALES							
Evidencias geomorfológicas de "huecos" en laderas contiguas	Incipientes	0.0	Formas de conchas o de embudo (huipis)				
	Volumenes moderados	0.3					
Vegetación y uso de la tierra	Grandes volúmenes fallantes	1.0	Considerar no solo ladera, sino también la plataforma en la cima				
	Zona urbana	2.0					
	Cultivos anuales	1.5					
	Vegetación densa	0.0					
	Rocas con talcos de arcillosos en las laderas	2.0					
Regimen del agua en la ladera	Áreas de inestabilidad	2.0	Detectar posibles emanaciones de agua en el talud				
	Nivel freático superficial	1.0					
	Zanjas o depresiones donde se acumule agua en la ladera o plataforma	0.0					
		1.0					

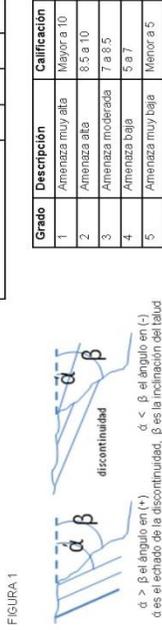


FIGURA 1

Grado	Descripción	Calificación
1	Amenaza muy alta	Mayor a 10
2	Amenaza alta	8.5 a 10
3	Amenaza moderada	7 a 8.5
4	Amenaza baja	5 a 7
5	Amenaza muy baja	Menor a 5

Observaciones (Afectación):

Responsable del levantamiento: _____

Figura 66. Ficha de campo, modificada de CENAPRED, 2006.

VII.2.4. Análisis de Información y Generación de Mapas Base

Factores que Determinan la Inestabilidad de Laderas

En términos generales se puede decir que los factores que propician los problemas por PRM o inestabilidad de laderas se dividen en internos y externos; y tienen que ver directa o indirectamente con los esfuerzos cortantes actuantes y resistentes que se desarrollan en la potencial superficie de falla. Los PRM pueden ser desencadenados tanto por cambios en el ambiente natural, como por actividades humanas. Las características intrínsecas y las debilidades inherentes en las rocas y suelos frecuentemente se combinan con uno o más eventos desestabilizadores, tales como lluvias intensas, actividad sísmica, actividad volcánica y, en menor proporción en México, por el deshielo (CENAPRED, 2006). Para el modelo se consideraron las siguientes variables, que corresponde a las de mayor incidencia, identificadas en la ocurrencia de los deslizamientos en la zona, que se describen a continuación:

Pendiente

Para la generación de movimientos en masa (Figura 67), generalmente las zonas con inclinaciones más pronunciadas tienen mayor probabilidad de que ocurran procesos de remoción; mientras que en zonas con pendientes suaves tienen una menor probabilidad de ocurrencia (Tabla 34).

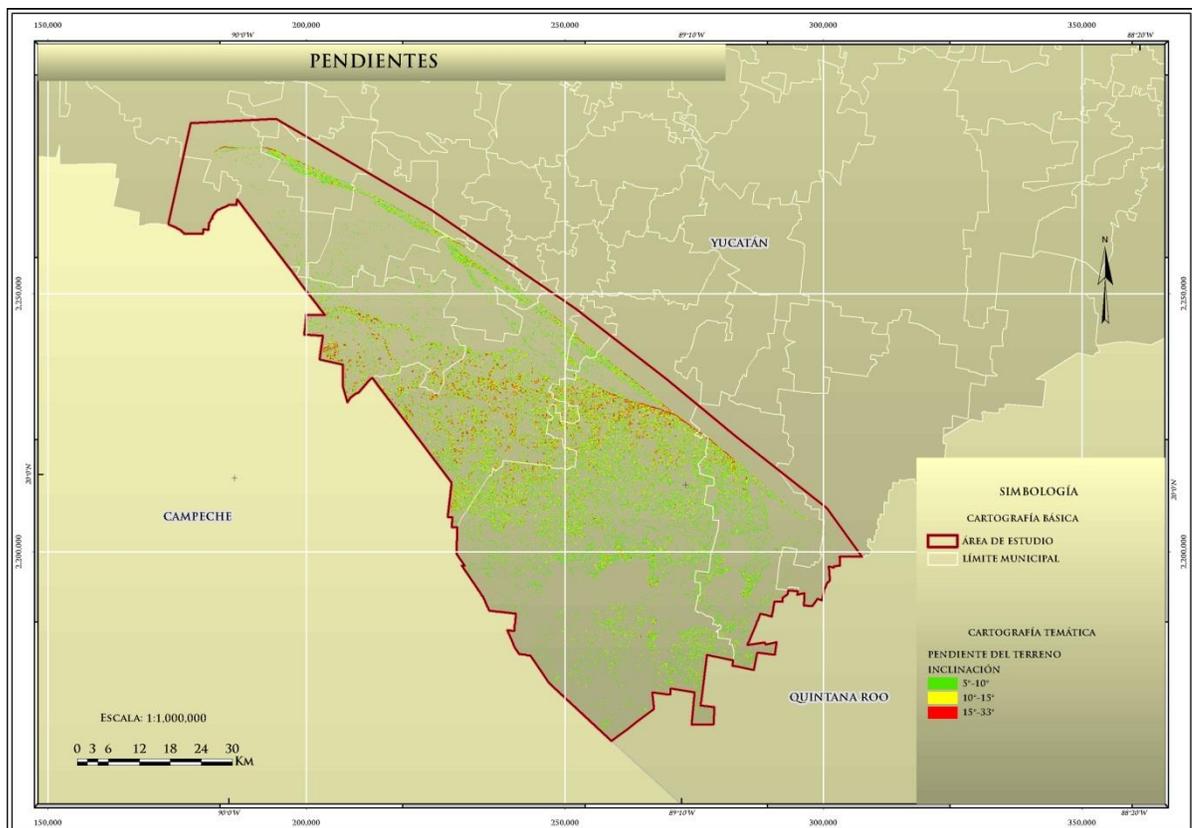


Figura 67. Mapa de pendientes en la parte sur-suroeste del Estado, donde se encuentra la sierra de Ticul, las partes sombreadas de verde van de 5 a 10° de inclinación, mientras que las de amarillo y rojo van de 10 a 15° y mayores a 15° respectivamente, siendo las máximas de 33°. Predominando en Yucatán las pendientes suaves y zonas planas.

Tabla 34. Clasificación por grado de pendiente y su valor en la generación a PRM.

PENDIENTES	VALOR
0 - 5°	0.0992
5 - 10°	0.132
10 - 15°	0.199
15 - 33.5°	0.397

Nota: Los valores que se le dieron a las pendientes, fueron tomadas de la matriz de normalización tabla 42.

Geología

La importancia de contar con una carta Geológica radica en conocer y definir qué tipo de litología y discontinuidades se encuentran en la zona de estudio, y por ende clasificar los materiales más susceptible a sufrir inestabilidad, en conjunto con la combinación de los demás parámetros involucrados, ya que el comportamiento geológico determina la potencialidad de movimientos en los diferentes tipos de materiales rocosos y suelos (Figura 68).

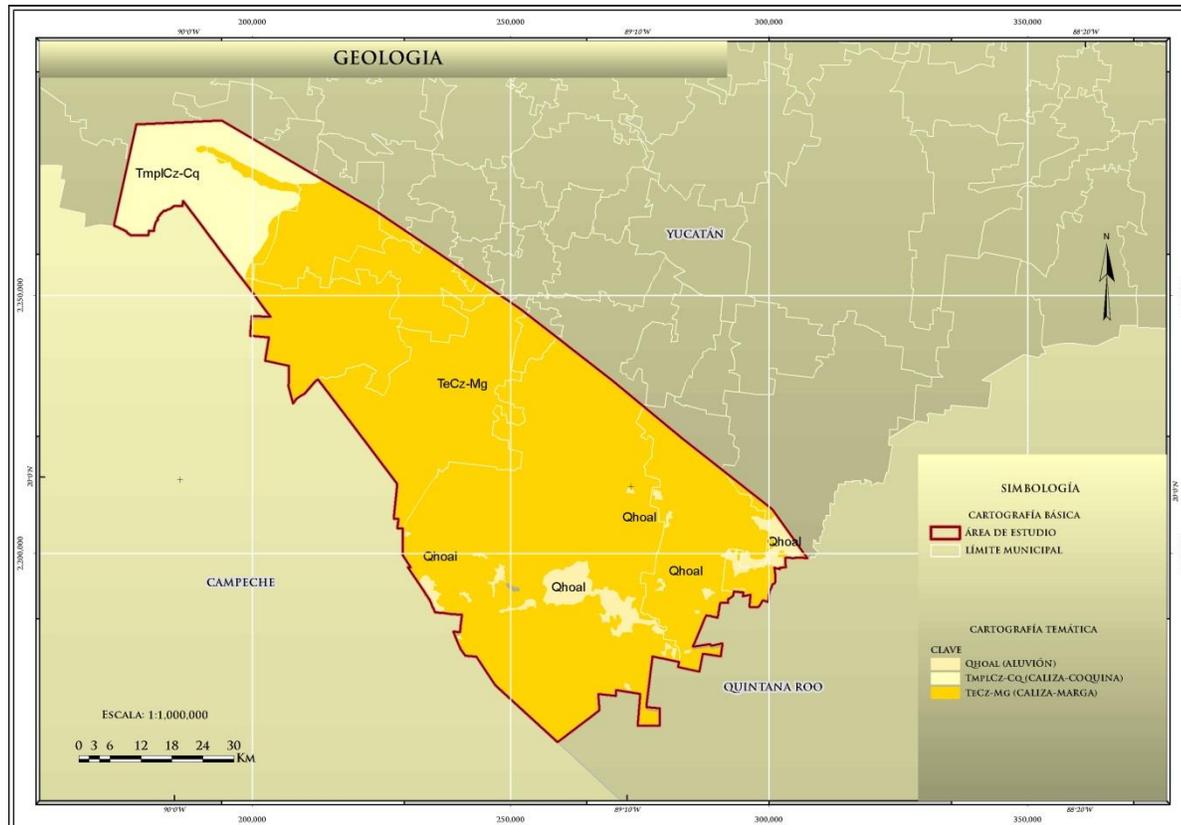


Figura 68. Geología de la parte Sur-Suroeste del Estado.

En el caso de las rocas sedimentarias que predominan en el estado de Yucatán, debido a la estratificación que se encuentra en capas horizontales, y el fracturamiento presenta uno o más sistemas de familias en un macizo rocoso que genera bloques susceptibles a inestabilidad. Así mismo el arreglo geométrico entre las discontinuidades presentes en el talud o ladera determina el tipo de inestabilidad que se puede presentar en un lugar determinado, por lo que es de suma importancia la relación del sistema discontinuidad-talud (Tabla 35).

Tabla 35. Clasificación por tipo de litología y su valor en la generación de PRM.

LITOLOGIA	VALOR
Caliza-Marga	0.047
Caliza-Coquina	0.047
Aluvion	0.024
Lacustre	0.024

Nota: Los valores que se le dieron a la litología, fueron tomadas de la matriz de normalización tabla 42.

Fracturamiento

El análisis de fallas y fracturas de los macizos rocosos presentes en la zona de estudio, es importante para definir las áreas con posibilidad de ser afectadas por la presencia de éstas. Dichas estructuras son un factor condicionante para la inestabilidad de laderas, este nivel se tomara en cuenta como un mecanismo acelerador ya que a mayor fracturamiento existe mayor posibilidad que ocurran procesos de remoción en masa (Figura 69).

El ángulo diferencial es la relación angular existente entre la pendiente natural del terreno o en su caso la inclinación del talud, con respecto a la inclinación de las discontinuidades del macizo rocoso, dependiendo de este valor así como del ángulo entre el rumbo de las estructuras y el rumbo de la dirección del talud, se conocerá el arreglo geométrico de la ladera (Tabla 36).

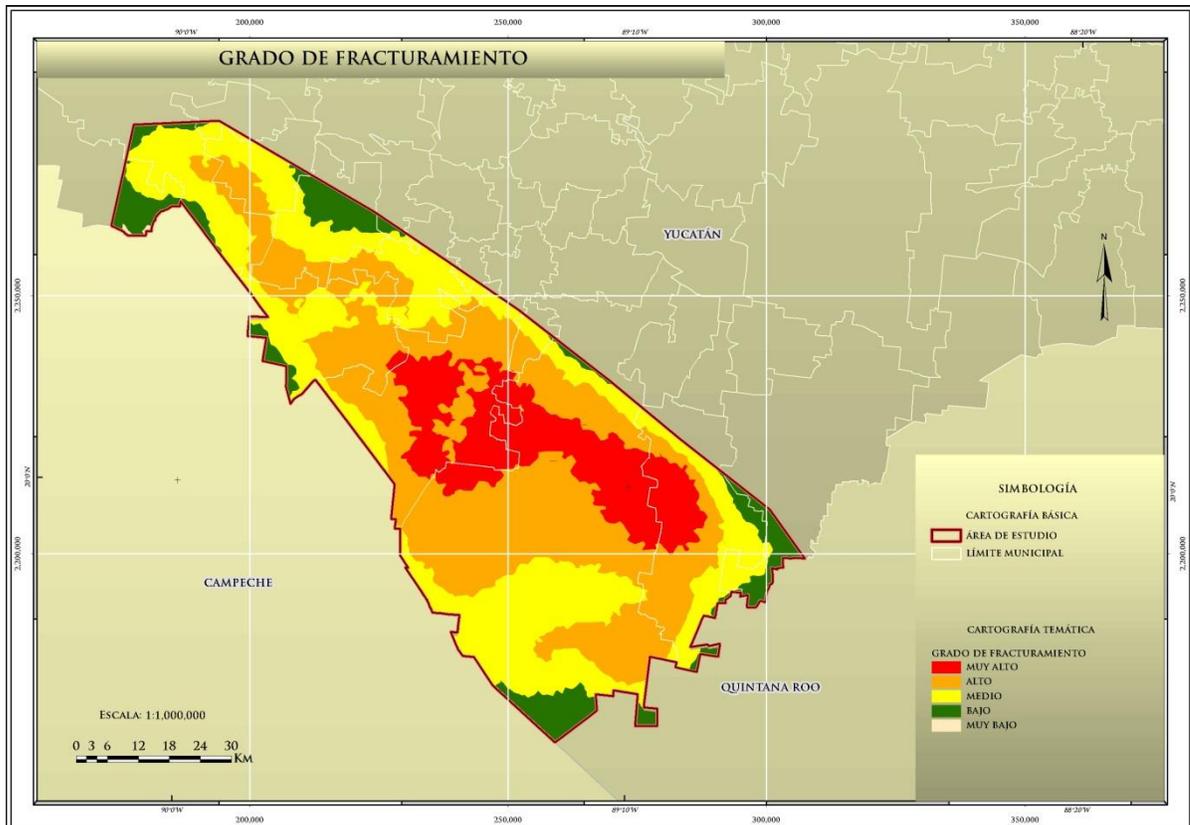


Figura 69. Grado de fracturamiento del área de estudio.

Tabla 36. Clasificación por grado de fracturamiento y su valor en la generación de PRM.

GRADO DE FRACTURAMIENTO	VALOR
Muy Alto	0.288
Alto	0.144
Medio	0.096
Bajo	0.072
Muy Bajo	0.058

Nota: Los valores que se le asignaron al grado de fracturamiento, fueron tomadas de la matriz de normalización tabla 42.

Características Estructurales del Sistema Ladera-Discontinuidad

Cuando se estudian los casos de PRM resulta importante conocer el comportamiento de una ladera, esto con base en las relaciones geométricas que guardan entre sí, la ladera o talud y la discontinuidad principal, la cuál puede ser la estratificación, fallas o fracturas, ya que esta relación define el tipo de mecanismo de inestabilidad que se presentara en el caso que exista algún tipo de peligro.

Conocer estas características es de utilidad al momento de prever la posibilidad de falla de una ladera o bien, al momento de definir el tipo de medida de remediación o mitigación. Cabe mencionar que de entre los datos más importantes destaca la diferencia angular existente entre el echado de la discontinuidad principal, en este caso la estratificación, y la inclinación del talud o pendiente de la ladera se le conoce como ángulo diferencial (Figura 70).



Figura 70. Relación entre el echado de las discontinuidades y la inclinación de la ladera.

En la Figura anterior se muestra un valor resultante de ángulo diferencial positivo y otro negativo, cabe mencionar que cada uno de ellos atiende a ciertas condiciones geológico-estructurales. Esto significa que si el echado de la discontinuidad es mayor que el echado de la ladera, entonces se habla de un ángulo diferencial positivo que es aplicable para el mecanismo de inestabilidad por falla por volteo; por el contrario, si la pendiente sobrepasa el echado de la discontinuidad, el ángulo diferencial resultante será negativo, entonces se tendrán condiciones favorables a una falla plana.

Vegetación y Uso del Suelo.

Otro de los factores involucrado en este proceso de estimación del peligro por inestabilidad de laderas es la vegetación, una zona con vegetación densa contribuye a una mejor estabilidad de la ladera, debido a que sus raíces actúan como anclas al macizo rocoso, además evita la erosión de los materiales que forman la misma ladera, por lo que una zona deforestada aunada a la combinación de los demás factores involucrados es más propensa a sufrir inestabilidad (Tabla 37 y Figura 71).

Tabla 37. Clasificación por comunidades vegetales y uso de suelo y su valor en la generación de PRM.

VEGETACIÓN Y USO DE SUELO	VALOR
Zona urbana	0.093
Selva Mediana Subcaducifolia	0.093
Selva Baja Espinoza Subperennifolia	0.093
Pastizal Inducido	0.046
Selva Baja Caducifolia	0.046
Selva Mediana Caducifolia	0.031

Nota: Los valores que se le asignaron, fueron tomadas de la matriz de normalización tabla 42.

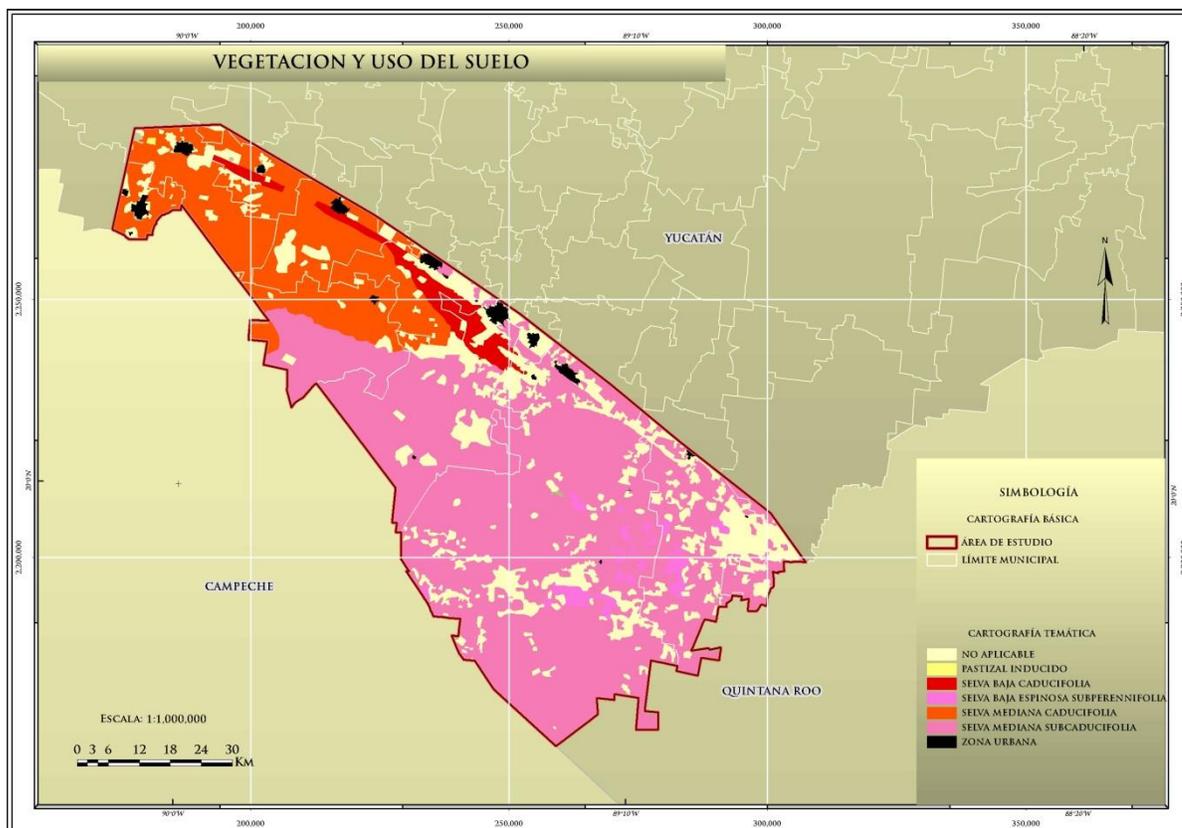


Figura 71. Vegetación en la zona sur y suroeste del Estado.

Edafología

Tomando como referencia la Guía para la Interpretación de Cartografía Edafología de INEGI del 2008, se elaboró una clasificación de tipos de suelo de acuerdo a sus propiedades físicas que presentan a la erosión (Figura 72).

Con apoyo de la base de datos edafológicos de la zona de estudio, en función del tipo de suelo predominante fueron asignados rangos en función de su grado de erodabilidad, así como de las características propias de cada suelo, resultando un valor de 0.058 para erodabilidad baja, 0.116 moderada y 0.175 alta (Tabla 38); los valores que se asignaron fueron tomados de la matriz de normalización (Tabla 42).

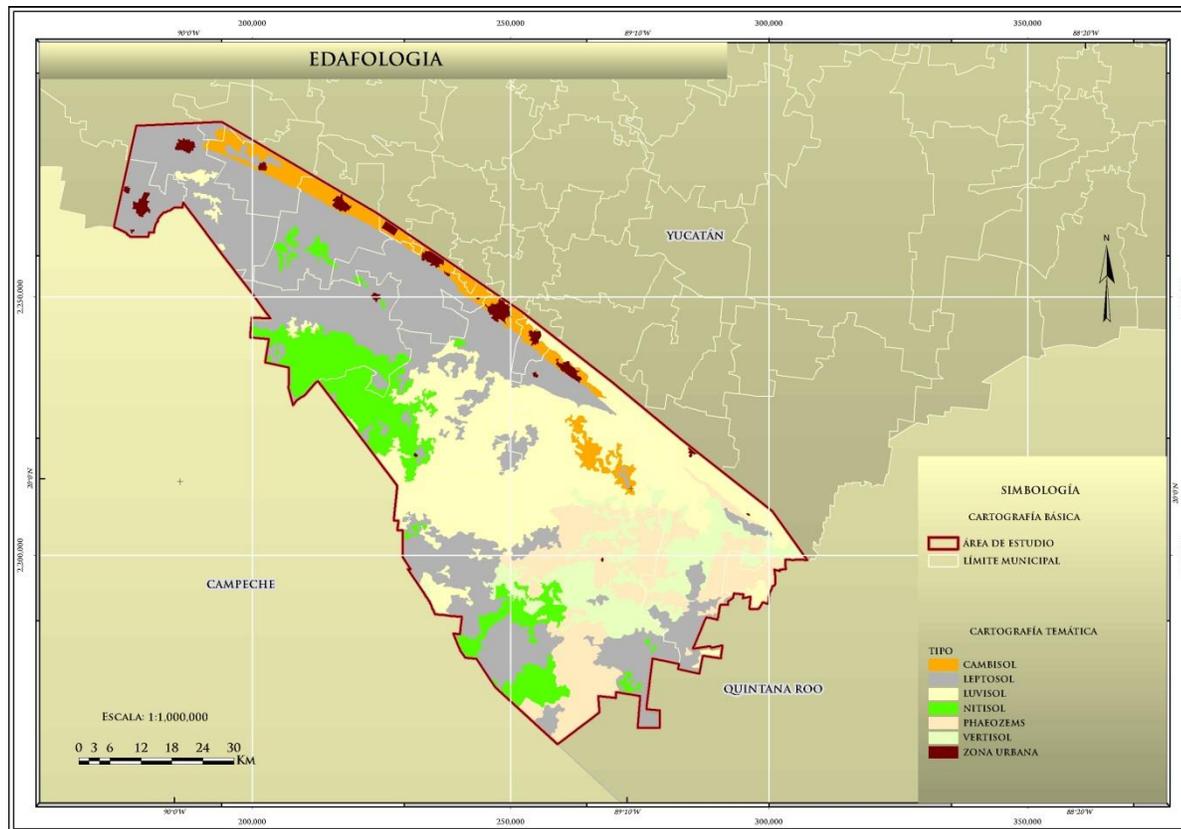


Figura 72. Mapa de tipo de suelos de la zona de estudio.

Tabla 38. Clasificación edafológica con respecto al grado de erodabilidad.

TIPO DE SUELO	VALOR
Cambisol	0.175
Leptosol	0.058
Luvisol	0.116
Nitisol	0.058
Phaeozems	0.058
Vertisol	0.116

Nota: Los valores que se le asignaron al tipo de suelo, fueron tomadas de la matriz de normalización tabla 42.

VII.2.5. Descripción e Interpretación de Datos Tomados en Campo

Para la realización de la etapa de campo, con lo que respecta al tema de remoción en masa, se tomaron en consideración alrededor de 28 sitios, que se analizaron en las imágenes topográficas impresas y digitales en el programa Arc Gis10; los cuales fueron definidos primeramente, sobre la Sierra de Ticul debido a su expresión orográfica, a las curvas de nivel en donde las líneas se acercan más indican una zona elevada y con mayor pendiente, para poder evaluar las laderas y taludes que se encuentren cerca de comunidades (viviendas) y a vías de comunicación para acceder a ellas. Cabe resaltar que durante la prospección el número de puntos de campo varía con los prospectados, ya que hay algunos sitios donde no se pudo acceder al lugar planeado.

En los trabajos de campo se pudieron registrar 23 puntos de control marcados con la clave YPRM00, que presentan principalmente caída de bloques cercanos a la infraestructura, que actualmente se encuentran inactivos, por lo que no representan una amenaza alta a las comunidades ni a las vías de comunicación.

Las zonas que presentan bloques potencialmente activos se ubican sobre taludes por donde cruzan vías de comunicación (Tabla 40). Dichos taludes se asocian con calizas que generalmente se encuentran intemperizadas y altamente fracturadas (Fotografías 58 y 59), normalmente relacionadas con zonas de pendientes de más de 20° de inclinación.



Fotografía 58. Carretera Uxmal (YPRM01), cerca de la localidad de Calcehtok, se encuentra un talud de 5 m de altura, roca caliza con sistemas de fracturamiento, dentro de las fracturas se encuentra rellena de suelo de color rojizo, en esta zona se observó una brecha de falla.



Fotografía 59. Talud sobre camino pavimentado con flujo constante de vehículos (punto YPRM04), el macizo rocoso se encuentra altamente fracturado, lo que provoca pequeños bloques que caen sobre el camino.

Los datos que se tomaron en campo fueron principalmente sobre vías de comunicación ya que en estos lugares fue donde se observaron algunos taludes. Entre los datos más importantes de obtener está el buzamiento es el sentido u orientación de la inclinación de los estratos o capas de rocas, o bien, algunos expertos, lo consideran como el ángulo que forma el plano a medir con respecto a un plano horizontal, y debe ir acompañado por el sentido en el que el plano buza o baja (Fotografía 60).

En algunos sitios, se presentan suelos de textura limo-arcillosa de color blanco, meteorizado, alterado y deleznable de espesor discontinuo, así como roca caliza alterada y fracturada en las partes superiores de los taludes de los puntos YPRM09 (Fotografía 61), YPRM11, YPRM12, YPRM13, YPRM16 y YPRM18.



Fotografía 60. Talud del punto YPRM22, la brújula indica el buzamiento de la estratificación. Obsérvese que los estratos buzan 12 grados con respecto a la horizontal.



Fotografía 61. Alternancia de materiales rocosos con diferente composición y estructura en un talud en el trayecto del camino de Santa Elena a Emiliano Zapara (YPRM09), que se manifiesta en distinto grados de alteración, resistencia y comportamiento mecánico.

Otros de los taludes observados se localizan en los tramos carreteros estatales que comunican con localidades como son: San Juan Tekax, Sudzal Chico, San Pedro Rompoy, Chun Wuitz, Kantemo, que se encuentran en el extremo sur del Estado, por mencionar algunos, los puntos de control tomados en campo corresponden a vías de comunicación que se describen en la Tabla 39 y se observa su ubicación espacial en la Figura 73.

Tabla 39. Localización de los puntos verificados en campo y las afectaciones por PRM.

PUNTO DE CONTROL	MUNICIPIO	TRAMO CARRETERO	TIPO DE CAMINO	TIPO DE ROCA	AMENAZA
YPRM01	Opichén	Calcehtok – Opichén	Pavimentado	Caliza	Baja
YPRM02	Maxcanú	Maxcanú – Halachó	Pavimentado	Caliza	Muy Baja
YPRM03	Opichén	Opichén – Salvador Alvarado	Pavimentado	Caliza	Baja
YPRM04	Santa Elena	Uxmal – Santa Elena	Pavimentado	Caliza - silicificada	Baja
YPRM05	Muna	Muna - Uxmal	Pavimentado	Caliza	Baja
YPRM06	Muna	Muna - Uxmal	Pavimentado	Caliza	Baja
YPRM07	Ticul	Ticul – Santa Elena	Pavimentado	Brecha Calcarea	Baja
YPRM08	Ticul	Yotholin – carretera estatal #31	Pavimentado	Brecha Calcarea	Baja
YPRM09	Santa Elena	Santa Elena – Emiliano Zapata	Pavimentado	Brecha Calcarea	Baja
YPRM10	Oxkutzcab	Emiliano Zapata - Xul	Pavimentado	Caliza	Baja
YPRM11	Oxkutzcab	Xkobenhaltun - Yaxhachen	Pavimentado	Brecha Calcarea	Baja
YPRM12	Tekax	Benito Juárez – San Pedro Dzula	Terracería	Brecha Calcarea	Baja
YPRM13	Tekax	Kantemo - Kancab	Pavimentado	Caliza	Baja
YPRM14	Tekax	Kancab - Kantemo	Pavimentado	Brecha Calcarea	Baja
YPRM15	Akil	Akil - Buenavista	Pavimentado	Caliza	Baja
YPRM16	Tzucacab	Noh-Bec hacia Sacbecan	Pavimentado	Caliza	Baja
YPRM17	Tzucacab	Tigre Grande - Catmis	Pavimentado	Caliza	Baja
YPRM18	Tekax	Sudzal Chico – San Pedro Rompoy	Pavimentado	Caliza	Baja
YPRM19	Tekax	Colokche Akal – Santa Ana	Pavimentado	Caliza	Baja
YPRM20	Tekax	Caxaytuk – Alfonso Caso	Pavimentado	Caliza	Baja
YPRM21	Tekax	Ticum – Xkan lol	Pavimentado	Caliza	Baja
YPRM22	Tekax	Tekax	Pavimentado	Caliza	Baja
YPRM23	Tekax	San Juan Tekax – Chun Wuitz	Pavimentado	Caliza	Baja

Nota: Los datos obtenidos del grado de amenaza fueron tomados en campo por medio de la ficha de deslizamientos (modificada de Cenapred 2006), la cual indica todos los parámetros que se evaluaron por punto de verificación, la cual se encuentra en los anexos.

En el municipio de Tekax, se verificaron 9 puntos de control (Tabla 40). En estos sitios, la mayor parte del terreno es ondulado presentando además las mayores elevaciones del Estado (hasta 300 msnm). En el camino que conduce de Ticum a Xkan lol, la roca caliza (roca dura) se encuentra altamente fracturada, con un espaciado entre discontinuidades que varía de 60 a 200 mm. Dichas discontinuidades corresponden con fracturas que generalmente están rellenas con limos y arcillas, normalmente asociadas con crecimiento de vegetación, que tienen una abertura de hasta 10 mm, en un talud de hasta 4 m de altura (Fotografía 62).



Fotografía 62. Talud de 4 m de altura (punto YPRM21), donde afloran rocas con estratificación sub horizontal.

Dentro de la zona urbana de Tekax, en la parte sureste, en el camino que comunica con la zona arqueológica del lugar, se tienen pequeños deslizamientos de suelo y roca que afectan el camino pavimentado, la roca se encuentra intensamente fracturada, formando bloques de pequeños a grandes, con un espaciamiento moderado (200 a 600 mm), las fracturas tienen una abertura amplia de 10 mm y se encuentran rellenas de arcilla (Fotografía 63).



Fotografía 63. Caída de suelo y rocas (punto YPRM22), afectando a la vía de comunicación, debido las precipitaciones pluviales recientes.

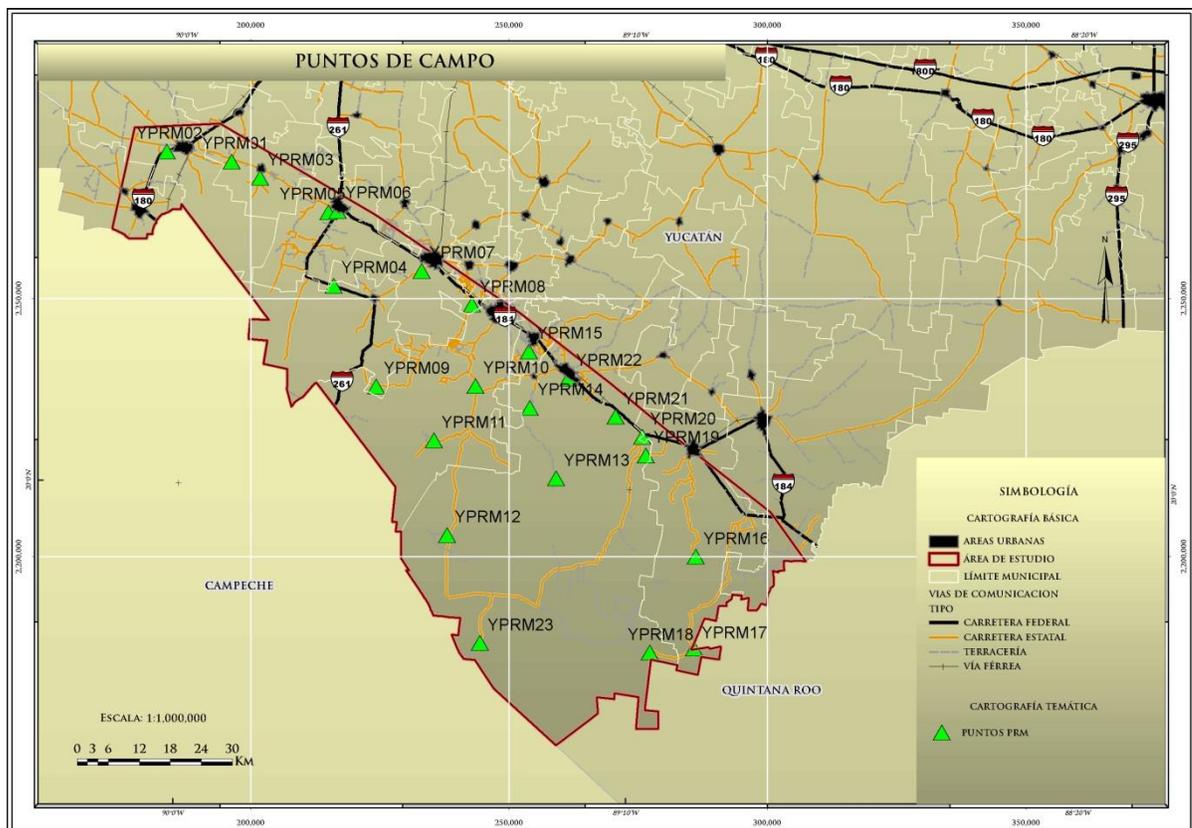


Figura 73. Mapa donde se representan los puntos levantados en campo.

Durante la prospección de campo se evaluaron parámetros de los macizos rocosos de manera cualitativa, lo que incluye: grado de alteración y fracturamiento (Tabla 40), conforme a los lineamientos que establece la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas ISRM, 1981 (Flores 2001 y Chávez 2006).

Tabla 40. Características geotécnicas de las unidades litológicas.

PARAMETROS	OBSERVACIONES
Litología	Caliza
Color al fresco	Beige
Color al intemperie	En tonos amarillentos y rojizos
Estructura	Estratificada y masiva
Presencia de agua	Nula
Intemperismo	Débilmente a Moderadamente
Resistencia	Roca dura a Medianamente dura
Tipos de discontinuidades	Estratificación y Fracturamiento
Sistemas de Juntas	Dos sistemas de juntas más aleatorias
Fracturamiento	Medio
Abertura de las Discontinuidades	Parcialmente abierta a Abierta
Espaciamiento de las Discontinuidades	Cerrado a Moderado
Tamaño de los Bloques	Medianos a Pequeños
Pendiente	Ligeramente Ondulado a Terreno Inclinado (4 a 30°)

Cabe mencionar, que para la interpretación de los datos de campo se utilizó la proyección estereográfica, que es una herramienta fundamental en el campo de la ingeniería geológica, debido a que su principal interés estriba en el hecho de que con ella podemos representar orientaciones e inclinación preferentes de elementos que en la naturaleza no se presentan con desarrollos geométricos perfectos, como el caso de los estratos. Entre sus aplicaciones más importantes se encuentra el reconocimiento de juegos de diaclasas en su afloramiento rocoso, la determinación de la dirección y el buzamiento de un estrato, la determinación del tipo de rotura en un movimiento de ladera, etc (Tomás *et. al*, 2002). Como parte de la obtención de datos en campo se tomaron los rumbos de los buzamientos e inclinación de las discontinuidades solo de la estación de medición YPRM03; donde además se obtuvo el dato del talud predominante. Con base a la obtención de hasta 100 datos en promedio de cada punto verificado, se realizó el posterior análisis y se utilizó un cono de fricción de 35°, de acuerdo con Wyllie, 2004. En el caso del punto antes mencionado se obtuvieron 4 sistemas de familias de discontinuidades, las cuales corresponden con fracturamiento; por lo tanto se determinó que la familia A tiene un rumbo preferencial de 41°/83°, B: 171°/85°, C: 16°/25° y D: 265°/71°. El dato del talud es T: 25°/79°. De acuerdo con el análisis la relación de los sistemas A y D, nos generan falla por cuña, que en general producen bloques pequeños a medianos (Figura 74).

En la estereofalsilla (proyección estereográfica) la orientación del talud y las discontinuidades se estima la posibilidad de ocurrencia de una rotura en cuña, ya que existen dos familias de discontinuidades con direcciones oblicuas respecto a la dirección del talud (Tomás, *op. cit.*).

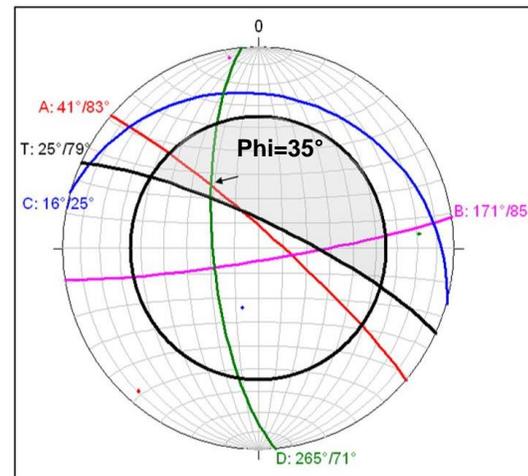


Figura 74. Estereofalsilla que define el sistema de falla en cuña (flecha negra).

VII.2.6. Susceptibilidad a los Procesos de Remoción en Masa.

La estimación del peligro por Procesos de Remoción en Masa, todavía es una tarea ardua y que enfrenta una serie de problemas, como el alto grado de complejidad e incertidumbre que implica dicha estimación (Chivatá, 2008). Las dificultades que se tienen en la modelación de los fenómenos de los PRM, para este caso, es de disponer de información actualizada relacionada con estos procesos, la estimación de la magnitud de las masas deslizadas, la determinación de las probabilidades espaciales y temporales de ocurrencia y la modelación de las trayectorias de los movimientos; por lo tanto sólo se llegó a nivel de susceptibilidad, que corresponde a la favorabilidad del ambiente físico de los elementos inherentes como la geología, geomorfología, el uso del suelo, pendiente, y otros factores para potenciar deslizamientos.

Se realizó mediante el análisis multicriterio utilizando el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) (Saaty, 1990; Saaty, 2008). Este proceso incluye cinco variables donde se ponderó su peso (Tabla 41), tomando en consideración su relativo impacto en términos de susceptibilidad a los PRM. En este sentido se utilizaron los valores de la Tabla 41, donde 1 representa el valor más alto y el 6 el más bajo en peso. La comparación se realiza considerando que el valor de 1 representa la variable de mayor importancia respecto de las demás que a su vez representan una fracción. Con estos datos se obtuvo la Matriz de Comparaciones Pareadas de Variables (MCP).

Tabla 41. Matriz de comparaciones pareadas de variables (MCP) en susceptibilidad a PRM.

CRITERIO	PENDIENTES	FRACTURAMIENTO	EDAFOLOGÍA	VEGETACIÓN	LITOLOGÍA
Pendientes	1	2	2	5	6
Fracturamiento	0.50	1	2	4	6
Edafología	0.50	0.50	1	2	4
Vegetación	0.20	0.25	0.50	1	3
Litología	0.17	0.17	0.25	0.33	1
SUMA	2.37	3.92	5.75	12.33	20.00

Posteriormente se realizó la normalización para cada variable. Dicha normalización se presenta a continuación (Tabla 42). La normalización se obtiene del resultado del producto entre la MCP y la adición de los valores de las variables.

Tabla 42. Matriz de normalización.

PENDIENTES	FRACTURAMIENTO	EDAFOLOGÍA	VEGETACIÓN	LITOLOGÍA	PROMEDIO
0.423	0.511	0.348	0.405	0.300	0.397
0.211	0.255	0.348	0.324	0.300	0.288
0.211	0.128	0.174	0.162	0.200	0.175
0.085	0.064	0.087	0.081	0.150	0.093
0.070	0.043	0.043	0.027	0.050	0.047
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.000

Posteriormente, se realiza el Vector de la Suma Ponderada (VSP) (Tabla 43), obtenida a partir del resultado del producto de los valores de la MCP y del promedio de la Matriz de Normalización (MN). De estos valores se obtiene la adición de los factores. Finalmente el valor de consistencia, se obtiene a partir del cociente entre la suma ponderada y el promedio de la MN. Lambda se obtiene a partir del cociente entre la adición de los valores de consistencia y el número de variables consideradas.

Tabla 43. Vector de la suma ponderada y valor de consistencia.

CRITERIOS						SUMA PONDERADA	VALOR DE CONSISTENCIA
Pendientes	0.397	0.575	0.350	0.466	0.280	2.069	5.209
Fracturamiento	0.199	0.288	0.350	0.373	0.280	1.490	5.177
Edafología	0.199	0.144	0.175	0.187	0.187	0.891	5.091
Vegetación	0.079	0.072	0.088	0.093	0.140	0.472	5.063
Litología	0.066	0.048	0.044	0.031	0.047	0.236	5.048
							$\lambda=5.117$

Se obtiene el índice de consistencia (IC). Donde n representa el número de variables y el índice de aleatoriedad (IA) o de consistencia aleatoria (Tabla 44). Este último se toma de los índices considerados en la literatura los cuales son constantes y se relacionan con el número de variables consideradas dentro del análisis.

$$IC = \frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{0.117}{5} = 0.029$$

Tabla 44. Índice de inconsistencia aleatoria o índice de aleatoriedad.

INDICE ALEATORIO (IA)									
Numero de Elementos que se comparan	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatorio de consistencia	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Por último se calcula la Razón de Consistencia (RC) (o CR, de Consistency Ratio). Esta razón o cociente está diseñado de manera que los valores que exceden de 0.10 son señal de juicios inconsistentes; es probable que en estos casos el tomador de decisiones desee reconsiderar y modificar los valores originales de la matriz de comparaciones pareadas. Se considera que los valores de la razón de consistencia de 0.10 o menos son señal de un nivel razonable de consistencia en las comparaciones pareadas (http://sisbib.unmsm.edu.pe/bivirtualdata/tesis/basic/toskano_hq/cap3.pdf).

$$RC = \frac{IC}{IA} = \frac{0.029}{1.12} = 0.026$$

Siendo el valor de Razón de consistencia menor a 0.10, se dice que es una Consistencia Razonable.

En la obtención del mapa de salida, se procedió a la asignación de valores de peso (0.397 hasta 0.047) a cada una de las unidades contenidas en los diferentes mapas temáticos utilizados, transformando mediante un proceso de reclasificación los mapas de clases en mapas de valores (Tabla 42). Posteriormente estos mapas fueron integrados mediante un proceso de adición dando como resultado final el mapa de susceptibilidad a PRM clasificado en 3 categorías: Nulo, Muy Bajo y Bajo.

El mapa de susceptibilidad corresponde a los resultados de salida del modelo, resaltando que el 13.2% de la superficie del Estado que se encuentra en probabilidad de tener PRM. Las zonas en color verde se clasificaron como “muy bajo” y en amarillo “bajo”, que representan el 8.2 y 5 % respectivamente, de la zona de estudio (Figura 75 y 76).

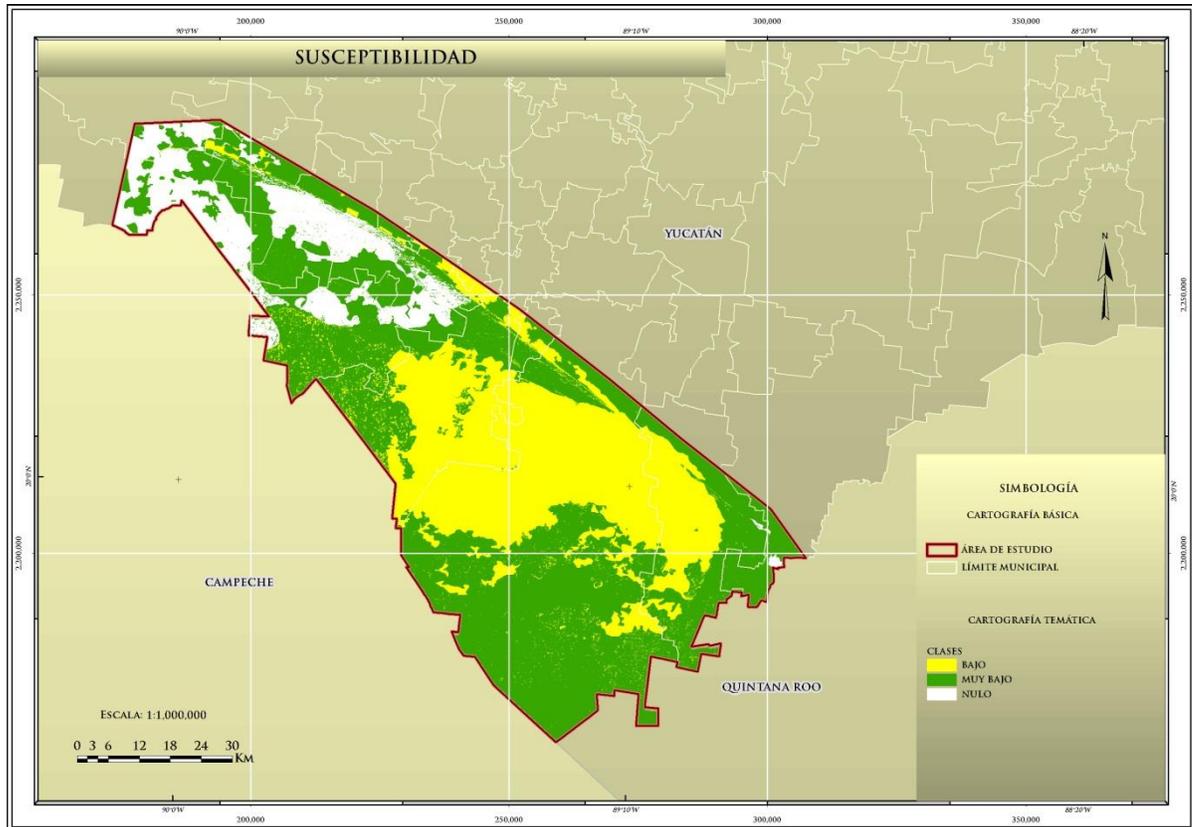


Figura 75. Mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, las zonas verdes están catalogadas como de grado "muy bajo", en amarillo de grado "bajo" y en blanco "nulo".

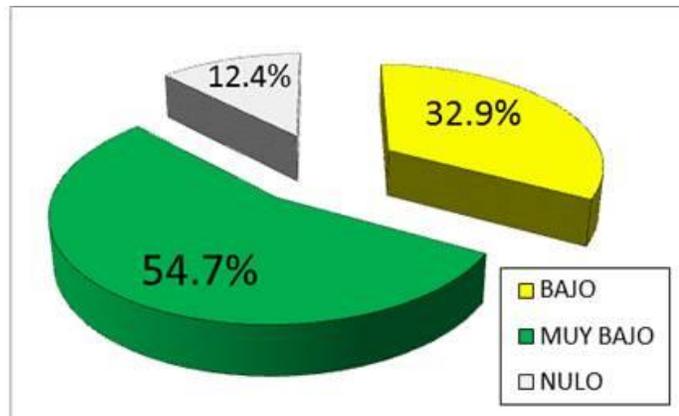


Figura 76. Gráfica representando en porcentaje, el grado de susceptibilidad que ocupa en el área de estudio.

Los terrenos que se encuentran en susceptibilidad Muy Baja, no muestran ninguna propensión natural a generar movimientos en masa en las condiciones en que se encuentran actualmente, no se identifica en ellos ninguna superficie de ruptura de orden métrico o superior y las áreas de susceptibilidad Baja, si se identifica alguna superficie de ruptura de orden métrico o superior.

Las áreas de Grado Bajo, se encuentran localizadas básicamente en las partes de pendientes de más de 12° de inclinación y de un fracturamiento medio a alto, que ocupa un área de aproximadamente 1,962 Km². Las zonas de grado Muy Bajo, se encuentra en las zonas topográficamente bajas, en pendientes menores de 11° de inclinación y de un fracturamiento de bajo a muy bajo, siendo la de mayor extensión en el área de estudio, con 3,261 Km². Los municipios que tienen más áreas susceptibles destacan Tekax, Tzucacab, Oxkutzcab, Maxcanú y Santa Elena (Tabla 45).

Tabla 45. Municipios con áreas susceptibles a PRM en kilómetros cuadrados.

MUNICIPIO	SUSCEPTIBILIDAD		AREA TOTAL
	MUY BAJO	BAJO	
Akil	36	16	52
Dzan	-	9	9
Halachó	35	-	35
Kopomá	9	-	9
Maxcanú	125	1	126
Muna	160	4	164
Opichén	132	14	146
Oxkutzcab	327	514	841
Peto	120	-	120
Sacalum	17	2	19
Santa Elena	371	31	402
Tekax	1430	1045	2475
Ticul	153	29	182
Tzucacab	348	297	645

El mapa de amenaza por PRM, es definido como el fenómeno natural que puede generar daños, en un espacio determinado, de acuerdo a su naturaleza, sin definir su probabilidad de ocurrencia y capacidad destructiva en ese mismo espacio. Dicho mapa resultó de la combinación del mapa de susceptibilidad y los atributos que pueden ser afectados como las poblaciones y vías de acceso (Figura 77).

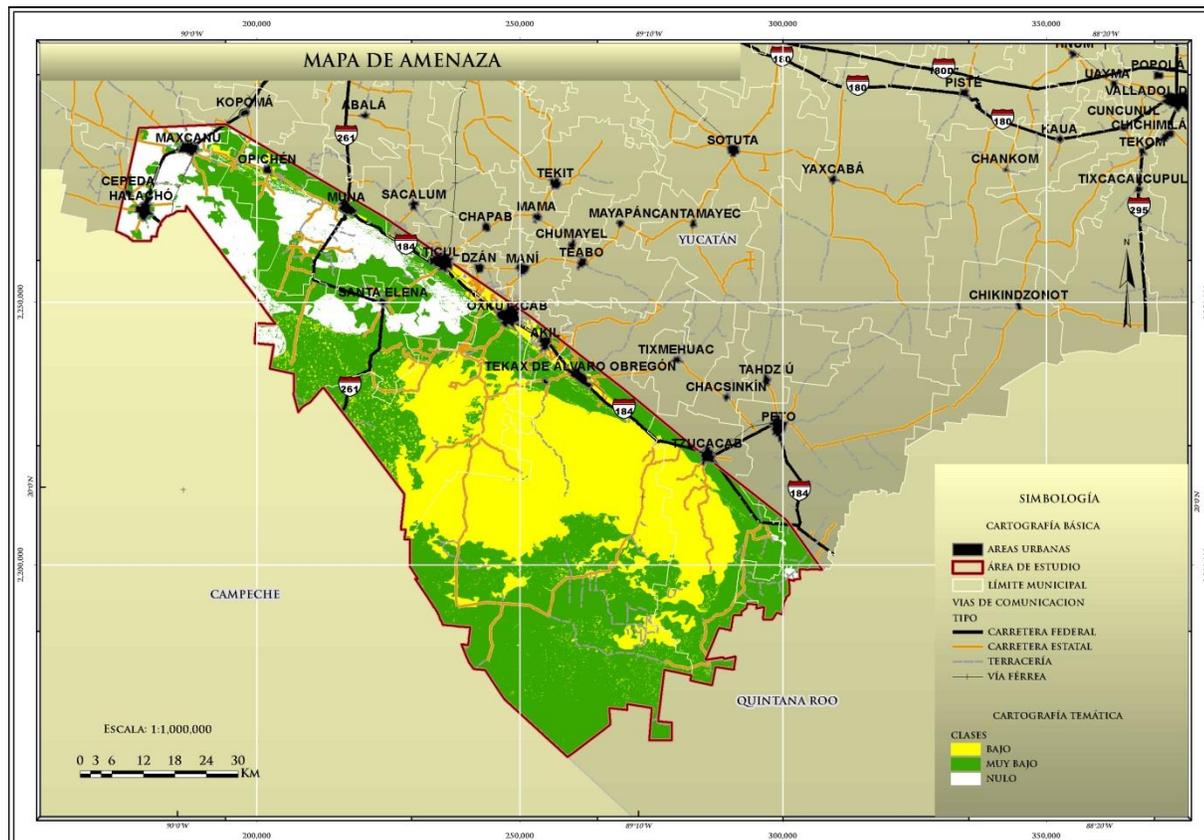


Figura 77. Mapa de Amenaza por PRM, donde se muestran las localidades y vías de acceso que pueden ser afectadas.

Las localidades urbanas que caen dentro de la zonificación de amenaza son: Halacho, Cepeda, Maxcanu, Opichen, Muna, Santa Elena, Ticul, Oxkutzcab, Akil, Tekax, Tzucacab y algunas poblaciones rurales que abundan en la zona sur. En la evaluación de campo se observó que estos poblados no han sido afectados por estos procesos, pero en la clasificación de PRM se tienen flujos que éstos se pueden generar en las partes altas y seguir su recorrido por varios metros hasta kilómetros.

Lo que respecta con las vías de comunicación que son afectadas por PRM, en la zona de estudio se tienen 11,525.24 km a ser afectadas. Del cual, 4045.30 km se encuentran en susceptibilidad Baja y 7497.51 se encuentran en susceptibilidad Muy Baja, en la Tabla 46, se representa la clasificación de los caminos y su extensión de afectación.

Tabla 46. Tipo de caminos y su afectación en kilómetros cuadrados.

TIPO DE CAMINO	AMENAZA	
	MUY BAJA	BAJA
Brecha	1479.71	836.19
Calle de Primer Orden	0.22	
Calle de Segundo Orden	58.57	24.79
Calle de Tercer Orden	603.64	304
Carretera Estatal	1159.05	671.65
Carretera Federal	340.06	148.02
Terracería	1060.83	559.47
Vía Férrea	136.84	80.56
Vereda	2653.87	1420.62
TOTAL	7492.79	4045.30

El método propuesto, basado en técnicas de evaluación multicriterio implementadas dentro de un SIG, se considera eficaz para la evaluación de la susceptibilidad a los PRM a escalas intermedias (1:25,000 a 1:50,000).

La subjetividad implícita a este método a la hora de asignar pesos a clases y factores condicionantes de la inestabilidad, es generalmente inferior a la de otros métodos de indexación, al proporcionar una medida de consistencia en la asignación de pesos a los factores, siendo además el de éstos dominante con respecto al de las clases en la obtención de la susceptibilidad.

Dada la homogeneidad de los materiales y la escasez de deslizamientos existentes en Yucatán, sería deseable aplicar y validar el método propuesto en una zona con mayor variedad litológica y de deslizamientos a fin de evaluar el peligro.

VII.3. Hundimientos

Debido al incremento en la demanda de materia prima (fluidos y sólidos) para el desarrollo económico de algunas regiones, se han generado problemas a nivel mundial asociados con subsidencia y colapso del terreno debido a su extracción, lo cual implica retirar volúmenes de material del subsuelo y por consiguiente el sistema tiende a la estabilidad provocando compactación y reacomodo de la estructura geológica en el subsuelo, cuyos efectos en superficie se traducen en colapsos repentinos o subsidencia gradual del terreno y generación de fracturas que afectan a la infraestructura (Howell, 1986; Bertoni *et al.*, 1995; Calderhead *et al.*, 2010).

La mayoría de los hundimientos son de tipo antrópico, sin embargo existen casos importantes de subsidencia natural del terreno, uno de ellos es por disolución de rocas calcáreas que en la gran mayoría de los casos es acelerada por prácticas humanas, principalmente por extracción de agua y cambios en las condiciones químicas naturales producto de la adición de componentes que alteran al sistema (Duran Valsero, 2002).

El término subsidencia se define como... *“el colapso repentino o descenso gradual de la superficie de la Tierra con poco o nada de movimiento horizontal. El movimiento no se restringe a taza, magnitud o área involucrada. La subsidencia puede ser causada por procesos geológicos naturales, tales como la disolución, deshielo, compactación, torsión lenta de la corteza, o enfriamiento de lava fluida por debajo de una corteza sólida; o por actividad humana, tal como minado del subsuelo o extracción de aceite, vapor o agua subterránea”* (Bates and Jackson, 1987 in Delle Rose y Parise, 2002).

Dependiendo del mecanismo generador y el marco geológico, el fenómeno de subsidencia puede relacionarse a varios procesos físicos y químicos. En este sentido existe subsidencia del terreno asociado con disolución de las rocas, extracción de agua en cuencas granulares, extracción de petróleo y gas en campos petroleros, extracción de vapor en sistemas geotérmicos, extracción de minerales en distritos mineros, erosión mecánica del subsuelo etc., (Allen, 1984).

En el presente Atlas, el tema de hundimiento (subsidencia), se enfoca principalmente a los colapsos históricos y recientes asociados con disolución kárstica que actualmente se observan en superficie y que generalmente reciben el nombre de dolinas y cenotes (dolinas con agua).

Las dimensiones para las dolinas y cenotes no están establecidas, pero de acuerdo con la terminología empleada por EPA (2002), nos referimos a un hueco en el suelo debido a disolución de roca calcárea con forma generalmente circular a semicircular en superficie y cilíndrica vertical a sub-vertical en el subsuelo, distribuido en el territorio del estado de Yucatán. En el caso de úvalas y poljes por definición se han considerado como geoformas de gran extensión superficial respecto de la profundidad a razón de kilómetros de longitud por decenas de metros de profundidad respectivamente. Debido a que sus límites geográficos no están definidos, los poljes no están considerados dentro del análisis.

A nivel mundial existen ejemplos representativos de hundimiento asociados con procesos de disolución; algunos, relacionados principalmente a fluctuaciones del nivel freático por extracción de agua (Durán Valsero, 2002). Casos como el de Winter Park en Orlando Florida, Maryland y Allentown, Pensilvania en los Estados Unidos de Norteamérica donde se presentaron pérdidas económicas por aproximadamente \$4, 000,000 y \$700,000 dólares en los primeros dos casos respectivamente, y que afectaron carreteras, viviendas, comercios entre otras propiedades contabilizándose los hundimientos por miles (Durán Valsero *op. cit.*); estos casos ejemplifican perfectamente los efectos en la infraestructura. Otros casos son el de la Península de Salento en la región de Apulia en el SW de Italia, donde las unidades geológicas afectadas consisten de depósitos de rocas calcáreas del Terciario que sobreyacen parcialmente a calizas y dolomitas deformadas, de edad Cretácico (Richetti *et al.*, 1988 in Delle Rose y Parise, 2002). En esa área se reportaron aproximadamente 2000 cavidades de las cuales solo algunas han causado daño a la infraestructura.

En China, el karst se distribuye por aproximadamente 3.2 millones de Km², en 23 provincias, donde existen 797 regiones presentando un registro incompleto de 30,005 superficies de subsidencia relacionadas con rocas calcáreas de edad Paleozoico (Yu, 1994). Ejemplos de afectaciones en China, son principalmente a edificios (70,000 m²), tierras de cultivo (666,517 m²), casas (18,300 m²), carreteras (15 Km lineales) y vías de ferrocarril (45 Km lineales) únicamente en Fankou área de Guangdong (Yu, *op. cit.*).

En nuestro país existen zonas importantes con desarrollo kárstico, estas zonas se distribuyen principalmente en la Península de Yucatán y en el sistema montañoso de Chiapas así como en áreas de la Sierra Madre del Sur y Sierra Madre Oriental (SMO), (Gutiérrez, 2008), en esta última las unidades son predominantemente calcáreas del Mesozoico medio a tardío (Padilla y Sánchez, 1985), con intensa deformación dúctil ocurrida en el Terciario temprano (Eguiluz *et al.*, 2000); dentro de esta provincia geológica existen rocas asociadas con la regiones paleogeográfica denominada Plataforma Valles-San Luis Potosí, la cual está constituida por unidades geológicas de facies arrecifales, talud y de laguna interna de gran espesor de edad Cretácico (López-Doncel, *et al.*, 2007) que sobreyace concordantemente depósitos de yesos pertenecientes a la Formación Guaxcamá (Aranda-Gómez, *et al.*, 2000). En esta provincia aflora la Formación El Abra, la cual presenta gran desarrollo kárstico. De igual manera unidades consideradas del mismo ambiente de depósito y edad (Albiano-Cenomaniano) (Wilson *et al.*, 1955 in Mendoza-Rosales y Silva-Romo, 2001), corresponden con la Formación El Doctor (Raines, 1968) que se distribuye principalmente en el sur del estado de San Luis Potosí, así como en los estados de Querétaro e Hidalgo. En esta unidad se encuentra una dolina considerada entre las tres más profundas a nivel mundial conocida como Sótano de las Golondrinas la cual tiene aproximadamente 500 m de profundidad (Raines *op. cit.*).

Espinasa-Pereña (1994), señala que el karst en nuestro país se distribuye principalmente en la Sierra Madre Oriental, Sierras Morelos-Guerrero, Sierras Orientales de Oaxaca, Sierras de Chiapas, Caribe y Península de Yucatán. Siendo en esta última donde se encuentra el afloramiento de rocas carbonatadas más extenso del país que ostenta el registro más extenso de redes kársticas en el mundo.

La Península de Yucatán es una provincia geológica compuesta en su totalidad de rocas calcáreas principalmente Mesozoicas y Cenozoicas (López-Ramos, 1973) y constituye además una provincia geomorfológica de planicie con elevaciones que alcanzan hasta 400 metros sobre el nivel medio del mar (Lugo-Hubp *et al.*, 1992). De acuerdo con algunos estudios las unidades marinas de esta provincia han estado sujetas a etapas de exposición sub aérea aparentemente desde los últimos 55 millones de años (Lugo-Hubp *et al.*, 1992; Pope *et al.*, 1996 y McClain, 1997 in Lefticariu *et al.*, 2006).

VII.3.1. Conceptos Básicos

La Península de Yucatán geológicamente representa una extensa área de rocas calcáreas con propiedades que la hacen muy susceptible al fenómeno de karstificación, en este sentido es importante describir algunos conceptos básicos.

Karsticidad

La palabra Karst proviene de Carso/Kras, región italo-eslovena, de mesetas calcáreas o de piedra caliza característico de la región. La palabra fue llevada a la lengua alemana como karst. El concepto de karst fue introducido en 1893 por el geógrafo serbio especializado en geomorfología, Jovan Cvijić en su libro *Das Karstphänomen*.

Desde el punto de vista geomorfológico el karst se define como un tipo de paisaje generado sobre rocas solubles, caracterizado en superficie por la presencia de depresiones cerradas y una red de drenaje escasamente funcional, mientras que a profundidad se caracteriza por la existencia de cavidades y un sistema de drenaje subterráneo bien desarrollado (Durán-Valsero, 2002).

Por otro lado, con base en “A Lexicon of cave and karst terminology with special reference to environmental karst hidrology” [EPA, 2002 (United States Environmental Protection Agency)]; se considera como karst a un terreno, generalmente constituido por caliza o dolomía, en el cual la topografía está ampliamente conformada por disolución de roca, el cual puede estar caracterizado por colapsos, arroyos subterráneos, depresiones cerradas, y cavernas.

El término karst, integra rasgos morfológicos e hidrológicos relacionado con rocas solubles (principalmente carbonatos) e incluyen estructuras como lapiaz, dolinas, pozo, sumidero, úvalas, poljes, cuevas, cavernas etc. Dentro de los rasgos hidrológicos se incluye cuencas de drenaje cerrado, pérdida de corrientes superficiales, manantiales, manantiales submarinos, arroyos subterráneos, etc., y se entiende además como un proceso natural en y sobre la corteza terrestre que causa disolución e intemperismo en calizas, dolomías, yeso, sal y otras rocas solubles.

El proceso llamado karstificación se refiere a la disolución indirecta del carbonato de calcio contenido en las rocas solubles (caliza, yeso, halita etc.), debido a la acción del agua producto de las precipitaciones cuando se infiltra y escurre por el interior del macizo rocoso. Esta agua lleva disuelto CO₂ atmosférico y lleva a cabo procesos de carbonatación, precipitación y disolución, en este último caso debido a la formación de ácido carbónico por acidificación del CO₂ atmosférico (Coch, 1995). Estas acciones originan formas muy diversas, tanto en la superficie como en el interior de las formaciones rocosas (Salinas-Rodríguez, 2011).

Las tasas de disolución de las rocas solubles son muy variables y dependen de muchos factores externos (hidrogeología, topografía, clima, etc.) e internos intrínsecos de la unidades geológicas. Sin embargo Delle Rose y Parise, (2002) en estudios realizados en la provincia de Apulia (Italia) señalan que la tasa de evolución de los rasgos kársticos en términos geológicos es relativamente rápida, del orden de decenas de miles de años o incluso en escala de tiempo de vida humana; esto último y bajo ciertas condiciones, fue corroborado por Dreybrodt y Gabrovsek (2003) mediante análisis en laboratorio.

Estructuras kársticas

De manera general se describen las estructuras kársticas mayores exógenas las cuales están presentes en el estado de Yucatán, cuyo funcionamiento y desarrollo pueden tener el impacto inmediato en la infraestructura. Las estructuras kársticas endógenas no se tratan en este informe.

Lapiaz: Conjunto de cavidades formadas superficialmente, originada por la disolución que causa la escorrentía sobre la superficie de las rocas por las que discurre cuando están desprovistas de vegetación. Son crestas agudas, surcos, hendiduras, etc., de dimensiones decimétricas que en profundidad pueden superar la decena de metros. Presentan fondos planos y aristas agudas (Figura 78).

Úvalas: La coalescencia de varias dolinas resultan formas compuestas de planta alveolar llamadas úvalas (Figura 78).

Sistemas Cavernosos: Los sistemas cavernosos son lo más característico del relieve kárstico. El agua a través de las grietas va disolviendo la roca y creando una red de galerías y sistemas hidrológicos inmensos que se comunican con el exterior a través de resumideros, simas y surgencias. En principio, su forma general es la de un río subterráneo. La forma elemental es la galería, más o menos horizontal, que localmente se curvan hacia arriba en sifones. La galería puede estrecharse en túneles y pasillos, a menudo ramificados y sin salida. Localmente se desarrollan salas de dimensiones considerables, cuya parte superior forma una bóveda. Esa agua lleva carbonato de calcio disuelto, que se precipita formando estalactitas que cuelgan del techo y estalagmitas, que se levantan del suelo (Salinas- Rodríguez, 2011).

Poljes: Es una extensa depresión cerrada, de fondo plano, de dimensiones kilométricas, dominada por vertientes escarpadas. Dentro de un polje existen formas kársticas menores: dolinas y lapiaz. La existencia de dicha estructura está relacionada con los grandes accidentes tectónicos y la red hidrográfica. Al ser una depresión cerrada la evacuación del agua se realiza a través de pozos llamados localmente resumideros o tragaderos. El resumidero comunica el polje con el exterior, a través de una red subterránea. (Figura 78) (Salinas-Rodríguez, 2011).

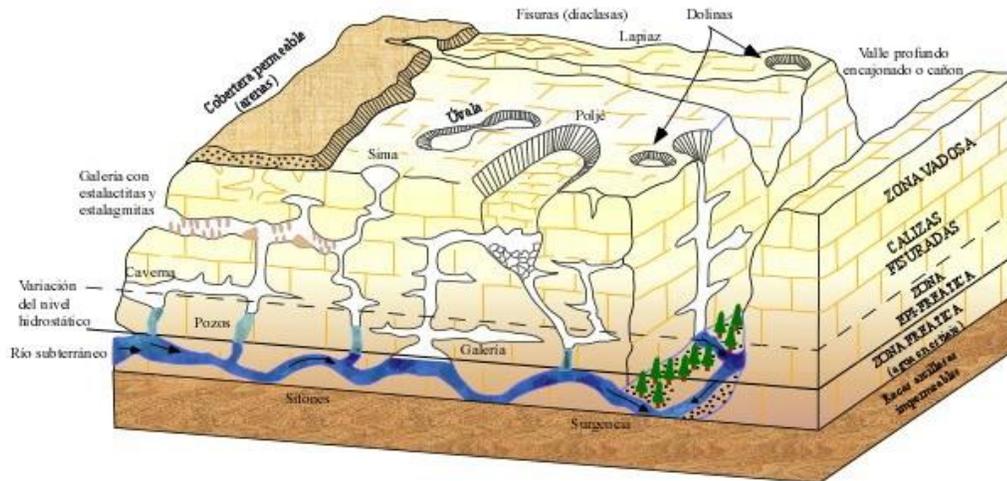


Figura 78. Estructuras Kársticas.

Dolina: Es la forma más importante de las oquedades kársticas y son depresiones circulares o elípticas que se forman por disolución (y consiguiente pérdida de volumen), a partir de la intersección de diaclasas, generalmente a favor de los planos de estratificación, produciéndose un proceso en cadena de infiltración, disolución y eventualmente se puede presentar el colapso (Figura 79). En cualquier caso no se disponen aleatoriamente, sino que generalmente están alineadas según fracturas o direcciones de estratificación determinadas. En sección tienen formas cilíndricas o cónicas. Sus dimensiones varían desde unos pocos metros hasta más de un kilómetro de diámetro mientras que en el subsuelo llegan a alcanzar varios cientos de metros de profundidad (EPA, 2002).

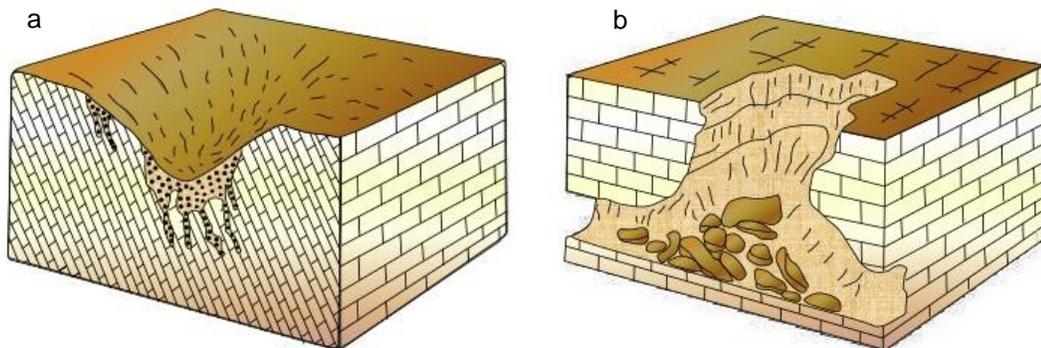


Figura 79. Dolinas por disolución (a) y colapso (b).

Origen y formación de Cenotes

En general existen algunos estudios que describen las características del sistema acuífero de la Península de Yucatán. Las estructuras endokársticas como cuevas y galerías se forman por disolución de las rocas carbonatadas por ataque químico del agua ligeramente ácida. El agua de lluvia que se infiltra a través de la zona de aireación circula por conductos preexistentes haciéndose más ácida y disolviendo lentamente la roca carbonatada, agrandando las fracturas y planos de estratificación. Cuando el agua alcanza la zona saturada, continúa disolviendo la roca creando un sistema de galerías y red de drenaje subterránea, buscando puntos de descarga naturales.

La mayoría de las cuevas se crean en el nivel freático o en la zona saturada inmediatamente por debajo de este. En consecuencia, oscilaciones del nivel freático producen modificaciones de la morfología de las paredes de la cueva. Dichos procesos endokársticos se favorecen en condiciones climáticas húmedas y frías. Las bajas temperaturas posibilitan la disolución de CO_2 , acidificando el agua y favoreciendo la disolución (Ford y Williams, 1989). En el interior de las galerías de los cenotes estudiados, se han descrito conductos kársticos con orígenes diferentes, unos formados sólo por disolución y otros por colapso (Figura 80) (Ordoñez-Crespo y García-Rodríguez, 2010)

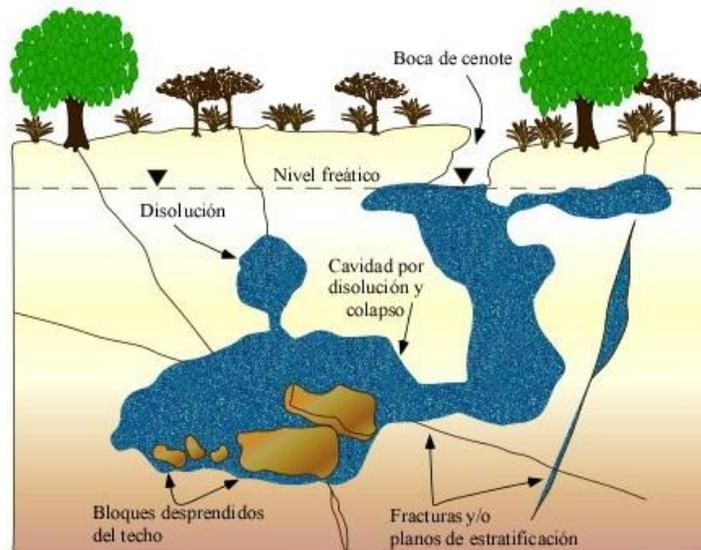


Figura 80. Esquema del aspecto de los conductos kársticos producto de disolución y colapso. Modificado de Ordoñez-Crespo y García-Rodríguez, (2010).

El proceso geomorfológico denominado karst, está gobernado por factores intrínsecos y extrínsecos, los cuales actúan en diferentes escalas de tiempo y espacio, generando una amplia gama de formas y grados de karstificación. Los factores intrínsecos incluyen la litología, el grado de porosidad de la matriz y la fractura de la roca; los extrínsecos, el clima, la temperatura, la vegetación, la mezcla de agua dulce y salada y el tiempo de duración de la exposición al proceso en cuestión. En la Figura 81 se indican los principales tipos de cenotes.

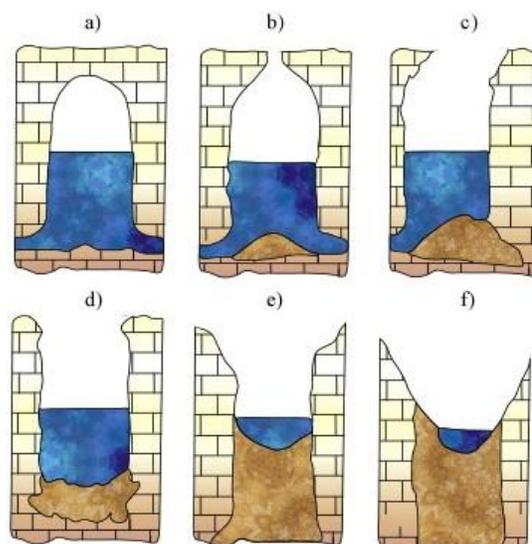


Figura 81. Evolución geológica en la formación de los cenotes y tipos de cenotes. a) Cueva anquihalina, b) cenote tipo cántaro lótico, c) cenote de paredes verticales, d) cenote tipo lentic, e) azolve y hundimiento de paredes, f) cenote tipo aguada (Modificado de Beddows *et al.*, 2007).

Como resultado de la disolución de rocas (yeso, caliza, dolomita y halita) por corrosión química, con base en las condiciones hidrológicas imperantes, se generan geo-formas “negativas” en el relieve, incrementando la permeabilidad; así mismo se desarrollan grandes sistemas de drenaje subterráneo (Schmitter-Soto *et al.*, 2002).

VII.3.2. Antecedentes

Pocos son los reportes oficiales encontrados en la literatura de casos de colapso dentro del estado de Yucatán. La mayoría de los reportes provienen de notas periodísticas y especialmente comentarios de los pobladores de los sitios a los que se han visitado dentro de las actividades de campo.

Steffen *et al.*, (2005), señalan de manera general la existencia de superficies de colapso en las grandes ciudades de Yucatán (Mérida y Valladolid) haciendo referencia al uso de los cenotes como espacio turístico y al desarrollo de infraestructura hotelera en estas áreas que pueden ser consideradas como sitios no aptos en términos de riesgo.

De acuerdo con algunas notas periodísticas, se han reportado casos aislados de colapsos del terreno principalmente en la zona urbana de la ciudad de Mérida, como el ocurrido el 22 de septiembre de 2007 al sur de la ciudad en la colonia San José Tecoh donde se reportó la presencia de una fisura de aproximadamente tres metros de profundidad sin que se presentaran lesionados o afectación a las viviendas.

Otro caso fue registrado en la colonia García Ginerés en el mes de Septiembre de 2011, en dos tramos de pavimento junto a las vías del tren aledañas a la Unidad Deportiva Inalámbrica en la calle 90 entre las calles 25 y 31.

Los trabajos de remediación llevados a cabo en este sitio consistieron en rellenar la caverna de aproximadamente 4 m de diámetro utilizando aproximadamente 49 metros cúbicos de piedra y 28 metros cúbicos de sascab. En este incidente se vio afectada una de las viviendas cercanas.

Existen escasos reportes en municipios de la entidad, sin embargo se tiene reportes como el del poblado de Kantunil, sucedido el 8 de octubre posterior al paso del ciclón tropical Isidoro (Septiembre de 2002), donde se reportó un hundimiento del terreno de aproximadamente 10 m de profundidad y 5 m de diámetro, en predio ubicado en la calle 22 entre 39 y 41. Las afectaciones fueron al terreno de uso principalmente agrícola (Espinosa-Graham, 2003). Otro caso fue en el poblado de Oxtutzcab donde se reportaron para el mes de enero de 2007, cuatro hundimientos, que representaron trabajos que alcanzaron una inversión de al menos medio millón de pesos, donde se argumentó que el origen de dichos hundimientos se debieron al desarrollo de “sascaberas” en el subsuelo, sin embargo no se tiene el registro de los estudios realizados en dichos sitios.

Karsticidad en el Estado

El estado de Yucatán debido a sus condiciones geológicas y a la historia de exposición de las rocas a las condiciones sub-aéreas y sus condiciones hidrogeológicas e hidroquímicas, cuenta con gran desarrollo kárstico el cual tiene una estrecha relación con la porosidad secundaria o fracturamiento y porosidad primaria de las unidades litológicas.

De acuerdo con Beddows y colaboradores (2007), el número de cenotes en el territorio del estado de Yucatán varía de 7000 a 8000, sin embargo, considerando a los cenotes en términos de karsticidad, estos forman parte de las dolinas. En este sentido las cavidades sobre el terreno sin importar las dimensiones pueden elevarse considerablemente en número. En el presente estudio, se cuenta con una base de datos donde se tiene el registro incompleto de aproximadamente 10,000 dolinas.

Dicha información se obtuvo de la base de datos de los registros de CINVESTAV-SEDUMA (Inédito), interpretación morfológica de cartas topográficas escala 1:50,000 de INEGI, y de imágenes de Google *Earth*. Los registros no consideran en ningún caso el desarrollo subterráneo de cavernas y no se tiene conocimiento de registros de esta naturaleza, sin embargo se sabe de extensiones longitudinales de cavernas en el estado de Quintana Roo (Supper *et al.*, 2007), y de acuerdo con la semejanza en la historia geológica de las rocas de la península, además de las condiciones morfo-tectónicas y climáticas, es posible considerar un gran desarrollo de cavernas similares bajo el suelo del estado de Yucatán. En capítulos posteriores se mencionará a detalle el desarrollo y distribución de las estructuras kársticas en la entidad.

Marco Hidrogeológico

El acuífero de Yucatán, cuenta con un espesor medio de 150 metros y está constituido por calizas de características variadas y depósitos de litoral. Por su respuesta hidráulica, se le puede considerar como acuífero libre (Pacheco-Ávila *et al.*, 2002; Graniel-Castro *et al.*, 2004), excepto por una estrecha franja a lo largo de la costa, en donde una delgada capa de caliche representa un confinamiento hidrogeológico (Perry *et al.*, 1989). En acuíferos kársticos como este, la permeabilidad es una combinación de la porosidad primaria, grado de fracturamiento y karstificación. Los mecanismos de formación de estos conductos son corrosión debido a la mezcla de agua dulce con agua salada además de reacciones mediadas por bacterias (Marín-Stillman, *et al.*, 2005). Como resultado de esto último en las unidades geológicas, la heterogeneidad del sistema se incrementa continuamente propiciando que el almacenamiento y el movimiento del agua subterránea tenga lugar a través de la red de cavidades interconectadas con fracturas y conductos de disolución, localizadas a diferentes profundidades en el subsuelo (Villasuso y Méndez, 2000). La profundidad del nivel freático se definió en el estudio “Sinopsis Geohidrológica del Estado de Yucatán” (SARH, 1989), donde señalan dirección del flujo subterráneo a partir del sur hacia el norte, pasando por la Sierrita de Ticul limitada de la Planicie Interior por una falla normal denominada con el mismo nombre, de donde el flujo discurre al oeste y norte, por Maxcanú hacia la costa y noroeste, cruzando por el Semicírculo de Cenotes cuya banda constituye flujos preferenciales al mar, en tanto que en la zona Costera el flujo es perpendicular al litoral. En el oriente del Estado el flujo es al norte y hacia Quintana Roo. Existen algunos estudios puntuales realizados en la ciudad de Mérida y al sur de esta, donde reportan elevaciones (niveles dinámicos) y flujos locales (Pacheco-Ávila, *et al.*, 2002a; Graniel-Castro *et al.*, 2003). Pacheco-Ávila y colaboradores (2004), en estudios de calidad del agua en una pequeña área localizada aproximadamente 15 Km al sur de la ciudad, determinaron flujos locales que van de SW a NE durante época de estiaje, mientras que durante épocas de lluvia determinaron flujos de SE a NW.

Parte de la recarga del acuífero en Yucatán, proviene subterráneamente de los estados de Campeche y Quintana Roo, con un volumen de 150 Mm³ y 1,350 Mm³ respectivamente dando un total de 1,500 Mm³ (CONAGUA, 2011). Existen gran variedad de estudios hidrogeológicos e hidrogeoquímicos desarrollados en el estado de Yucatán, principalmente enfocados en la calidad del agua y el impacto antrópico en el sistema kárstico (Pacheco-Ávila, *et al.*, 2002a; Pacheco-Ávila *et al.*, 2002b, Graniel-Castro *et al.*, 2004). Algunos estudios puntuales señalan procesos de disolución en función de la saturación de calcita y dolomita aparentemente relacionada al agua de lluvia (Graniel-Castro *et al.*, 2009).

VII.3.3. Método de Trabajo

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, la elaboración del presente Atlas, se basa en las guías metodológicas de CENAPRED (2006). En el caso de la guía por peligros geológicos, no está considerado el análisis de peligros y riesgo asociado a subsidencia del terreno. Por tanto, en el presente estudio, se propone el empleo de una metodología, específica para el análisis de susceptibilidad por hundimientos en el estado de Yucatán. La metodología propuesta que se divide en trabajos de campo y gabinete se basa principalmente en el análisis bibliográfico, disponibilidad de datos y escala de trabajo (Figura 82)

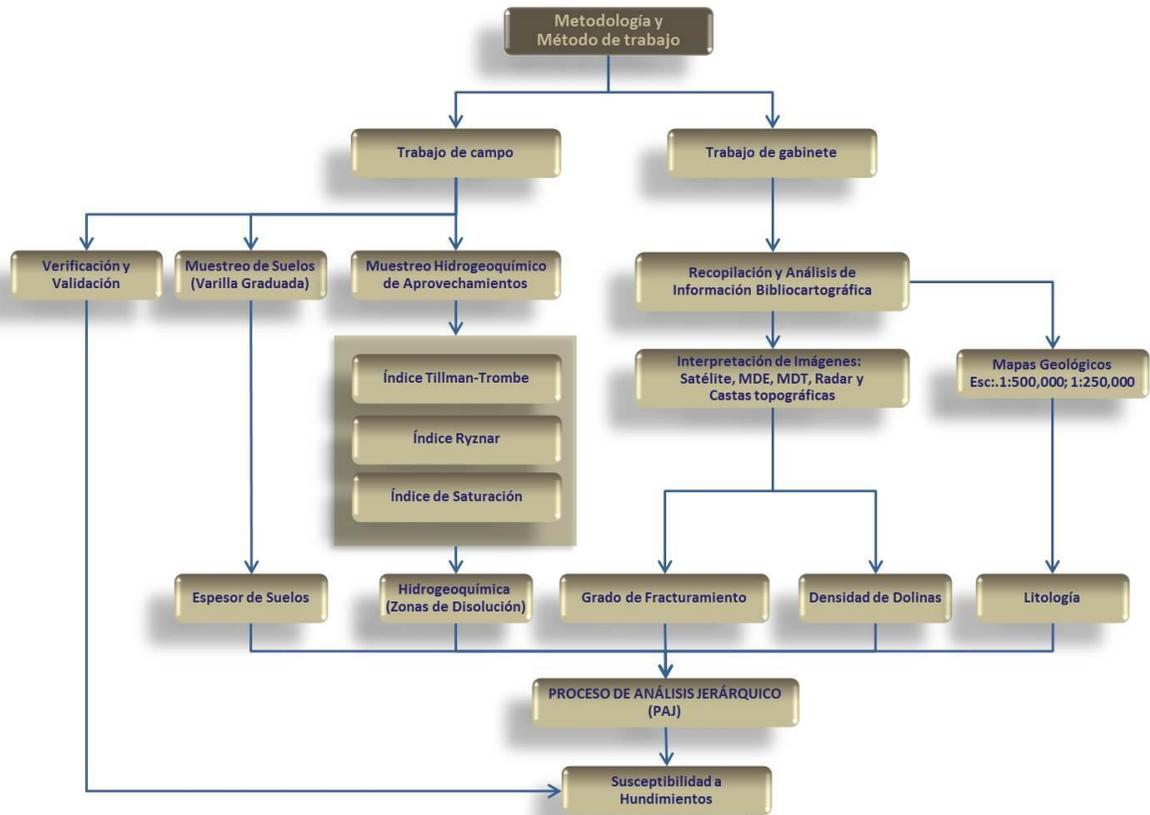


Figura 82. Método general para la obtención del mapa de susceptibilidad a hundimiento kárstico.

En primera instancia en el trabajo de gabinete, se consultaron casos de estudio a nivel mundial y los métodos empleados en el análisis del problema. Cada situación conlleva un análisis específico respecto de la escala de trabajo y de ello depende las técnicas analíticas empleadas. En este sentido se tiene que en general en escalas locales (análisis individuales de dolinas o grupo de dolinas) se emplean técnicas principalmente geofísicas y geotécnicas que incluyen análisis y estimaciones de variables hidrogeológicas, apoyados con monitoreo en la aplicación de modelaciones numéricas (Simón *et al.*, 2009; López *et al.*, 2010; Gutiérrez, 1998 in Ayala-Carcedo y Olcina-Cantos, 2002). Yu (1994), por ejemplo señala que es posible predecir y determinar la distribución de superficies de subsidencia mediante la integración de estudios de sensores remotos, métodos geofísicos (métodos eléctricos, prospección sísmica, métodos gravimétricos y perforación de pozos) y recorridos de campo aplicados en áreas minadas. Sin embargo estas técnicas junto con mapeo de paleokarst, exploraciones espeleológicas, excavaciones, fechamiento y perforación de pozos son consideradas dentro de niveles detallados auxiliares en el reconocimiento de rasgos asociado con subsidencia (Gutiérrez *et al.*, 2008). Cabe señalar que en escalas intermedias y regionales también se han considerado el uso de variables geotécnicas, hidrogeológicas, geológicas-estructurales y geofísica adecuadas a las condiciones del área de estudio, sin embargo la información a estos niveles suele ser más escasa, de tal manera que se emplean técnicas como sensores remotos que cubren zonas de mayor extensión y cuyos resultados en ocasiones no es empleado en áreas que por obvias razones requieren detallarse (Simón *et al.*, 1998). Algunas de las ramas de la ciencia y métodos empleados para el análisis de susceptibilidad, peligro y riesgo por colapsos asociados a karsticidad se resumen en la Tabla 47.

Tabla 47. Variables y escalas utilizadas en algunos análisis del peligro, riesgo, susceptibilidad y probabilidad de hundimientos por karsticidad empleados en el mundo.

AUTOR	LOCALIDAD	TIPO DE MAPA	ESCALA	VARIABLES
Wright y Calvin (1995)	Condado de Fillmore, Minnesota	Mapa de hundimientos y probabilidad de hundimientos	1:100,000	Geología, Hidrogeología, Edafología, Climatología, Topografía
Yu (1994)	Parte sur de China	N/E	N/E	Geología, Hidrogeología, Sensores remotos, Geofísica (métodos eléctricos, sísmica, gravimetría)
Simón et al. (1998)	Zaragoza, España	Estudio de riesgos kársticos	1:50,000; 1:25,000; 1:5,000	Geología, Geoquímica, Hidrogeología, Geotecnia, Hidrogeoquímica
López et al. (2010)	Ciudad de Salento, Cataluña, España	Modelado	Detalle	Modelado numérico (Elementos finitos), monitoreo con extensómetros, inclinómetros y levantamientos topográficos.
Delle-Rose y Parise (2002)	Región de Apulia, Italia	Mapa de subsidencia por karst (Peligro)	Regional	Menciona la importancia de estudios integrales de Geología, Hidrogeología, Morfología, cubierta de suelo o capas arcillosas, geotecnia, espeleología, hidráulica, etc.
Gutiérrez et al. (2008)	N/E	Peligro por hundimiento kárstico	Variable	Fotografías aéreas e imágenes de satélite, Investigación en campo, información topográfica y geodésica, información oral y documentada, Paleokarsticidad, Exploración espeleológica, Prospección geofísica, Perforación de pozos, Zanjas, Hidrogeología.
Howell (1984)	Cheshire, England	Mapa de karst y evolución kárstica	Variable	Fotogeología
Gov. Edo. Tamaulipas (2011)	Estado de Tamaulipas, México	Atlas de riesgos	Regional	Geología, Recorridos de campo, Geomorfología
Yuhr et al. (2003)	NW Pinellas, Florida, EUA	Análisis de riesgo	Detalle	Geofísica (Radar de penetración terrestre, Electromagnetometría, Resistividad, Microgravimetría, Sísmica de reflexión, Conductividad eléctrica, Perforación rotosónica, Difracción de rayos X, etc.
Wu et al. (2010)	Ciudad de Wuhan, China	Susceptibilidad y peligro por colapso debido a karsticidad	Semi-detalle	Edafología, Geología, Hidrogeología, Actividad Humana
Durán-Valsero (2002)	N/E	Mapa de peligrosidad	N/E	Combinación de variables geológicas, hidrogeológicas, geofísicas (microgravimetría y georadar) y espeleológicas.
Wilson y Beck (1992)	Orlando Florida, USA	Peligro	Semi-detalle	Hidrogeología, geología estructural.
Gillman et al. (2007)	Missouri, USA	Peligro	Regional	Hidrología, hidrogeología, Edafología, Geología
Sartain et al. (2011)	Área de Centurión, Sud-Africa	Riesgos	Regional	Geología, Hidrogeología, Registros históricos, Densidad y tamaño de las dolinas.
Brook y Allison (1984)	Dougherty County, Georgia, USA	Susceptibilidad	Regional	Geología, Interpretación fotogeológica, Mapas de dolinas
Sotiano (1995)	NW de Zaragoza, España	Peligro, susceptibilidad	Regional	Geología, geoquímica, hidrogeología, hidroquímica, cartografía de dolinas.

Con lo que respecta al trabajo de campo, para lograr un mejor entendimiento de la distribución de fracturas y zonas susceptibles a la presencia y desarrollo de karst en el estado de Yucatán y su relación con los sistemas de fracturamiento, se consideró realizar una zonificación mediante el análisis de imágenes de percepción remota; con la finalidad de reconocer zonas con características principalmente geomorfológicas que presenten relación con dolinas y la profundidad del nivel freático observado en el sitio. Lo anterior obedece a la necesidad de contar con criterios morfológicos e hidrogeológicos para entender las observaciones de campo realizadas.

En este caso, se empleó el anáglifo de la zona del estado de Yucatán, obtenida del *Shutter Radar Topography Mission (SRTM)* del programa de la *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* (<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA03380>). Esta imagen presenta expresión topográfica con exageración vertical adecuada, la cual sirve como base para realizar la zonificación (Figura 83).

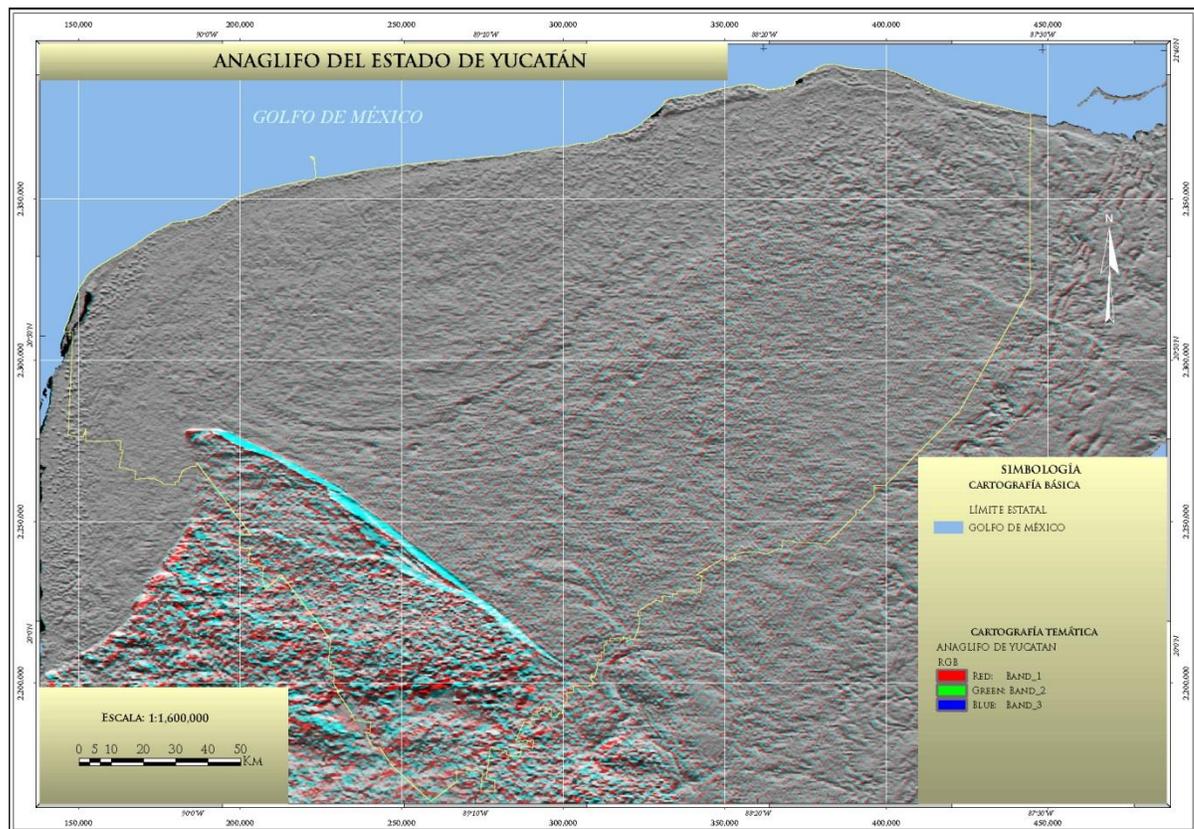


Figura 83. Anáglifo empleado para el análisis morfológico en la zonificación del análisis de datos de campo (tomado de NASA-Jet *Propulsion Laboratory*, 2003).

Para observar las variaciones en el relieve, se emplearon lentes anaglíficos (rojo, azul) que sirven como herramienta en la obtención de perspectiva en tercera dimensión. Cabe señalar que la imagen del relieve presentada en el actual Atlas muestra rasgos asociados con características morfológicas del terreno, sin embargo en comparación con el anáglifo, la exageración vertical de este último provee elementos morfológicos importantes de fácil reconocimiento a la escala de trabajo.

Una vez establecidos estos criterios base para la descripción de campo, a continuación se realiza la descripción general de algunos sitios considerados importantes desde el punto de vista de riesgos. La realización de la verificación de campo, se hace con la finalidad de recabar información que permita evaluar las condiciones del lugar a través de características intrínsecas del sitio. Dicha descripción se realiza con base al llenado de la ficha técnica (Figura 84) elaborada específicamente para este propósito.

ATLAS DE PELIGROS POR FENOMENOS NATURALES DEL ESTADO DE YUCATÁN

HUNDIMIENTOS POR KÁRSTICIDAD

UBICACIÓN	
LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	
PUNTO DE CONTROL	YHB2005
FECHA	16/02/2012
ESTADO	YUCATÁN
MUNICIPIO	CHOCHOLA
LOCALIDAD	CHOCHOLA
COLONIA	CENTRO
CALLE	23
CARTA TOPOGRÁFICA	OPICHEN
CLAVE CARTA	F16-C61
COORDENADAS UTM WGS84	
LATITUD X	204864
LONGITUD Y	2297100
ELEVACIÓN Z	10
CARACTERÍSTICAS	
RELIEVE DEL TERRENO	PLANO 1°-3°
TIPO DE ROCA	CALIZA COQUINA
CONDICIONES DE LA ROCA	ROCA MASIVA Y SANA
ESTRUCTURA KÁRSTICA	CENOTE
MORFOLOGÍA DE LAS PAREDES	IRREGULAR
SUPERFICIE DEL HUNDIMIENTO (M2)	198.2
PROFUNDIDAD DE LA CAVIDAD (M)	9
PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO (M)	6.3
AFECTACIÓN A INFRAESTRUCTURA EXPUESTA	
EVIDENCIA DEL HUNDIMIENTO	NO VISIBLE EN SUPERFICIE
AFECTACION	CALLE Y VIVIENDAS
GRADO DE PELIGRO	ALTO
DATOS ESTRUCTURALES	
S/D	
OBSERVACIONES	
PARTE DE LA CAVIDAD SUBYACE A LA CALLES 23, ASI COMO CONSTRUCCIONES DE CASA HABITACION.	
REALIZO	ADRIANA CORDOVA-AGUSTÍN CAZARES




Figura 84. Ficha técnica empleada en la estimación cualitativa de peligro por hundimientos asociado a procesos kársticos.

Por otra parte, es importante señalar que en cada caso de estudio se emplean variables acordes con la escala y se determinan los factores que disparan el fenómeno de colapso y en la mayoría de los casos el agua es el principal detonante.

La función del agua en el sistema desde el punto de vista de peligros por colapso es mecánica y desde luego química. Por un lado en la acción química-erosiva, el agua, de acuerdo con su

agresividad química, disuelve la roca haciéndola frágil y propensa a que los componentes granulares o en solución sean transportados, y por otro lado en la acción mecánica, el agua juega un papel muy importante, debido a que las variaciones de los niveles freáticos o piezométricos, es decir, el aumento y disminución del nivel de agua durante las estaciones del año, produce un efecto de expansión-succión, cuyo esfuerzo en las rocas bajo ciertas condiciones provoca que el sistema pueda llegar al colapso (Soriano, 1995).

El caso de análisis de las variaciones del nivel freático no se plantea en el presente trabajo debido a falta de detalle en las configuraciones a nivel estatal y debido principalmente a que no se tienen registros de monitoreo de elevaciones del nivel piezométrico durante las etapas de intensas lluvias las cuales pueden generar rápida elevación del nivel freático. Desde el punto de vista químico, se realizó un muestreo de aprovechamientos que incluyen principalmente pozos, cenotes y manantiales, con la finalidad de obtener un mapa de isovalores respecto a la actual agresividad química del agua. Este mapa junto con además información pedológica se integra a la suma de capas de información para la obtención del mapa de susceptibilidad a hundimientos.

Debido a la extensión del estado de Yucatán y a las características geológicas en general de la Península del mismo nombre es importante mencionar que el objetivo de esta propuesta metodológica se realiza con base al análisis regional de acuerdo con la información geológica, geofísica, hidrogeológica, hidroquímica y pedológica disponible. En este sentido se tienen buenos ejemplos de análisis a escalas semi-regionales y regionales.

Los métodos empleados en algunos estudios establecen modelos que integran gran cantidad de variables, mientras que en otros utilizan variables relativamente sencillas que generan modelos con muy buenos resultados; tal es el caso de Brook y Allison (1984) quienes proponen el empleo de variables relativamente simples, como densidad, intersección y número de fracturas en las rocas, así como densidad de dolinas por unidad de área, con la finalidad de determinar zonas susceptibles de colapso (Tabla 47).

Por otro lado Witthuhn y Calvin (1995) utilizan capas de información topográfica, hidrogeológica, litológica, estructural, pedológica y climatológica con la finalidad de generar un mapa de colapsos y probabilidad de colapsos. En este caso, los resultados señalan áreas ya colapsadas así como zonas consideradas como de colapso potencial. Gutiérrez y colaboradores (2008) sin embargo, proponen una metodología empleando un mapa de colapsos preexistentes por unidad de área, proponiendo arbitrariamente zonas consideradas con grados variables de susceptibilidad, a las cuales le suman datos de colapsos validados posteriores a los previamente considerados; de ésta forma generan el mapa de probabilidades de colapso (Tabla 47).

En México, son escasos los estudios relacionados a la estimación de peligros y riesgos relacionados con subsidencia asociada con procesos kársticos. Sin embargo se han realizado esfuerzos en su determinación. En el Atlas de riesgos del estado de Tamaulipas, el Gobierno del Estado de dicha entidad (2011) generó un mapa de riesgos con base a la determinación de áreas de peligro arbitrarias de 50, 100 y 150 m de diámetro respecto del área de las dolinas, considerados como alto, medio y bajo respectivamente, de este modo se generaron mapas donde se observan las dolinas y su potencial zona de colapso (Tabla 47).

En el presente Atlas, la metodología empleada, para obtener el mapa de susceptibilidad por hundimientos, integra capas de información geológica, hidrogeológica, análisis e interpretación de imágenes de percepción remota, distribución de formas kársticas (dolinas y cenotes) así como la variable hidrogeoquímica y espesor de suelos, las cuales se describen a continuación.

VII.3.4. Análisis de Información y Generación de Mapas Base

Geología

La capa de información geológica, se refiere a las unidades litológicas aflorantes distribuidas en el estado de Yucatán. A partir del análisis geológico, se pretende establecer rasgos relacionadas con las propiedades intrínsecas de las rocas; en este sentido, los criterios utilizados se basan en las descripciones texturales y estructurales generales de las formaciones geológicas presentes. Esta capa de información se basa en descripciones y mapas geológicos en escala 1:250,000, editados por el Servicio Geológico Mexicano (2005, 2006), donde se hace referencia exclusivamente a los rasgos texturales que nos permite unificar las unidades y sintetizarlas. Se denominan con el término unidad seguido del nombre de la Formación predominante. En este sentido la unidad no es sinónimo de formación geológica.

De acuerdo con las descripciones mencionadas en el capítulo de geología, desde el punto de vista de susceptibilidad por karsticidad, dentro de la capa de información geológica, es posible establecer únicamente dos unidades (Figura 85):

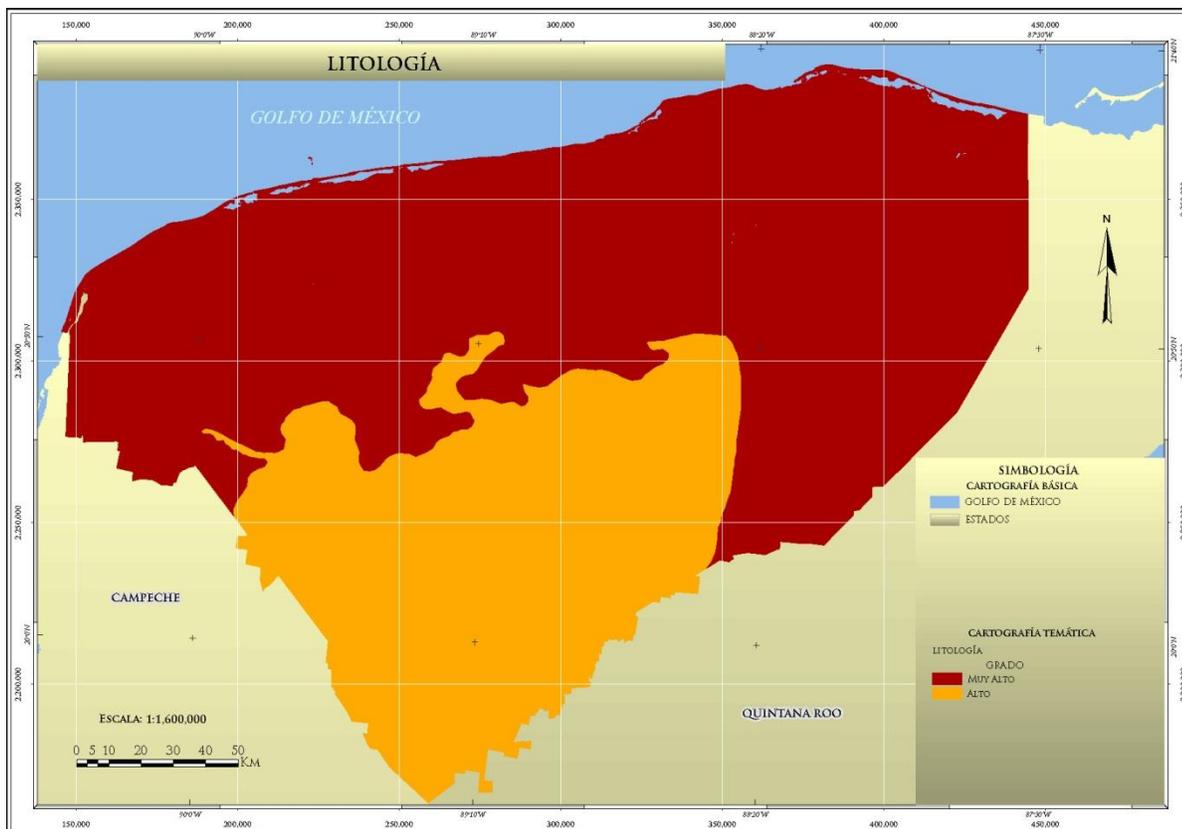


Figura 85. Capa de información litológica.

De cara al análisis por susceptibilidad, a la Unidad Chichen Itzá, se le asignó arbitrariamente el valor de 9, del mismo modo se le asigna a la Unidad Carrillo Puerto el valor de 10 (Tabla 48).

Tabla 48. Grado de susceptibilidad de las unidades litológicas a procesos de disolución kárstica.

UNIDAD LITOLÓGICA	VALOR OTORGADO	GRADO DE SUSCEPTIBILIDAD
Unidad Carrillo Puerto	10	Muy Alto
Unidad Chichen Itza	9	Alto

Unidad Chichen Itzá que es la unidad geológica aflorante más antigua (Eoceno) la cual integra a la formación con el mismo nombre y a los depósitos aluviales. Corresponde con (Butterlin y Bonet, 1959 in SGM, 2005), la cual se distribuye en el sur y centro del Estado. Esta unidad consiste de *grainstone*, *wackestone*, brechas calcáreas y horizontes de margas así como algunas capas de *mudstone*, en general presenta gran cantidad de material fósil, entre los que destacan microfauna de miliolidos, macrofauna constituida por gasterópodos y cefalópodos; así como oolitos (SGM, 2005; SGM, 2006). Graniel-Castro y colaboradores (2009) señalan que en la parte noroeste de la Sierrita de Ticul dentro del territorio del Estado, las calizas se encuentran dolomitizadas, silicificadas o recristalizadas. El ambiente de depósito de esta Formación se considera como perteneciente a una plataforma somera (López-Ramos, 1973).

La **Unidad Carrillo Puerto**, la cual además de la Formación del mismo nombre, integra a los depósitos de Coquinas; Coquinas con areniscas y depósitos Holocénicos costeros sobreyace concordantemente a la Caliza-Coquina. Consta principalmente de *boudstone* (Fotografía 64), *wackestone* y *packeston* además de brechas calcáreas, depositada en ambiente de plataforma somera (SGM, 2005). Los valores asignados a las unidades se consideraron con base a su relación entre la porosidad primaria relativa, estableciéndose así, que la Unidad Carrillo Puerto es relativamente más porosa que la Chichen Itzá y por tanto más susceptible a procesos de karstificación. Es importante señalar que de acuerdo con lo anterior, existe una estrecha relación entre la presencia de dolinas con la unidades litológicas, donde la mayor concentración de dolinas de mayores dimensiones aparecen dentro de la unidad Carrillo Puerto, la cual tiene gran distribución territorial en la zona de planicie.



Fotografía 64. Afloramiento de Boudstone perteneciente a la Formación Carrillo Puerto, localizado en la zona urbana del poblado de Cuzamá.

Grado de fracturamiento.

Como se menciona a detalle en el apartado correspondiente a fallas y fracturas, esta variable juega un papel importante desde el punto de vista de susceptibilidad a algunos procesos como remoción en masa y hundimientos relacionados con karsticidad. En este último caso las discontinuidades en las rocas calcáreas funcionan como zonas de alta permeabilidad secundaria que condicionan la generación, propagación y desarrollo preferencial de las estructuras kársticas (Brook y Allison, 1984; Marsico, *et al.*, 2004; Adriani, *et al.*, 2005; Florea, 2005; Delle Rose y Parise, 2002), debido a que concentran el flujo del agua subterránea (Brook y Allison, *op. cit.*).

Tomando como base el mapa de fracturamiento, basado en el análisis de la densidad de fracturas, longitud de fracturas e intersección de fracturas por unidad de área. Se determinaron zonas estrechamente ligados con zonas donde aparecen lineamientos relacionados con y con algunos de los rasgos geomorfológicos “mayores”. En este caso la zona sur es la más representativa y está relacionada con la zona topográficamente más elevada que a su vez está limitada al oriente por la Falla Ticul. (Figura 86).

De acuerdo con la clasificación realizada, se obtuvieron cinco valores representados por el grado de fracturamiento muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto otorgándoles a su vez valores arbitrarios para su empleo dentro del proceso de análisis jerárquico (Tabla 49).

Tabla 49. Clasificación del Grado de Fracturamiento.

GRADO DE FRACTURAMIENTO	VALOR OTORGADO
Muy Alto	10
Alto	8
Medio	6
Bajo	4
Muy Bajo	1

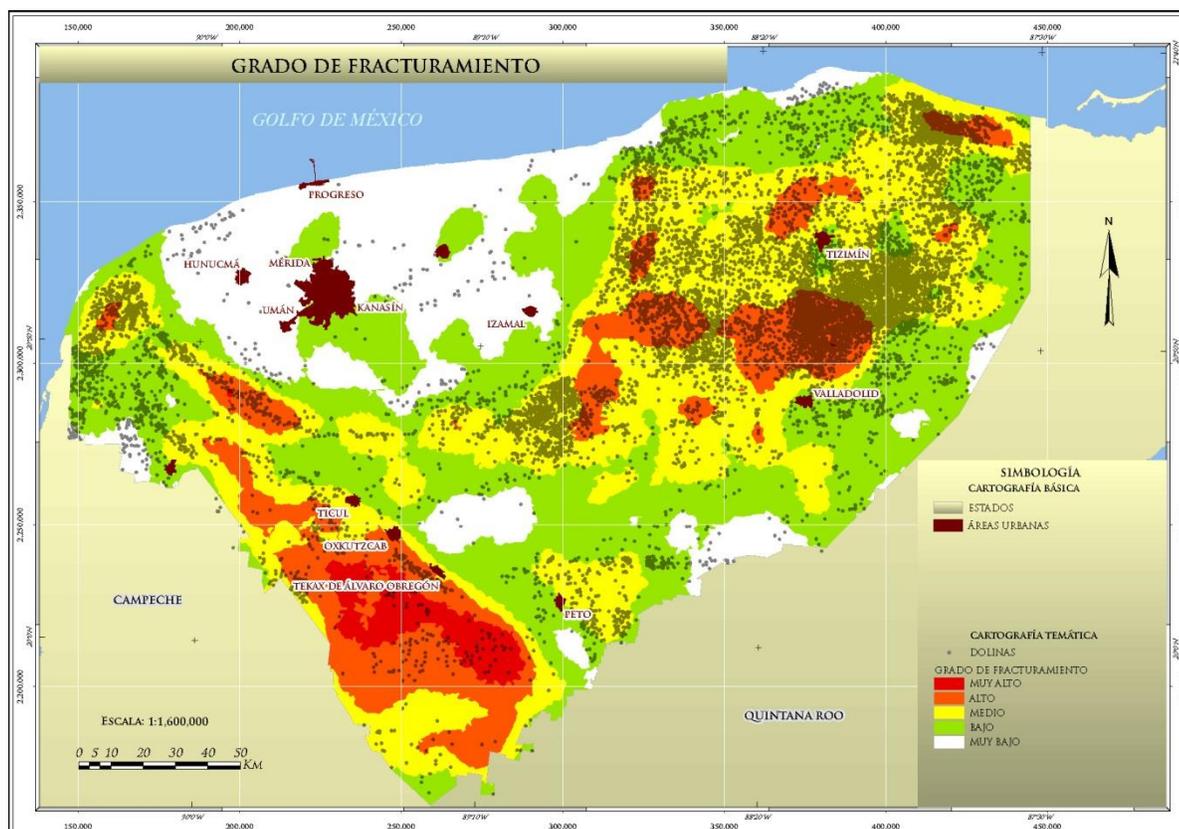


Figura 86. Relación entre grado de fracturamiento y densidad de dolinas.

Densidad de dolinas.

El término Densidad de dolinas, se refiere a la capa de información que utiliza una base de datos de las dolinas presentes en el territorio del Estado. Esta capa de información integra el registro incompleto de aproximadamente 9560 dolinas de las cuales 7240 fueron determinadas a partir de la cartografía de INEGI (cartas topográficas escala 1:50,000), Cartas Geológico-Estructurales del SGM (escala 1:250,000), además de interpretaciones con la ayuda de imágenes Google; en este caso la escala más adecuada fue 1:20,000 donde se lograron observar dolinas superiores a 35 m de diámetro. Complementan el registro 2320 estructuras que fueron integradas a partir de datos de SEDUMA-CINVESTAV (inédito).

Es importante señalar que no se considera el diámetro de las dolinas, solamente se considera un punto el cual representa su ubicación (Figura 60). Cabe mencionar que no se considera las estructuras kársticas de desarrollo horizontal en el subsuelo (cavernas) debido a que no se cuenta con este registro.

Se toma como parámetro principal el número de cavidades cercanas a la superficie y la posibilidad de migración de la cubierta hacia el interior. Considerando que la densidad de dolinas superficiales es un índice de la presencia de cavidades en el subsuelo (Ogden y Reger, 1977; Brook y Allison, 1984) es posible utilizar este parámetro como representativo de susceptibilidad a hundimientos. Ogden y Reger (1977), a partir de estudios morfométricos, determinaron en algunas localidades en el oeste de Virginia en los Estados Unidos de América, que rocas calcáreas cavernosas, muestran la mayor cantidad de dolinas, estableciendo además que el porcentaje de calizas con dolinas y densidad de dolinas, fueron indicadores útiles para determinar áreas de potencial subsidencia.

Por otro lado, Ford (1964), demostró que la formación de una dolina (madre) tiende a generar condiciones sub-superficiales que conducen a la formación de otras dolinas (hijas) en la misma área. En este sentido las estructuras funcionan además como zonas o conductos con gran susceptibilidad de colapso.

Para la generación del mapa de densidad de dolinas, se estableció una red que cubre en su totalidad el Estado, dicha red consiste de 2589 celdas de 16 Km² (4x4 Km). Estas dimensiones se establecieron de acuerdo con la mejor representación gráfica obtenida. De acuerdo con lo anterior se obtuvieron cinco clases, las cuales corresponden a Grado Muy Alto, Alto, Medio, Bajo y Muy Bajo que representan la cantidad de estructuras por unidad de área (Tabla 50).

Tabla 50. Clasificación del grado de densidad de dolinas.

GRADO	CLASES	VALOR
Muy Alto	9-45	10
Alto	7-8	6
Medio	5-6	3
Bajo	3-4	2
Muy Bajo	1-2	1

Los valores considerados, son arbitrarios y pretende reflejar el comportamiento de la distribución y densidad de dolinas en el territorio.

De acuerdo con el resultado del análisis, se determinó que la mayor concentración de dolinas se ubica en la parte noreste del territorio del Estado (Figura 87) principalmente en el área de los municipios de Calotmul, Temozón, Sucilá, Espita y Tizimín, donde puede llegar a presentarse hasta 15 dolinas por kilómetro cuadrado. Por otro lado, la concentración de dolinas del centro y algunas zonas de pequeñas dimensiones en el noroeste se relacionan con el anillo de cenotes Chicxulub. Existen otras zonas distribuidas en el sur de la entidad, aparentemente asociadas con la Falla Ticul. La zona con relativamente menor concentración de dolinas aparece en el norte del Estado, distribuido en la parte central del anillo de cenotes de Chicxulub el cual funciona como límite geográfico con las demás zonas.

Es importante señalar que no se observa concentración importante de dolinas en la zona de la Sierrita de Ticul (este y sur del Estado) debido a que en esta área el desarrollo de las estructuras kársticas aparentemente presentan una mayor evolución asociada con la edad de las rocas y morfología del terreno, respecto del resto del territorio. Se considera que las principales estructuras kársticas presentes en esta zona corresponden con poljes, úvalas y dolinas de mayor dimensión. Por tanto un punto en esta zona puede representar a un polje el cual tiene una gran extensión territorial.

Los valores y grados obtenidos, están en función de la gran cantidad de estructuras en un área relativamente pequeña, esto hace que la mayor concentración de datos se restrinja al valor alto a muy alto. Esta clasificación aunque parece "incongruente" es representativa de la situación en términos de distribución de dolinas, como se logra observar en mapa respectivo.

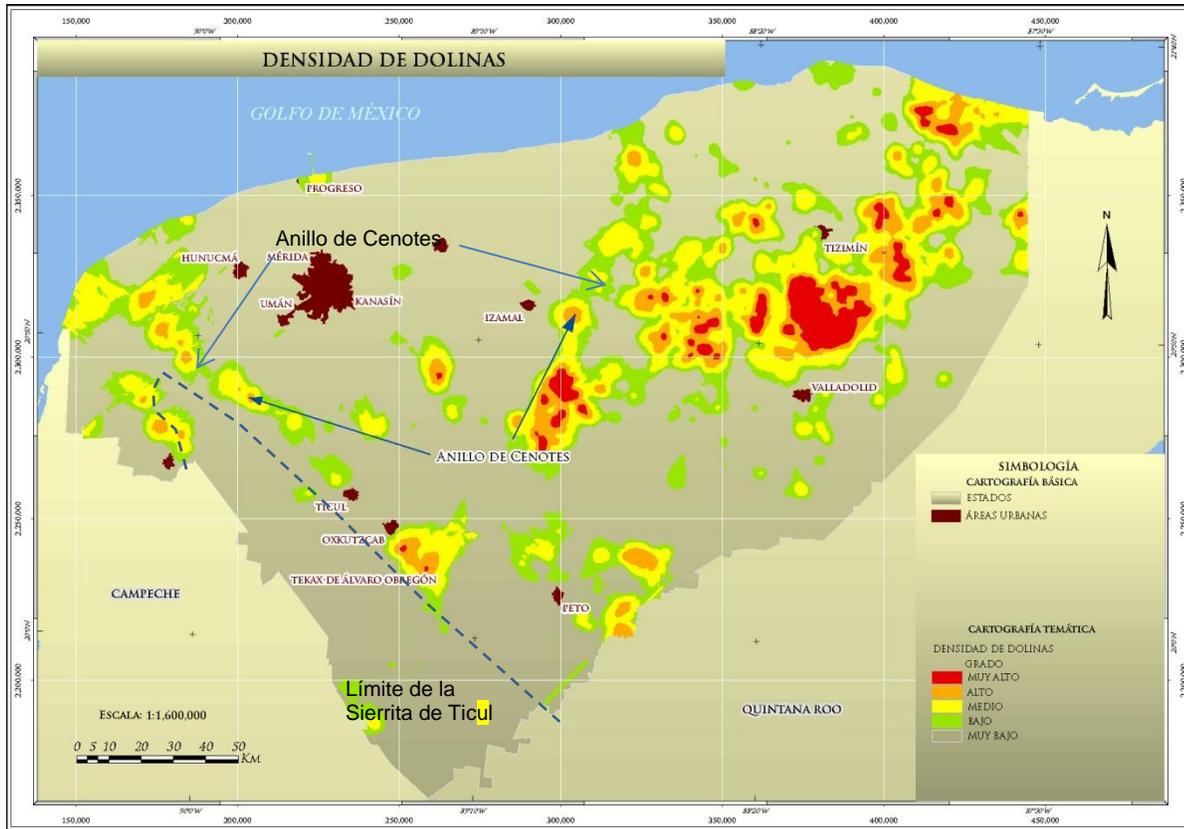


Figura 87. Mapa de densidad de dolinas.

Hidrogeoquímica

Como parte de las capas de información empleadas en el desarrollo del mapa de susceptibilidad, se generó el mapa de susceptibilidad a procesos de disolución a partir de modelos hidrogeoquímicos, realizados por la Subgerencia de Modelado de Cuencas del SGM, con el objetivo de llevar a cabo una caracterización para conocer los procesos de disolución de rocas calcáreas en el territorio del Estado.

Para el análisis hidrogeoquímico se tomaron 160 muestras de agua durante el periodo de septiembre a octubre de 2012, de estas, 19 corresponden a cenotes, 13 norias y 128 pozos, cuya distribución se observa en la Figura 88.

Los sitios muestreados fueron seleccionados en función de los siguientes puntos:

- Buen cubrimiento geográfico
- Muestreo de diferentes tipos de aprovechamientos
- Muestreo de diferentes profundidades de nivel estático
- Cubrir zonas de recarga y descarga del sistema acuífero
- Cubrimiento de varias unidades litológicas

Para el muestreo de agua se siguió rigurosamente el protocolo de muestreo de agua subterránea del Servicio Geológico Mexicano, el cual está basado en los requerimientos de los Centros Experimentales del propio SGM y en la Guía de Muestreo de Aguas Subterráneas y el Manual del Equipamiento de Pozos de Monitoreo (CNA, 1999).

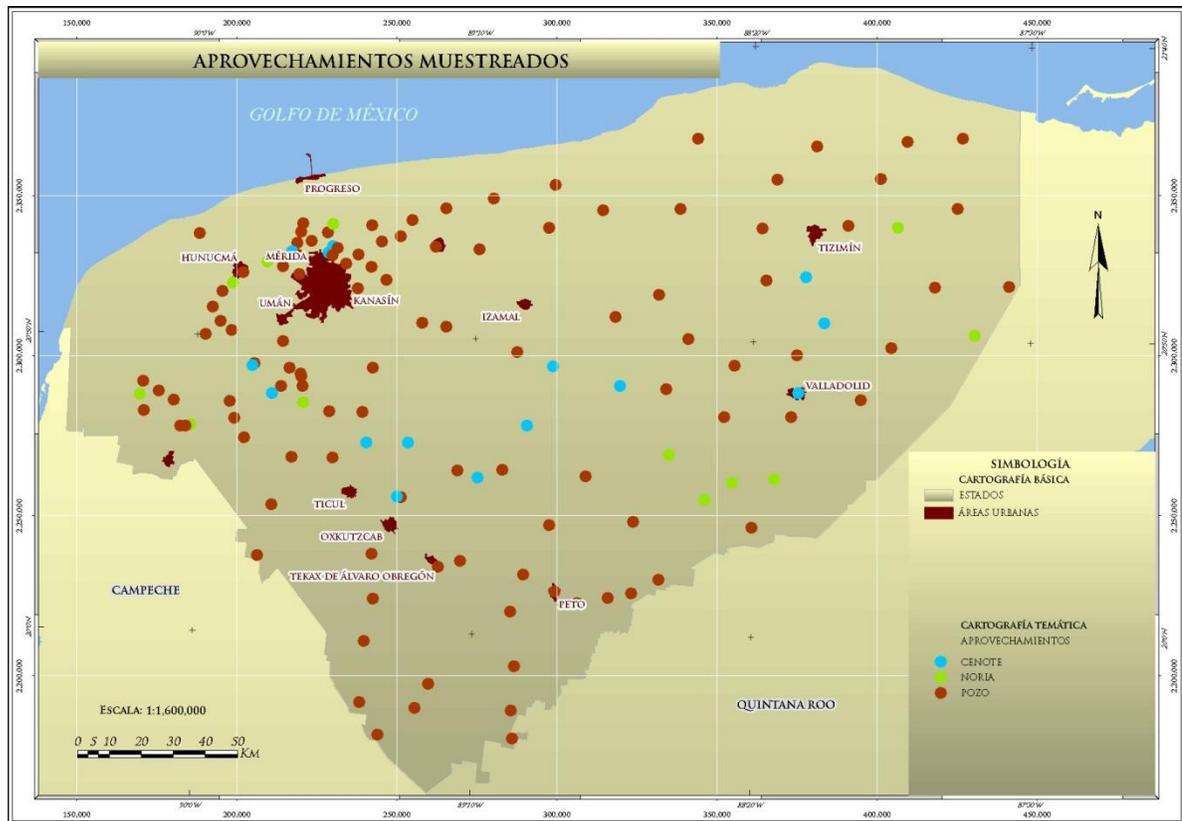


Figura 88. Mapa de aprovechamientos muestreados.

Para el propósito del presente estudio los parámetros considerados para el análisis del agua fueron: potencial de hidrógeno (pH), potencial de óxido reducción (Eh), conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), salinidad, oxígeno disuelto (OD), temperatura del agua, determinación de carbonatos y bicarbonatos. Por otra parte se utilizaron los aniones y cationes para la determinación de la agresividad del agua. Para ello, en el Centro Experimental Oaxaca del Servicio Geológico Mexicano fueron determinadas las concentraciones de Cloruros, Nitratos, Sulfatos, Plata, Aluminio, Arsénico, Bario, Berilio, Bismuto, Boro, Calcio, Cadmio, Cobalto, Cromo, Cobre, Hierro, Litio, Magnesio, Manganeseo, Mercurio, Molibdeno, Oro, Sodio, Níquel, Fósforo, Plomo, Antimonio, Escandio, Selenio, Sílice, Estaño, Estroncio, Telurio, Titanio, Uranio, Vanadio, Wolframio y Zinc.

Clasificación del agua.

Con los datos químicos del agua, se llevó a cabo la clasificación de la misma a partir de diagramas de Piper, en el cual se incluyen aniones y cationes en forma simultánea. Este gráfico permite representar muchos análisis sin dar origen a confusiones y las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas (Custodio, 1965).

En la Figura 89 se observa un diagrama tipo Piper (elaborado con AquaChem 5.1) en el cual se grafican los resultados del muestreo durante el presente estudio. En general destacan cuatro tipo de familias de agua: a). Bicarbonatada Cálctica (con una componente menor de tipo magnésica), b). Sulfatadas Cálctica (con componentes menores de tipo clorurada y magnésica), c). Clorurada Sódica (con una componente menor sulfatada) y d). Bicarbonatada Sódica.

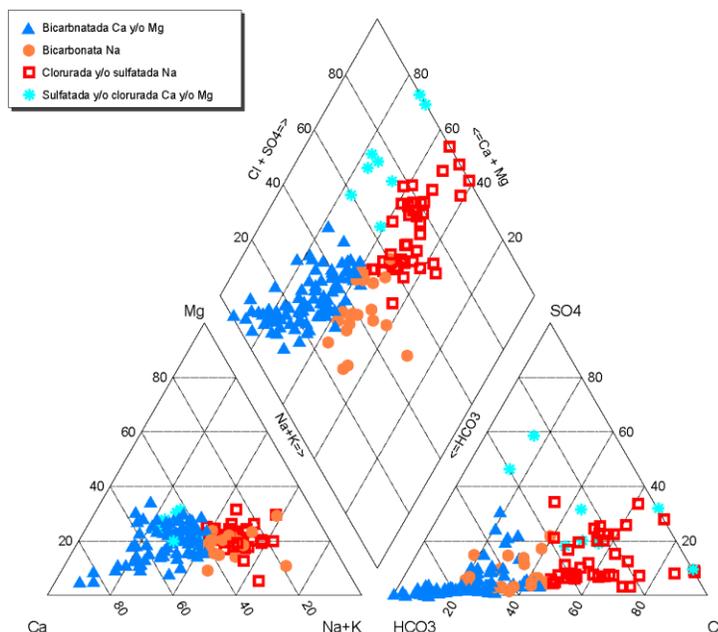


Figura 89. Diagrama de Piper.

A través de un diagrama tipo Piper es posible clasificar las componentes principales del agua en función del tipo de aprovechamiento hidráulico muestreado, es decir, definir si las norias, cenotes y pozos muestreados tienen un comportamiento particular con respecto a las concentraciones de sus iones mayores.

En la Figura 90 se observa un diagrama tipo Piper con la ubicación de las muestras tomadas en función del tipo de aprovechamiento muestreado, en este se observa que no existe una tendencia en la clasificación del agua entre pozos, norias y cenotes.

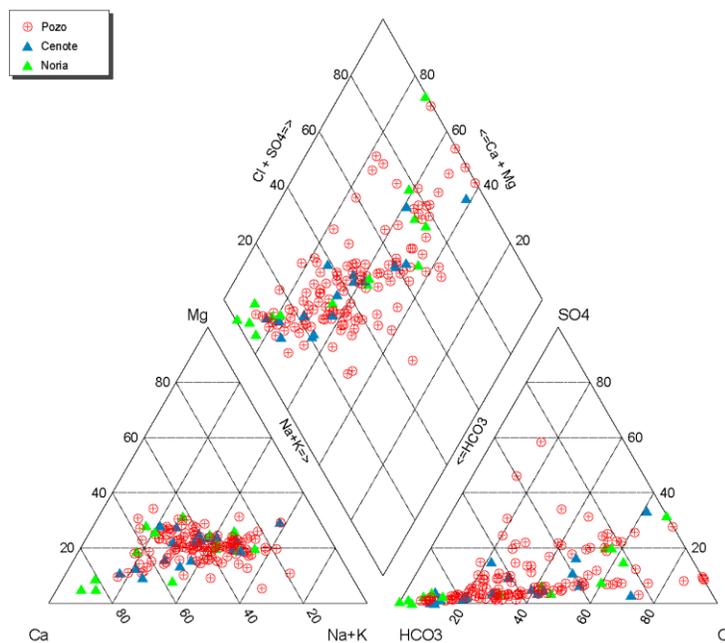


Figura 90. Diagrama de Piper en función del tipo de aprovechamiento muestreado.

Una vez establecida la clasificación general del agua para los aprovechamientos muestreados, es importante conocer su distribución superficial, de esta manera es factible relacionar la distribución y concentración de iones mayores en el agua con el comportamiento hidráulico del sistema acuífero.

En la Figura 91 se observa cada uno de los aprovechamientos muestreados y su clasificación o familia de agua, mientras que en la Figura 92 se observa un zoneamiento superficial con los tipos predominantes de familias de agua.

De acuerdo a la clasificación general de familias de agua y su distribución, en el estado de Yucatán predomina el tipo de agua Bicarbonatada Cálctica con una componente Magnésica. Su distribución se concentra en prácticamente todo el Estado, con excepción de los extremos sur, noreste y noroeste.

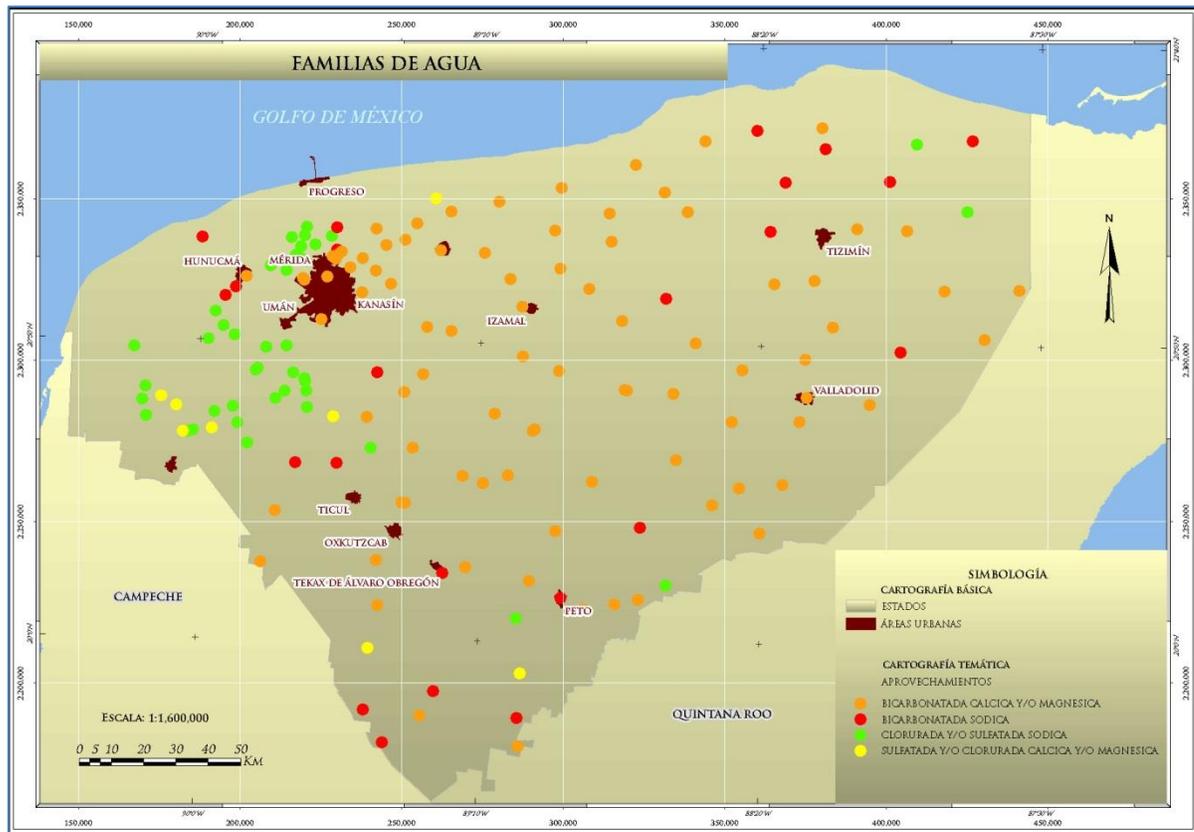


Figura 91. Ubicación de muestras tomadas y su clasificación general de familias de agua.

La familia de agua Bicarbonatada Cálctica con una componente secundaria de tipo Magnésica está relacionada a agua de reciente infiltración, misma que ha circulado por un medio calcáreo (calizas, dolomías, yeso). La distribución de esta familia de agua está relacionadas a posibles zonas de recarga natural del sistema acuífero, además de representar regiones con baja salinidad.

El estado de Yucatán carece de zonas montañosas importantes, de tal forma que la recarga al sistema acuífero se lleva a cabo en zonas dispersas, principalmente por medio de infiltración vertical de agua de lluvia.

La familia de agua Sulfatada Cálctica con una componente secundaria de tipo Clorurada Magnésica se localiza en dos pequeñas zonas al sur y extremo poniente del estado de Yucatán. Se trata de agua subterránea con un moderado tiempo de residencia en el acuífero, de igual forma es probable que su circulación esté relacionada a un medio geológico con presencia de depósitos de yeso.

La familia de agua Clorurada Sódica con una componente secundaria de tipo sulfatada se localiza principalmente al noroeste del estado de Yucatán, de igual forma, aunque con una distribución menor, se localiza al sur y extremo noreste del Estado. Esta familia de agua está relacionada con agua de un tiempo mayor de residencia en el sistema acuífero, su presencia puede representar zonas de mezcla de agua dulce y agua marina, asimismo, altas concentraciones de sal en el agua subterránea, en este caso asociada a agua que circula a una mayor profundidad.

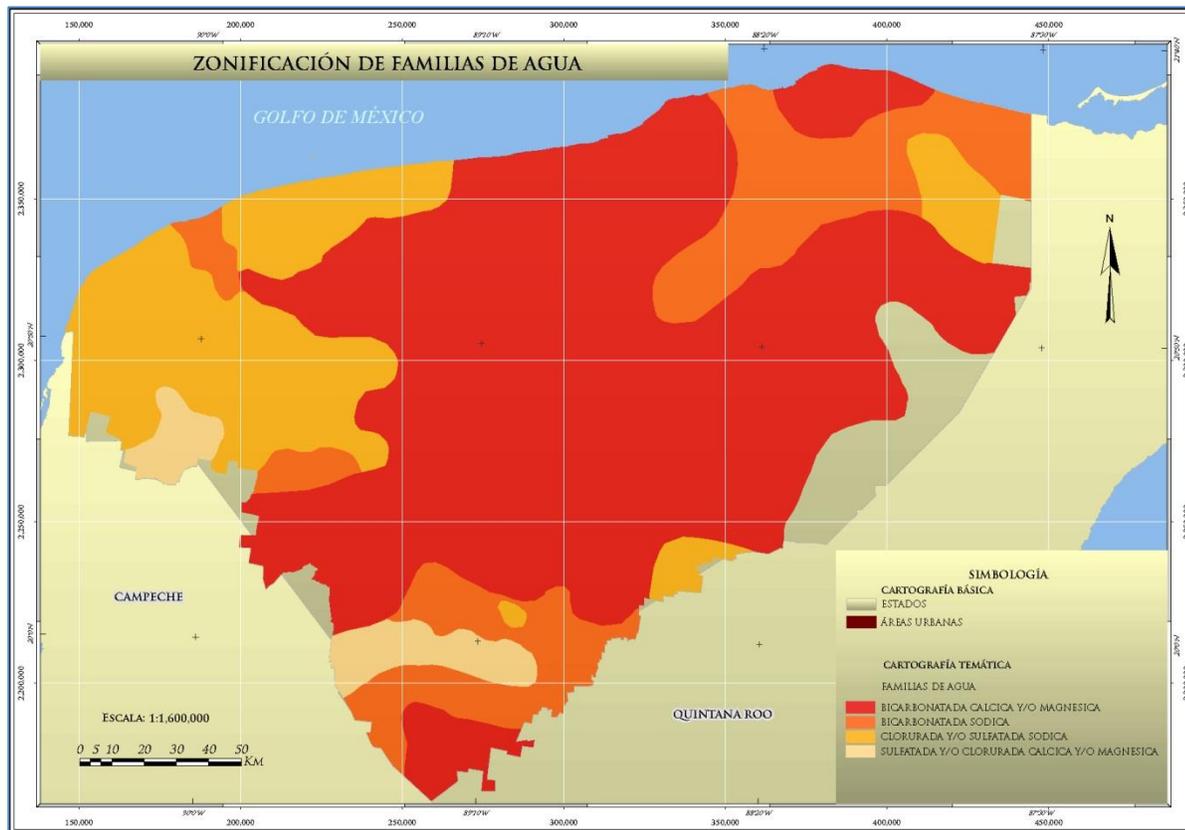


Figura 92. Zonificación en función de la clasificación general de familias de agua.

La familia Bicarbonatada Sódica, cuya distribución principal es al sur y noreste del estado de Yucatán (Figura 92), refleja una mezcla de agua, por un lado agua de reciente infiltración que preserva la firma bicarbonatada, por otro lado la abundancia de sodio en el agua respecto de los iones mayores calcio y magnesio, reflejan una importante y continua interacción iónica entre el agua y materiales como el yeso, la anhidrita o la halita, además de un tiempo de residencia considerable para dicha interacción. Una vez establecidas las zonas donde predomina actualmente el proceso de disolución de calizas, mismo que se muestra en las siguientes páginas de este informe, se establece que no existe una relación directa entre la familia de agua y la zona donde actúan aguas de tipo “agresivas”.

Algunos autores como como la SARH (1988 en Pacheco-Ávila y colaboradores 2004) exponen la presencia de agua tipo cálcica-magnésica/bicarbonatada en la mayor parte del estado de Yucatán misma. Por otro lado, en prácticamente toda la línea de costa del estado de Yucatán se hace referencia a familias de agua Cloruradas Sódicas a su vez relacionadas a agua de regular calidad, asimismo se marcan dos zonas con agua mixta al norte y extremo noroeste de Yucatán. Por otro lado, Pacheco-Ávila *et al.* (2004), señalan que las familias cálcicas-bicarbonatadas /sódicas-cloruradas son las de mayor distribución en el territorio del Estado, predominando las primeras presentes desde el este al centro y las segundas distribuidas en la costa noreste y en la zona de la Sierrita de Ticul así como en el extremo noroeste del territorio. De acuerdo con lo anterior, de manera general existe una correlación de los resultados obtenidos en el presente estudio con las distribuciones señaladas en los estudios anteriormente citados.

Para comprender el fenómeno de disolución en rocas calcáreas es importante considerar que las calizas se erosionan dejando pocos residuos de alteración debido a que la erosión se lleva a cabo precisamente por el fenómeno de la disolución. Para esto el agua de lluvia penetra a favor de las diaclasas hasta alcanzar una capa de permeabilidad baja o muy baja, posteriormente el flujo tiende a la horizontal en forma de corriente de agua subterránea. En este proceso de tránsito del agua por los materiales calcáreos, la acción erosiva del agua estará en función del contenido anhídrico carbónico en el agua. El principal constituyente de las calizas es el carbonato de calcio (CaCO_3), el cual es poco soluble en el agua, sin embargo, gracias a la presencia de gas carbónico en solución (CO_2), y debido al efecto del ácido carbónico (H_2CO_3), el carbonato se disuelve dando lugar a bicarbonato de calcio $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, el cual se transporta fácilmente por las aguas circulantes.

Los fenómenos de disolución o precipitación de calcita están en función de la saturación del material calcáreo, de esta forma un medio acuoso al tener condiciones saturadas de calcita resulta ya incapaz de seguir disolviendo, resultando un tipo de agua poco agresiva. Al existir condiciones de sobresaturación de calcita se presentan condiciones para la precipitación de la misma calcita, es entonces que un agua agresiva es capaz de disolver calcita y generar el fenómeno de disolución.

Con la finalidad de cartografiar las zonas donde actualmente se llevan a cabo procesos de disolución en calizas en el estado de Yucatán, a continuación se presentan tres metodologías contempladas: Diagrama Tillman-Trombe, Índice de Ryznar e Índice de saturación. Posteriormente y producto de la integración de los tres métodos, fue elaborado un mapa que muestra diferentes zonas del estado de Yucatán y su diferente grado de susceptibilidad al fenómeno de disolución.

Diagrama Tillman-Trombe

El diagrama de Tillman-Trombe ha sido ampliamente utilizado por la literatura para estimar el grado de agresividad del agua respecto a la calcita. Autores como Fagundo y Álvarez (1997), aseguran que es una herramienta útil para caracterizar aguas kársticas. El método se basa en la denominada agresividad potencial, la cual consiste en determinar la posibilidad que tiene un agua en un momento dado pueda disolver carbonatos. Se trata de un diagrama pH contra dureza (Figura 93), en el cual se define el comportamiento del agua en función de su agresividad, considerando alta, moderada y baja, a partir del cual es posible establecer zonas donde existen condiciones de agresividad alta y asociarla a ocurrencia de disolución de calcita (Figura 94).

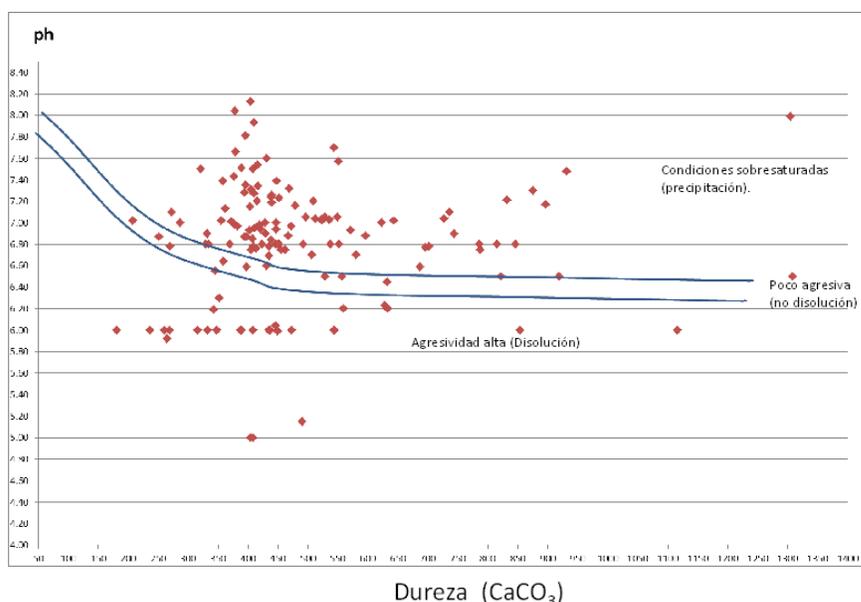


Figura 93. Diagrama Tillman-Trombe.

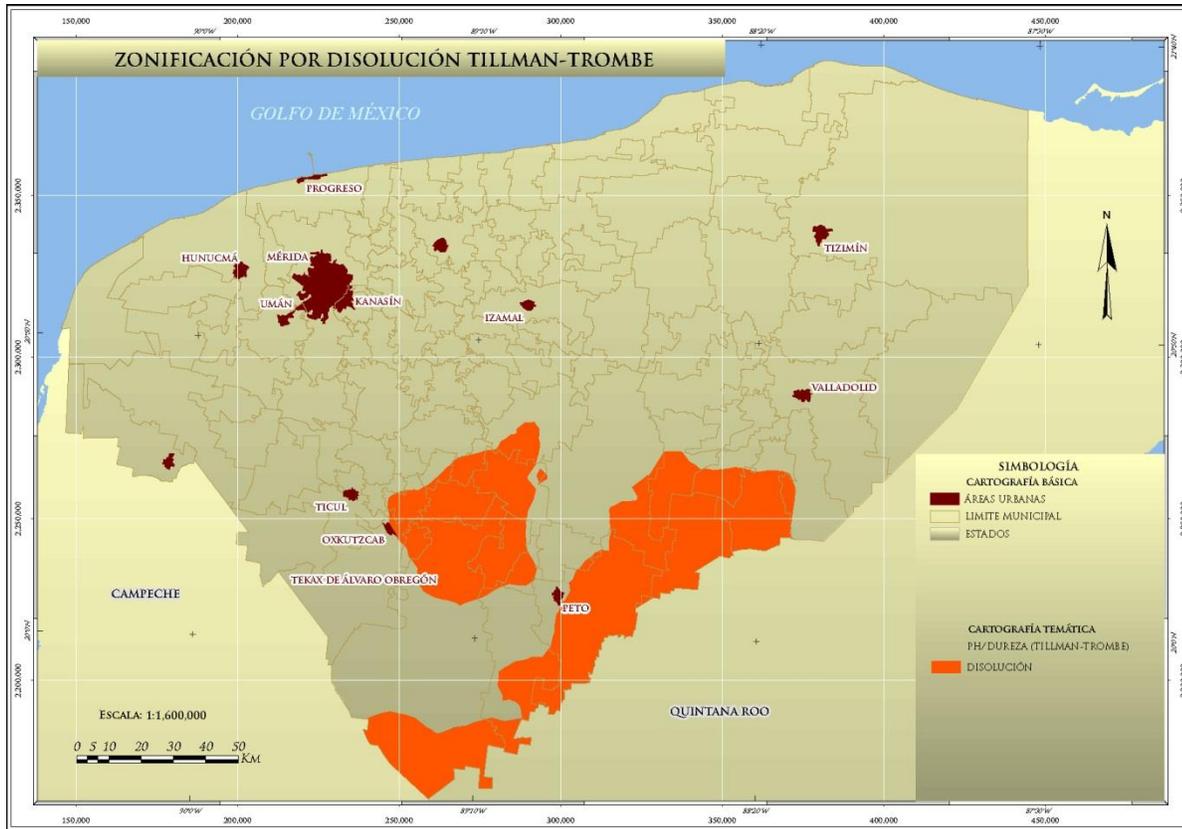


Figura 94. Mapa de agresividad química del agua en función de Ph vs. Dureza (Diagrama Tillman-Trombe).

Índice de Ryznar

Esta índice se utiliza como una medida cuantitativa de la tendencia general del agua a depositar (incrustación) o disolver CaCO_3 (corrosión). Su cálculo considera los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica, calcio, carbonatos, bicarbonatos, factor de sólidos totales disueltos y temperatura. Para su cálculo se consideró la siguiente fórmula:

$$\text{RSI} = 2\text{pH}_s - \text{pH} \text{ (medido).}$$

Donde RSI es el Índice de Ryznar.

pH corresponde al valor de potencial de hidrógeno medido en campo.

pH_s corresponde al cálculo del pH de saturación del carbonato de calcio, el cual se obtiene de la siguiente forma:

$$\text{pH}_s = (\text{pK}_2 - \text{pK}_s) + \text{pCa} + \text{pT}_{\text{AC}}$$

Siendo:

pK_2 el logaritmo negativo de la constante de la segunda disociación del ácido carbónico.

pK_s el logaritmo negativo de la constante del producto de la solubilidad.

pCa el logaritmo negativo de la concentración de calcio.

pT_{AC} el logaritmo negativo de la alcalinidad.

Los resultados para el cálculo del Índice de Ryznar se manejan de acuerdo a los parámetros mostrados en la Tabla 51.

Tabla 51. Índice de Ryznar y categoría de las aguas muestreadas respecto de su agresividad química.

INDICE DE RYZNAR	CONDICIÓN
2.5	Extremadamente incrustante
4	Muy incrustante
5.5	Incrustante
6.5	Ligeramente incrustante
7	Agua estable
8	Ligeramente agresiva
9	Agresiva
10.5	Fuertemente agresiva
12	Muy fuertemente agresiva

En función de lo anterior, se aplicó el Índice Ryznar a las muestras consideradas en este estudio, dando como resultado la Figura 95, en la cual aparecen zonas relacionadas con disolución (rojo) que se concentra principalmente en la zona centro-sur y sur del estado de Yucatán, asimismo, zonas que corresponden a un comportamiento relacionado posiblemente con precipitación de carbonatos en el resto del territorio.

En función de los resultados arrojados por Índice Ryznar, fue posible generar el segundo nivel de información en este tema, que a su vez se utilizó como un insumo para la elaboración del mapa de susceptibilidad a hundimientos asociados a fenómenos de disolución.

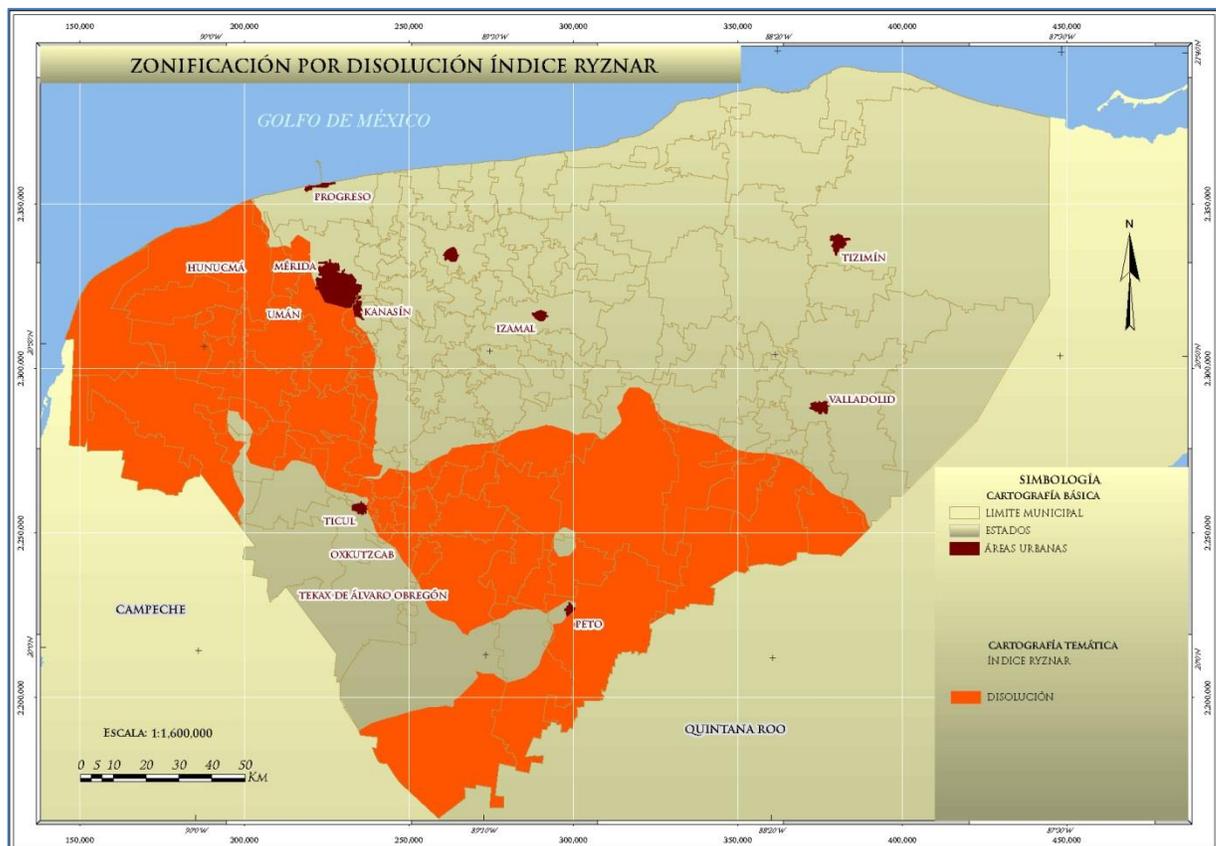


Figura 95. Zonas de disolución establecidas a través del Índice Ryznar.

Índice de Saturación

El índice de saturación proporciona un indicador confiable del grado de saturación del agua con respecto al carbonato de calcio (CaCO_3). Se interpreta como el cambio requerido de pH para llevar el agua a su estado de equilibrio, por ejemplo: el agua con un índice de saturación de 1 es un agua cuyo pH de saturación se encuentra una unidad de pH por encima de su pH de equilibrio, es decir, la reducción de pH en una unidad ocasionaría que el agua llegase a su condición de equilibrio y por lo tanto no sería corrosiva ni incrustante.

Básicamente el índice de saturación marca la tendencia a la precipitación o disolución del CaCO_3 , definiendo si el agua está sobresaturada, saturada o subsaturada. Este método utiliza variables como pH, conductividad eléctrica, calcio, bicarbonatos, factor para el cálculo de Sólidos Totales disueltos y temperatura. Su cálculo es similar al Índice Ryznar, sólo que en este caso se considera sólo en una ocasión el cálculo de pH de saturación del carbonato de calcio. De acuerdo con lo anterior se establecieron valores menor, igual o mayor que cero a las condiciones de disolución, equilibrio y precipitación respectivamente (Tabla 52).

Tabla 52. Índice de saturación y condición de agresividad química del agua

ÍNDICE DE SATURACIÓN	CONDICIÓN
<0	Disolución
0	Equilibrio
>0	Precipitación

En función de los resultados arrojados por Índice de Saturación fue posible generar el tercer nivel de información que a su vez se utilizó como un insumo para la elaboración del mapa de susceptibilidad a hundimientos asociados a fenómenos de disolución. En la Figura 96 se observa el zoneamiento relacionado con aguas agresivas y generadoras del proceso de disolución en calizas, mismo que se concentra principalmente en la zona centro-sur, noroeste y sur del estado de Yucatán.

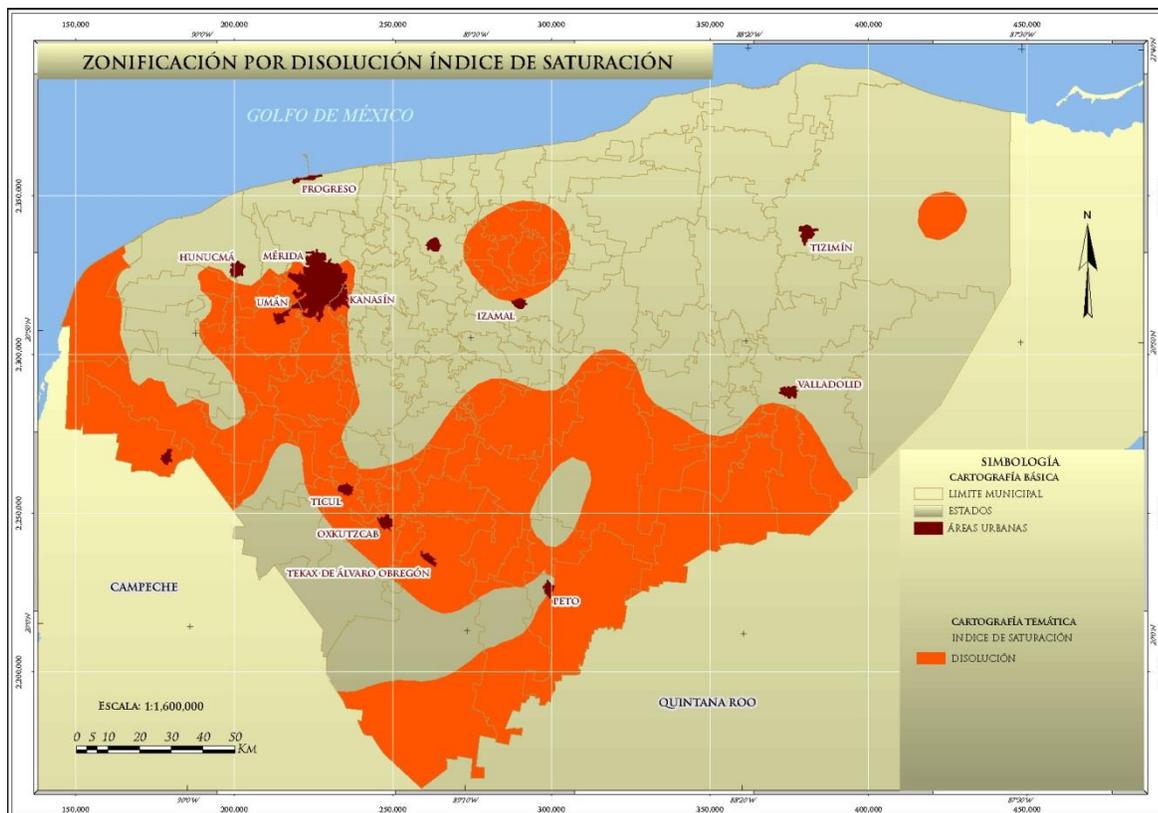


Figura 96. Ubicación de muestras de agua y su condición con respecto al índice de saturación.

Una vez consideradas las tres metodologías para establecer las zonas donde actualmente se llevan a cabo procesos de disolución en calizas (Ryzar, Tillman-Trombe e Índice de Saturación), mediante su integración (Figuras 94,95 y 96), se elaboró el mapa de susceptibilidad a hundimientos por efectos de la disolución (Figura 97) bajo los siguientes criterios:

- **Susceptibilidad muy alta.** Zonas donde confluyen áreas determinadas como de disolución considerando los tres métodos utilizados.
- **Susceptibilidad alta.** Zonas donde confluyen dos áreas a partir de los tres métodos empleados.
- **Susceptibilidad media.** Zonas donde existen áreas correspondientes a sólo un método.
- **Susceptibilidad baja.** Zona donde actualmente no actúan procesos de disolución.

Derivado de estas consideraciones es posible concluir que en el estado de Yucatán actúan procesos de disolución de calizas, particularmente en la zona centro-sur, sur, y noroeste. Estos procesos predominan en materiales calcáreos de edad Eoceno, caso particular de la Formación Chichén Itzá, que a su vez se caracteriza por la presencia calizas tipo grainstone y wackestone, brechas calcáreas y horizontes de margas. Es importante establecer que los resultados sugieren actividad de disolución actual, es decir, que aunque las áreas desde el punto de vista de tiempo geológico con gran desarrollo kárstico como lo son el anillo de cenotes y la parte Este del territorio del Estado no estén directamente relacionadas con la zonificación aquí mostrada no necesariamente quedan fuera de las áreas de gran susceptibilidad a hundimientos debido a que se tienen que considerar otros factores. Sin embargo esta capa de información es muy útil debido a que establece un marco donde las condiciones son favorables para la karsticidad y posible aceleración en tiempos relativamente “cortos”. Es importante comentar además, que de acuerdo con reportes periodísticos es en la parte sur del Estado donde se han tenido casos de colapsos aislados del terreno además de la zona urbana de la ciudad de Mérida.

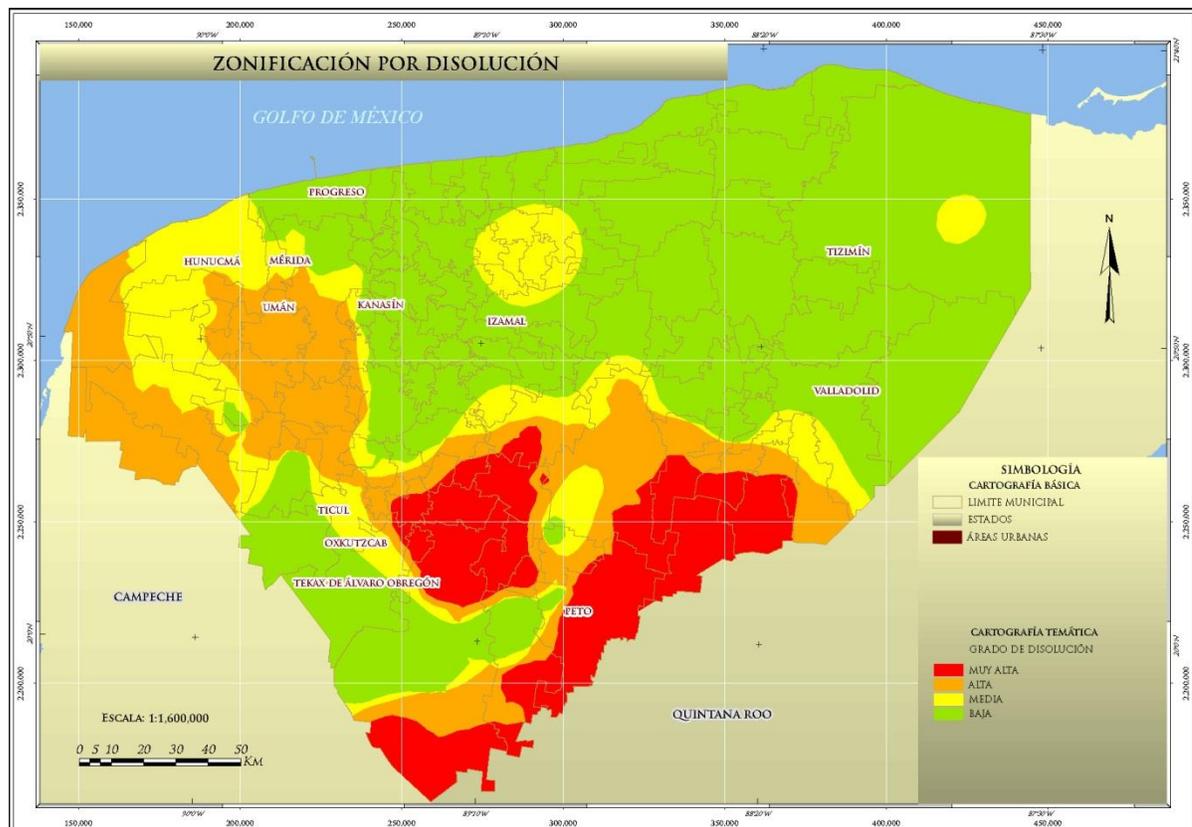


Figura 97. Mapa de susceptibilidad a hundimiento por disolución de rocas carbonatadas.

Con base a los resultados obtenidos se establecieron los parámetros (Tabla 53) que serán incluidos en el análisis para determinar la susceptibilidad a hundimientos. Los valores otorgados a los grados de disolución son arbitrarios.

Tabla 53. Grado de disolución y valores otorgados.

DISOLUCIÓN	VALOR OTORGADO
Muy Alta	10
Alta	8
Media	6
Baja	0

Los mecanismos de formación de estos conductos son corrosión del agua dulce con el agua salada y reacciones mediadas por bacterias; este anillo de cenotes controla el flujo del agua subterránea en el noroeste de la Península de Yucatán (Marín-Stillman, *et al.*, 2005). Debido a la relativa estabilidad de la plataforma kárstica, la península contiene muy pocas superficies o sistemas de drenaje y lagos; haciéndola altamente vulnerable a la dinámica de la espeleogénesis (Coke, 2012).

Es importante mencionar que la configuración de las zonas de disolución aparentemente tiene una relación con la estructura geológica especialmente con la Falla Ticul y su intersección con el anillo de cenotes en la parte noroeste y el límite del acuífero en la costa. La concentración de disolución en esta zona, puede relacionarse con la Falla Ticul que en este caso puede funcionar como frontera hidrogeológica o como condicionante del flujo regional del agua subterránea como lo menciona

Relación del suelo con hundimientos

De acuerdo con Witthunh y Calvin (1995), en estudios realizados en el Condado de Fillmore en Minnesota, EUA, zonas con suelos relativamente delgados se consideran áreas de recarga hacia el acuífero kárstico; con lo anterior se establece que son zonas donde el agua de lluvia puede circular libremente e infiltrarse del mismo modo hacia el acuífero y poniéndose en contacto con las rocas del entorno. Por otro lado Wu y colaboradores (2010) en estudios realizados en la Ciudad de Wuhan, señalan que áreas con espesor de suelo relativamente delgado, son zonas propensas para que suceda el colapso de los techos de estructuras. Estas observaciones se han realizado en casos geológicos y fisiográficos totalmente distintos a las que prevalecen en el territorio del estado de Yucatán, no así el marco de interacción agua-suelo-roca. Por una parte, de acuerdo con las observaciones de campo, de manera general se constató el poco espesor de suelo el cual llega a tener poco más de 1 m principalmente en el sur de la Entidad. Una observación muy importante sobre todo en los taludes de las carreteras en la Sierrita de Ticul, es que existen huecos producto de la disolución de la roca, totalmente rellenos por material edáfico. Por otro lado, se ha observado con base en la distribución de dolinas (cenotes) y densidad de fracturamiento una estrecha relación con suelos de poco espesor. Lo anterior puede explicar en parte la relativa carencia del recurso edáfico en zonas con gran cantidad de karst y por otro lado la ausencia de suelo puede hasta cierto grado contribuir acelerando la generación de colapsos.

Como se ha observado, existe un desequilibrio suelo-densidad de dolinas donde la interrelación de las capas de información puede depender una respecto de la otra. Es importante señalar que el espesor de suelo puede estar condicionado de acuerdo a las características actuales del relieve kárstico de Yucatán. Sin embargo se debe considerar que la configuración actual del espesor de suelo tiene impuesta la alteración antrópica esto indudablemente cambia la relación directa con los grados de karsticidad.

De acuerdo con lo anterior, se generó la capa de información Espesor de Suelo, la cual se refiere específicamente al espesor de las unidades edáficas predominantes en el territorio del Estado, en este caso no se consideró el tipo de suelo. Esta variable se obtuvo mediante la interpolación de los espesores de suelo, los cuales fueron obtenidos mediante medición en campo (el método y resultados pueden consultarse en el capítulo de susceptibilidad a la erosión hídrica).

A partir del mapa de espesor de suelo, se generó el mapa de susceptibilidad a filtración de agua, que representa las zonas con relativa capacidad de permitir la infiltración de agua de lluvia al subsuelo. En este sentido, los suelos de mayor espesor o profundos son menos propensos a que el agua fluya con mayor libertad en sentido vertical, mientras que los suelos con menor espesor representan el valor de mayor capacidad de infiltración (Figura 98). Cabe mencionar que en la zona de la Sierrita de Ticul se detectaron suelos de gran espesor y con gran cantidad de arcillas y limo, en el resto del territorio los espesores son delgados y normalmente constituidos de fracciones de partículas relativamente más gruesas.

Según la literatura, la interacción agua de lluvia-suelo es un proceso que acentúa la presencia de ácido carbónico, por tanto esta consideración puede tener también un efecto contrario, es decir que la presencia de suelo puede también ser un factor a favor de la disolución, estas consideraciones pueden ser tomadas desde dos puntos de vista, ya sea que mecánicamente la ausencia de suelo puede estar asociada a colapsos, o que hidrogeoquímicamente la presencia de suelo puede aumentar el contenido de ácido carbónico en el agua de lluvia que se infiltra hacia el acuífero.

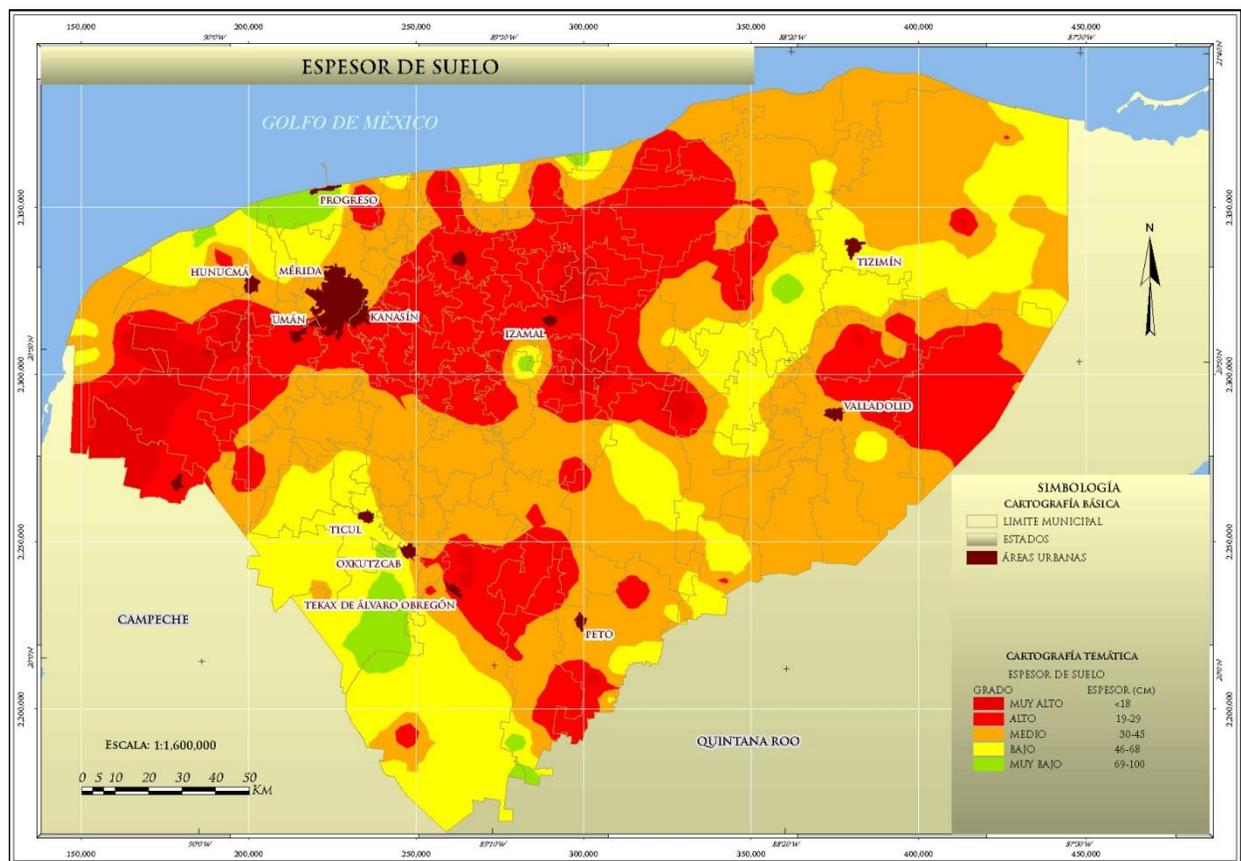


Figura 98. Mapa de espesor de suelos.

Para la elaboración del mapa, se le asignaron valores arbitrarios a los espesores de suelo como se muestra en la Tabla 54. Estos valores fueron empleados dentro del Proceso de Análisis Jerárquico.

Tabla 54. Valores otorgados a los diferentes espesores de suelo distribuidos en el territorio del estado de Yucatán.

GRADO DE FRACTURAMIENTO	ESPESOR (cm)	VALOR OTORGADO
Muy Alto	<29	5
Alto	45-29	4
Medio	68-45	3
Bajo	100-68	2
Muy Bajo	>100	1

VII.3.5. Descripción e Interpretación de Datos Tomados en Campo.

De acuerdo con el análisis, el estado de Yucatán puede dividirse en cuatro zonas principales (Figura 99), determinadas con base a su expresión topográfica, morfología, textura del relieve y relación con lineamientos en el mismo. En este sentido, se tienen las zonas: 1) Planicie Costera, 2) Anillo de Cenotes, 3) Sierrita de Ticul y 4) Peto-Tizimín, las cuales se describen a continuación.

- 1) **Zona Planicie Costera.** Se localiza en el norte del Estado en la zona de la costa, es de morfología relativamente plana con textura relativamente lisa. Aparecen zonas en la parte sur-oriental a manera de depresiones elongadas orientadas al NE-SW, mientras que en la parte norte de la zona, aparece un área relativamente más elevada orientada casi E-W.

- 2) **Zona Anillo de Cenotes.** Área de forma semi-circular caracterizada por la presencia de curvilineamientos generados por depresiones y elevaciones topográficas paralelas entre sí. Algunos de estos lineamientos llegan a medir más de 200 Km de longitud (Lineamiento Mayor, Figura 100), con lineamientos menores paralelos asociados. En conjunto constituyen una franja de aproximadamente 34 Km de ancho, considerada como área de transición entre las zonas Planicie Costera y Tizimín.

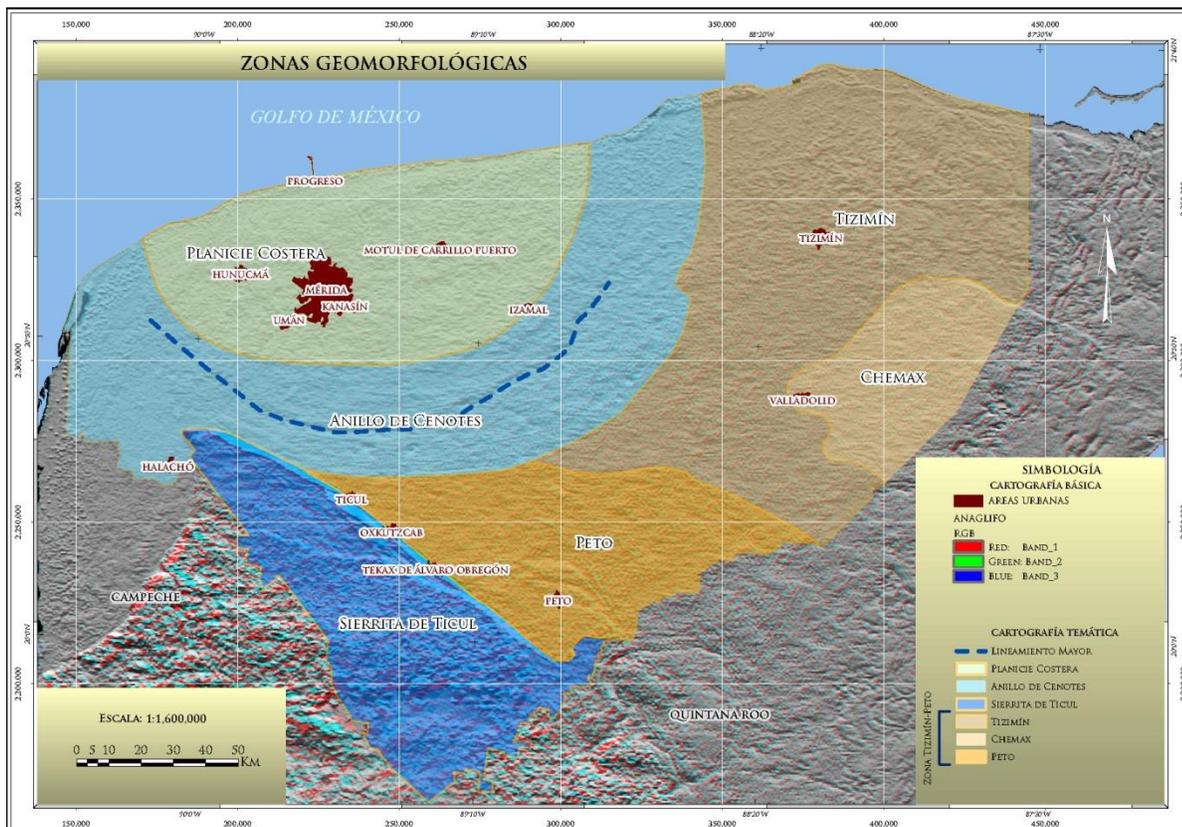


Figura 99. Mapa de zonificación para análisis de información de campo.

- 3) **Zona Sierrita de Ticul.** Esta zona se caracteriza por presentar las mayores elevaciones topográficas en la entidad. Presenta rasgos que hacen suponer evolución kárstica mayor con respecto del resto del territorio. En la parte sur de la zona podemos encontrar depresiones generalmente alargadas orientadas E-W y de gran extensión territorial. Estos rasgos pueden estar relacionados a poljes con extensión hacia los estados de Campeche y Quintana Roo. Es importante comentar que los límites con las demás zonas son abruptos en términos topográficos. La textura del relieve es muy rugosa, presentando variaciones internas

asociadas con depresiones y elevaciones separadas por lineamientos (de rumbo NE-SW) muy marcados, principalmente en la parte norte de la zona.

- 4) **Zona Peto-Tizimín.** Esta zona es la de mayor extensión y se caracteriza por constituir un área de elevación intermedia entre las Sierrita de Ticul y las demás zonas. De acuerdo con lo anterior y a variaciones morfológicas-texturales internas, esta puede subdividirse en tres sub-zonas (Peto, Chemax y Tizimín); en este sentido la sub-zona de Peto se ubica al poniente, es de pocas dimensiones y de forma irregular. Consiste de una ligera depresión respecto de la sub-zona Tizimín, esta última presenta textura rugosa y de relativamente mayor elevación, extendiéndose hacia el NE del Estado. En esta misma porción se asocian algunos lineamientos a manera de depresiones alargadas orientadas NW-SE, paralelas a la zona de costa actual. Por otro lado la sub-zona Chemax representa un área de planicie limitada al NE por un lineamiento orientado NW-SE, en los demás está limitado por zonas de mayor elevación correspondientes a la sub-zona Tizimín, y al SE con el estado de Quintana Roo respectivamente.

Las zonas aquí clasificadas mantienen una correlación con las expresiones morfológicas aparentemente controladas por fallas y fracturas asociadas con desarrollo de deformación neotectónica presente en la Plataforma de Yucatán (Lugo-Hubp, *et al.*, 1992). Por otro lado se cree que el fracturamiento dentro del territorio del estado de Yucatán, posiblemente fue generado por la intrusión de cuerpos diapíricos evaporíticos (López-Ramos, 1975 in Lugo-Hubp, *et al.*, 1992).

En el caso del anillo de cenotes es posible que además su presencia esté condicionada por estructuras previas desarrolladas en el subsuelo, es decir con la paleomorfología del cráter del Chicxulub (Urrutia-Fucugauchi *et al.* 2011). Lo anterior puede confirmarse con la superposición del anáglifo y la configuración de los patrones geofísicos obtenidos a partir de dominios magnéticos representados por altos y bajos magnéticos de forma circular en esta misma zona los que definen el comportamiento del basamento a profundidad (Comunicación Personal Rausel Pascacio-Toledo, SGM 2012).

Cabe mencionar que los datos geofísicos empleados, corresponden con el levantamiento aeromagnético en el sureste de México, proporcionados y recabados por personal de Petróleos Mexicanos, mediante vuelos barométricos a una altura de 450 metros. Esta información fue proporcionada por los directivos de esta empresa al Servicio Geológico Mexicano, los cuales fueron procesados para ser utilizados y completar la Cartografía Geofísica del Territorio Nacional.

Estas cartas fueron editadas por el Servicio Geológico Mexicano, en el periodo 2010-2011 a las cuales fue necesario aplicar correcciones, iniciando con la digitalización de la información mediante cuadrículas a cada 1,000 metros, aplicando posteriormente la corrección del International Geomagnetic Reference Field (IGRF). También fue necesario utilizar en la información de los mapas de este levantamiento la continuación descendente, utilizando la serie de Taylor para convertir la altura de vuelo barométrico a la altura sobre el nivel del terreno a 300 metros (Comunicación personal Pascacio-Toledo *op. cit.*).

Para poder obtener información más completa y confiable, el trabajo de campo se dividió en dos etapas, una por vía aérea y otra terrestre. Con lo que respecta a la vía aérea, se realizó un reconocimiento del territorio del estado de Yucatán con apoyo de un helicóptero EUROCOPTER AS350-B3 durante el mes de Febrero del 2012. Los vuelos se establecieron en función de información obtenida de cartas topográficas escala 1:50,000, del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y de cartas geológico-mineras (escala 1:250,000 y 1:500,000) del Servicio Geológico Mexicano (SGM).

De acuerdo con lo anterior, fueron verificados 50 puntos (Tabla 55; Figura 100), establecidos de acuerdo con la cercanía de estructuras con infraestructura, aspectos geológicos y geomorfológicos. La base de datos completa, fotografías y fichas pueden ser consultadas en el Anexo I y II respectivamente.

Tabla 55. Relación de puntos verificados vía aérea en el tema de hundimientos.

PUNTO	X	Y	OBSERVACIONES
YH01	322647	2361449	Estructuras circulares, con agua en su interior; muestran alineación entre ellas.
YH02	321532	2344545	Cenotes cercanos a carretera que comunica a los poblados de Buctzotz y Sucilá
YH03	332681	2319402	Cenotes al costado oriente de iglesia y sur de edificio en cabecera municipal de Cenotillo.
YH04	341181	2305192	Dolina (cenote) en predio baldío en zona urbana de cabecera municipal de Dzitás.
YH05	329934	2308675	Estructuras en cabecera municipal de Quintana Roo y en áreas conurbadas.
YH06	299698	2295211	Estructuras en cabecera municipal de Holcá y en áreas conurbadas.
YH07	311034	2290445	Cenotes con vegetación en su interior en el poblado de Libre Unión.
YH08	297371	2285641	Cenotes con vegetación en su interior en el poblado de Tibilón.
YH11	262497	2294832	Durante el trayecto hacia este sitio se observaron algunos cenotes.
YH12	249894	2240266	No se observaron dolinas.
YH13	257905	2235053	
YH14	303300	2225908	
YH15	309789	2217001	
YH16	243368	2186290	
YH17	257905	2214435	
YH18	226497	2321937	
YH19	790215	2330974	Zona de cenotes dispersos y algunos alineados con vegetación asociada.
YH20	781400	2321781	Zona de cenotes dispersos y algunos alineados con vegetación asociada.
YH21	800436	2280219	No se observaron dolinas.
YH22	808836	2272437	Estructura en patio de vivienda en el poblado de Chan Chócola.
YH23	812303	2278076	No se observaron dolinas.
YH24	214946	2266430	
YH25	227603	2255866	
YH26	215423	2281378	
YH26A	217138	2281581	Se observó una serie de cenotes de dimensiones variables.
YH27	205387	2287397	
YH28	195813	2292266	
YH29	808548	2300443	
YH30	807115	2304238	
YH31	802201	2306418	
YH32	795524	2312445	
YH33	792446	2319927	
YH34	244941	2277571	Zona con abundantes cenotes, generalmente aprovechados para uso ganadero y agrícola.
YH34A	268366	2262201	Gran concentración de cenotes, algunos alineados y cercanos a la infraestructura.
YH35	394488	2315265	Gran concentración de cenotes, algunos alineados y cercanos a la infraestructura.
YH35A	379373	2287121	En el poblado de Yalcón municipio de Valladolid existe una gran cantidad de cenotes.
YH36	393217	2321102	Zona con gran cantidad de cenotes. Ubicados al norte de Nahbalám en zona despoblada.
YH37	379224	2337641	En los alrededores y en la zona urbana de Tizimin se observan gran cantidad de cenotes.
YH38	408400	2367050	Zona con gran cantidad de cenotes.

....Continuación de Tabla 55.

PUNTO	X	Y	OBSERVACIONES
YH39	419571	2349030	Zona con cenotes utilizados como abrevaderos en el sur de la localidad La Libertad.
YH40	442354	2344496	Cenotes con vegetación en su interior localizados al noroeste de la localidad Emiliano Zapata 3ro.
YH41	419275	2370096	Cenotes alineados, algunos cercanos a ranchos ganaderos cerca de la comunidad San José Yaxba.
YH42	414477	2375484	Cenotes alineados.
YH43	407278	2380571	Cenotes dispersos y alineados.
YH44	360478	2307573	Cenotes con vegetación en su interior, localizados hacia el SW a 3 Km de San Pedro Chenchela.
YH45	376639	2289379	Cenotes cercanos a la carretera que comunica a los poblados de Tesoco y Valladolid.
YH46	392507	2375585	Cenotes ubicados al sur de la localidad San Alfredo.
YH47	379990	2373329	Cenotes localizados hacia el norte de la localidad San Juan del Río, en zona despoblada.
YH48	363900	2338103	Cenotes localizados al sur de la cabecera municipal de Sucilá cercanos a poblados.
YH49	379990	2373329	Cenotes con vegetación en su interior, en la zona urbana y conurbada de Temozón.

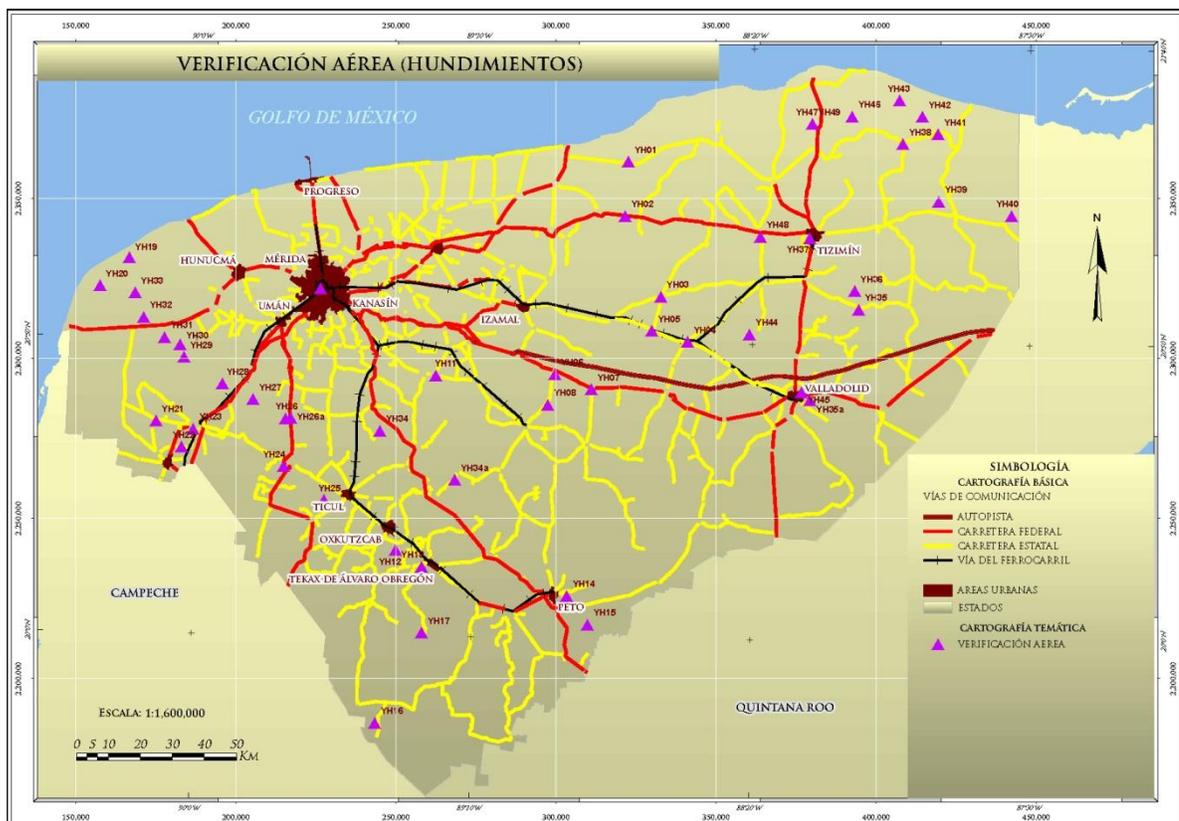


Figura 100. Puntos de verificación en vuelo de reconocimiento.

De acuerdo con el vuelo de reconocimiento se tienen algunas observaciones importantes que se describen a continuación.

Hacia el poniente del Estado, en el área cercana a la costa entre los sitios marcados con las clave YH19, YH20, YH21 y YH22, se observó que los niveles freáticos son someros (Fotografía 65 y 66), relacionados con morfología plana, gran concentración de cenotes o dolinas de diámetro variable y profundidad relativamente somera, normalmente dispersas y en algunos casos alineadas. En estas estructuras existen “islotos” de vegetación arbolada que contrasta con la vegetación circundante.

Hacia la parte centro del Estado, se observó la presencia de dolinas (YH27, Fotografía 67), que forman parte del anillo de cenotes Chicxulub. Los diámetros de las estructuras son similares, contienen agua en su interior, algunas se observan alineadas (Fotografía 67) y con orientación preferencial NW-SE. En algunos casos las vías de comunicación se encuentran muy cercanas a los cenotes (Fotografía 68).



Fotografía 65. Cenotes clásicos cercanos a la línea de costa.



Fotografía 66. Islote de vegetación contrastante con la vegetación circundante.



Fotografía 67. Estructuras alineadas característico del anillo de cenotes, imagen viendo al oeste.



Fotografía 68. Cenote al costado de la carretera Federal 261, que comunica al poblado de Yaxcopoil y Muna.

Hacia el noreste y este del estado de Yucatán existe mayor concentración de dolinas distribuidas principalmente en los municipios de San Felipe, Río Lagartos, Temozón, Panabá, Dzitás, Calotmul, Cenotillo, Tizimín, Dzilam de Bravo, Temax, Izamal, Tunkás, Quintana Roo y Espita donde la mayoría de los casos, localidades y poblados crecen en el entorno de cenotes (Fotografías 69 y 70) debido a que son la única fuente de agua disponible.



Fotografía 69. Cenote en zona urbana de la cabecera municipal de Cenotillo.



Fotografía 70. Cenote en área verde en el poblado de Yalcón en el Municipio de Valladolid.

De acuerdo con esta primera observación aérea, se tuvo un panorama general de la distribución de dolinas, y en algunos casos de la relación con la infraestructura. La información obtenida fue empleada en la programación de visitas de campo. Debido a la gran concentración de dolinas a nivel estatal (registro incompleto de 10,190 dolinas), se realizó una selección de sitios para verificar, considerando únicamente aquellas cavidades ubicadas dentro y cerca de infraestructura vial y urbana que pudiera ser afectada.

Referente a la etapa de campo vía terrestre, las actividades, se establecieron de acuerdo con la presencia de estructuras cársticas y la relativa cercanía con infraestructura. Inicialmente se programaron 559 puntos de interés para verificar, sin embargo algunos de ellos no pudieron ser levantados debidos principalmente con problemas de acceso a los sitios. Por otro lado, de los puntos antes mencionados, se lograron verificar 478 (Figura 101). La etapa de programación de actividades de campo, se basó en una primera interpretación, establecida de acuerdo con dolinas y cuerpos de agua identificados a partir de cartas topográficas de INEGI (escala 1:50,000) y mapas geológicos del Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2005, Cartas E16-1, F16-10, F16-8, F16-11, F16-7 escala 1:250,000.

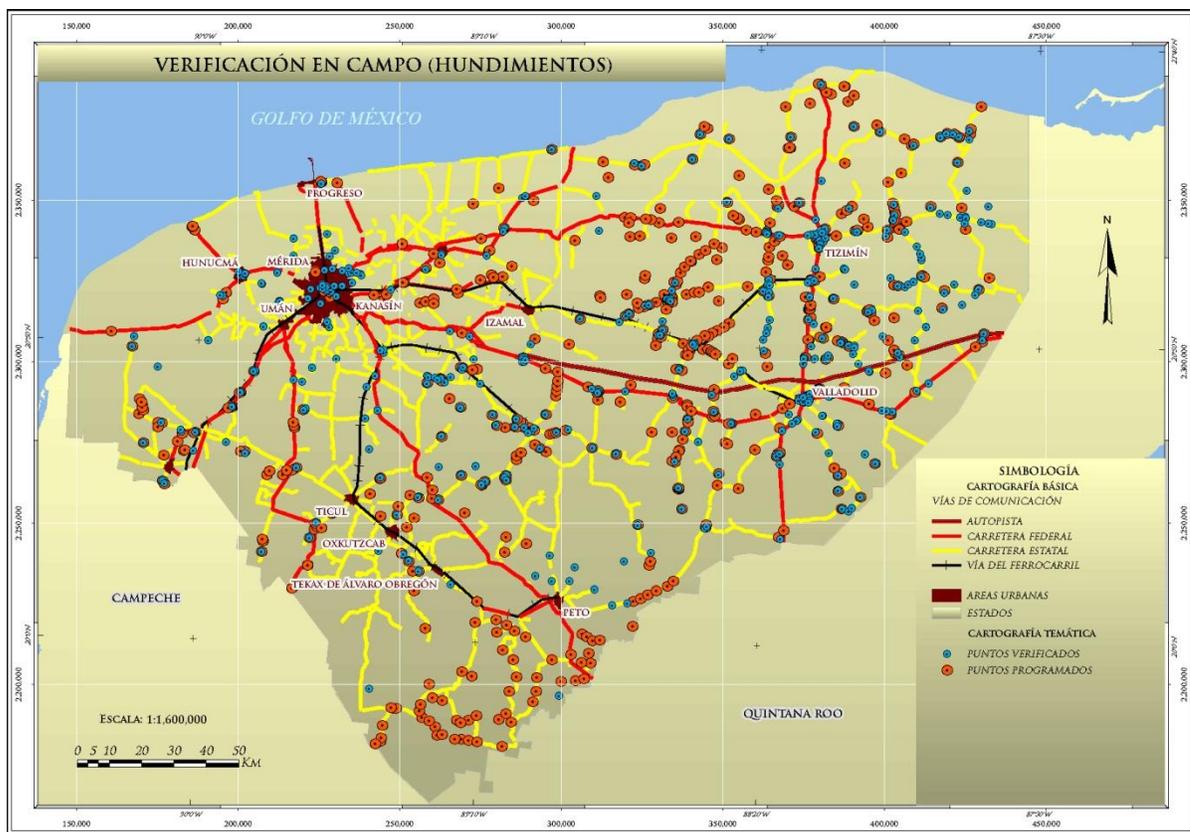


Figura 101. Mapa de puntos programados y verificados en actividades de campo

La descripción de los datos obtenidos en campo, se realizaron conforme a su relación con la zonificación antes mencionada. Lo anterior con la finalidad de establecer rasgos geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos de cada área y la relación con cada sitio verificado. Estos datos consideran de manera general la forma de las estructuras kársticas, amplitud, profundidad de la estructura, sima del nivel freático, tipo de roca, grado de intemperismo y datos estructurales, además de la relación con la infraestructura. Estas descripciones son fundamentales para determinar las características de las estructuras y la relación con la infraestructura con la finalidad de estimar cualitativamente el grado de peligro por hundimientos.

La base de datos general, considera 445 puntos de campo (Anexo I), donde se consideran algunas características importantes obtenidas y representadas en los formatos o fichas de campo correspondiente (Anexo II). Para agilizar y complementar los trabajos de campo, se solicitó el apoyo

del personal de protección civil municipal, así como la recopilación de información testimonial de habitantes de los lugares visitados.

A continuación se describen algunos sitios considerados como relevantes de acuerdo con la zonificación regional. Las descripciones de cada sitio pueden consultarse en la base de datos (en formato digital) anexa al presente informe, en ella encontrará localización del sitio así como descripciones puntuales e imágenes.

Zona Planicie Costera.

Esta zona se ubica al norte del Estado, distinguiéndose de las demás por el relieve y geomorfología relativamente plana. En esta área, el nivel freático es somero, en general fluctúa entre 1 y 10 m de profundidad. Sin embargo, en la franja costera existen manantiales, indicando procesos de descarga de agua dulce hacia el mar. Lo anterior se observó en los municipios de Hunucmá, Tetiz, Telchac Puerto y Dzidzantún.

De acuerdo con las observaciones las unidades geológicas con desarrollo kárstico son principalmente coquinas (calizas con abundantes restos fósiles) mientras que en la zona costera existen unidades, conformadas por depósitos lacustres y palustres de litoral consolidados a no consolidados. Una observación importante es que las unidades geológicas presentan poco desarrollo de fracturas en comparación con otras zonas, en general existen fracturas orientadas preferencialmente NE-SW y NW-SE.

En comparación con las demás zonas la presencia de cenotes en esta zona es relativamente baja, lo anterior puede obedecer a la inherente juventud del terreno desde el punto de vista geomorfológico, es decir al poco tiempo de exposición de la roca a los agentes erosivos y posiblemente a la poca profundidad del nivel freático de la zona. Cabe señalar que las dimensiones de las superficies de colapso en general varían de 2 a 170 m², sin embargo en la cabecera municipal de Acanceh existe una cavidad con 400 m².

En la zona generalmente predominan grutas de poca longitud y cenotes. En esta zona se realizó la verificación de 75 puntos. En la Tabla 56 se muestran algunos de los sitios considerados como relevantes. A continuación se describen algunos de estos puntos considerados como relevantes debido a la relación que guarda la cavidad con respecto a infraestructura.

Tabla 56. Sitios relevantes en la Zona Planicie Costera.

PUNTO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	ESTRUCTURA	SUPERFICIE (m ²)	PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO (m).
YHB2027	Cansahcab	Cansahcab	Gruta	113.09	S/D
YHB2028			Gruta	30.00	7.00
YHB2031	Dzidzantún	Dzidzantún	Dolina - Gruta	113	6.00
YHB2032			Dolina -Noria	50.26	5.00
YHB2016	Hoctún	Hoctún	Gruta	1.76	7.00
YHB4016	Hunucmá	Hunucmá	Gruta	4.00	3.00
YHB8120	Mérida	Mérida	Gruta	120.00	7.00
YHB4027		Noc-Ac	Cenote	8.00	3.00
YHB2044	Motul	Motul	Cenote	50.26	7.00
YHB2045	Muxupip	Muxupip	Cenote	4.80	S/D

S/D. Sin dato

Un ejemplo de estos es la gruta localizada al sur de la cabecera municipal de Hoctún, cartografiada con la clave YHB2016. La gruta se encuentra emplazada en capas de caliza brechosa, le subyacen estratos de caliza fosilífera de espesor desconocido, está ligeramente fracturada. El techo de la gruta es de aproximadamente 0.7 m de espesor, de paredes irregulares orientadas 30° al NE y de 2 m de profundidad.

De acuerdo con comentarios de personal de protección civil municipal aseguran que dicha cavidad tiene una longitud mayor a los 100 m y 20 m de amplitud. Se clasifico de peligro medio debido a que se sitúa en un predio donde no existen viviendas cercanas, sin embargo existe camino de terracería al costado, carece de protección y señalamientos (Fotografía 71).

Otro sitio señalado con la clave YHB2028, corresponde a una gruta localizada al noreste de la cabecera municipal de Cansahcab, se sitúa en la calle 12 entre 17 y 15. Se observó que está constituida por una capa de caliza brechosa de espesor variable, entre 2–3.2 m, subyaciendo a un paquete de estratos horizontales de caliza poco compacta de espesor desconocido (posible Sascab), tiene una profundidad aproximada de 4 m, es considera de peligro alto debido a que en el subsuelo tiene un diámetro mayor a 1500 m² y 3 m de altura, se orienta al 25° al NE, misma que subyace a parte de vivienda y granja. Comenta la dueña de predio que durante la ocurrencia del paso del huracán Isidoro en Septiembre del 2002, se colapsó dicha cavidad (Fotografía 72).



Fotografía 71. Punto YHB2016. El camino mantiene la misma dirección de la cavidad



Fotografía 72. Punto YHB2028. Desarrollo de gruta con dirección hacia la granja.

Existe una gruta localizada al oriente de la cabecera municipal de Dzidzantún, situada en la calle 8 entre 17 y 19 identificada con la clave YHB2031. Aparentemente se trata de una dolina de colapso de aproximadamente 3 m de profundidad, asociada a una gruta. La roca está conformada por un paquete de brecha calcárea moderadamente fracturada, sobreyace a estratos de caliza poco compacta.

Se clasifico como peligro alto de acuerdo con la cercanía a la infraestructura, no se observó afectación, sin embargo la geometría de la cavidad subyace parte de las calles, además de que existe desprendimiento de bloques en su interior. Según comentarios del encargado de protección civil, cuando ocurren fuertes precipitaciones en nivel freático asciende originando la emanación del agua a través de la cavidad, provocado inundaciones hacia la parte sur de dicha cabecera (Fotografía 73).

El cenote localizado en el centro de la cabecera municipal de Muxupip mismo que es identificado con la clave YHB2045, está conformado por roca caliza ligeramente fracturada, con profundidad de 6 m, se consideró de peligro alto, si bien es cierto que a la fecha no se tiene registro de afectaciones, se desconoce la distribución en el subsuelo de dicha cavidad (Fotografía 74).



Fotografía 73. Punto YHB2031. Vialidad al costado de caverna en Dzidzantún.



Fotografía 74. Punto YHB2045. Estructura kárstica circularada con mampostería contigua a viviendas.

Finalmente una gruta (clave YHB8120) localizada en la calle 31A, en la colonia García Ginerés en el oeste de la ciudad de Mérida, se observó que está conformada por depósitos de brecha calcárea de espesor desconocido, le sobreyace una capa de caliza compacta con espesor aproximado de 1.3 m.

Es importante comentar que en la misma área en septiembre del 2011, se suscitó un colapso, afectando vía de comunicación además existe afectación en muros de viviendas y actualmente se observan actividades de mantenimiento en la vialidad (Fotografía 75). Se considera de peligro alto debido a que en dicha vialidad se concentra importante flujo vehicular además de la circulación del tren. Según comentarios de vecinos aseguran que es resultado de antiguos bancos de extracción de sascab. Otra problemática observada es que la caverna es utilizada como depósito de escombros y basura (Fotografía 76).



Fotografía 75. Afectación en muros de vivienda y vialidad.



Fotografía 76. Caverna utilizada como depósito de escombros y basura.

Ciudad de Mérida.

Como un apartado dentro de esta zona, debido a su importancia, se describe estructuras kársticas distribuidas en la zona urbana y conurbada de la Ciudad de Mérida. Las actividades llevadas a cabo en esta descripción se basan en datos proporcionados por la Dirección de Desarrollo Urbano Municipal de Mérida (2012).

Esta base de datos incluye la localización y nombres de dolinas (cenotes) distribuidas dentro del territorio del Municipio, consta de 145 cenotes, de los cuales solo se lograron visitar 33 debido principalmente a que no se otorgaron permisos para entrar en los predios y en otros casos las dolinas aparecen canceladas o rellenas con material, escombros o basura.

La base de datos completa de estos sitios se puede consultar en el Anexo I electrónico donde aparecen identificados en el municipio de Mérida. En la Figura 102 se muestran únicamente los sitios distribuidos dentro de la zona urbana de la Ciudad.

Es escasa la información documentada relacionada con colapsos asociados a procesos kársticos en la zona urbana de la ciudad. Sin embargo, derivado de la necesidad de la construcción de norias o pozos para la extracción de agua para consumo y a la extracción de materiales para la construcción, se han suscitado algunos colapsos aislados; mismos que es posible asociarlos a la existencia de cavernas o cuevas subterráneas producto de antiguos bancos de material o sascaberas y obviamente a procesos kársticos.

Además de los casos mencionados en el apartado de antecedentes, el caso más reciente de hundimiento, ocurrió durante el mes de Agosto del 2012 en la calle 10 a la altura de la 49, en la colonia San Marcos Ncoch, ubicada al sureste de la ciudad y al poniente del aeropuerto frente a la cancha de usos múltiples en entrada de predio. En general no se presentaron lesionados, solo daños en muros a las viviendas.

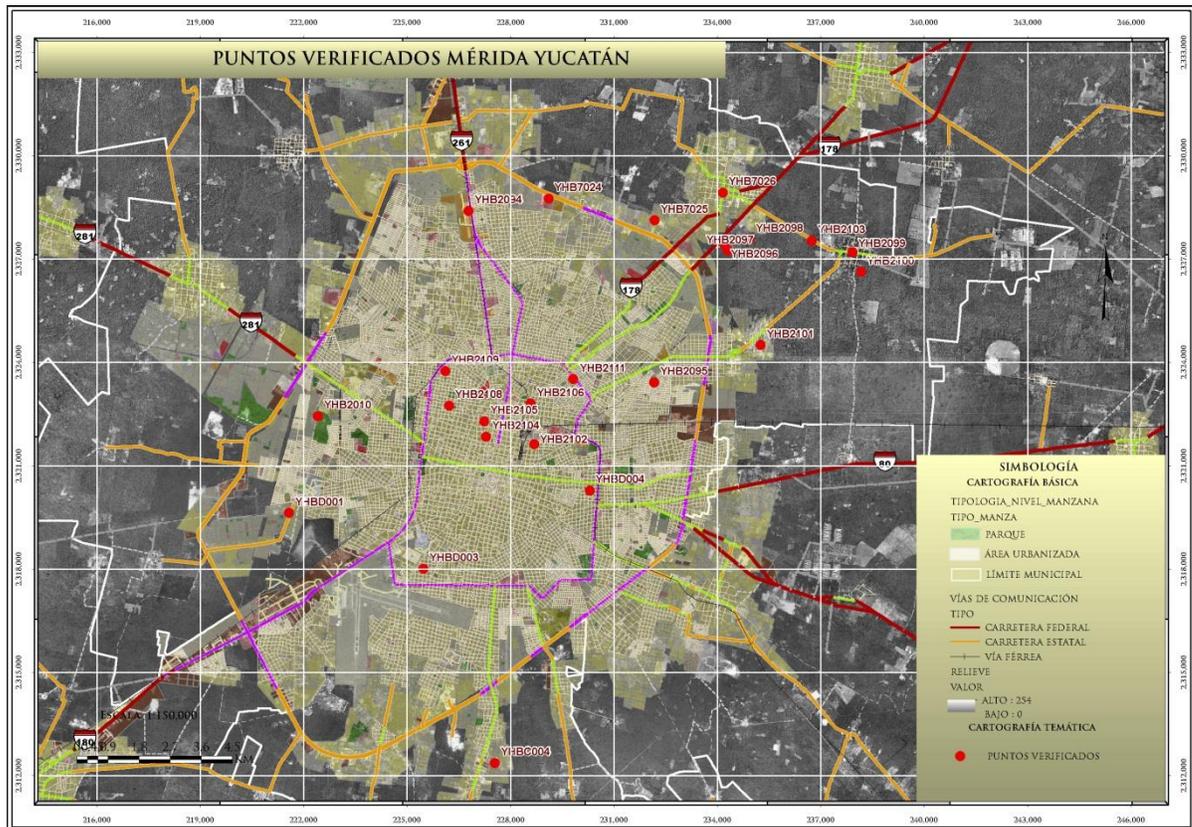


Figura 102. Localización de sitios cartografiados en el municipio de Mérida.

Como resultado de la información recabada en los 33 sitios cartografiados los más relevantes se muestran en la Tabla 57. De estos solo se describirán ejemplos representativos.

Tabla 57. Algunos de los sitios importantes sobre estructuras kársticas en el municipio de Mérida.

MUNICIPIO DE MÉRIDA						
PUNTO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	ESTRUCTURA CÁRSTICA	SUPERFICIE DE HUNDIMIENTO (m ²)	PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO (m).	
YHB2096	Mérida	Fracc. Gran San Pedro Cholul	Gruta	8.00	4.00	
YHB2100		Sitpach	Cenote	13.00	12.00	
YHB2102		Mérida		330.00	10.00	
YHB2103		Sitpach		82.00	8.00	
YHB2104		Mérida			115.00	13.00
YHB2105					150.00	11.00
YHB2106					S/D	S/D
YHB2107					154.00	8.00
YHB2108					254.00	15.00
YHB2109					S/D	S/D
YHB2111		S/D		S/D		
YHBC003		San Ignacio Tesip	Dolina	9.00	S/D	
YHBD003		Mérida	Gruta	S/D	S/D	
YHBD004			Cenote	79.00	S/D	
YHB7020		Dzibilchaltun	Cenote	600.00	4.00	
YHB7023		Xcanatun		706.00	S/D	
YHB7025	Santa Rita Cholul	Caverna	1.00	S/D		
YHB7026	Cholul	Cenote	50.26	5.00		

En el municipio algunas de las dolinas (cenotes) de mayor relevancia son las cartografiadas con la clave. YHB2096 y YHB2103. Ambas ubicadas al noreste de la ciudad de Mérida. El primer caso situada a un costado de la avenida que conduce hacia el fraccionamiento Gran San Pedro Cholul. Se observa un hueco por disolución, asociado a un estrato horizontal de coquina de 2 m de espesor y capas calcáreas con menor contenido fósil de entre 0.35 a 0.80 m de espesor, ligeramente fracturadas, subyaciendo a un depósito de brecha calcárea, donde se aloja dicha cavidad con presencia de bloques caídos en su interior. El flujo vehicular en este sitio es relativamente bajo, sin embargo se considera como de peligro medio, debido a la cercanía de la estructura con respecto a la avenida (Fotografía 77).

El segundo sitio (YHB2103) (Fotografía 78) se localiza a un costado de la carretera que comunica a Cholul y Sitpach. La cavidad presenta paredes irregulares; de aproximadamente 7 m de profundidad; relacionado con brecha calcárea ligeramente fracturada. El sitio se considera como de peligro alto de acuerdo con la cercanía a la carpeta asfáltica. Al momento no existe afectación visible.



Fotografía 77. Estructura cárstica próxima a la vialidad (YHB2096).



Fotografía 78. Estructura (YHB2103) la cual subyace parcialmente a vía de comunicación.

Por otro lado, en la ciudad de Mérida se identificaron cenotes subyaciendo infraestructura urbana. El primero (YHB2104) ubicado en la calle 45 a la altura de la 62, en el patio del Instituto

Comercial Bancario, el segundo (YHB2105) se ubica sobre la calle 39 entre las calles 62 y 62A localizado en un taller mecánico; ambos sitios en la colonia centro. Otro cenote (YHB2102) se localiza en la calle 42 a la altura de la calle 43A en el Centro turístico los Tulipanes, Colonia Industrial. Otro más en la calle 27 entre 20 y 22, en la colonia García Ginerés, ubicado en la Villa María (congregación religiosa) verificado con la clave YHB2108, finalmente uno más, en la calle 8 por 63, en la colonia Cortez Sarmiento, identificado con la clave YHBD004.

Un común denominador en dichas cavidades es su relación con capas de depósitos calcáreos alterados semiconsolidados (Sascab) deleznable al ser golpeados con martillo, con espesor mayor a 4 m, que a su vez subyacen estratos de caliza brechosa a masiva consolidada de espesor variable de entre 1.5 a 2 m, ligeramente fracturada, y profundidad que va de 7 a 15 m. En la mayoría de los casos las cavidades fueron encontradas debido a perforaciones realizadas para obtención de agua. Casi todas las cavidades, cuentan con construcción en su interior y aparentemente han modificado considerablemente su forma colocando arena en el piso de la cavidad, se han realizado accesos con escalinatas, que sirven como atracción turística.

De acuerdo a las condiciones de la roca y construcción de pilares en el interior de las cavidades, se consideran sitios relativamente seguros. Por otro lado el cenote señalado con la clave YHB2105, en su interior se percibe un ligero olor a hidrocarburo, mismo que puede estar asociado a la percolación de productos utilizados en un taller mecánico cercano. A la fecha no existen evidencias de afectación en la infraestructura, sin embargo es necesario que las instancias correspondientes vigilen continuamente los sitios (Fotografías 79 y 80).



Fotografía 79. La roca en el techo y paredes consta de brecha calcárea sana (YHB1108).



Fotografía 80. El agua presenta cierto grado de turbidez y acumulación de basura (YHB2105).

El resto de los sitios cartografiados, se localizan hacia la periferia de la ciudad en lugares, distantes de viviendas, parques, algunos son utilizados como balneario como el ubicado en la zona arqueológica de Dzibilchaltún, donde la estructura presenta 40 m de profundidad.

Zona Anillo de Cenotes.

Con base a los levantamientos en campo, en esta zona se cartografiaron 104, mismos que se muestran en la base de datos general localizada en Anexo I, donde podrá verificar sus contenidos considerados en la ficha técnica correspondiente a hundimiento.

De acuerdo al análisis de la información recabada, de manera general, se observó un relieve que va de plano a ondulado, sin embargo, predomina este último (aproximadamente 8°-15° de inclinación), principalmente hacia la parte centro de la zona al cual se distribuye en parte de los municipios de Cozumá, Sotuta, Mayapán, Yaxcabá y Chapab.

Por otro lado, se tiene relieve considerado como ligeramente ondulado (4° - 7°), distribuido hacia la porción noreste de la zona, en los municipios de. Cenotillo, Quintana Roo, Kantunil y Tunkás. Finalmente el relieve plano se distribuye hacia el extremo oeste y este como en Celestún y Dzilam de González respectivamente.

Con base en la distribución litológica, en la porción centro de la zona existen depósitos de brecha calcárea y horizontes de margas (calizas limo arcillosas) de 40 cm de espesor a masivas, con laminación interna, con estratificación horizontal y muy rara vez con inclinación de las capas superior a 20° , normalmente de color blanco a grisácea en superficie intemperizada sin embargo esta coloración es muy variable. El resto de la zona está conformado por depósitos de coquina y lacustres no consolidados a semiconsolidados. Estructuralmente las discontinuidades presentan direcciones preferenciales al NE-SW, NW-SE. Aunque en menor grado también se tienen fracturas en dirección E-W y N-S e inclinaciones del echado casi verticales.

Las dolinas (cenotes y/o aguadas) que se encuentran en esta zona se asocian con el denominado anillo de cenotes Chicxulub, con gran desarrollo kárstico. Las estructuras presentan superficie de hundimiento que van de los 12 m^2 hasta 3849 m^2 . Sin embargo existen estructuras de grandes dimensiones como la localizada en el municipio de Homún denominada Laguna de Yalahau y la cual presenta una superficie aproximada de 282744 m^2 e identificada con la clave YHB5032.

Otro cenote de grandes dimensiones es el llamado Xpolol ubicado hacia el este de la localidad de Hunabchen, perteneciente al municipio de Chapab y aproximadamente a 3.5 Km del rancho ganadero Chuun Ha; tiene una superficie aproximada de $100,000 \text{ m}^2$. Cabe señalar también la existencia de dolinas en menor proporción, caracterizadas por la carencia de acumulación agua y abundante vegetación en su interior.

Es importante comentar que dichas cavidades, se encuentran de manera dispersa, sin embargo existen también dolinas alineadas con dirección preferencial NW-SE y NE-SW aparentemente condicionadas por sistemas de fracturas. La zona del anillo de cenotes consta de una franja de aproximadamente 300 Km de longitud por 38 Km de amplitud.

Con lo que respecta a la profundidad del nivel freático en la zona, de acuerdo con observaciones y testimonio de habitantes de las localidades, los niveles, varían en general de entre 10 y 30 m, aunque en la parte relativamente planas distribuidos en el municipio como Celestún y Dzilam de Bravo es menor a 10 m de profundidad.

Es importante mencionar que, los sitios verificados se ubican tanto en zonas urbanas y conurbadas de poblados y comunidades, así como cercanos a vías de comunicación. Las implicaciones de la presencia de las dolinas en las comunidades son benéficas por el hecho de que son fuentes permanentes de agua, sin embargo algunas de ellas son utilizadas como tiraderos de basura e incluso para verter aguas residuales, lo cual conlleva por una parte a la contaminación local y posiblemente regional del agua y por otra al peligro por colapso repentino de las paredes y techo de las cavidades. Otros son utilizados como centro turístico, algunos presentan muros de protección, con maya metálica y muy pocos con señalamientos.

De los 104 sitios verificados en esta zona, los de mayor relevancia de acuerdo a la relación con infraestructura se muestran en la Tabla 58. En algunos de los municipios, las estructuras se ubican cerca, e incluso subyaciendo vías de comunicación o viviendas. Es decir, que la circunferencia de dichas cavidades se encuentra por debajo de la carpeta asfáltica de carreteras o calles por donde transitan constantemente vehículos y transeúntes. Algunos de estos sitios se describen a continuación.

Tabla 58. Sitios relevantes en la zona de anillo de cenote.

PUNTO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	ESTRUCTURA	SUPERFICIE (m ²)	PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO (m)
YHB4024	Celestún	Rancho Santa Julia	Cenote	1963.00	1
YHB2047	Cenotillo	Cenotillo	Dolina	11309	S/D
YHB2048			Cenote	380	25
YHB8110	Chocholá	1.00		8	
YHB2005		198		6.5	
YHB2007	Halacho	Santa Maria Acu		114	4
YHB5012	Homún	Homún		270	12
YHB5008	Huhí	Huhí		Dolina	176
YHB2035	Kantunil	Kantunil	Cenote	78.5	16
YHB2036			Gruta	50.3	S/D
YHB2041			Dolina	3217	S/D
YHB2014	Maxcanú	Granada	Gruta	50.3	S/D
YHB2060	Quintana Roo	Tramo Cenotillo-Quintana Roo	Dolina	5026	6
YHB2062		Quintana Roo	Gruta	3	10
YHB5007	Sotuta	Tabí	Cenote	706	21
YHB2023	Tunkás	Tunkás	Gruta	120	S/D
YHB2024		Santa Cruz	Dolina	15393	S/D

S/D Sin dato; superficies estimadas; las profundidades del nivel freático son datos proporcionados por pobladores, encargados de pozos, personal de protección civil municipal o dueños de ranchos.

Las estructuras identificadas con las claves YHB2047 y YHB2048, ambas localizadas en la zona centro de la cabecera municipal de Cenotillo, en las calles 18 y 17 y 20 respectivamente. En el primer caso la estructura se desarrolla en roca calcárea de textura brechosa, ligeramente fracturada y muy alterada, la estructura corresponde a dolina o rehollada (Termino local), carece de agua en su interior, tiene 5 m de profundidad. En los límites de esta estructura se desplantaron viviendas y edificios de uso público en este caso correspondiente al Teatro Municipal (Fotografía 81) el cual presenta fracturas en los muros y piso. Aparentemente la presencia de fracturas está relacionada con la pendiente del terreno y posiblemente al mal diseño del edificio, sin embargo no es concluyente que exista una relación directa con la estructura kárstica desde el punto de vista de hundimientos.

En el segundo caso, la estructura se sitúa en la parte posterior de la iglesia principal corresponde a un cenote abierto o de colapso, que de acuerdo con comentario del encargado de la iglesia el cenote tiene más de 30 m de profundidad. No se observó afectación en la infraestructura. Sin embargo tomando en cuenta las condiciones del lugar, cercanía de las viviendas con relación a la cavidad y por verter aguas residuales y basura a dicha cavidad, se clasificó como peligro alto (Fotografía 82).



Fotografía 81. Punto YHB2047. Fracturas en muros y piso de teatro municipal, en cabecera municipal Cenotillo.



Fotografía 82. Punto YHB2048. Vista aérea del cenote, situado detrás de la iglesia de Cenotillo.

En el cenote San Ignacio señalado con la clave YHB2005 y noria marcada con la clave YHB8110, ambos localizados en la calle 23 entre 26 y 28 en la cabecera municipal de Chocholá se observa una capa compacta de roca caliza de poco espesor, seguida de un depósito de espesor desconocido de caliza coquina, ligeramente fracturada.

En el primer caso la cavidad fue descubierta por la construcción de una noria o pozo, posteriormente se adaptó una entrada a la cavidad la cual presenta una superficie de aproximadamente 198 m² con profundidad aproximada de 9 m y nivel freático a 6 m. Es importante comentar que, parte de dicha estructura subyace a la calle 23 y parte a viviendas y otras instalaciones. Esta estructura, es utilizada como centro turístico. No se observa afectación sin embargo dada la cercanía con la infraestructura se consideró como de alto riesgo (Fotografía 83).

En el segundo caso de acuerdo con comentarios del señor Prudencio Solís Euán, dueño del predio, menciona que en el subsuelo existe una cavidad de aproximadamente 2828 m² manifestada a través de una noria ubicada en dicho lugar, dispone de una profundidad del nivel estático de 8 m y pudiera afecta al menos a 5 viviendas abarcando otro predio contiguo. El sitio se consideró como alto riesgo, debido a la relación con el cenote San Ignacio.

En el cenote marcado con la clave YHB2007, localizado al este, de la localidad de Santa María Acu, (municipio de Halachó), se observa una capa de caliza compacta, sobreyaciendo de un depósito de caliza coquina ligeramente fracturada con espesor desconocido. Dicha estructura se manifiesta en superficie a través de 3 orificios. En subsuelo el techo presenta un espesor de aproximadamente 1.2 m, presenta paredes irregulares, superficie aproximada de 114 m² bajo la superficie se extiende más allá del otro extremo de la carretera, tiene una profundidad de 5 m. Esta vialidad es moderadamente transitada, por tanto es importante la colocación de señalamientos (Fotografía 84).



Fotografía 83. Cavidad subterránea con clave (YHB2005) del cenote San Ignacio, en Chocholá.



Fotografía 84. Colapso en superficie provocado por cavidad en el subsuelo. Santa María Acu. Municipio de Halachó.

Existen otros ejemplos importantes debido a la cercanía con la infraestructura, en este caso el cenote San Kuat (YHB5012) representa estructuras típicas desarrolladas dentro de la zona de anillos de cenotes. Son en general estructuras abiertas, con presencia de agua, la abertura en superficie es generalmente menor respecto de la superficie del piso en el subsuelo, presenta desarrollo de estructuras como estalactitas, estalagmitas, columnas y eventualmente con depósito de material edáfico y con aparente interconexión con otras estructuras.

El cenote San Kuat se localiza hacia el poniente de la cabecera municipal de Homún. La roca asociada es caliza compacta con capas que varían de espesor entre 0.8 a 2 m, le infrayace depósitos de caliza con gran contenido de fósiles (coquina), en general está ligeramente fracturada.

De acuerdo con testimonio del director de protección civil municipal, el cenote tiene una profundidad de aproximadamente 32 m; el nivel freático se estima a 12 m de profundidad, es utilizado como atracción turística y es considerado como de alto riesgo, debido a la cercanía con el COBAY Homún (Colegio de Bachilleres), calle y restaurant (Fotografía 85). Cabe mencionar que existen neumáticos pintados de blanco como única forma de señalética, aunque los habitantes están familiarizados con la presencia de cenotes y consideran algunas medidas precautorias se mencionan casos de personas que han caído en ellos.

El Otra cavidad de importancia es la dolina de colapso, localizada en el centro de la cabecera municipal de Huhí, marcado con la clave YHB5008. Se observó que está situada o emplazada, sobre una serie capas horizontales de roca caliza compacta con espesores variables, la profundidad estimada es de 15 m, se desconoce la profundidad del nivel freático. Funciona como dren natural de la escorrentía superficial, evitando encharcamientos durante la temporada de lluvias y a la vez, como depósito de basura. Es considerado de riesgo alto, debido a que se ubica contiguo a viviendas, edificio municipal y vialidad posible contaminación local del acuífero (Fotografía 86).

Otros ejemplos sobresalientes corresponden a cenotes o dolinas colapsadas, localizadas en el centro y periferia en la cabecera municipal en Kantunil, cartografiadas con las claves YHB2035 y YHB2041. En el lugar el relieve es ligeramente ondulado, el tipo de roca constituida por una capa de roca caliza compacta con espesores variables de entre 0.7 a 3 m, sobreyaciendo a un depósito de caliza brechosa ligeramente fracturada y alterada.

El primero, definido como cenote situado al extremo sur de la calle 23 evidenciada a través de una noria, misma que antes era utilizada para consumo. Dicha cavidad está asociada a una capa de caliza brechosa medianamente compacta y ligeramente fracturada, espesor variable que va de 0.7 a 2 m, sobreyace a una serie de capas del mismo material, con presencia de alteración, superficie de hundimiento visible de 78.6 m². Sin embargo de acuerdo a comentarios del sr. Nicanor Aké Avilés director de protección civil de dicha entidad, asegura que la cavidad en el subsuelo es mayor e inclusive presenta conductos irregulares con dirección que van al SW y W.

Se observaron fracturas en muros en algunas viviendas contiguas, sin embargo se desconoce si es debido a la antigüedad o relacionada a posible hundimiento de la cavidad. Es considerado de peligro o riesgo alto, debido a la extensa cavidad en subsuelo, donde se asientan viviendas, negocios y calles, es utilizada para verter aguas residuales y basura (Fotografía 87). Actualmente lejos de ser considerada fuente de abastecimiento, es de contaminación al acuífero local y posiblemente regional.



Fotografía 85. Sitio YHB5012. Cenote San Kuat, Situado cerca del COBAY, no presenta protección.



Fotografía 86. Sitio YHB5008. Dolina situada en medio de infraestructura urbana en Huhí.

El segundo caso correspondiente a la dolina Homokop marcada con la clave YHB2041, ubicada en la calle 23 entre 39, en la porción sur de la cabecera municipal de Kantunil en la colonia Candelaria. La estructura se sitúa en el predio propiedad del Sr. Nicanor Aké Avilés y se asocia a depósitos de brecha calcárea poco consolidada con alto grado de alteración, el suelo relacionado es de tonalidad ocre. En general es de relativa poca profundidad con aproximadamente 3217 m² de superficie (Fotografía 88), que es utilizada para uso agrícola (Árboles frutales y maíz).

De acuerdo a notas informativas y comentarios del propio dueño del predio mencionan que, durante el paso del huracán Isidoro en Septiembre del 2002, las fuertes precipitaciones originaron en ascenso del nivel freático reblandeciendo las paredes y originando el colapso en el centro de dicha estructura, dejando como resultado una cavidad mayor a los 10 m de profundidad y una superficie colapsada de 35 m², afectando solo árboles frutales.



Fotografía 87. Punto YHB2035. La eminente contaminación del manto acuífero y colapso generado a través de las cavidades en zonas urbanas.



Fotografía 88. Punto YHB2041. Cavidad colapsada asociada al paso del Huracán Isidoro en Septiembre de 2002.

Otro sitio relevante corresponde a la gruta señalada con la clave YHB2014, localizada al norte de la localidad de Granada municipio de Maxcanú. La cavidad está constituida por una capa roca brechosa moderadamente compacta espesor promedio de 1.2 m, ligeramente fracturada, subyaciendo a un depósito de caliche no consolidado (sascab). Dicha estructura presenta una profundidad de 4 m, dirección preferencial norte-sur y una longitud de 50 m. Se desconoce si es producto de la extracción de material o de origen natural, sin embargo es considerada de peligro alto, debido a que la cavidad invade subterráneamente parte del área ocupada por la vialidad con tránsito moderado, comunica a Granada con Santo Domingo. Es utilizado como depósito de basura (Fotografía 89).

Dentro del municipio de Quintana Roo. Se identificaron dos sitios importantes. En general el relieve varía de ligeramente ondulado a ondulado, el tipo de roca consiste de caliza brechosa de espesor mayor a 2 m y moderadamente fracturada.

El primero corresponde a una dolina, marcada con clave YHB2060, localizada a 3.5 Km al norte de la cabecera municipal, ubicada al lado poniente de la carretera que comunica a las cabeceras municipales de Cenotillo - Quintana Roo. Dicha cavidad está asociada con estratos constituidos por roca brechosa compacta, moderadamente fracturada, con profundidad aproximada de 6 m y abundante vegetación. Si bien es cierto que la superficie de hundimiento, limita a dicha vía de comunicación, ubicación en curva con pendiente suave producto de la geometría de dicha estructura, carencia de señalamiento y muro de contención. Sin embargo se clasifico de peligro medio, debido al bajo tránsito vehicular. No se observó afectación en la carpeta asfáltica.

El segundo sitio corresponde a una gruta, cartografiada con la clave YHB2062, ubicada en la calle 20 en el centro de dicha cabecera municipal. Cabe mencionar que dicha cavidad fue descubierta en el 2005, cuando realizaban trabajos de remodelación del parque central, actualmente es visible a

través de la construcción de una obra tipo jardinera protegida con parrilla metálica de poca dimensión y una noria, dispone de una profundidad variable de entre 4 a 8 m.

De acuerdo a comentarios de oficiales de policía pertenecientes al mismo municipio, aseguran que la superficie en subsuelo es considerable, mantiene una dirección preferencial norte-sur, longitud de decenas de metros, donde se ubica infraestructura urbana.

Se considera de riesgo alto debido a que dicha cavidad mantiene la misma dirección donde se asienta el edificio del palacio municipal, viviendas, parque central y calles. Sin afectación verificada al momento, sin embargo existen fracturas en piso, se desconoce si son causadas por mala construcción o efectos de un posible colapso (Fotografía 90).



Fotografía 89. Punto YHB2014. Estructura contigua a vía de comunicación Granada- Santo Domingo.



Fotografía 90. Punto YHB2062. Cavidad evidenciada a través de una noria y jardinera parque central Quintana Roo.

Otro sitio importante es el cenote Tabí, cartografiado con la clave YHB5007, ubicado en el centro de la localidad de mismo nombre, perteneciente al municipio de Sotuta. En el área persiste un relieve ondulado. Afloran calizas constituidas por estratos y capas horizontales de espesor variable y ligeramente fracturada. La cavidad tiene de una profundidad aproximada de 32 m, es protegido con maya ciclónica.

De acuerdo a comentarios de habitantes durante la llegada del huracán Isidoro, el nivel freático en la cavidad, ascendió aproximadamente 12 m. Se considera de riesgo alto debido a la cercanía con viviendas y vialidad que comunica a Sotuta (Fotografía 91).

Por último dos cavidades más como ejemplos relevantes, cartografiadas con la claves YHB2023 y YHB2024 localizadas en el municipio de Tunkás. En el área predomina un relieve ligeramente ondulado, constituido por una capa horizontal de roca brechosa compacta de aproximadamente un metro de espesor, con contenido fosilífero, sobreyaciendo a depósitos de roca caliza de espesor desconocido y ligeramente fracturada. La primera cavidad definida como gruta (Fotografía 92), ubicada en el centro de dicha cabecera municipal, sobre la calle 28. Presenta una superficie aproximada de colapso de 120 m², sin embargo en el subsuelo es de aproximadamente 5436 m², profundidad mayor a los 7 m, con colapso en su interior, así como desarrollo de estalactitas.

Se considera de peligro medio por la ubicación de las viviendas a 40 m de distancia. Sin embargo la cavidad subyace una barda y posibles proyectos de construcción de vivienda.



Fotografía 91. Punto YHB5007. Cenote Tabí relativamente cerca de viviendas.



Fotografía 92. Cavidad con posibilidad de colapso debido al poco espesor del techo y su amplitud en el subsuelo.

Finalmente una dolina localizada a 1.8 Km al noreste de la cabecera municipal de Tunkás. Cerca de Santa Cruz, en el tramo carretero Tunkás-Cenotillo. Presenta una profundidad mayor a 6 m, es utilizada para pastoreo de ganado. Se considera de peligro alto debido a que parte del terraplén de la carretera esta desplantada en el límite de la estructura así como por el alto flujo vehicular de transporte de carga. En este caso parte de la depresión fue rellenada para el trazo de la misma. A la fecha no se observó afectación en la infraestructura, sin embargo, se detectaron pequeñas fracturas en la carpeta asfáltica en sentido paralelo, sin embargo aparentemente no tienen relación con la estructura (Fotografías 93 y 94).



Fotografía 93. Vialidad en el límite de dolina en tramo Tunkás-Cenotillo.



Fotografía 94. Carpeta asfáltica recién construida con presencia de fracturas.

Zona Sierrita de Ticul

La zona de la Sierrita de Ticul, se ubica al sur suroeste del Estado, se caracteriza por la presentar mayor elevación topográfica, presencia de valles cerrados dentro de una área de lomeríos, drenaje deficiente, áreas de mayor espesor de suelo respecto del resto de las demás áreas. Existe relieve variado que va de ondulado ha Inclinado (hasta 30°) distribuido en gran parte de la zona, aunque para la parte sur de la misma existen relieve principalmente plano.

Afloran depósitos de caliza constituida por brecha y horizontes de margas con abundante material fósil constituida por gasterópodos, cefalópodos y oolitas. En los valles intermontanos podemos encontrar depósitos de aluvión. La roca presenta fracturas con dirección preferencial NE-SW, NW-SE y en menor proporción N-S.

Con respecto al nivel freático, predominan los niveles más profundos del territorio estatal, mismos que fluctúan de entre los 30 a 65 m encontrados principalmente hacia la parte sur de la zona, e incluso existe un pozo, localizado en la localidad de Chan Dzitnup Municipio de Tekax, que de acuerdo con comentarios de la persona encargada de dicho aprovechamiento, asegura que tiene una profundidad del nivel freático de 120 m.

Esta zona, se caracteriza por la presencia de lomeríos y depresiones de gran extensión que corresponden con poljes, existen además cavernas y dolinas asociadas.

Con base a los datos recabados en campo en la zona se cartografiaron 15 sitios, de los cuales se describen a continuación los de mayor trascendencia (Tabla 59). De acuerdo a la información recaba en campo persisten principalmente grutas o cavernas. Un ejemplo de lo anterior en la gruta Calcehtok, localizada entre las coordenadas X=196323 Y=2275129, cartografiada con la clave YHB2093, ubicada al sur de la localidad de mismo nombre, perteneciente al municipio de Opichén.

Dicha estructura es utilizada como centro turístico presenta una dirección preferencial E-W, sin embargo presenta ramificaciones, con paredes irregulares, dando origen a galerías estrechas hasta grandes bóvedas con dimensiones considerables, presenta caídos de bloques, una serie de colapsos, profundidad que va de 10 a 25 m o mayor, el espesor del techo es variable. La roca consiste de caliza compacta moderadamente fracturada. Según comentarios de propietarios aseguran que tiene más de 3 Km de longitud, se encuentra en zona despoblada por tal razón se considera de peligro bajo. Sin embargo es importante realizar monitoreo de las condiciones de la roca en el techo para garantizar la seguridad de los visitantes (Fotografía 95).

Tabla 59. Sitios relevantes en la zona de Sierrita de Ticul.

PUNTO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	ESTRUCTURA CÁRSTICA	SUPERFICIE DE HUNDIMIENTO (m ²)	PROFUNDIDAD DE LA CAVIDAD (m).
YHB2092	Muná	Muná	Gruta	330.00	>30
YHB2093	Opichén	Calcentok	Gruta	S/D	>40

S/D: Sin dato; superficies estimadas; las profundidades del nivel freático son datos proporcionados por pobladores, en general por encargados de pozos, personal de protección civil municipal o dueños de ranchos.

Otro caso importante es una gruta localizada al oeste de la cabecera municipal de Muna, ubicada al costado sur del tramo carretero Muna-Ticul, cartografiada con la clave YHB2092. Dicha estructura está emplazada en una caliza brechosa, presenta una capa alterada de coloración que varía de blanca a rojiza de espesor aproximado a 0.8 m, con indicios de propagación de colapso hacia la parte NW, tiene aproximadamente 330 m² de superficie de hundimiento, y profundidad aproximada de 30 m. Según testimonio de propietarios dicen el daño por fracturas en muros y techo con número 126 en la vivienda se vio acelerado después del paso del huracán Isidoro ya que además dicha cavidad subyace a la vivienda y a vía de comunicación. Sin embargo la cavidad se encuentra rellena con escombros y basura (Fotografía 96).



Fotografía 95. Presencia de escombros producto de colapsos en Caverna Calcehtok.



Fotografía 96. Estructura contigua a la vivienda.

Zona Tizimín-Peto

Dicha zona se localiza hacia la porción este y sur del Estado es la de mayor extensión, se divide en tres sub-zonas (Tizimín, Peto y Chemax); respectivamente.

Para la zona Tizimín. Debido a las escasas elevaciones topográficas y a la abundante vegetación en el territorio, es difícil trazar límites de distribución o comportamiento del relieve. Sin embargo se puede mencionar de manera general que hacia la parte norte presenta una topografía con pendientes suaves, a montículos con tendencia a aumentar hacia el sur. Por ende se considera de relieve plano (1° a 3°), distribuido en los municipios de San Felipe, Río Lagartos y parte norte de Panabá y Tizimín respectivamente.

Posteriormente conforme se dirige hacia el centro y sur de la zona dispone de una morfología rugosa con mayor elevación, por tal razón el relieve varía de ligeramente ondulado a ondulado, es decir esta entre el rango de 4° a 15° , se distribuye en los municipios de Panabá y parte de Tizimín, Calotmul, norte y centro de Temozón, parte noroeste y suroeste de Valladolid, Cuncunul, Espita, Piste, Dzitás, Kaua, Uayma, Tekom, Tinum, Chichimilá, Chankom y Sucilá así como parte del municipio de Cenotillo.

En La sub-zona Chemax. En general persiste un relieve plano a ligeramente ondulado (1° a 7°), distribuido hacia la parte noreste y centro-sur del municipio de Valladolid, así como en la totalidad del municipio Chemax, parte oeste de Temozón y una pequeña porción al sur del municipio de Tizimín.

Finalmente para la subzona Peto, En general el relieve es definido como ondulado, distribuido hacia la parte oriente y poniente en los municipios de Chikindzonot, Tixcacalcupul, Dzán, Maní, Teabo, Tixméhuac, Chacsinkín y la porción norte de Cantamayec. En la parte centro se tiene un relieve que va de plano a ligeramente ondulado, distribuido en los municipios de Peto, Tahdziú además la parte noroeste de Cantamayec.

Con base en la distribución litológica hacia la parte sur del Estado, donde se ubica la subzona Peto y la porción suroeste de la subzona Tizimín. Está constituida por brechas calcáreas y horizontes de margas, con material fósil constituida por gasterópodos, cefalópodos y oolitas. Mientras que al noreste del Estado, donde se localiza la zona Tizimín y la sub-zona Chemax, en general predominan los depósitos de roca caliza constituidas por boundstone, wackestone, packstone y depósitos de brecha calcárea, así como depósitos de coquina distribuida al norte de la zona y depósitos recientes distribuidos hacia la zona costera.

Con base en los datos de campo se concluye en general que la litología consta de una capa de caliza brechosa de ligera a moderadamente fracturada en ocasiones masiva, espesores variados que van de 0.5 a 4 m así como estratos de caliza coquina y margas principalmente hacia el oeste de la sub-zona de Peto. De acuerdo con los datos obtenidos en campo la dirección preferencial de las discontinuidades, son principalmente NE-SW y NW-SE, en menor proporción N-S, de ligeramente a moderadamente fracturado.

En esta zona se caracteriza por presentar la mayor concentración de estructuras, principalmente distribuidas en gran parte de la superficie de los municipios de Panabá, Tizimín, Sucilá, Espita, Calotmul, Temozón, Espita y Valladolid, entre otras porciones de los municipios de Cenotillo y Dzitás. Sin embargo, la mayor concentración es hacia la parte norte de la zona. Es decir se encuentran distribuidas hacia la porción centro sur, norte y noreste de los municipios de Río Lagartos y Tizimín respectivamente. En general las dimensiones de dichas cavidades son muy variadas. En el caso de los cenotes varían de 10 a 2827 m² y de 4 a 37 m de profundidad e incluso existen mayores de 50 m, por ejemplo YHB3040 y YHB3041, ambos ubicados en la localidad de Tixhualatún municipio de Valladolid. Para el caso de reholladas de 50 a 13077 m², sin embargo existen superficies entre 20000 a 30000 m², por ejemplo las cartografiadas con las claves YHB8055 y YHB8046, respetivamente, ubicadas en el municipio de Calotmul.

Con respecto a la profundidad del nivel freático. Para esta zona, cabe destacar que, con base a los datos tomados en campo, testimonios de encargados de pozos y mediciones directas en algunos cavidades, de manera general se determinó que hacia la parte norte de la zona la profundidad varía de 0 a 10 m, distribuyéndose en los municipios de San Felipe, Río Lagartos, Panabá, Sucilá y centro-norte de Tizimín; mientras que en la parte centro-sur de la zona los niveles fluctúan de entre 11 a 30 m, distribuidos en los municipios Calotmul, Temozón, Valladolid, Temax, Sucilá, Espita. Finalmente en la porción suroeste de la zona y sub-zona Peto, la profundidad del nivel freático es mayor a los 35 m.

De los 282 sitios cartografiados en dicha zona, 28 de ellos se consideraron de importancia, debido a su relación de las cavidades con infraestructura. Dichos puntos se muestran en la Tabla 59, donde se menciona sólo algunas características importantes contenidas en la ficha técnica correspondiente al tema en desarrollo. A continuación se describen de manera concreta algunos ejemplos de los sitios trascendentes localizados durante la etapa de campo (Tabla 60).

Tabla 60. Características importantes de sitios cartografiados en la zona Tizimín-Peto.

PUNTOS RELEVANTES ZONA TIZIMÍN-PETO						
PUNTO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	ESTRUCTURA CÁRSTICA	SUPERFICIE DE HUNDIMIENTO (m ²)	PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO (m).	
YHB8050	Calotmul	Tahcobo	Gruta	280.00	S/D	
YHB8056		Calotmul	Cenote	320.00	18	
YHB8064			Dolina Y Cenote	2827.44	12.00	
YHB2086	Chankom	Ticimul		706.00	21.00	
YHB3029	Chemax	X-Catzin	Cenote	471.00	15.20	
YHB3032		Carr Valladolid Chemax		1200.00	16.60	
YHB3043		Carretera Valladolid-Chemax	Dolina	908.00	S/D	
YHB8098		Uspibil		Orificio (Posible Cavidad)	S/D	S/D
YHB8099					S/D	S/D
YHB3011	Chichimilá	Chichimilá		S/D	18.00	
YHB3012		Rancho Yokdzonot	Cenote	113.00	18.30	
YHB3006	Chikindzon	Chikindzonot		S/D	22.00	
YHB2066	Dzitás	Dzitás	Dolina De Colapso	3848.00	S/D	
YHB8058	Espita	Espita	Gruta	14.00	S/D	
YHB8085	Temozón	Temozón	Dolina	2827.00	S/D	
YHB2079	Tinum	San Francisco Grande		12.60	S/D	
YHB3013	Tixcacalcup	Tixcacalcupul	Cenote	532.00	19.60	
YHB7003	Tizimín	Cenote Azul		28.27	6.00	
YHB8002				Dolina	50.26.56	10.00
YHB8005		3848.00	S/D			
YHB8007		Cenote	S/D		12.00	
YHB8010		Dolina	1256.00		S/D	
YHB6032		Chan Tres Reyes			201.00	10.00
YHB6034				Chan Cenote	18.00	12.00
YHB3037	Valladolid	Kanxoc	Cenote	S/D	19.45	
YHB3041		Tixhualactun	91.00	16.60		
YHB3042		Tesoco	S/D	18.50		
YHB8096		Yalcoba	706.86	20.00		

S/D Sin dato; superficies estimadas; las profundidades del nivel freático son datos proporcionados por pobladores, encargados de pozos, personal de protección civil municipal o dueños de ranchos.

Uno ejemplo importante es el cenote Xtatun, localizado hacia la porción noroeste de la cabecera municipal de Tixcacalcupul, cartografiado con la clave YHB3013. La estructura está conformada por una cavidad principal, así como orificios de diferentes diámetros en su entorno, dicha estructura está constituida por una serie de capas horizontales de caliza de espesores variables ligeramente fracturada, con alto grado de karsticidad, le suprayace una capa de caliza masiva con espesor que va de 0.5 a 1.8 m. Se considera de peligro alto ya que se encuentra relativamente cerca de viviendas y calle además. Se observa indicios de caídos de bloques (Fotografía 97).

El Cenote Azul. Localizado al noreste de Tizimín aproximadamente a 48 Km. En la localidad del de mismo nombre, fue cartografiado con la clave YHB7003: (X:425482 y Y:2352888), se observó que en las paredes de la cavidad están constituidas por una capa de roca caliza ligeramente fracturada, espesor aproximado de 1.2 m, dispone con 28 m de profundidad, se considera de peligro alto aunque al momento no muestra afectación, se encuentra cercado con mampostería y maya ciclónica, sin embargo debido a comentarios de personal de protección civil, aseguran que la cavidad en subsuelo es mayor e incluso subyace en su totalidad el área de la vialidad poco transitada y se encuentran viviendas en su entorno (Fotografía 98)



Fotografía 97. Cenote Xtatun, contiguo a viviendas y calle.



Fotografía 98. Cenote Azul. Cavidad susceptible a colapso.

Otro sitio importante es la dolina, ubicada en la calle 52 por la 54, en la colonia centro de la cabecera municipal en Tizimín, cartografiada con la clave YHB8002. Dicha cavidad se encuentra emplazada en caliza brechosa con espesor aproximado de 1.3 m ligeramente fracturada, le subyacen depósitos no consolidados conocidos localmente como Sascab, tiene una profundidad que va de 8 a 10 m, sirve como dren natural de aguas pluviales y residuales. No se observó afectación en muros de viviendas y calle, sin embargo la geometría de la cavidad, limita al menos 20 viviendas asentadas en su entorno. Por tal razón se consideró de peligro alto (Fotografía 99).



Fotografía 99. Casas, negocios ubicados en el entorno de la dolina en el municipio de Tizimín.

Otro ejemplo corresponde a una gruta en la localidad de Tahcabo correspondiente al mismo municipio, cartografiada con la clave YHB8050. Se observó que esta constituida por una capa de brecha calcárea con un espesor de 2 m, moderadamente fracturada con alto grado de karsticidad, profundidad mayor a 2.2 m. No se observó afectación en muros ni pavimento, sin embargo la cavidad en el subsuelo subyace tanto a vivienda como a la calle y fue considerada como peligro alto (Fotografía 100).



Fotografía 100. Vivienda expuesta sobre la cavidad.

Existe un cenote localizado aproximadamente a 20 Km al noroeste de la ciudad de Valladolid, ubicado en el centro en la localidad de Yacobá municipio de Valladolid señalado con la clave YHB8096. De acuerdo a lo observado en las paredes están constituidas por capas horizontales de brecha calcárea moderadamente fracturada de aproximado de 2 a 4 m de espesor, subyaciendo a una serie de capas de material poco compacto.

Se clasifico como peligro alto, debido a que se ubica cerca de calle principal altamente transitada, además al centro de salud y viviendas, si bien es cierto que en infraestructura no se observó afectación, sin embargo en Agosto del 2012, a raíz de fuertes precipitaciones ocurridas en el área derribo el muro de contención que servía de protección al mismo cenote (Fotografía 101).

Un ejemplo más, es la cavidad situada en la localidad de Uspibil, localizada al noroeste de la cabecera municipal de Chemax, del mismo municipio. Dicha cavidad se identificó con la clave YHB8098. Es importante comentar que se trata de un hundimiento activo evidenciado a través de una serie de orificios con diámetro pequeño, profundidad y superficie aproximada de 3 m y 4 m² respectivamente, sin embargo se desconocen las dimensiones en el subsuelo. Se sitúa en la entrada de la iglesia en obra negra, por tal motivo se consideró de peligro alto. Es importante considerar estudios puntuales debido a la presencia de otras estructuras en patios de viviendas en esta misma localidad (Fotografía 102).



Fotografía 101. La cavidad limitan al norte centro de salud y al sur comercio y vivienda.



Fotografía 102. Hundimiento activo, frente a iglesia en construcción.

Finalmente fueron verificadas un par de estructuras (YHB6032 y YHB6034) en la porción sur del municipio de Tizimín. La primera en el poblado Chan Tres Reyes, donde se observan capas de caliza brechosa, de espesor variable que va de 0.8 a 1.2 m, le subyace una serie de estratos horizontales de roca caliza con alto grado de karstificación y profundidad mayor a 10 m. Se clasifico de peligro alto, debido a que se encuentra muy cerca de viviendas e incluso la geometría de la cavidad subyace la totalidad el área de la calle, sin embargo no se observó afectación. La segunda se ubica en la localidad de Chan Cenote el cual se manifiesta a través de 5 norias interconectados entre sí en el subsuelo originando una estructura kárstica con superficie aprox. 3000 m. Se considera de peligro alto porque se localiza en el parque central de la localidad (Fotografías 103 y 104).



Fotografía 103. La superficie del cenote, subyace a calle. Chan Tres Reyes.



Fotografía 104. Cavidad en subsuelo manifestada en superficie por 5 norias.

VII.3.6. Susceptibilidad a Hundimientos

Los factores disparadores de colapsos del terreno relacionado a procesos kársticos pueden ser muy variados y de muchos orígenes. Las principales por mencionar algunos son químicas y mecánicas. En el primer caso, para estimar la tasa de disolución de calizas, se requiere de datos muy específicos y requiere además de análisis por unidad kárstica es decir por cada dolina pues cada estructura es distinta. Por tanto a nivel regional esta estimación queda fuera de los alcances del presente Atlas. Por otro lado como se menciona anteriormente, las variaciones del nivel freático en el sistema acuífero son aisladas y no existe un registro completo, al menos para realizar un escenario que incluya esta variable. Existe solo un antecedente sobre la variación del nivel freático del acuífero.

Este estudio fue llevado a cabo por la CONAGUA (2002) inmediatamente después del paso del Ciclón Tropical Isidoro en el 2002, y que de acuerdo con testimonios durante este evento existieron casos aislados de colapsos en el territorio del Estado. Sin embargo en las distintas comunidades los pobladores mencionan que los niveles de agua llegaron a elevarse hasta 10 m, de manera casi homogénea en el territorio del Estado; mientras que CONAGUA (*op. cit.*) señala que los niveles cercanos a la costa y en la parte central del Estado variaron entre uno y cuatro metros mientras que en el área de la Sierrita de Ticul los niveles fueron de hasta diez metros.

La discrepancia entre los datos de CONAGUA y el testimonio de pobladores puede deberse al tiempo transcurrido en las mediciones. Estos datos son muy importantes, sin embargo la certeza de los resultados para la generación de escenarios en sentido estricto no es suficiente, pues sería necesario datos históricos de otros meteoros y principalmente sus consecuencias hidrogeológicas, de lo cual no se tienen registros.

Por otro lado, en el caso de que existieran los datos, la generación de escenarios sería especulativo y sería una variable más dentro de un análisis de probabilidad donde tendríamos que considerar el espesor de la cubierta rocosa y sus características mecánicas en todo el territorio para lo

cual se tendría que conocer la configuración de todas las cavidades en un marco geológico donde se tiene de manera principalmente interpretativa poco más de 10,000 dolinas “visibles” en superficie, que en el presente estudio se consideran simplemente como un indicador de la posible presencia de otras no visibles, como consecuencia se hace muy difícil estimar el peligro. Sin embargo el presente mapa cuenta con elementos capaces de proporciona un panorama general de la probabilidad relativa de colapsos y una herramienta en la toma de decisiones y planeación del uso de suelo. Este estudio es un esfuerzo en materia de protección civil y un primer acercamiento a una propuesta metodológica que sirva como base en el desarrollo de futuros proyectos. No obstante, es posible hacer una relación de la infraestructura con los grados de susceptibilidad; los mapas resultantes se denominan mapas de amenaza a la infraestructura vial (el cual considera carreteras federales y estatales únicamente) y mapa de amenaza a áreas urbanas (en poblaciones con más de 2500 habitantes).

Modelo de unión de variables

La elaboración del mapa por susceptibilidad a hundimientos por karsticidad, fue realizado mediante el Procesos de Análisis Jerárquico (PAJ) (Saaty, 1990, Saaty, 2008) como propuesta para realizar análisis multicriterio integrado al Sistema de Información Geográfica (SIG). Este método ha sido utilizado ampliamente en gran cantidad de temas y problemáticas enfocado principalmente en la toma de decisiones, desde elegir el mejor software para usos específicos (Chandio *et al.*, 2011), selección de sitios para establecer infraestructura e impulsar el desarrollo económico (Jabr y El-Awar, 2004), ubicación de sitios para disposición de aguas residuales (Ibrahim *et al.*, 2011) etc. Este método se utilizó con la finalidad de establecer algunas de las variables que intervienen en el proceso de karsticidad y su relación con zonas de potencial colapso.

Para la realización del análisis de susceptibilidad se incluyeron cinco variables donde se ponderó su peso tomando en consideración su impacto relativo en términos de susceptibilidad a la karstificación. En este sentido se utilizaron valores que van de 1 a 9, donde 1 representa igual importancia y 9 representa extremadamente importante. Con estos datos se obtuvo la Matriz de Comparaciones Pareadas de Variables (MCP) (Tabla 61).

La asignación de los pesos a cada variable se estableció considerando ejemplos mundiales. Sin embargo el uso de las variables aquí empleadas son una propuesta con base a la información con la que actualmente se cuenta, la cual a su vez se considera como apropiada de acuerdo a la escala de trabajo.

Tabla 61. Matriz de comparaciones pareadas de variables (MCP) consideradas en el análisis de susceptibilidad a hundimientos.

CRITERIOS	GEOLOGÍA	GRADO DE FRACTURAMIENTO	DENSIDAD DE DOLINAS	HIDROGEOQUÍMICA	ESPESOR DE SUELOS
Geología	1	3	3	5	9
Grado de Fracturamiento	0.5	1	2	5	7
Densidad de Dolinas	0.5	0.5	1	5	7
Hidrogeoquímica	0.25	0.25	0.25	1	5
Espesor de Suelos	0.1250	0.1250	0.1667	0.1667	1
Suma	1.9778	4.8429	6.3429	16.2000	29.0000

Posteriormente, se realizó la normalización para cada variable. Dicha normalización se presenta a continuación (Tabla 62). La normalización se obtiene del resultado del producto entre la MCP y la adición de los valores de variables.

Tabla 62. Matriz de normalización.

						PONDERACIÓN (PROMEDIO)
Geología	0.5056	0.6195	0.4730	0.3086	0.3103	0.4434
Grado de Fracturamiento	0.1685	0.2065	0.3153	0.3086	0.2414	0.2481
Densidad de Dolinas	0.1685	0.1032	0.1577	0.3086	0.2414	0.1959
Hidrogeoquímica	0.1011	0.0413	0.0315	0.0617	0.1724	0.0816
Espesor de Suelos	0.0562	0.0295	0.0225	0.0123	0.0345	0.0310
	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Por otra parte se realiza el Vector de la Suma Ponderada (**VSP**) (Tabla 63) obtenida a partir del resultado del producto de los valores de la **MCP** y del promedio de la Matriz de Normalización (**MN**). De estos valores se obtiene la adición de los factores. Finalmente el valor de consistencia, se obtiene a partir del cociente entre la suma ponderada y el promedio de la MN. Lamda se obtiene a partir del cociente entre la adición de los valores de consistencia y el número de variables consideradas.

Tabla 63. Vector de la suma ponderada y valor de consistencia.

CRITERIOS					SUMA PONDERADA	VALOR DE CONSISTENCIA
Geología	0.4434	0.7442	0.5877	0.4081	2.4625	5.5535
Grado de Fracturamiento	0.1478	0.2481	0.3918	0.4081	1.4128	5.6951
Densidad de Dolinas	0.1478	0.1240	0.1959	0.4081	1.0929	5.5789
Hidrogeoquímica	0.0887	0.0496	0.0392	0.0816	0.4141	5.0739
Espesor de Suelos	0.0493	0.0354	0.0280	0.0163	0.1600	5.1610
						$\lambda = 5.4125$

Por último se obtienen los **Índices de Consistencia (A)** y la **Proporción de Consistencia (B)**. Donde n representa el número de variables e **IA** el índice de aleatoriedad o de consistencia aleatoria (Tabla 64). Este último se toma de los índices considerados en la literatura los cuales son constantes y se relacionan con el número de variables dentro del análisis.

$$A) \quad IC = \frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{0.4125}{4} = 0.1031$$

$$B) \quad PC = \frac{IC}{IA} = \frac{0.1031}{1.12} = 0.0921$$

Tabla 64. Índice de consistencia aleatoria o índice de aleatoriedad.

INDICE ALEATORIO (IA)									
Tamaño de matriz	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatorio	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

A partir de los pesos de cada atributo se llevó a cabo la suma de los mapas de geología, grado de fracturamiento, densidad de dolinas, hidrogeoquímica y espesor de suelos, cuyo resultado se resume en el mapa de susceptibilidad a hundimientos por procesos kársticos (Figura 103).

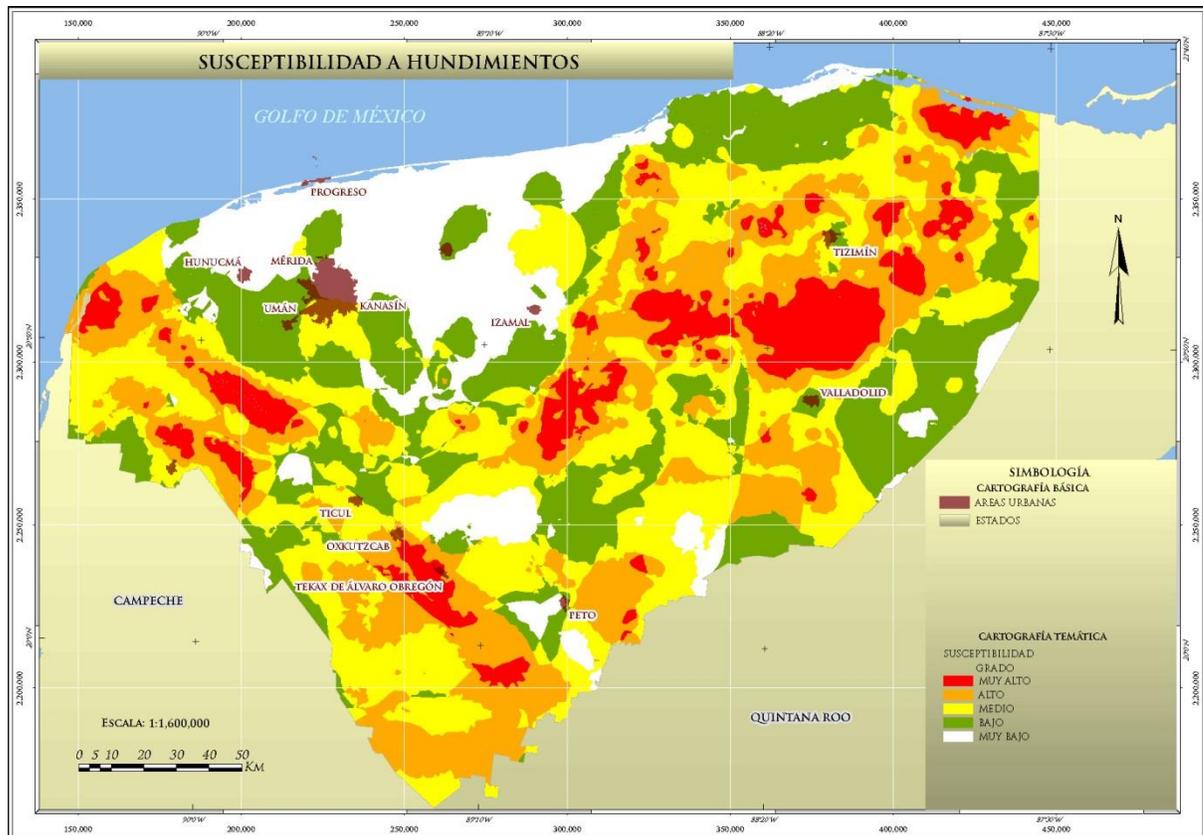


Figura 103. Mapa de susceptibilidad a hundimiento del terreno en el estado de Yucatán.

En este mapa se observan de manera general cinco zonas. La zona de mayor relevancia se distribuye en el centro-noreste del territorio del Estado donde se tiene el mayor grado de susceptibilidad (colores rojo y naranja). En esta área se encuentra la mayor concentración de dolinas, respecto del resto del territorio. De acuerdo con el análisis previo mediante imágenes de satélite, en estas áreas se llegó a contabilizar aproximadamente 15 dolinas por kilómetro cuadrado.

Otra zona importante es un semicírculo que se extiende desde la costa noroeste hasta el centro norte del Estado, coincidiendo con la distribución de dolinas del denominado anillo de cenotes del Chicxulub. El grado de susceptibilidad en esta área es muy variable, sin embargo de manera general se considera como grado alto a muy alto. De acuerdo con la descripción realizada en la zonificación morfológica (Figura 100), estos anillos de cenotes se relacionan con lineamientos circulares paralelos entre sí con longitudes superiores a 100 Km.

La zona sur y poniente del Estado, donde se encuentra la Sierrita de Ticul, se considera de grado muy alto a alto, con pequeñas zonas de grado intermedio. Cabe mencionar que esta zona desde el punto de vista geomorfológico es considerada con desarrollo kárstico más avanzado.

Finalmente en centro-norte del Estado se encuentran las zonas caracterizadas por valores de susceptibilidad principalmente de grado bajo. Estas zonas están limitadas por la zona de cenotes del Chicxulub. Es de especial interés algunas áreas de grado medio que se distribuyen en el interior del semicírculo donde se encuentra el desarrollo urbano de la ciudad de Mérida.

El mapa antes citado, refleja condiciones donde existe presencia de estructuras kársticas ampliamente reconocidas dentro del territorio y que son estructuras generadas una vez que las rocas fueron expuestas a las condiciones subaéreas; sin embargo es posible establecer zonas con gran posibilidad de desarrollo kárstico, con base en las condiciones actuales desde el punto de vista de agresividad química del agua que actúa en el medio geológico. De acuerdo con lo anterior en la mitad poniente del territorio es en donde el agua juega un papel de mayor relevancia.

De acuerdo con el cruce de información entre las áreas con diferente grado de susceptibilidad y el territorio de los municipios, se estimó que aproximadamente el 8.78% (3446 Km²) del territorio del Estado presenta susceptibilidad muy alta, mientras que áreas con susceptibilidad alta a media representan el 23.78% (9336 Km²) y 29.30% (11503 Km²) respectivamente (Figura 104a, b).

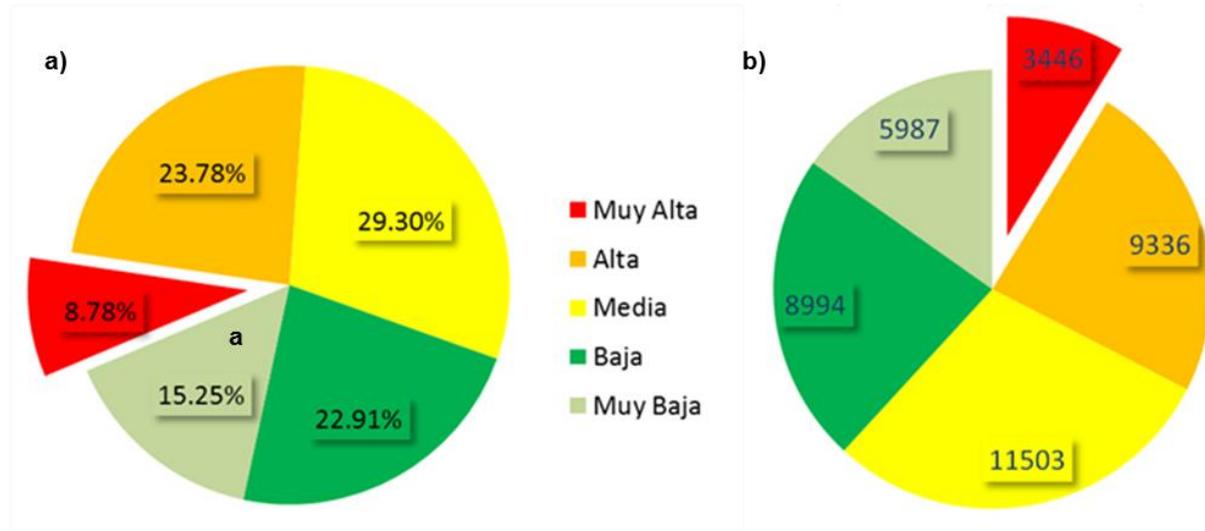


Figura 104. Porcentaje de área (a) (Km²) y área ocupada (b) por los diferentes grados de susceptibilidad a hundimientos en el estado de Yucatán.

Desde el punto de vista de peligros geológicos se procedió a generar el mapa de amenaza para la infraestructura vial (Carreteras Federales y Estatales) así como para áreas urbanas (poblaciones con más de 2500 habitantes). Previamente, como punto de partida se determinaron áreas que ocupa cada grado de susceptibilidad en los municipios, de lo cual en la Tabla 65 se muestran solo las áreas superiores a 100 Km². En este sentido se tiene que los municipios con áreas relacionadas a grado de susceptibilidad muy alto, alto y medio destacan los municipios de Tizimín, el cual tiene aproximadamente 514 Km² involucrados los cuales representan solo el 14% de su superficie (en el grado muy alto) por encima de los municipios de Tekax, Sotuta y Temozón; sin embargo este último tiene 66% de sus superficie involucrada.

Tabla 65. Áreas superiores a 100 Km² en territorios municipales con diferentes grados de susceptibilidad a hundimientos.

MUNICIPIO	ÁREA (Km ²)	ÁREAS DE SUSCEPTIBILIDAD (Km ² /%)		
		MUY ALTA	ALTA	MEDIA
Tizimín	3883	542/14	1321/34	1269/32
Temozón	706	470/66		
Tekax	2770	256/9	1207/43	1105/39
Sotuta	546	222/40	220/40	
Espita	735	195/26	340/46	198/27
Calotmul	291	148/50	107/36	
Cenotillo	542	145/26	296/54	100/18
Maxcanú	912	135/14	423/46	343/37
Dzité	310	123/39		
Celestún	604	113/18	228/37	226/37
Chocholá	293	108/36		
Tzucacab	766		462/60	
Peto	1055		460/43	331/31

MUNICIPIO	ÁREA (Km ²)	ÁREA DE SUSCEPTIBILIDAD (Km ² /%)	
		ALTA	MEDIA
Temozón	706	149/21	
Sucilá	307	130/42	110/35
Opichén	260	126/48	
Tekom	273	120/43	136/49
Tinum	470	113/24	199/42
Tetiz	337	109/32	
Chankom	443		345/77
Halachó	587		293/50
Chemax	1398		270/19
Santa Elena	514		233/45
Chikindzonot	474		228/48
Ticul	340		208/61
Panabá	665		196/29

.....Continuación de Tabla 65.

MUNICIPIO	ÁREA (Km ²)	AREAS DE SUSCEPTIBILIDAD (Km ² /%)		
		MUY ALTA	ALTA	MEDIA
Oxkutzcab	864		449/51	312/36
Buctzotz	654		243/37	305/46
Tixcacalcupul	502		239/47	
Tunkás	413		228/55	118/28
Chichimilá	470		227/48	211/44
Yaxcabá	1474		212/14	630/42
Kinchil	356		173/48	
Valladolid	1078		165/15	381/35
Mérida	884			202/22

MUNICIPIO	ÁREA (Km ²)	AREA DE SUSCEPTIBILIDAD (Km ² /%)	
		ALTA	MEDIA
Tixmeuac	230		178/77
Abalá	293		165/56
Tekit	281		164/58
Cantamayec	356		150/42
Temax	338		149/44
Muna	398		138/34
Tekal De Venegas	200		104/52
Dzilam De González	506		100/19

Posteriormente se estimaron las superficies de los grados de amenaza por área urbana (Figura 105). De lo anterior destacan los las poblaciones de Cenotillo, Dzitas, Quintana Roo, Temozón, Calotmul, Sucila, Sotuta, Oxkutzcab, Akil, Tekax, Kompoma y Maxcanu (Tabla 66).

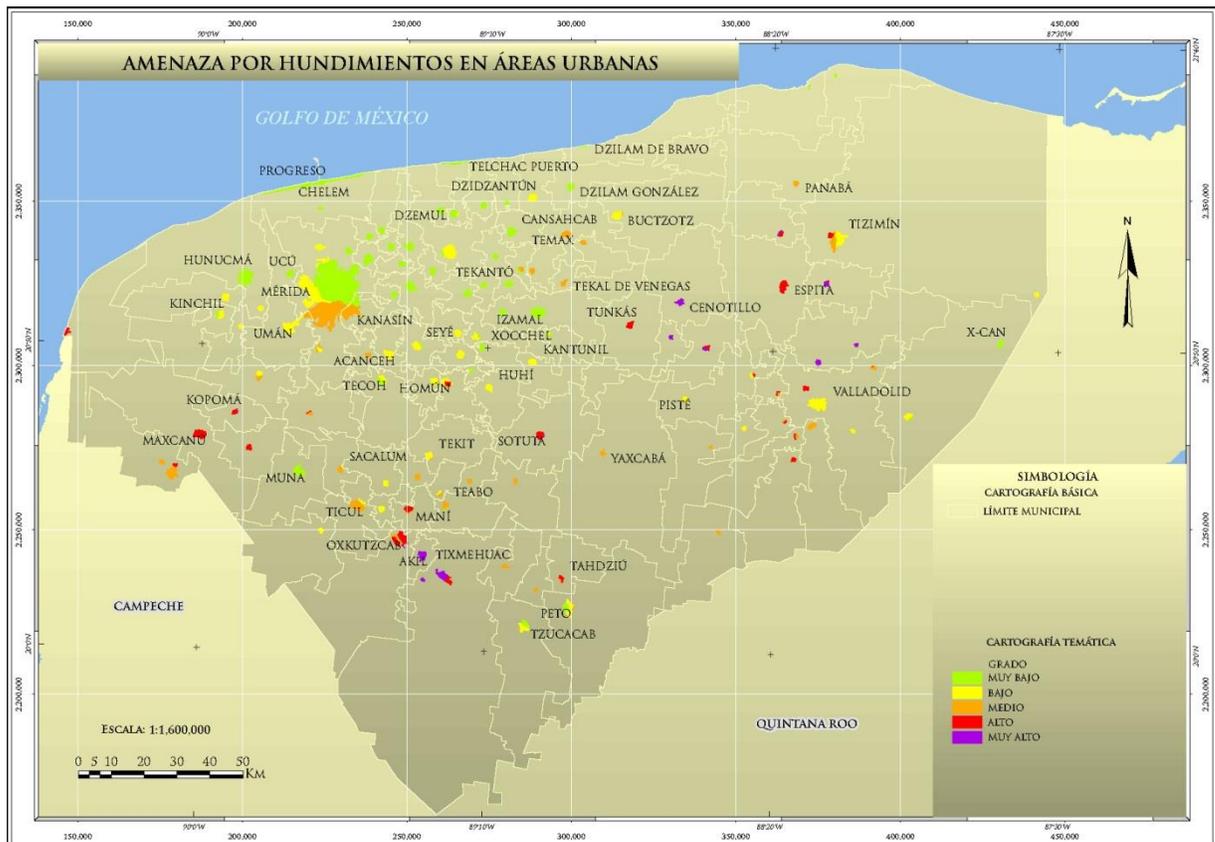


Figura 105. Mapa de amenaza por hundimiento en áreas urbanas.

Tabla 66. Áreas urbanas consideradas dentro de zonas con diferentes grados de amenaza a hundimientos.

MUNICIPIO	AMENAZA			MUNICIPIO	AMENAZA		
	MUY ALTA	ALTA	MEDIA		MUY ALTA	ALTA	MEDIA
Cenotillo	✓			Abalá		✓	
Dzitas	✓	✓		Cuzamá		✓	✓
Quintana Roo	✓			Sacalum		✓	
Temozón	✓			Ticúl		✓	✓
Calotmul	✓			Santa Elena		✓	✓
Sucilá	✓			Oxkutzcab		✓	
Sotuta	✓	✓		Teabo			✓
Oxkutzcab	✓	✓		Chumayel			✓
Akil	✓			Mama			✓
Tekax	✓	✓		Mayapán			✓
Kopomá	✓	✓		Cantamayec			✓
Maxcanú	✓	✓		Tixmeuc			✓
Celestún		✓		Yaxcabá			✓
Opichén		✓		Tekal De Venegas			✓
Maní		✓		Chankom			✓
Homún		✓		Chikindzonot			✓
Tahdziú		✓		Uyma			✓
Tunkás		✓		Chichimilá			✓
Valladolid		✓	✓	Tekom			✓
Tixcacalcupul		✓		Tizimín			✓
Halachó			✓	Panabá			✓
Chocholá			✓	Tepakán			✓
Mérida			✓	Teya			✓
Umán			✓	Temax			✓
Kanasín			✓	Dzoncauich			✓
Timucuy			✓	Buctzotz			✓

En cuanto a la superficie involucrada en los grados de amenaza a áreas urbanas, Tekax de Álvaro Obregón, Akil, Cenotillo, Calotmul y Temozón presentan superficies de más de 2 Km² dentro del grado muy alto; por otro lado, la ciudad de Mérida destaca por presentar la mayor superficie involucrada (57 Km²) en el grado medio (Tabla 67), seguida por Kanasin, Ticul y Halacho con 15, 10 y 8 Km² respectivamente. En la tabla 67, las casillas en blanco representan ausencia del grado de amenaza respectivo.

Tabla 67. Superficies de áreas urbanas en grados de amenaza muy alta, alta y media.

AREA URBANA	ÁREA AMENAZADA (Km ²)		
	MUY ALTO	ALTO	MEDIO
Tekax de Álvaro Obregón	6	3	
Akil	5		
Cenotillo	3		
Calotmul	2	<1	
Temozon	2		
Hunuk	1		
Dzitas	1	1	
Kankab	1		
Quintana Roo	1		
Sotuta	<1	4	
Maxcanu	<1	7	
Kopoma	<1	2	
Sucila	<1	2	
Oxkutzcab	<1	9	4
Espita		6	<1
Mani		3	1
Tunkas		3	

.....Continuación de Tabla 67.

AREA URBANA	ÁREA AMENAZADA (Km ²)		
	MUY ALTO	ALTO	MEDIO
Celestun		2	
Popola		2	
Tizimin		2	8
Opichen		2	
Homun		2	
Dzitas		1	
Halacho		1	
Tixcacalcupul		1	
Tahdziu		1	1
Yalcoba		<1	
Tinum		<1	<1
Cuncunul		<1	1
Abala		<1	1
Uayma		<1	1
Tekom		<1	1
Calotmul		<1	
Mérida			57
Kanazin			15
Ticul			10
Halacho			8
Uman			4
Temax			4
Chichimila			3
Tizmehuac, Mama, Cepeda, Yaxcaba, Timucuy, Tepakan, Sacalum, Dzoncahuich, Chochola Tekal de Venegas, Teabo, Panaba			2
Leona Vicario, Cantamayec, Peto, Chumayel, Chankon, Yalcoba, San Jose Itzal, Chikindzonot, Chakzinkin, Teya, Mayapan			1
Cuzama			<1
Tekit			<1
Chapab			<1
Buctzotz			<1
Piste			<1
Santa Elena			<1

Por otro lado, con respecto a la infraestructura vial, de los 1556 Km de carreteras federales, 90 Km (5.78%) se consideran en amenaza muy alta, mientras que 247 Km y 313 Km corresponden a amenaza alta a media respectivamente (Figura 106).

En la Tabla 68 se muestran los costos de tramos carreteros de acuerdo con el grado de amenaza a hundimientos. Las cantidades con las que realizaron los cálculos así como las especificaciones estructurales y consideraciones en la clasificación de las vías de comunicación, fueron obtenidas del IMT (2009). Para mayor información consulte el subcapítulo de Vías de Comunicación. Los costos aquí expuestos son solo como referencia.

Tabla 68. Costos por tramo carretero federal respecto a su relación al grado de amenaza a hundimientos.

AMENAZA	LONGITUD (Km)	COSTO (\$)	% DE TRAMO
Muy Alta	90	\$2,138,970	5.78
Alta	247	\$6,404,393	15.87
Media	313	\$6,827,361	20.11
Baja	516	\$11,758,331	33.16
Muy Baja	390	\$6,028,568	25.06
Total	1556	\$33,157,623.00	99.98

Por otro lado, con respecto a las Carreteras Estatales (Figura 106) y su relación con las áreas de susceptibilidad a hundimientos se tiene lo siguiente: De los 3933 Km, solo 338 (8%) se consideran en amenaza muy alta, principalmente en la parte E-NE, centro y sur de la entidad relacionados con zonas del anillo de cenotes, y el área de la Sierrita de Ticul. Dentro del grado Alto a Medio, se presentan 921 (23%) y 1072 (27%) Km asociados respectivamente (Tabla 69).

Tabla 69. Costos por tramo carretero estatal respecto a su relación al grado de amenaza.

AMENAZA	LONGITUD (Km)	COSTO (\$)	% DE TRAMO
Muy Alta	338	\$1,006,415	8.59394864
Alta	921	\$2,028,902	23.41723875
Media	1072	\$2,743,168	27.25654717
Baja	894	\$2,045,936	22.73073989
Muy Baja	708	\$1,823,592	18.00152555
Total	3933	\$9,648,013	100

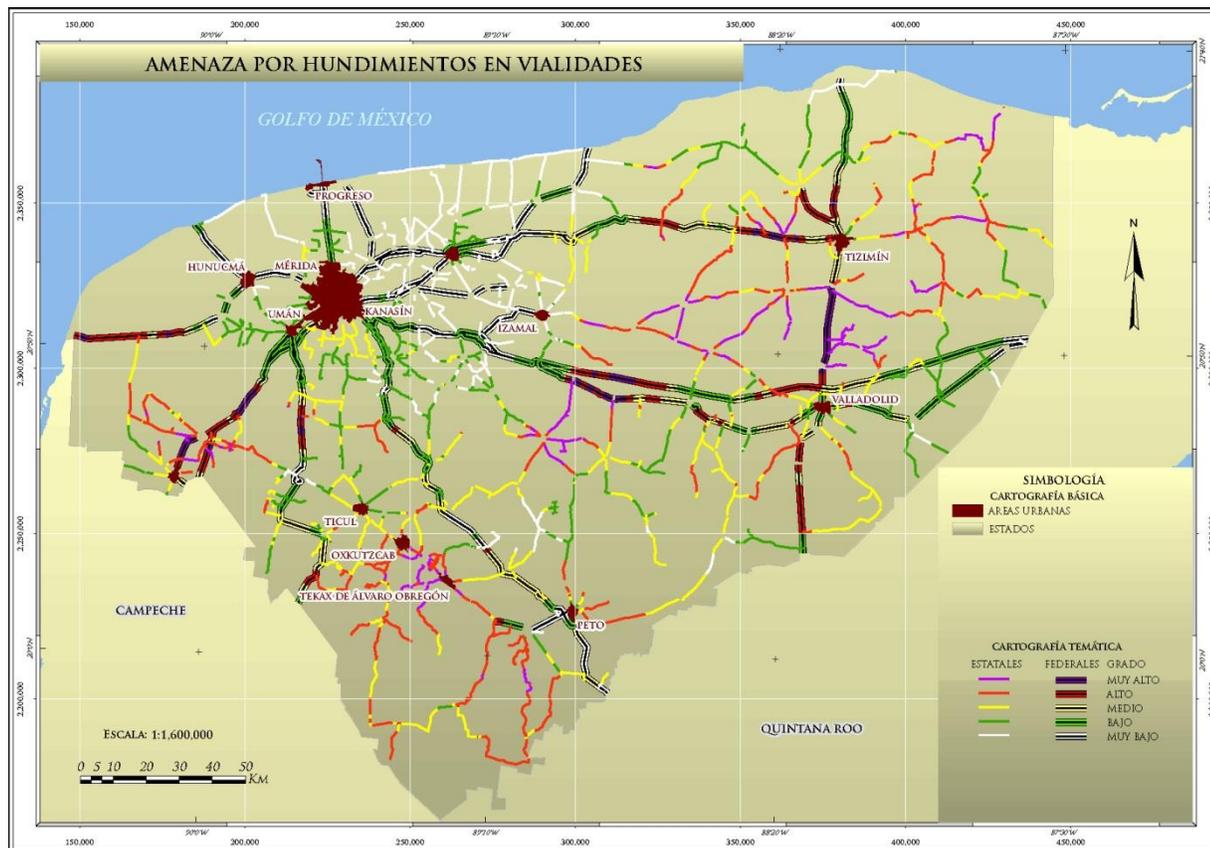


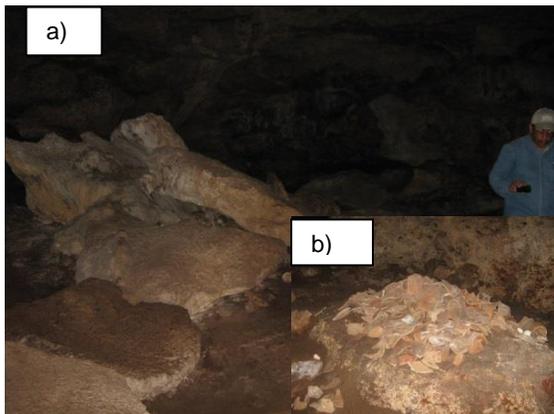
Figura 106. Mapa de amenaza por hundimientos en vialidades federales y estatales.

VII.3.7. Discusión

Existen numerosos problemas relacionados con el karst, entre ellos se pueden considerar: 1) Colapso repentino de la superficie del terreno, 2) Subsistencia gradual de baja magnitud del terreno, 3) Contaminación del agua subterránea debido al desecho de aguas residuales al acuífero, 4) Contaminación de agua debido al colapso de embalses, 5) condiciones de cimentación irregulares e impredecibles que surgen de los procesos de erosión en la zona de epikarst e 6) Inundación debido a cuencas con tasas de infiltración limitadas (Beck, 1988), aunque se tiene que agregar también la pérdida de suelo y migración de material edáfico al sistema kárstico-hidrogeológico. Por otro lado son innumerables los aspectos positivos de este tipo de ambiente. En el caso de la península existe un acuífero donde se tiene la mayor cantidad de agua dulce disponible de nuestro país del cual especies de flora y fauna endémicas dependen de los sistemas cavernosos, por mencionar algunos de los más relevantes.

En la mayoría de los casos la subsistencia por disolución o colapso normalmente esta precedido por la aparición de fracturas y grietas en edificios o infraestructura, lo cual puede ser considerado como precursor de un probable colapso (Delle Rose y Parise, 2002). De acuerdo con observaciones en campo, en algunas estructuras donde se puede acceder a su interior, existen evidencias de colapsos relativamente jóvenes debido a que algunos de los bloques caídos se encuentran depositados sobre “suelos” o depósitos de limo y arcilla previamente depositados como en el caso del cenote en el poblado de Maní donde existen bloques caídos sobre material edáfico de donde se ha rescatado material posiblemente arqueológico (Espinosa-Vázquez, 2012, comunicación personal) (Fotografías 105a y 105b); incluso casos como en el Cenote Yaxbacaltún (Fotografía 106), donde existen bloques caídos encima de la infraestructura.

En algunos casos se sabe de eventos de colapso durante o posterior al paso de ciclones tropicales o durante lluvias intensas. Es muy complicado establecer en que momento puede ocurrir un colapso, sin embargo se sabe que este proceso de erosión kárstica es continuo y que generalmente se pueden presentar durante o después de precipitaciones atípicas que provocan el ascenso y descenso abrupto de los niveles freáticos.



Fotografía 105. a) Bloques producto de colapso en el Cenote Maní y b) Detalle de material arqueológico.



Fotografía 106. Bloque caído en el Cenote Yaxbacaltun. SE del poblado de Homún.

Con el paso del ciclón tropical Isidoro, de acuerdo con comentarios de pobladores de las cabeceras municipales de Huhí y Homún, el nivel freático llegó a subir al menos 10 m en algunos de los cenotes visitados y en ninguno de los casos superó el nivel del terreno. Por otro lado durante este mismo evento, en la parte Sur del Estado, en la zona de poljes con desarrollo de suelos principalmente arcillosos y de gran espesor en las áreas bajas, el nivel de agua en algunos puntos se elevó por más de diez metros respecto del nivel del terreno. Posterior al paso del ciclón, en las zonas inundadas se generaron hundimientos del terreno por donde el agua logró infiltrarse al subsuelo, en algunos casos estos hundimientos afectaron terrenos particulares, donde el nivel de agua bajo relativamente rápido gracias a la generación de “pozos de absorción” naturales. Cabe señalar que

CONAGUA (2002), en estudios de monitoreo de elevación de agua en pozos, realizó una comparación entre el promedio anual del nivel freático en 1988 y los valores medidos inmediatamente después del paso del ciclón Isidoro, estimando que en la mayor parte del territorio el nivel de agua se elevó de 1 m hasta 4 m en las áreas costera y de Tizimín respectivamente, mientras que en el sur de la entidad el nivel subió más de 10 m.

De manera general las rocas que presentan desarrollo de dolinas están relacionadas con capas masivas a estratos gruesos de rocas con gran contenido fósil, capas gruesas de material calcáreo no consolidado a semi-consolidado. En ocasiones se observa disolución preferencial horizontal relacionada con la estratificación y en otras se observa control estructural relacionado con fracturas sub-verticales. Es de especial atención que algunos huecos verticales de dimensiones centimétricas no tienen relación aparente con porosidad secundaria (fracturas). Con respecto a las observaciones realizadas vía aérea, se constató alineación de dolinas, lo cual supone control estructural en la generación de las estructuras kársticas por sistemas de fracturas con direcciones preferenciales NW-SE y NE-SW principalmente desarrollados en la zona del anillo de cenotes, que junto con la parte E y NE, y la zona de las grandes cavernas en la sierrita de Ticul constituyen las áreas de mayor concentración de áreas urbanas e infraestructura vial con grados de susceptibilidad mayores.

Así mismo, la infraestructura se encuentra en zonas susceptibles a hundimiento, sin embargo son aislados los casos que se tienen donde se han reportado colapsos que hayan afectado de manera significativa a viviendas o vías de comunicación.

VII.4. Sismicidad

VII.4.1. Conceptos Básicos

La sismicidad se define como el parámetro que describe la actividad sísmica en un área geográfica dada, con base al estudio de ocurrencia y distribución de ondas que provocan el movimiento del terreno. Este fenómeno derivado de la dinámica interna de la Tierra ha estado presente en la historia geológica de nuestro planeta, y seguramente continuará manifestándose de manera similar a lo observado en el pasado (CENAPRED, 2006). Un sismo (Terremoto o temblor), es la vibración de la Tierra producida por una súbita liberación de energía la cual se propaga en el interior y en la superficie de la Tierra en forma de ondas elásticas. La energía que da origen a estas ondas proviene de una fuente sísmica, por lo regular, se producen por el deslizamiento de la corteza terrestre a lo largo de una falla. El punto donde se genera la ruptura en el interior de la Tierra se denomina Hipocentro o Foco, y a su vez la proyección de este en la superficie se conoce como Epicentro (Figura 107).

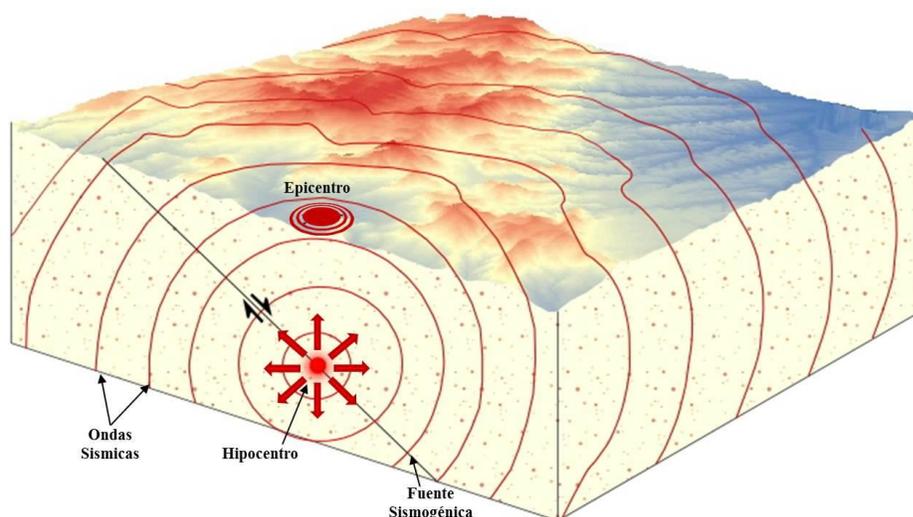


Figura 107. Esquema de propagación de las ondas sísmicas.

Existen dos tipos de ondas sísmicas que se propagan cuando existe una liberación de energía, las ondas de cuerpo (P y S) y las ondas superficiales (Love y Rayleigh). Las primeras son aquellas que viajan a través del interior de la Tierra, no presentan trayectorias horizontales continuas ya que esta varía debido a la densidad y composición del cuerpo rocoso del interior de la Tierra por lo que se presentan fenómenos de reflexión y refracción. Se dividen en dos grupos: Ondas P o primarias y ondas S o secundarias (CENAPRED, 2011).

- Ondas P: Son longitudinales o compresionales, es decir, el material es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación. Viajan a diferente velocidad dependiendo del medio sobre el cuál se transmiten, las velocidades de dispersión oscilan entre 1,100 y 8,000 m/s. Se les conoce también como ondas primarias (P) debido a que viajan más rápido y son las primeras en llegar al punto de distancia (Figura 108a).
- Ondas S: Son ondas transversales o de corte, esto es que el material es desplazado perpendicularmente a la dirección de propagación. Presentan mayor amplitud que las ondas P, por lo que se sienten con más intensidad. Las ondas de cizalla ó secundarias (S) solo pueden viajar a través de medios solidos ya que su existencia depende de la habilidad del medio transmisor para resistir los cambios de forma debido al esfuerzo cortante (Figura 108b).

Las segundas son ondas que viajan sobre la superficie de la Tierra y se desplazan a menor velocidad que las ondas P y S. Estas ondas son las que causan mayor destrucción por la resonancia

que provocan en las edificaciones debido a su baja frecuencia. Dentro de estas se encuentran las ondas Rayleigh y ondas Love.

- Ondas Rayleigh (R): son aquellas en las que las partículas se mueven verticalmente en una órbita elíptica, es decir, viajan como ondulaciones (Figura 108c).
- Ondas Love (L): las partículas vibran transversalmente a la dirección de avance de la onda por lo que provocan cortes horizontales en la Tierra (Figura 108d).

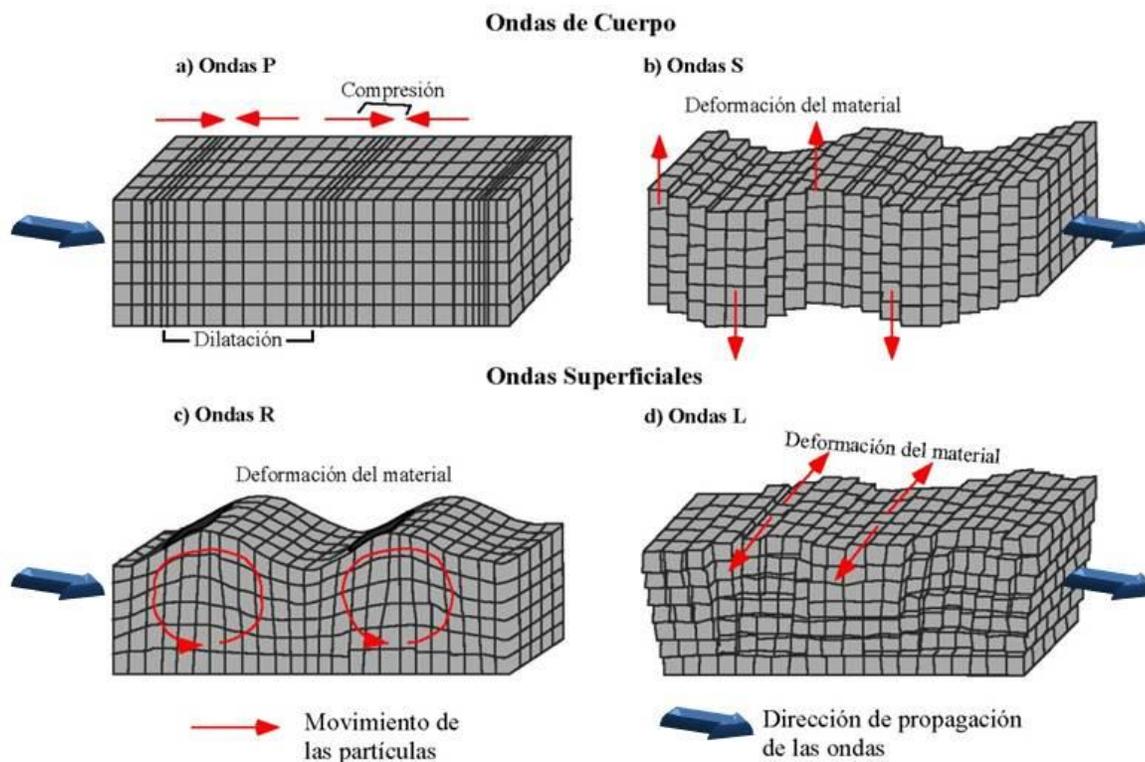


Figura 108. Tipos de ondas sísmicas.

La descripción de un sismo se da generalmente en términos de intensidad y magnitud, los cuales son a menudo confundidos, a pesar que aluden a fenómenos distintos, el primero evalúa el daño producido por un terremoto a la infraestructura existente en un lugar determinado, su cuantificación está en función de la sensibilidad de las personas y la apreciación de los daños; mientras que la magnitud es una medida cuantitativa de la cantidad de energía liberada que determina el tamaño real del sismo, independientemente si estos ocurren en regiones habitadas o no.

Para medir la intensidad sísmica se utiliza la escala de Intensidad de Mercalli Modificada la cual consta de doce grados, esta medición no solo depende de la fuerza de un sismo, sino también de otros factores, como la distancia al epicentro, la naturaleza de los materiales de superficie y el diseño de los edificios. En la Tabla 70 se muestran los grados de intensidad y los efectos asociados a cada uno de ellos.

Por otro lado, la magnitud de un terremoto puede determinarse a partir de la cantidad de energía liberada utilizando las amplitudes de las ondas medidas directamente desde un sismógrafo, la cuantificación de los efectos de un sismo se da con la asignación de un número en una escala logarítmica utilizada mundialmente conocida como Escala de Richter (Tabla 71), esto significa que por cada grado de aumento en la escala, la energía liberada podría ser hasta 32 veces mayor.

Tabla 70. Escala de Intensidad de Mercalli Modificada-Abreviada (CENAPRED, 2011).

INTENSIDAD	PERCEPCIÓN-EFECTO
I	No es sentido, excepto por algunas personas bajo circunstancias especialmente favorables.
II	Sentido sólo por muy pocas personas en posición de descanso, especialmente en los pisos altos de los edificios. Objetos delicadamente suspendidos pueden oscilar.
III	Sentido claramente en interiores, especialmente en pisos altos de los edificios, aunque mucha gente no lo reconoce como un terremoto. Automóviles parados pueden balancearse ligeramente. Vibraciones como al paso de un camión. Duración apreciable.
IV	Durante el día sentido en interiores por muchos; al aire libre por algunos. Por la noche algunos despiertan. Platos, puertas y ventanas agitadas; las paredes crujen. Sensación como si un camión pesado chocara contra el edificio. Automóviles parados se balancean apreciablemente.
V	Sentido por casi todos, muchos se despiertan. Algunos platos, ventanas, y similares rotos; grietas en el revestimiento en algunos sitios. Objetos inestables volcados. Algunas veces se aprecia balanceo de árboles, postes y otros objetos altos. Los péndulos de los relojes pueden pararse.
VI	Sentido por todos, muchos se asustan y salen al exterior. Algún mueble pesado se mueve; algunos casos de caída de revestimientos y chimeneas dañadas. Daño leve.
VII	Todo el mundo corre al exterior. Daños insignificantes en edificios de buen diseño y construcción; leve a moderado en estructuras comunes bien construidas; considerables en estructuras pobremente construidas o mal diseñadas; se rompen algunas chimeneas. Notado por algunas personas que conducen automóviles.
VIII	Daño leve en estructuras diseñadas especialmente para resistir sismos; considerable, en edificios comunes bien construidos, llegando hasta colapso parcial; grande en estructuras de construcción pobre. Los muros de relleno se separan de la estructura. Caída de chimeneas, objetos apilados, postes, monumentos y paredes. Muebles pesados volcados. Eyección de arena y barro en pequeñas cantidades. Cambios en pozos de agua. Cierta dificultad para conducir automóviles.
IX	Daño considerable en estructuras de diseño especial; estructuras bien diseñadas pierden la vertical; daño mayor en edificios comunes bien construidos, colapso parcial. Edificios desplazados de los cimientos. Grietas visibles en el terreno. Tuberías subterráneas rotas.
X	Algunas estructuras bien construidas en madera, destruidas; la mayoría de estructuras de mampostería y marcos, destruidas incluyendo sus cimientos; suelo muy agrietado. Rieles torcidos. Deslizamientos de tierra considerables en las orillas de los ríos y en laderas escarpadas. Movimientos de arena y barro. Agua salpicada y derramada sobre las orillas.
XI	Pocas o ninguna obra de mampostería quedan en pie. Puentes destruidos. Anchas grietas en el suelo. Tuberías subterráneas completamente fuera de servicio. La tierra se hunde y el suelo se desliza en terrenos blandos. Rieles muy retorcido.
XII	Destrucción total. Se ven ondas sobre la superficie del suelo. Líneas de mira (visuales) y de nivel deformadas. Objetos lanzados al aire.

Tabla 71. Magnitudes de los terremotos e incidencia mundial prevista (USGS).

MAGNITUD	DESCRIPCIÓN	EFFECTOS	FRECUENCIA DE OCURRENCIA
<2.0	Micro	Los microsismos no son perceptibles.	Alrededor de 8,000 por día.
2.0-2.9	Menor	Generalmente no son perceptibles.	Alrededor de 1,000 por día.
3.0-3.9	Menor	Perceptibles a menudo, pero rara vez provocan daños.	49,000 por año
4.0-4.9	Ligero	Movimiento de objetos en las habitaciones genera ruido. Sismo significativo pero con daño poco probable.	6,200 por año
5.0-5.9	Moderado	Puede causar daños mayores en edificaciones débiles o mal construidas. En edificaciones bien diseñadas los daños son leves.	800 por año
6.0-6.9	Fuerte	Pueden ser destructivos en áreas pobladas, en hasta unos 160 Km a la redonda.	120 por año
7.0-7.9	Mayor	Pueden causar serios daños en extensas zonas.	18 por año
8.0-8.9	Gran	Puede causar graves daños en zonas de varios cientos de kilómetros.	1 por año
9.0-9.9	Gran	Devastadores en zonas de varios miles de kilómetros	1 en 20 años
> 10	Épico	Nunca registrado	En la historia de la humanidad (y desde que se tienen registros históricos de sismos) nunca ha sucedido un terremoto de esta magnitud, registros históricos de sismos) nunca ha sucedido un terremoto de esta magnitud.

Por su origen, los sismos se pueden clasificar según como naturales y artificiales. En general, los naturales liberan mayor cantidad de energía; por tanto, sus efectos en la superficie son mayores a diferencia de los de origen artificial.

▪ Sismos Naturales

Sismos Tectónicos. Se generan por interacción de placas tectónicas. De estos se han definido dos clases, los de interplaca ocasionados por fricción en las zonas de contacto entre las placas y los de intraplaca generados en la parte interna de las placas, generalmente consecuencia de deformaciones continentales.

Sismos Volcánicos. Estos son simultáneos a erupciones volcánicas; principalmente los ocasiona el fracturamiento de rocas debido a movimiento del magma. Aunque puede haber decenas de ellos en un día, sin embargo, no llegan a ser tan grandes como los anteriores.

Sismos de Colapso. Se generan por derrumbamiento del techo de cavernas y minas. Generalmente se sienten en un área reducida, ya que ocurren cerca de la superficie.

▪ Sismos Artificiales

Son los producidos por el hombre por medio de explosiones comunes y nucleares, con fines de exploración, investigación, y explotación de bancos de material para la extracción de minerales.

VII.4.2. Antecedentes

México es un país tectónicamente activo y de alta sismicidad caracterizado por la ocurrencia periódica de eventos sísmicos de diferentes magnitudes, ya que se encuentra afectado por la interacción de cinco placas tectónicas denominadas: Cocos, Pacífico, Norteamérica, Caribe y Rivera. Estos fragmentos de litosfera están en constante movimiento presentando velocidades de desplazamiento variadas del orden de varios centímetros por año, la fricción que se ejerce entre ellas es la principal responsable de los sismos que ocurren en el país, además de los generados por la actividad volcánica y colapso de cavernas.

A pesar de que los sismos no pueden predecirse en tiempo, magnitud e intensidad, estos se presentan en regiones bien definidas, asociadas generalmente a zonas cercanas a la interacción entre dos o más placas tectónicas. La zona de mayor peligro sísmico se tiene cartografiada a lo largo de la Costa del Pacífico, la cual es una zona de subducción activa donde las Placas de Cocos y Rivera penetran por debajo de la Norteamericana y esta última presenta un desplazamiento lateral con respecto a la Placa del Pacífico, el cual es visible en la superficie del terreno en la parte norte de la Península de Baja California y a lo largo de California en los Estados Unidos de América (Figura 109). Este fenómeno es lo que propicia los movimientos telúricos en el Territorio Mexicano.

En la Figura 110, se muestran los epicentros registrados en el territorio mexicano según la base de datos del Sistema Sismológico Nacional (SSN) en el periodo de 1990-2012 y 1900-2012 para sismos históricos mayores, donde se observa una mayor concentración en la zona antes mencionada como de alto índice de peligro. Los epicentros de mayor magnitud ($M_s \geq 7$) que llegan a ocasionar grandes daños se ubican a lo largo de la línea costera que comprende los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Sin embargo, a pesar de que estos fenómenos ocurren en regiones bien definidas, también se han suscitado aunque con menor frecuencia dentro del continente, pero a diferencia de las magnitudes que registran los sismos de interplaca, estos sismos denominados de intraplaca presentan magnitudes menores de alrededor de 3 a 4 grados Richter (Figura 110).

Esta distribución de eventos provocó la división del territorio de la República Mexicana en 19 zonas sismotectónicas, las cuales representan áreas en las que la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico de importancia, presente valores estadísticos similares. Estas 19 zonas están distribuidas a lo largo de la Trinchera Mesoamericana o bien donde se tienen estructuras geológicas activas. El estado de Yucatán se encuentra dentro de la zona de eventos de intraplaca someros, de baja magnitud-baja periodicidad (Región NAL). En esta se agrupan las zonas activas de México con bajo potencial de daños y donde ocurren eventos de magnitudes menores a nivel de detección nacional ($M \leq 4.5$), localizables solamente por redes de cobertura local (Zúñiga, R. *et al.*, 1997).

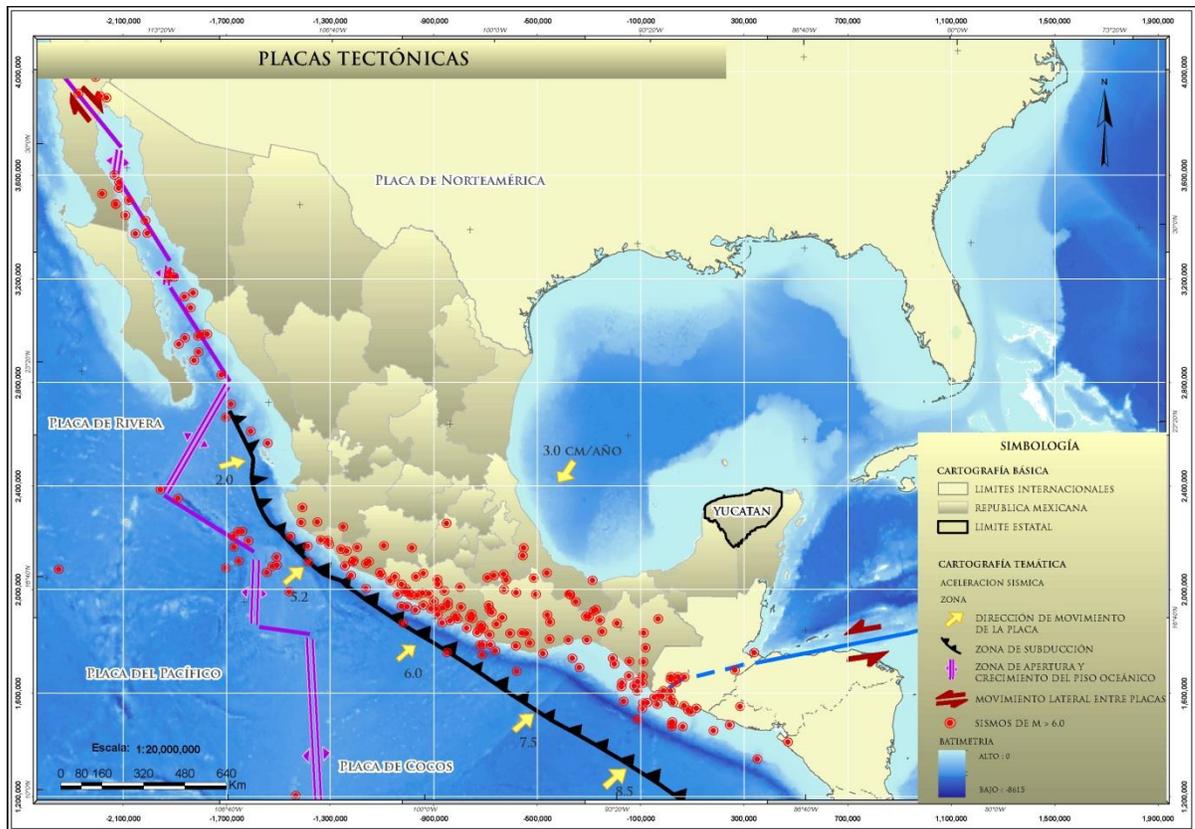


Figura 109. Placas Tectónicas que afectan a México y epicentros de magnitud >6.5 (modificado de CENAPRED, 2006).

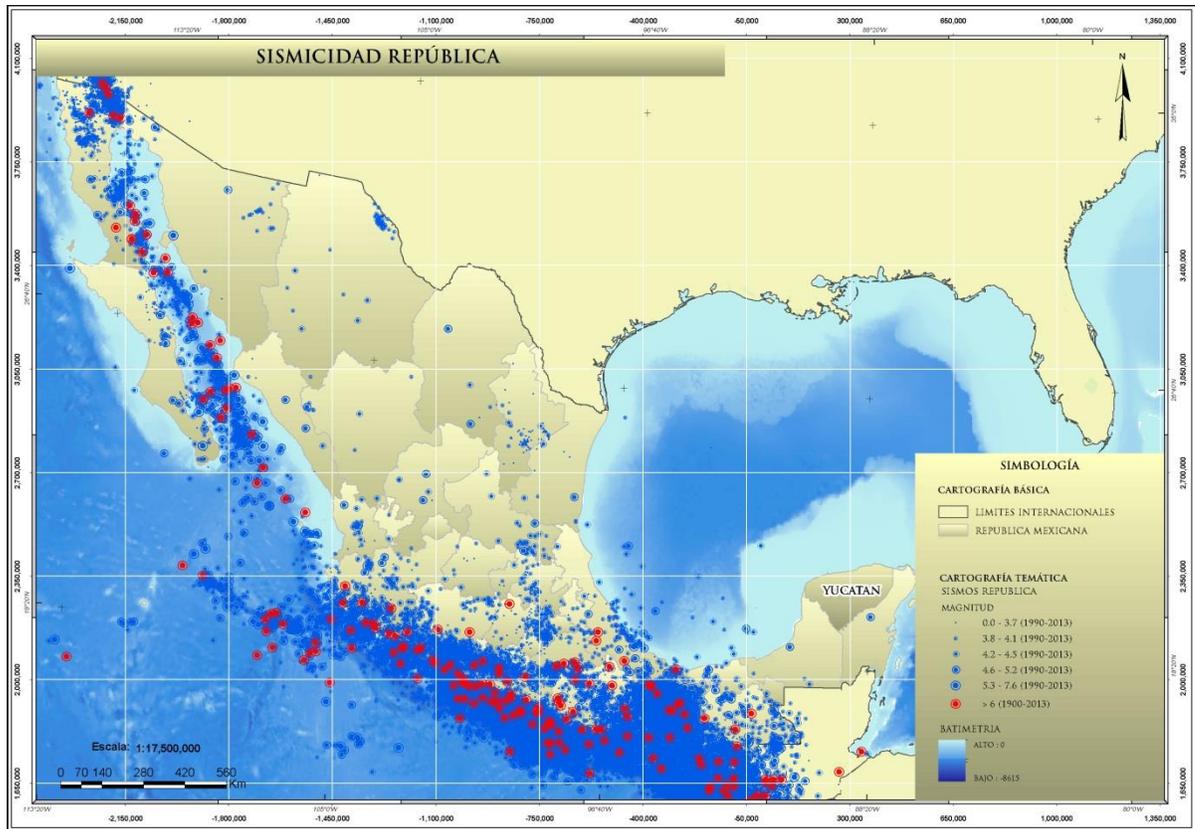


Figura 110. Epicentros de temblores con magnitud 2 ó mayor, ocurridos en o cerca del territorio nacional durante el siglo XX (modificado de CENAPRED, 2006).

Dentro de estas zonas, existen fuentes generadoras de sismos las cuales están dictadas por la tectónica del país y por registros históricos de sismos (Zúñiga, R. *et al.*, 1994), cada una de ellas genera temblores a una tasa constante, los cuales se dividen en:

- Sismos de subducción, son aquellos que se producen a lo largo de la trinchera de la costa del Pacífico asociados a eventos de magnitudes \geq a 7.0.
- Sismos profundos, se les conoce así a los que ocurren en el continente a profundidades de unos 60 Km, generalmente se producen por el rompimiento de la placa subducida que se refleja en un mecanismo de fallamiento normal. Este tipo de sismos pueden presentar magnitudes variadas que van desde aquellos que causan gran destrucción ($M \geq 7$) a aquellos que son casi imperceptibles ($M \leq 5.5$).
- Sismos superficiales, su origen no puede asociarse a ninguna estructura geológica en particular, las zonas generadoras de este tipo de sismos están se distribuyen en el resto del territorio mexicano.

VII.4.3. Método de Trabajo

El peligro sísmico se define por la probabilidad de ocurrencia de un movimiento telúrico de determinada magnitud en una cierta área, cuya ocurrencia es carácter aleatorio por lo que generalmente se aplica la teoría de las probabilidades para su análisis.

La generación de un mapa de peligro sísmico constituye una herramienta fundamental para el diseño sismoresistente de las estructuras y edificaciones de cualquier localidad, esto atendiendo al grado de sismicidad o recurrencia de impacto de estos eventos en una determinada área. Lo anterior permite estar preparados ante cualquier contingencia que pudiera presentarse y evitar así la pérdida de vidas humanas y daños materiales significativos.

Para la estimación del peligro sísmico es necesario contar con información que se genera en observatorios sismológicos a través de periodos considerables. Por lo anterior, en la “Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos” (CENAPRED, 2006) se proporciona la información derivada de los mapas de peligros ya generados y empleados por especialistas, información que constituye la herramienta principal del método de trabajo en el presente Atlas (Figura 111).

Dado que el estado de Yucatán se ubica en una zona tectónicamente estable los sismos en esta región son poco recurrentes, sin embargo, no se descartan movimientos de magnitudes bajas que difícilmente pueden ser percibidos. El análisis de sismicidad en el presente trabajo se basa en la Regionalización Sísmica del Manual de Obras Civiles de CFE (1993), así como en la recopilación e interpretación de registros históricos de sismos ocurridos ya sea dentro del estado de Yucatán o en sus alrededores, obtenidos de la base de datos del Servicio Sismológico Nacional en el periodo de 1990-2012, el Catalogo de sismos mayores (SSN, 1900-2012) y la United States Geological Survey (USGS) periodo 1973-2012. Aunado a esto, se plasma la información recabada de los resultados obtenidos por el Programa de Peligro Sísmico en México (PSM, 1996), como son los periodos de retorno para aceleraciones del terreno mayores a 0.15 g para el estado de Yucatán y 15 de sus 106 Municipios.

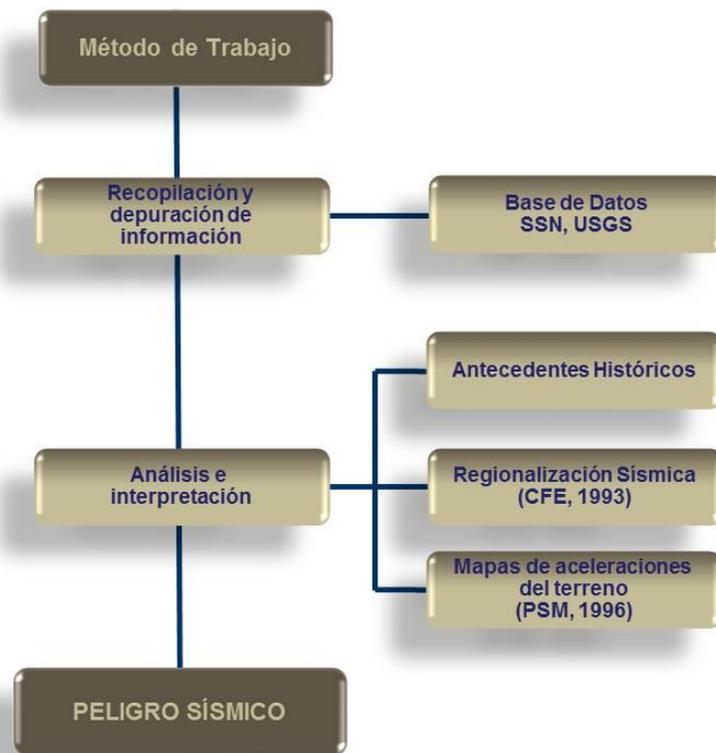


Figura 111. Método de trabajo para evaluar el peligro sísmico.

Esta información permite tener un registro detallado de la ocurrencia de estos fenómenos naturales, lo cual es vital para una zonificación de peligro sísmico misma que se basa en la realización de mapas con información estadística de eventos históricos de igual o similar magnitud ó intensidad.

Para el caso particular del estado de Yucatán, debido a que no se tienen antecedentes de eventos sísmicos ya que se considera una zona de baja sismicidad, no es posible realizar una zonificación de amenaza sísmica representativa, por lo que en este trabajo se hace mención a la interpretación de los mapas disponibles y a los antecedentes de sismicidad más próxima al Estado, como son los eventos ocurridos en los estados vecinos de Campeche y Quintana Roo (SSN), ya que esto da pauta para asumir que el Estado no está exento de la ocurrencia de alguno o bien se lleguen a percibir sismos originados en alguna otra región geográfica circunvecina que por su cercanía y magnitud pueda influir en la zona de estudio.

VII.4.4. Análisis de Información

Sismicidad en Yucatán

La Regionalización Sísmica (CFE, 1993) es la clasificación del territorio nacional en cuatro zonas (A, B, C y D) en orden creciente según su nivel de peligro sísmico. Estas se determinaron básicamente en función de la ocurrencia y distribución de las ondas de los movimientos del terreno propios de cada región con respecto al daño que pudieran sufrir las edificaciones; la zona A corresponde a la de menor peligro, la B a medio-bajo, la C a medio-alto y la D a la de mayor peligro (Figura 112).

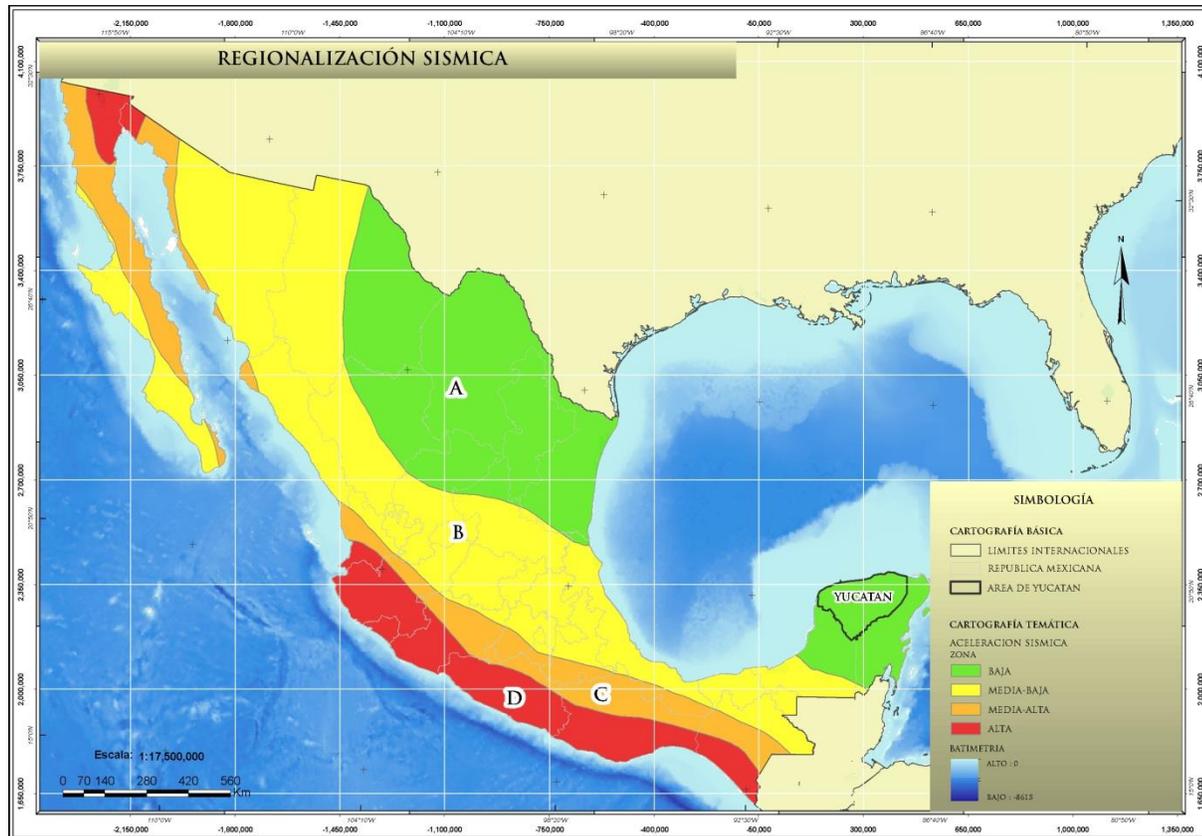


Figura 112. Regionalización Sísmica de la República Mexicana (Manual de Obras Civiles de la CFE, 1993).

De acuerdo a esta Regionalización, el estado de Yucatán se ubica dentro de la zona "A", donde registros históricos indican que no se han reportado sismos de gran intensidad y donde las aceleraciones del terreno se esperan menores al 10% del valor de la gravedad (g).

Esta clasificación es considerada en los reglamentos de construcción de cada Estado de la República para fijar los requisitos mínimos con que deben de cumplir las edificaciones y obras civiles de acuerdo a la zona de peligro sísmico donde se ubiquen, sin embargo, hay algunos de ellos que no contemplan en sus reglamentos el apartado de diseño por sismos, debido a que son zonas donde no se tienen registros históricos ni recientes de sismicidad, principalmente los ubicados en la zona A como es el caso del estado de Yucatán.

Para hacer una evaluación del peligro sísmico al que está sujeta un área en específico es necesario conocer la sismicidad histórica, la cual juega un papel importante ya que proporciona criterios cualitativos de la actividad sísmica del país, en el caso particular de Yucatán, no se tienen registrados epicentros dentro del territorio Estatal ni el antecedente de que sismos históricos mayores se hayan sentido en el Estado. En la Tabla 72 se muestran los valores de aceleración máxima del terreno para el Estado correspondientes a periodos de retorno de 10, 100 y 500 años, según

resultados obtenidos del Programa Peligro Sísmico en México (PSM, 1996), que constituye un sistema de información cuantitativa sobre este tipo de peligro en la República Mexicana con la participación del Instituto de Ingeniería de la UNAM, Instituto de Investigaciones Eléctricas y la CFE, además del CENAPRED.

Tabla 72. Valores de aceleración máxima del terreno en el Estado para periodos de retorno de 10, 100 y 500 años (CENAPRED, 2006).

A max (Gal) para Tr = 10 años	A max (Gal) para Tr = 100 años	A max (Gal) para Tr = 500 años
11	27	45

De acuerdo a estos datos, en el periodo de retorno para 500 años el valor de aceleración máxima del terreno es de 45 Gal, esta cifra es relativamente baja ya que para considerar una zona con cierto grado de peligro o bien poner atención especial a esa zona se debe considerar un valor de al menos 150 Gal, en cualquier periodo de retorno; por lo anterior el estado de Yucatán se ubica dentro de una zona de peligro bajo.

En el caso de un estudio específico, dentro del PSM se presentan periodos de retorno para aceleraciones del terreno de 0.15 g o mayores para diferentes Municipios del Estado, donde se observa un periodo de retorno de 10,000 años para que se presenten aceleraciones del terreno que generen movimientos perceptibles y daños considerables (Tabla 73).

Tabla 73. Periodos de retorno para aceleraciones del terreno de 0.15 g (aceleración de la gravedad) o mayores (CENAPRED, 2006).

MUNICIPIO	LONG °N	LAT °W	ALT (m)	POBLACIÓN	TR (años)
Hunucmá	-89.8744	21.0153	8	20978	10000
Izamal	-89.0178	20.9314	13	14075	
Kanasín	-89.5575	20.9317	10	37674	
Maxcanú	-90.0008	20.5831	13	11229	
Mérida	-89.6217	20.9678	9	662530	
Motul	-89.2831	21.0950	7	19868	
Muna	-89.7131	20.4847	19	10695	
Oxkutzcab	-89.4183	20.3028	33	20244	
Peto	-88.9214	20.1256	35	16572	
Progreso	-89.6633	21.2844	2	44354	
Tekax	-89.2881	20.2019	37	21580	
Ticul	-89.5339	20.3953	25	28502	
Tizimín	-88.1508	21.1422	17	39525	
Umán	-89.7500	20.8833	7	26657	
Valladolid	-88.2014	20.6906	25	37332	

El objetivo de los mapas de peligro que se generan a partir de los datos de aceleraciones del terreno, es contar con una base actualizada que permita tomar medidas apropiadas y orientar decisiones para la evaluación y mitigación del riesgo por sismo. Por lo cual, la región se caracteriza por una sismicidad baja y ausencia de registros de movimientos de alta magnitud. Sin embargo, eventos representativos, son los suscitados en los estados colindantes de Campeche y Quintana Roo en los años 1994, 1998 y 2002 con magnitudes alrededor de 4.2 a 4.7 grados en escala de Richter.

En la Tabla 74 se enlistan sismos que se han presentado en zonas geográficas próximas al Estado así como su distribución (Figura 113). Como puede observarse en la Tabla, las magnitudes de estos epicentros son bajas, algunos de ellos son corticales es decir la profundidad a la cual se registró el foco es de pocos kilómetros, como en los casos de los sismos de Campeche y Quintana Roo, en otros sin embargo las profundidades superan los 100 Km.

Tabla 74. Sismos ocurridos cercanos al territorio Estatal (SSN, 1990-2013).

No.	X	Y	FECHA	MAGNITUD	PROFUNDIDAD (Km)	EPICENTRO
1	1730306	2226678	07/06/1996	4.1	64	Golfo de México.
2	1802735	2143537	11/07/1997	4.3	20	Golfo de México.
3	1872592	2204269	14/01/2000	4.3	10	Golfo de México.
4	2084104	2044332	30/06/1994	4.2	10	Campeche.
5	2002093	2166766	03/06/1998	4.4	34	Champotón, Campeche.
6	1863974	2503517	15/03/2009	4.4	50	238 Km al NE de Hunucmá, Yucatán.
7	1844890	2214641	09/02/2007	4.8	20	112 Km al NW de Cd. Del Carmen, Campeche.
8	1888507	2063489	31/07/2009	4.1	167	50 Km al SW de Cd. Del Carmen, Campeche.
9	1851349	2200379	10/02/2011	3.9	16	97 Km al NW de Cd. Del Carmen, Campeche.
10	369223	2210929	10/06/2002	4.7	134	Quintana Roo.
11	557486	1877504	10/12/2011	5	5	258 Km al SE de Chetumal, Quintana Roo.
12	176990	1944031	15/01/2012	3.9	15	13 Km al NW de Tenosique, Tabasco.
13	-129734	2276288	03/04/2012	3.9	15	219 Km al N de Frontera, Tabasco.
14	-125159	2169309	04/04/2012	4.0	16	114 Km al NW de Frontera, Tabasco.
15	119600	1965523	13/08/2012	3.7	20	7 Km al SE de Emilio Zapata, Tabasco.
16	146407	2002314	20/10/2012	3.9	5	71 Km al SE de Escarcega, Campeche.
17	730210	1891772	24/12/2011	3.8	24	62 Km al SE de Tenosique, Tabasco.
18	991690	1920075	15/04/2012	3.8	20	71 Km al E de Tenosique, Tabasco.

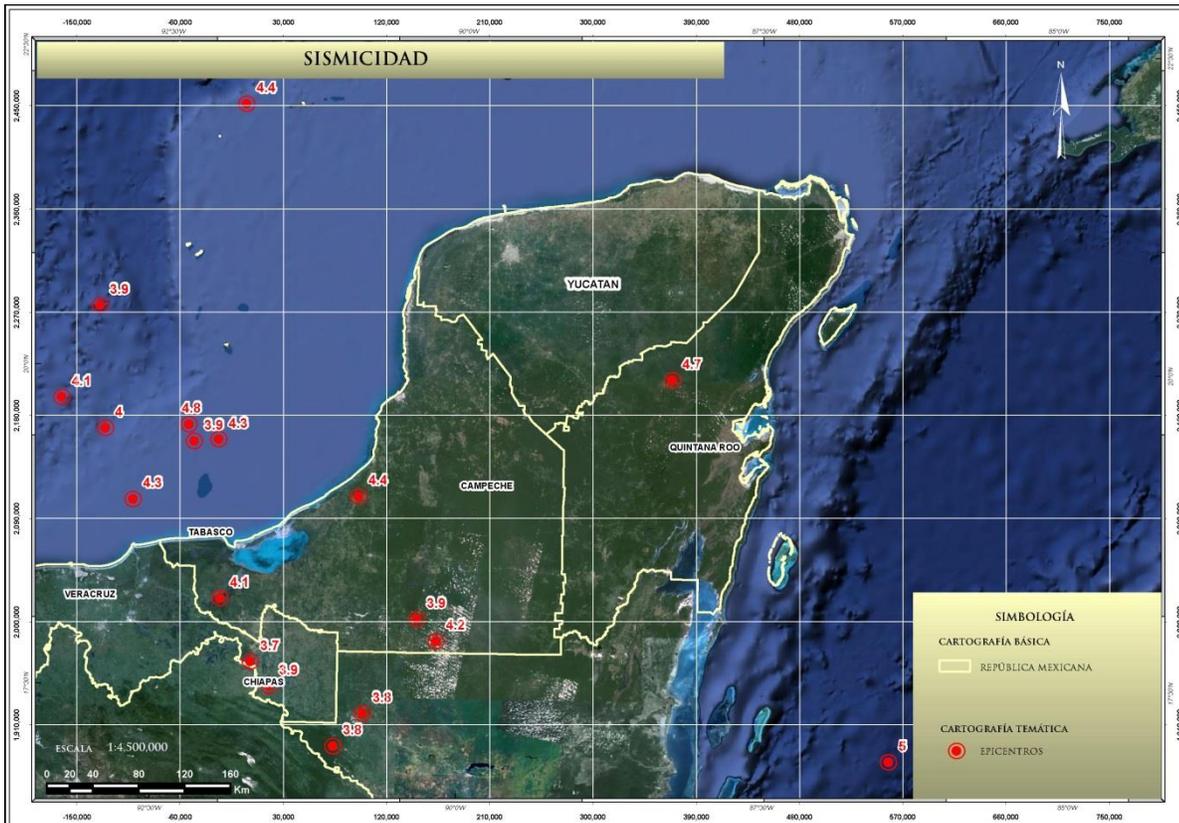


Figura 113. Epicentros cerca del estado de Yucatán, los valores corresponden a su magnitud.

El hecho de que no se presente sismicidad en el Estado está ligado a la historia tectónica de la Península de Yucatán la cual está relacionada con la apertura del Golfo de México durante el Jurásico inferior al medio (Cobiella-Reguera, 2008), cuando comienza el movimiento del Bloque de Yucatán hacia el SE a través de un sistema de fallas dextrales (Bird *et al.*, 2005) que lo separaban de la Plataforma de Florida, algunos autores sugieren que para el Oxfordiano ya se encontraba en su posición actual. Después de esto, ocurre una transgresión marina y con ello la depositación del paquete de rocas carbonatadas, como desde el Albiano al Reciente el nivel del mar ha oscilado se depositaron también junto con estos carbonatos rocas de facies restringidas como evaporitas, está cubierta es la que constituye la columna estratigráfica de la Plataforma de Yucatán con edad del Cretácico al Cuaternario.

La ausencia de procesos tectónicos pasados y presentes dificulta la explicación de los fenómenos sísmicos en la región, sin embargo, existen registro de sismicidad en las costas de Quintana Roo y su explicación es la posible asociación con fallamiento activo asociado a esfuerzos compresivos de dirección Norte-Sur (Pacheco, J. F. *et al.* 2002).

En general, en el Estado no se tienen evidencias de eventos tectónicos importantes. Sin embargo existe rasgos, como la denominada falla Ticul; la cual es una estructura de tipo normal con rumbo NW 50° SE asísmica, a su vez, Yucatán se ubica a más de 600 Km de la región tectónicamente activa, en la costa del estado de Chiapas, zona donde se han registrado los sismos de mayor magnitud a causa de la interacción de las placas tectónicas Cocos, Norteamericana y del Caribe. Sin embargo, pese a que los sismos registrados en esta zona son de gran magnitud, no se tiene registro en el Estado.

El descartar la ocurrencia de eventos tectónicos que puedan afectar al Estado, no impide la incidencia de pequeños movimientos de cobertura local, por ello, así como por los recientes movimientos ocurridos en zonas donde nunca antes se habían registrado epicentros, se instaló una estación sismológica dentro de la capital del Estado, que pertenece a la red de estaciones de banda ancha del Servicio Sismológico Nacional (SSN).

La estación (MYIG) se encuentra ubicada en instalaciones del Cementerio General de Mérida y opera por medio de un acelerómetro de superficie y un sismómetro digital que mide los desplazamientos del terreno horizontal y verticalmente. Cabe mencionar, que esta estación comenzó su operación en el año de 1912 continuando así hasta 1996, cuando fue cerrada. Tras 14 años, la estación fue reactivada el 13 de Abril de 2010, quedando su manejo a cargo de personal de la Facultad de Ingeniería de la UADY en convenio con el SSN.

El equipo con el que cuenta es muy preciso y permite registrar todos los movimientos no solo de la región sino aquellos registrados en otras partes del mundo, actualmente el equipo ha registrado telesismos y movimientos locales de magnitudes bajas, estos últimos corresponden a microtemores los cuales son ocasionados en la mayoría de los casos por fuentes artificiales como el tránsito vehicular, paso o trabajo de maquinaria y explosiones inducidas. Sin embargo, algunos de los movimientos que captan los equipos se podrían asociar a fuentes naturales, como el colapso de cavidades cársticas dada la geología de la región constituida por rocas carbonatadas vulnerables a la disolución de carbonatos y a la formación de diversas estructuras cársticas.

VII.5. Vulcanismo

Dentro de los peligros geológicos, los más representativos se asocian con desastres generados por procesos volcánicos, los cuales están directamente asociados con flujos de lava, flujos piroclásticos o caída de ceniza y emisión de gases. Existen otros procesos como flujos de lodos, escombros o lahares que normalmente son generados por lluvias torrenciales o deshielo, asociadas con edificios volcánicos. Otros peligros son deslizamientos de laderas en estas mismas estructuras.

Un edificio volcánico siempre representa un peligro latente este o no activo. A nivel mundial existen ejemplos importantes de desastres asociados con las erupciones volcánicas. Uno de ellos es la destrucción de la ciudad de St. Pierre en Martinica el 8 de mayo de 1902, donde murieron 29,000 personas a causa de flujos y oleadas piroclásticas. Este desastre es considerado como el más importante del siglo XXI, causado por la erupción del volcán Mount Pelée (Fisher and Heiken, 1982; Fisher *et al.*, 1997).

Existe una tragedia relativamente moderna denominada *Mount St. Helens*, la cual aconteció el 18 de Mayo de 1980, debido a la erupción del volcán St. Helens en el estado de Washington, U.S.A., matando a 57 personas producto de una explosión dirigida ("*blast*" en inglés), generado por descompresión debido al colapso de un flanco del edificio volcánico (Fisher y Heiken, *op. cit.*). Como estos casos se tienen ejemplos muy importantes como el Nevado de Ruiz en Colombia, donde el poblado de Armero fue arrasado por un lahar, matando a más de 20,000 personas en el año de 1985.

A pesar del peligro y riesgo que implica vivir cerca de los volcanes, las personas continúan estableciéndose debido a la fertilidad del suelo derivado de rocas volcánicas.

VII.5.1. Conceptos Básicos

La actividad volcánica es una de las manifestaciones más espectaculares y violentas de la dinámica de la Tierra. Los volcanes representan la expresión superficial de este proceso que puede durar desde algunos años hasta millones de años, y durante su desarrollo pueden cambiar el paisaje, degradar el clima global, inducir grandes inundaciones incluso sepultar ciudades completas; sin embargo son importantes en el sustento de la vida en nuestro planeta (Fisher *et al.*, 1997).

Por otro lado, es importante mencionar que la dinámica de nuestro planeta es la responsable de los procesos volcánicos y sísmicos que moldean la superficie terrestre. En este sentido existe relación entre el acomodamiento de la estructura externa e interna de la corteza terrestre con los procesos tectónicos. La corteza terrestre se divide de acuerdo con su composición en oceánica y continental, que en general constituyen placas tectónicas con estructura bien definida, en cuyos límites el vulcanismo está estrechamente asociado aunque en el interior de las mismas placas existen también aparatos volcánicos producidos por **puntos calientes** (Espíndola, 1989). Considerando el tipo de placas y su interacción, se producen diferentes tipos de edificios volcánicos de composición química distintiva (Macías y Capra, 2005). Por una parte, en un límite de placas convergente la placa más densa y pesada se mete por debajo (subduce) de la menos densa. En esta interacción se presentan procesos que producen magma provocando la generación de cadenas montañosas como la del Cinturón Volcánico Mexicano donde la Placa de Cocos subduce a la Placa Norteamericana constituyendo aparatos volcánicos en general explosivos, con la formación de estratovolcanes (Macías y Capra, *op. cit.*). Es importante describir que es el magma antes de señalar los productos volcánicos y las erupciones volcánicas.

De acuerdo con la definición de Macías y Capra (2005), El magma es una mezcla compuesta por roca fundida y gases, lo constituyen principalmente silicatos (SiO_2), y en menor grado potasio (K), sodio (Na), aluminio (Al) entre otros. Además de estos elementos, el magma contiene también gases disueltos, principalmente agua y en menor proporción dióxido de carbono (CO_2) y dióxido de azufre (SO_2). El contenido de sílice (SiO_2) determina la composición y varias de sus propiedades, en este sentido los extremos son magmas básicos y ácidos o sea basaltos y riolitas respectivamente.

Productos volcánicos

De acuerdo con la composición química del magma, la actividad volcánica puede ser **efusiva** o **explosiva** que en cada caso genera una amplia variedad de productos. Por un lado la actividad efusiva da lugar a derrames de lava y dependiendo de la viscosidad relativa del magma esta adquiere formas distintivas. Debido a esto, existen dos tipos de derrames el **Aa** y el **Pahoehoe**; en el primer caso los derrames generan formas angulosas, de superficie muy rugosa con generación de bloques, mientras que en el último caso la lava adquiere una superficie “lisa” y muy regular. Si el magma es mas viscoso es posible la generación de **domos** que presentan una morfología de cúpula debido a la acumulación de la lava y puede presentar espesores muy variables desde decenas hasta centenares de metros y generalmente se encuentran en el cráter del volcán o en fisuras en los costados de estos (Bardintzeff y McBirne, 2000).

Por otro lado, en una actividad explosiva, el magma se fragmenta y produce **piroclastos** cuyas características dependen de la composición del mismo, modo de explosión y emplazamiento. Cerca de la fuente los fragmentos de magma pueden ser lanzados y caer en forma de **bombas volcánicas**; cuyas formas típicas se deben a que durante su viaje por el aire el magma toma formas de torsión debido a que en un inicio se encuentra en estado fundido y antes de caer pueden solidificarse tomando forma de “uso” moldeándose durante el vuelo. Sin embargo cuando la actividad se torna más violenta se producen nubes eruptivas compuestas por fragmentos de magma enfriados rápidamente, estos fragmentos son **pómez**, **ceniza** y **gases** asociados principalmente, que pueden dar paso a la generación de columnas de nubes verticales o nubes incandescentes que viajan lateralmente en forma de flujos volcánicos por los flancos del volcán. Los fragmentos de magma al salir pueden ser muy vesiculados y dependiendo de la composición pueden ser pómez si el magma es ácido y escoria si es basáltico. Si el material expulsado es sólido o relativamente poco vesiculado es denominado como **lítico juvenil**, que se refiere a material considerado como depositado por primera vez en la superficie del terreno el cual se diferencia de material más antiguo arrancado de las paredes del edificio volcánico denominándose a estos fragmentos como **líticos accidentales**. El tamaño de las partículas producidas durante un evento explosivo se incluye en tres categorías principales: **ceniza**, el cual es material menor que 2 mm de diámetro, **lapilli** entre 2 y 64 mm y finalmente **bombas o bloques** para fragmentos mayores de 64 mm.

Tipos de volcanes

Existe una clasificación de los edificios volcánicos de acuerdo a la cantidad de erupciones a través de su desarrollo e historia. La forma típica de los grandes volcanes en cono como el Volcán de Colima y Popocatepetl por mencionar solo un ejemplo, implica el crecimiento del volcán en altura y área de acuerdo con la cantidad de erupciones y son denominados estratovolcanes o volcanes compuestos, es decir poseen estructuras estratificadas a consecuencia de la múltiple yuxtaposición de los materiales volcánicos expulsados en sus flancos a través del cráter (lava, cenizas, bloques y lapilli) y se caracterizan porque sus laderas presentan pendientes del orden de 30° a 35° (Antayhua y Tavera, 2003). Existen además volcanes los cuales se forman solamente por una única erupción y son denominados monogenéticos, tal es el caso del volcán Parícutín en el estado de Michoacán y son de dimensiones mucho menores respecto de los estratovolcanes.

Forma de los Volcanes.

Con base a la forma de los edificios volcánicos estos se dividen en **volcanes en escudo**, caracterizados porque la lava es altamente fluida, masiva, constituyendo pendientes muy poco pronunciadas y de gran amplitud esto último debido a las grandes distancias que recorren los derrames basálticos. Su nombre lo adquieren como remembranza a los escudos de antiguos guerreros. Los volcanes en escudo están constituidos por numerosas capas de flujos procedentes de la fuente central. Pequeños volcanes pueden formarse en las laderas y se consideran como **volcanes satélites**. En unidades de área y volumen los volcanes en escudo son por mucho las formas volcánicas más grandes en la superficie de la Tierra. Por otro lado aunque los **estratovolcanes** se definieron anteriormente por el número de erupciones, estos también se consideran dentro de esta clasificación por su forma; en este sentido la morfología obedece a erupciones de lava continuas que

generan capas y por tanto la forma típica de cono, las lavas son mucho más viscosas y contienen más gas, siendo más explosivo, que las lavas que constituyen a los volcanes en escudo, de tal forma que las lavas recorren distancias mucho- menores acumulándose “más cerca” de la fuente. Otro tipo son, los **conos cineríticos**, los cuales consisten completamente de tefra, es decir no existe o son muy pocos los flujos de lava. Su morfología es de flancos simétricos con pendientes intermedias entre los estratovolcanes y volcanes en escudo; son los volcanes más pequeños, pero sus erupciones pueden ser más explosivas y pueden crecer más rápidamente. Por otro lado existen formas que son generadas por lavas sumamente viscosas que no fluyen lejos del conducto principal debido a que se enfrían y solidifican, generando los denominados **domos de lava**; los cuales pueden ser muy peligrosos debido a que forman un “tapón” del conducto principal provocando la acumulación de presión de gas y ocasionar una explosión muy violenta una vez liberada la energía. Un tipo de forma volcánica es la denominada **caldera**, la cual está asociada a raras pero extremadamente violentas explosiones que generan cráteres superiores a decenas de kilómetros de diámetro (Coch, 1995, Macías y Capra, 2005). Fisher y colaboradores (1997), consideran las estructuras de **Maar** como una clasificación aparte y lo define como un volcán pequeño con un cráter muy amplio que varía de algunas decenas de metros hasta uno o dos kilómetros de diámetro, con su cráter generalmente por debajo del nivel del terreno, los cuales se forman por la explosión violenta al ascender el magma que entra en contacto y se mezcla con cuerpos de agua subterránea o superficial.

Estilos Eruptivos.

El factor principal que determina el estilo eruptivo es la composición química del magma; y su clasificación se establece de acuerdo con la altura de la columna eruptiva como sigue: Hawaiiano, estromboliano, surtseiano, sub pliniana, vulcaniana, freatopliniana y finalmente ultrapliniana que alcanza alturas superiores a 50 Km, sin embargo las erupciones más violentas son la surtseiana y freatopliniana las cuales interaccionan con cuerpos de agua (Figura 114).

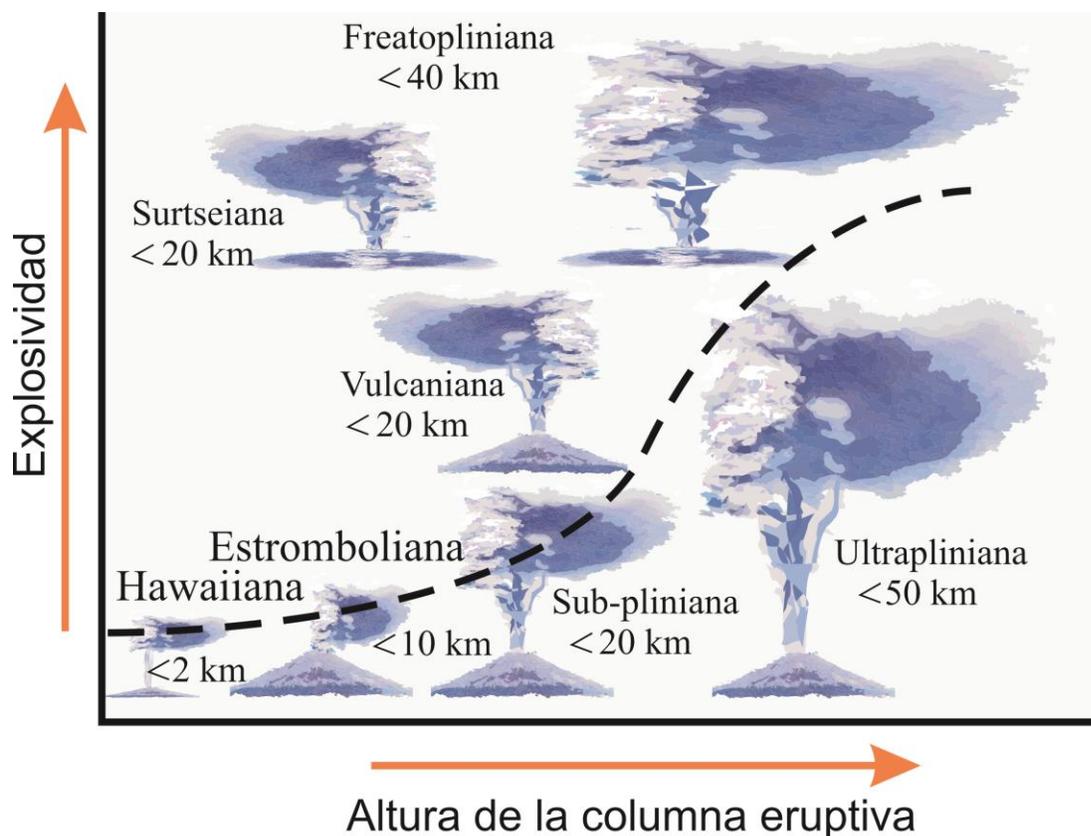


Figura 114. Estilos de erupción (modificado de Macías y Capra, 2005).

Peligros Volcánicos.

De acuerdo con las características de los productos volcánicos, volumen del material e intensidad eruptiva, los peligros volcánicos se clasifican en algunas publicaciones diferenciado en primarios y secundarios con base a sus efectos y su relativa relación con los procesos que los generan (Bardintzeff y McBirney, 2000), sin embargo en ambos casos pueden llegar a ser muy catastróficos. Los productos volcánicos primarios son: Flujos de lava, caída de ceniza, flujos piroclásticos y gases; los secundarios son lahares, avalanchas de escombros y tsunamis. Cada evento se describe a continuación.

Derrames o flujos de lava.

En las erupciones de tipo efusivo, el material fundido en estado incandescente (magma) es emitido de manera tranquila hacia la superficie del planeta y se conoce como lava. Estas erupciones efusivas forman fuentes, lagos y verdaderos ríos de lava. Los derrames de lava son flujos que viajan pendiente abajo siguiendo la morfología del terreno. Estos flujos avanzan a velocidades relativamente bajas (menos de 45 Km/h) comparados con otros tipos de peligros volcánicos, por lo cual rara vez representan un peligro para la vida humana (Macias y Capra, 2005).

Caída de ceniza.

Consiste de fragmentos de roca, minerales y vidrio más pequeños que 2 mm de diámetro. La ceniza volcánica no es lo mismo que la ceniza suave que resulta de quemar madera, hojas o papel, esta es dura, no se disuelve en agua y puede ser extremadamente pequeña, esto es, menor que 0.025 mm de diámetro (que es muy común), es extremadamente abrasiva, medianamente corrosiva y eléctricamente conductora, especialmente cuando está húmeda. La ceniza volcánica se crea durante erupciones explosivas por el rompimiento de roca sólida y por la separación violenta del magma (roca fundida) en piezas pequeñas. Las erupciones explosivas se generan cuando el agua subterránea es calentada por el magma y abruptamente convertida en vapor y también cuando el magma alcanza la superficie, así que los gases volcánicos disueltos en la roca fundida se expanden y escapan (explotan) hacia la atmósfera extremadamente rápido. Después de ser expulsado violentamente hacia la atmósfera debido a la expansión de vapor y otros gases, la ceniza y gas calientes se elevan rápidamente para formar una imponente columna de erupción directamente sobre el volcán (<http://volcanoes.usgs.gov/images/pglossary/ash.php>).

Los peligros asociados con la ceniza pueden ser variados, debido principalmente al tamaño de las partículas, es decir pueden ser desde impactos balísticos a personas o inmuebles en las cercanías del volcán, hasta la obstrucción de las vías de comunicación y reducción de visibilidad en zonas cercanas. La ceniza puede viajar miles de kilómetros de distancias y provocar serios problemas; uno de ellos es producto de la acumulación de capas gruesas de ceniza en los techos de las viviendas, provocando el colapso de las mismas. Debido a mezcla de ceniza con humedad, puede generar taponamiento de las redes de drenaje y de agua potable convirtiéndose prácticamente en concreto, además de contaminación de la vegetación y manantiales. Otro peligro por emisión de cenizas es la afectación a los aviones cuyas rutas se encuentran dentro o cercanas a zonas volcánicas y de los vientos predominantes que esparcen las cenizas. Casos de este tipo de peligro se describen con detalle en Fisher y colaboradores (1997).

Flujos y oleadas piroclásticas.

Son flujos de material volcánico compuesto por fragmentos de roca, pómez o escoria y gases volcánicos producidos por erupciones de tipo explosivo. Los fragmentos varían de tamaño desde bloques de varios metros de diámetro hasta partículas de ceniza. Estos flujos son dirigidos por gravedad alcanzando grandes velocidades sobre las laderas del volcán quemando y destruyendo todo a su paso debido a las altas temperaturas de emplazamiento. Si la concentración de fragmentos sólidos dentro del flujo es alto respecto del gas, se forman flujos piroclásticos, los cuales se canalizan en barrancas que circundan al volcán; la velocidad con la que ocurren estos flujos y la densidad o cantidad de material que transportan puede ser tal que rellenan barrancas en minutos incluso

segundos. Por el contrario, si la cantidad de gases es mayor que los fragmentos, se forman oleadas piroclásticas, que son flujos de gas a alta temperatura capaces de sobrepasar obstáculos topográficos a gran velocidad. Dentro de esta clasificación aparece un flujo especial conocido como una explosión dirigida (“blast” en inglés), similar a una oleada piroclástica producto de una detonación dirigida debida al colapso de un flanco del volcán y repentina descompresión del magma en su interior. Las velocidades que alcanzan estas explosiones son supersónicas (Macías y Capra, 2005).

Gases volcánicos

Otro producto eruptivo lo constituyen los gases volcánicos que se desprenden del magma hacia la atmósfera de manera continua. Estos gases se encuentran disueltos y pueden ser generados de manera continua durante erupciones o etapas de relativa calma en sistemas hidrotermales.

Durante grandes explosiones, los gases pueden alcanzar decenas de kilómetros en la atmósfera terrestre y esparcirse lateralmente en forma de aerosoles hasta miles de kilómetros de distancia desde el conducto principal.

El principal gas expulsado hacia la atmósfera es vapor de agua, seguido en cantidad por dióxido de carbono y dióxido de azufre, en menor proporción se presentan el sulfuro de hidrógeno, hidrógeno, monóxido de carbón, cloruro de hidrógeno, fluoruro de hidrógeno y helio entre otros (Macías y Capra, *op cit.*). Los gases con mayor potencial de peligro son el dióxido de azufre, dióxido de carbono y fluoruro de hidrógeno (<http://volcanoes.usgs.gov/hazards/gas/index.php>).

Lahares (Flujo de escombros)

Los Lahares son flujos de lodos compuesto por agua y material volcánico que se origina en los flancos de un volcán y se pueden generar durante o después de una erupción; esto es que representan un peligro geológico de tipo secundario; dado que los depósitos primarios no se encuentran consolidados, y fácilmente pueden ser re-movilizados por lluvias torrenciales y manantiales en las laderas del volcán (Macías y Capra, *op. cit.*). Debido a su alto contenido de material fino (limo y arena), los lahares suelen ser muy densos, por lo cual se comportan como una masa de concreto que les permite transportar grandes bloques de roca, arboles, casas, automóviles etc., por varios kilómetros de distancia. Los lahares tienden a canalizarse por barrancas y pueden moverse incluso en áreas de poca pendiente por lo cual pueden alcanzar distancias mayores respecto de otros peligros volcánicos. Un caso fue el registrado en poblado de Armero, Colombia en el año de 1985, donde murieron aproximadamente 25,000, personas a causa de un lahar derivado de la erupción del volcán Nevado de Ruíz el 13 de Noviembre de ese mismo año. El lahar recorrió más de 60 Km de distancia encausado sobre el Río Lagunillas, el cual fue generado por la fusión de hielo y nieve localizados en la cima del volcán (Fisher *et al.*, 1997).

Avalanchas de escombros

Son un flujo seco de fragmentos de rocas gigantes que se mueven por gravedad hacia las partes bajas, producido por el derrumbe de una parte del edificio volcánico. Las causas pueden por la intrusión de un nuevo cuerpo de magma generando cambios en la morfología del volcán; debido también a sismicidad o alteración por la infiltración de hielo o agua de lluvia etc. Estos últimos ejemplos pueden ocurrir incluso cuando el volcán está inactivo (Macías y Capra, *op. cit.*).

Tsunamis

Es una ola o grupo de olas anómalas provocadas por el desplazamiento de una masa de agua; y se puede generar debido a un sismo con epicentro en el fondo marino o por deslizamiento de un cuerpo de roca que entra al agua, ya sea oceánica o lagunar. En el caso de actividad volcánica, los fenómenos que pueden generar un Tsunami son: Temblores, colapso parcial de un edificio volcánico o formación de calderas en el fondo oceánico, el colapso de un volcán en el continente cuya avalancha de escombros entre a un lago (Macías y Capra, *op. cit.*).

VII.5.2. Antecedentes

Peligros Volcánicos en México

En nuestro país, en general, el vulcanismo actualmente activo, se concentra principalmente en el NW, centro y SE, en la Provincia Extensional del Golfo de California (PEGC), El Cinturón Volcánico Trans-mexicano (CVT) y el Arco Volcánico Chiapaneco (AVCh) respectivamente (Figura 115). La mayor parte de la actividad se localizan en la provincia del Cinturón Volcánico Trans-mexicano (CVT) el cual es una franja orientada este-oeste de aproximadamente 250 Km de ancho, distribuyéndose desde las costas del estado de Jalisco hasta las costas en el estado de Veracruz. La actividad ígnea en esta provincia presenta gran variedad de productos volcánicos que van desde flujos de lava, caída de cenizas, flujos piroclásticos y lahares derivados de la erupción de grandes estratovolcanes y volcanes monogenéticos, calderas etc. La edad de las rocas que conforman al CVT varía desde el Mioceno al Cuaternario, derivadas de lavas de composición extremas, es decir de magmas silícicos y basálticos. La tectónica de esta provincia se relaciona con un régimen de subducción en la cual la Placa de Cocos (corteza oceánica) se mete por debajo de la Placa Norteamericana (corteza continental)(Ferrari *et al.*, 1994b *in* Ferrari *et al.*, 1999).

Por otro lado en el NW de México, el vulcanismo se asocia con la Provincia Extensional del Golfo de California (PEGC) cuyo régimen tectónico es de distensión cortical durante los últimos 3 y 4 millones de años (Martín-Barajas, 2000; Demant, 1975). Mientras que en el SE mexicano el vulcanismo se asocia con actividad dentro del Arco Volcánico Chiapaneco el cual es un cinturón volcánico Cuaternario de 150 Km de longitud orientado NW-SE en el estado de Chiapas. El vulcanismo posiblemente este asociado con la subducción de la Placa de Cocos bajo la de Norte América en un marco tectónico complejo debido a la geometría del sistema de fallas del límite de placas (Damon and Montesinos, 1978 *in* De la Cruz-Reyna y Martín del Pozo, 2009).

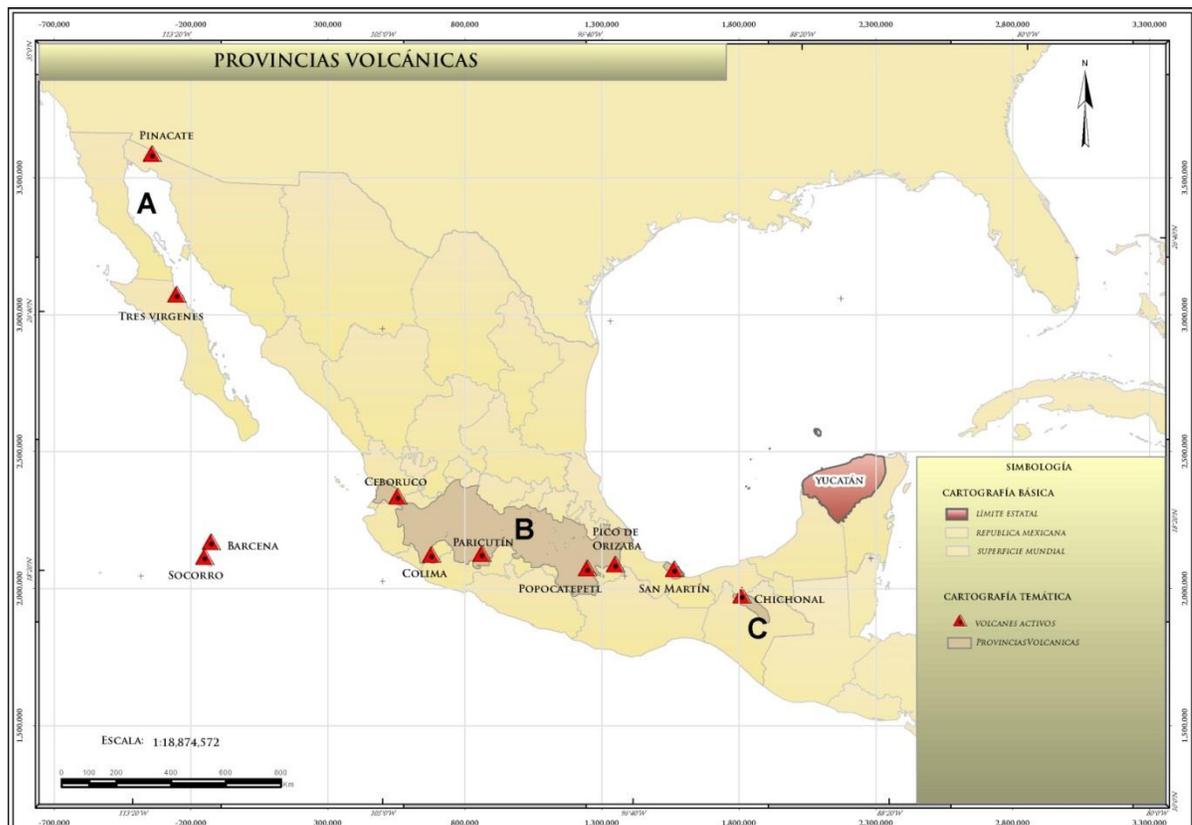


Figura 115. Distribución de las provincias volcánicas con actividad y algunos de los volcanes considerados como peligrosos en México, A) Provincia Extensional del Golfo de California, B) Cinturón Volcánico Trans-mexicano, C) Arco Volcánico Chiapaneco.

De acuerdo con el catálogo del Smithsonian Institution (Siebert y Simkin, 2002), existen 43 volcanes que tuvieron actividad en los últimos 10,000 años (Holoceno) clasificados entre calderas, estratovolcanes, domos, conos cineríticos, anillos de toba, volcanes en escudo, campos volcánicos y volcanes submarinos y de acuerdo con CENAPRED (2006) 15 de ellos se consideran peligrosos o activos. Algunos de estos son los volcanes de Pinacate, Tres Vírgenes, Colima, Ceboruco, Popocatepetl, Iztaccihuatl, Xitle, Pico de Orizaba, Socorro, Bárcena, San Martín Nevado de Toluca, Chichón, Tacaná, Parícutín de los cuales la mayoría cuentan con mapa de peligros.

De acuerdo con “EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database” (www.emdat.be/result-country-profile); en nuestro país se tiene el registro de aproximadamente mil decesos debido a peligros volcánicos en el periodo de 1900 a 2011, específicamente en el año de 1949. Sin embargo estos datos podrían no ser confiables debido a que en 1982 de acuerdo con De la Cruz-Reyna y Martín del Pozo (2009); Tilling y Beate (1989) y Tilling (2009) la erupción del Chichón en el estado de Chiapas provocó aproximadamente 2,000 víctimas mortales. Sin embargo los fenómenos con mayor número de víctimas son los sismos e inundaciones que de igual manera generan mayor afectación y costos en daños (Tablas 75, 76 y 77).

Tabla 75. Los principales desastres naturales en México. Clasificado por número de víctimas (Tomado y modificado de www.emdat.be/result-country-profile).

DESASTRE	FECHA	No. VICTIMAS
Actividad Sísmica	19/09/1985	9500
Inundación	1959	2000
Volcanismo	1949	1000
Tormenta	27/10/1959	960
Inundación	12/09/1999	636
Tormenta	01/10/1976	600
	28/09/1973	500
Actividad Sísmica	28/08/1973	500
Tormenta	12/11/1961	436
Temperatura Extrema	30/04/1990	380

Tabla 76. Los principales desastres naturales en México. Clasificado por número total de afectados (Tomado y modificado de www.emdat.be/result-country-profile).

DESASTRE	FECHA	No. TOTAL DE AFECTADOS
Actividad Sísmica	19/09/1985	2,130,204
Tormenta	01/10/2005	1,954,571
Inundación	28/10/2007	1,600,000
Tormenta	19/10/2005	1,000,000
Inundación	20/09/2010	1,000,000
Tormenta	07/10/1997	800,200
Inundación	12/09/1999	616,060
Tormenta	20/09/2002	500,030
	20/07/2008	500,000
	17/07/1976	300,000

Tabla 77. Los principales desastres naturales en México. Clasificado por costo en millones de dólares (Tomado y modificado de www.emdat.be/result-country-profile).

DESASTRE	FECHA	DAÑOS (000 EUA Dólares)
Tormenta	19/10/2005	5000
Actividad Sísmica	19/09/1985	4104
Tormenta	15/09/2010	3900
Inundación	28/10/2007	3000
Tormenta	01/10/2005	2500
	30/06/2010	2000
	22/06/1993	1670
	10/10/1995	1500
Sequía	05/1996	1200
Actividad Sísmica	04/04/2010	1150

Algunas cifras mundiales para el año de 1989 señalan que el mayor número de fatalidades por peligro volcánico son debidas a flujos piroclásticos, de escombros y de lava (Tilling y Beate, 1989).

Vulcanismo cercano al estado de Yucatán.

Geológicamente el territorio del estado de Yucatán, corresponde a una plataforma calcárea desarrollada desde el Triásico-Cretácico hasta nuestros días ausente de vulcanismo (López-Ramos, 1973). Sin embargo existe actividad ígnea en el estado vecino de Chiapas donde se encuentra el Volcán Chichón asociado al Arco Volcánico Chiapaneco (Manea y Manea, 2006), el cual es un edificio volcánico localizado aproximadamente a 438 Km de distancia (Figura 3).

El ejemplo más representativo de desastre volcánico en México fue la erupción de este volcán en el año de 1982 que desde 1930 había dado señales de actividad sísmica reportada por lugareños y corroborada por el Dr. Mulleried quien señaló que el volcán contaba con un tapón (domo) y actividad fumarólica, concluyendo que se trataba de un volcán activo; posteriormente años antes de la erupción, los geólogos René Canul y Víctor Rocha de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en estudios para aprovechamiento de energía geotérmica recalcan en su informe la posibilidad de que el volcán podría hacer erupción (Macías y Capra 2005). Para 1981 los habitantes de la región comenzaron a sentir temblores persistentes hasta el primer trimestre del año de 1982. El 3 de abril a las 23:32 horas sucedió una explosión freatomagmática que fue la más violenta de las etapas eruptivas hasta ese momento, produciendo oleadas piroclásticas destruyendo nueve poblados, mientras que varias rancherías quedaron sepultadas, matando a 2000 personas (Macías y Capra *op. cit.*).

La historia eruptiva del Volcán Chichón en los últimos 8000 años, registra al menos 12 erupciones explosivas, la más reciente ocurrida en 1982 y anteriormente hace 550 años (fecha por C14), esta ultima junto con las ocurridas hace 1250, 1500, 3700 y 7700 consideradas de igual o mayor magnitud que en 1982 con un Índice de Explosividad Volcánica (Tabla 78)(VEI por sus siglas en ingles) igual a 5 (Macías y Espíndola, 2002; Mendoza-Rosas y De la Cruz-Reyna, 2010).

Tabla 78. Criterios para la estimación del índice de Explosividad Volcánica (VEI)(Modificado de Newhall y Self, 1982).

VEI	CRITERIOS									
	DESCRIPCIÓN	V(m ³)	AC (Km) ⁺	DESCRIPCIÓN CUALITATIVA	CLASIFICACIÓN	TIEMPO (h)	CAVV Max. Expl.		Et	Ee
0	No explosivo	<10 ⁴	<0,1	Ligero, efusivo	Hawaiiano	<1	Flujo de Lava	Domo o flujo de lodo	Insignificante	Nulo
1	Pequeño	10 ⁴ -10 ⁶	0,1-1		Estromboliano				Menor	
2	Moderado	10 ⁶ -10 ⁷	1-5	Explosivo	Vulcaniano	1-6	Freático	Explosión o nube ardiente	Moderada	Posible
3	Moderado-Grande	10 ⁷ -10 ⁸	3-15						Ultra-pliniano	
4	Grande	10 ⁸ -10 ⁹	10-25	Catadísmico, Paroxísmico, Colosal	Violento, Severo	>12	Explosión o nube ardiente	Substantial	Importante	
5	Muy Grande	10 ⁹ -10 ¹⁰	500 años.>25							
6		10 ⁶ -10 ⁷								
7		10 ⁶ -10 ⁷								
8	>10 ¹²									

V- Volumen, AC-Altura de la columna, CAVV Max. Expl.- Máxima explosividad del Catálogo de volcanes activos y áreas de solfataras mundial (CAVV), Et- Emisión a la tropósfera, Ee- Emisión a la estratósfera.

De acuerdo con datos estratigráficos, la erupción de tipo pliniana de hace 550 años generó depósitos de caída de ceniza superior a la de 1982 (Mora *et al.*, 2002). Estos depósitos fueron de 110 cm de espesor determinados hasta 3 Km de distancia del cráter, estimándose una columna eruptiva de 31 Km de altura mientras que material más fino fue dispersado por los vientos dominantes hacia el E y NE cubriendo un área aproximada de 1475 Km² dentro de la isopaca de 10 cm (Arce *et al.*, 2002); por otra parte la erupción de 1982 (VEI=5)(Tilling, 2009) generó una columna eruptiva de aproximadamente 20 Km de altura (González-Mellado y De la Cruz-Reyna, 2010) depositando ceniza fina dentro de la isopaca de 0.5 mm hasta una distancia de aproximadamente 300 y 330 Km al NE y NW del volcán respectivamente (De la Cruz-Reyna y Martín Del Pozo, 2009). Arce y colaboradores (2002) no descartan bajo las condiciones actuales del volcán, un escenario eruptivo similar a la ocurrida hace 550 años.

De acuerdo con la clasificación de CENAPRED (2006), el Volcán Chichón está considerado dentro de la categoría 1 (Tabla 79) la cual representa un peligro alto debido a que su última erupción esta categorizada como VEI = 4-5, y la erupción antecesora fue aproximadamente hace 500 años.

Tabla 79. Clasificación de los 68 volcanes y campos volcánicos del Cuaternario en México (modificado de CENAPRED, 2006).

CATEGORÍA	VEI	TR (MILES DE AÑOS)	ERUPCIONES/TIEMPO (MILES DE AÑOS)	PELIGRO
1	3 ≥	<0,5	Ó al menos 1/últimos 0,5	Alto
2	3 ≥	>0,5<2	Ó al menos 1/últimos 0,5 a 2	Medio
3	3 ≥	>2<10	Ó al menos 1/últimos 2 a 10	Moderado
4	>4	>10	Ó al menos 1/últimos 10	Latente
5	3 ≥	Indeterminado*	Ó al menos 1/ últimos 10	Indefinido

VEI-Índice de explosividad volcánica, TR- Tiempo de Recurrencia, *Solo exista un dato.

VII.5.3. Método de trabajo

La metodología empleada en la generación de mapa de peligros por caída de ceniza se basa en la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgo editada por CENAPRED (2006). Dentro de las consideraciones básicas para el inicio de la elaboración de dichas capas de información, señala que el área de influencia de los depósitos se centra en un área dentro de 100 Km de radio respecto del volcán (Figura 116).

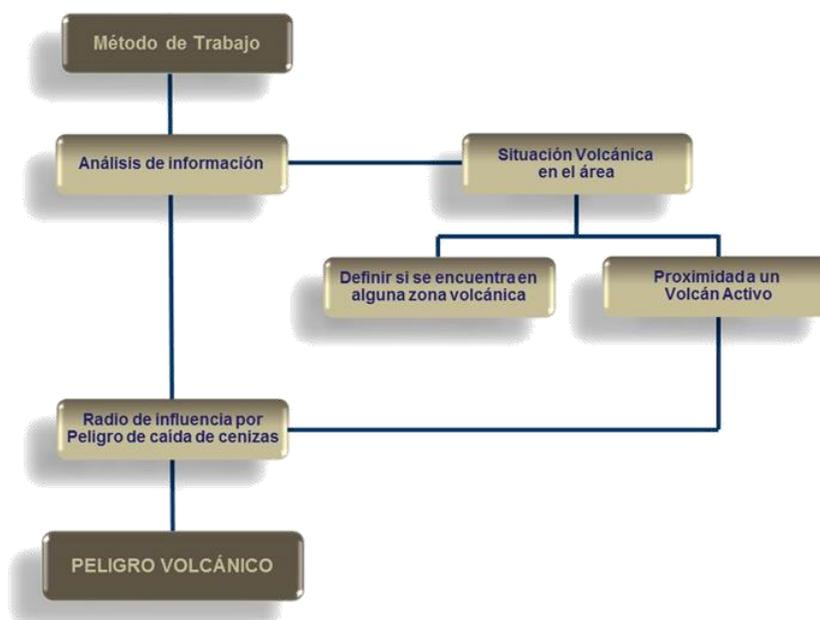


Figura 116. Método de Trabajo

VII.5.4. Análisis de Información

El estado de Yucatán queda fuera de la zona de influencia, según la metodología descrita anteriormente, con respecto del Volcán El Chichón, por tanto se establece que no existe peligro por caída de cenizas en el Estado. Cabe señalar que De la Cruz-Reyna y Martín-del Pozo (2009) indican que en la erupción de 1982 del Volcán Chichón generó depósitos de caída que alcanzaron hasta 400 Km de distancia del volcán en dirección al estado de Yucatán dentro de la isopaca de 0.5 mm.

Por otro lado Rose y Durant (2008), apoyados en analisis previos, datos obtenidos de fracciones fina de ceniza mediante el uso de sensores remotos satelitales determinaron para esta misma erupción que la altura de la columna eruptiva fue de 21 Km y depósitos de ceniza fina viajaron aproximadamente 300 Km a partir del crater del volcán.

Por otra parte el volcán Tacaná también se consideró dentro del análisis, sin embargo este se encuentra aun más alejado del estado de Yucatán, por tanto sus efectos respecto de caída de cenizas en la entidad es aun menos probable (Figura 117)(García-Palomo *et al.*, 2006).

De acuerdo con la estimación de dispersión de cenizas en erupciones de tipo pliniana que han sucedido en el Volcán Chichón, estas pueden alcanzar poco mas de 400 Km de distancia con depósitos de aproximadamente 1cm de espesor, cubriendo aproximadamente 250 Km², dependiendo principalmente de la altura de la columna eruptiva y velocidad y dirección de los vientos predominantes (CENAPRED, 2006).



Figura 117. Localización de los volcanes activos más cercanos al estado de Yucatán y el área de influencia de cenizas, conforme a la metodología establecida por CENAPRED (2006).

VIII. PELIGROS POR FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS

Los fenómenos hidrometeorológicos son cambios en la naturaleza, procesos permanentes de movimiento y transformaciones que tienen una relación directa o indirecta con el agua. Los más comunes son la lluvia y el viento; otros que se engloban dentro de este concepto están: ciclones tropicales, tormentas, heladas, nevadas, granizadas, inundaciones, tornados, sequía, temperaturas extremas, erosión, entre otras consecuencias como la marea de tormenta. El objeto de abordarlos dentro de este apartado es por los efectos adversos que estos pudieran causar hacia la población, la infraestructura, bienes y el medio por su ubicación geográfica, su orografía, a los diversos sistemas meteorológicos y primordialmente a la distribución de la población.

Los fenómenos naturales relacionados a peligros hidrometeorológicos a abordarse dentro de este nivel de información son: inundación (por encharcamiento, y por acumulación en zonas bajas y zonas costeras), ciclones tropicales (en sus diversas categorías) y otros fenómenos que van relacionados con los anteriores o son consecuencia del impacto de éstos, además de las sequías e incendios forestales.

Para empezar el análisis de las variables climatológicas se requiere un análisis y depuración de la información de estaciones meteorológicas. La Península de Yucatán se ubica en la franja de trayectoria de ciclones que tienen origen en el Océano Atlántico y el Mar Caribe, que por consecuencia de los mismos resulta expuesta a peligros por inundaciones, mareas de tormenta, e incluso incendios forestales. Debido a que los vientos generados al suscitarse un fenómeno ciclónico son de gran intensidad, cuando estos impactan tierra firme provocan destrucción de árboles y otros materiales que funcionan como combustibles, originando incendios, situación que se ve agravada si seguido a esto se presenta una sequía.

Algunos autores han postulado que la civilización maya sufrió los efectos que las sequías dejaron en la región, atribuyen a dicho fenómeno un desastre en el desarrollo de esta cultura, uno de los planteamientos que se maneja es el excesivo corte de leña para calcinar rocas y obtener calhidratada utilizada en la edificación de los majestuosos templos ceremoniales pudo haber influido en la alteración del ciclo hidrológico, pero habría que considerar también la conjugación de procesos naturales como es el caso de sequías meteorológicas, desencadenándose un desastre que estaría asociado a hambruna, muerte y migración.

El hecho es que los mayas quedaron a merced de leyes naturales que habrían provocado su colapso. La distinción en los efectos de la sequía puede ser en los siguientes términos: meteorológico, agrícola, hidrológico, biológico, ambiental, urbano y social. Dada la naturaleza de los tipos de vegetación y de procesos meteorológicos extremos de calor y la consecuente deshidratación puede convertirse en un detonante como combustible que derive en incendios forestales. Los incendios forestales constituyen en la actualidad uno de los principales impactos, relativos a la degradación del medio ambiente con los que se enfrenta nuestro país, no siendo la Península de Yucatán una excepción.

VIII.1. Análisis Meteorológico.

La meteorología es la ciencia que estudia la atmósfera y los fenómenos que ocurren en ella. Es una rama de la física que aborda el estado del tiempo, el medio atmosférico y las leyes que lo rigen. Además, debido al estudio que la meteorología realiza de estos fenómenos, también trata de pronosticar el tiempo, definir los diversos climas y entender cómo la atmósfera interactúa con otros subsistemas. Su nombre proviene del griego, en el que “meteoro” significa “alto en el cielo”, y “logos” significa “conocimiento o tratado”.

Para estudiar los cambios atmosféricos que se producen a cada momento, la meteorología utiliza parámetros como la temperatura del aire, su humedad, la presión atmosférica, el viento y/o las precipitaciones, teniendo como objetivo predecir el tiempo que va a hacer en 24 o 48 horas y, en menor medida, elaborar un pronóstico del tiempo a medio plazo.

VIII.1.1. Climatología

La climatología es la ciencia que estudia los fenómenos producidos en la atmósfera terrestre, climas de la tierra y su funcionamiento en relación a sus características, variaciones, distribución, tipos y posibles causas determinantes, involucrando los fenómenos producidos en la atmósfera terrestre.. Proporciona respuestas no sólo del estudio predictivo del tiempo; además trata de averiguar cuales son las causas que desencadenan estos fenómenos, tratando de establecer modelos que permitan predecir y prevenir posibles fenómenos desastrosos tanto para seres vivos como la infraestructura humana.

Algunos autores consideran a la climatología como una rama más de la meteorología, basándose en el hecho, por demás innegable, de que resulta imposible estudiar el clima de cualquier lugar si previamente no se realizan los estudios meteorológicos correspondientes (Marcano, 2000).

Específicamente, la climatología trabaja con datos meteorológicos obtenidos mediante observaciones y registros durante largos periodos de tiempo, (la Organización Meteorológica Mundial [OMM], recomienda sean generalmente 30 años ó más) en estaciones meteorológicas especializadas; a partir de ellos se calculan valores medios y extremos del clima y se analizan las oscilaciones periódicas, frecuencia y repetición de los diferentes fenómenos atmosféricos que suceden en el área a estudiar para obtener la condición climática media de ese lugar. Debido a que el análisis aquí realizado se refiere a un lapso de tiempo específico de 40 años, se podría englobar en el término climatología.

Una correcta planificación del desarrollo de los países debe tener en cuenta el conocimiento de los tipos de clima del lugar, por lo que es importante familiarizarse con los valores numéricos de los datos y aprender a interpretarlos, ya que con esta información podemos distinguir, por ejemplo, cuáles son los meses más calurosos o los más fríos, cuando llueve más en una comunidad determinada, o cuando se tienen las condiciones ideales para que se generen los ciclones.

VIII.1.1.1. Conceptos Básicos

Para conocer el tiempo atmosférico y el clima es preciso establecer las condiciones generales del tiempo atmosférico en una zona y época concretas, la posible interacción de diversos factores y por último los regímenes térmicos y pluviométricos, así como los elementos y factores que intervienen en la circulación atmosférica. Tiempo y clima, aunque muy relacionados entre sí, son conceptos diferentes que muy frecuentemente se confunden uno por el otro.

Tiempo

El estudio y previsión del tiempo corresponde a la meteorología. Al hablar de tiempo nos estamos refiriendo al estado de la atmósfera (observado habitualmente día a día) en relación con los fenómenos meteorológicos de una localidad determinada. Científicamente, este estado se describe mencionando los fenómenos atmosféricos que suceden en el lugar, tales como el viento y las precipitaciones, así como los valores correspondientes a las magnitudes fundamentales de presión, temperatura, humedad, etc., referidos estos a lapsos de tiempo de corto y mediano plazo, por ejemplo, horas, días, semanas.

Clima

El clima, a diferencia del tiempo, lo constituye las condiciones atmosféricas medias que son características de un área o región de la superficie terrestre, por tanto no se refiere a fenómenos meteorológicos concretos o un estado atmosférico puntual, sino al valor más representativo del conjunto de todos ellos durante escalas de tiempo mayores, incluso de hasta 4 meses. Concretamente, el clima es el conjunto de características meteorológicas habituales o más probables (temperaturas y precipitaciones) que se dan en una superficie muy extensa durante un período largo de tiempo, por lo tanto una serie de valores estadísticos.

Factores Climáticos

Los factores climáticos intervienen en la distribución de las zonas climáticas de la Tierra, obedecen a las características geográficas influyentes en el clima, por ejemplo: la proximidad al mar, la altura, las corrientes marinas, etc; de los que se distinguen:

Energía solar.

La variación calorífica que el sol ejerce sobre varios de los elementos climáticos se debe en parte, al movimiento que realiza la Tierra alrededor del sol y de su propio eje. Tal es el caso sobre la temperatura, donde se influye directamente sobre las diferencias térmicas en el planeta, que junto con las diferencias de presión por efecto de la altitud, dan lugar a la formación de los vientos.

Latitud.

Con este factor se determinan las grandes franjas climáticas que involucran además, la forma del planeta. Puesto que su mayor extensión está en el Ecuador, más cerca a éste se da un mayor calentamiento de las masas de aire de manera permanente, conforme nos desplazamos en latitud hacia los polos las temperaturas van disminuyendo. El Polo Norte es siempre menos frío que el del sur, esto debido al predominio de océanos en el primero (sin tierras emergidas), el polo Norte siempre es menos frío que el polo Sur

Altitud y relieve

El relieve es un factor determinante sobre el clima por efecto de la altitud, influye en el mayor o menor calentamiento de las masas de aire. Al aumentar la altura disminuye la capa de aire, y consecuentemente la presión atmosférica; el aire disponible absorbe menos calor solar, descendiendo la temperatura y aumentando la humedad. La temperatura va disminuyendo a mayor altitud aproximadamente unos 6.4°C por cada 1000 metros de altura.

Suelo

Este es un factor climático apreciable con respecto al agua, ya que la tierra se calienta o enfría dos veces más rápido que cualquier medio acuático a igual nivel de exposición solar. En caso de que éste no reciba radiación solar, la temperatura desciende en igual proporción, cosa que no sucede con las aguas oceánicas. Los factores de intercambio térmico de las tierras en relación con los océanos originan regímenes de viento.

Vegetación

Se clasifica como un factor biológico del clima, ya que influye directamente en la temperatura y humedad, así como en la radiación solar que la superficie terrestre recibe o refleja. se puede entender fácilmente que en las regiones boscosas, en que la radiación solar entra con mayor dificultad, las temperaturas desciendan y aumenten las precipitaciones.

Orientación

Se refiere a la forma y posición de la Tierra en el Sistema Solar. La forma de la Tierra no es completamente redonda, tiene cierto achatamiento en los polos y un alargamiento en el Ecuador, lo que hace que gire sobre su eje (rotación); la posición se refiere al movimiento de la Tierra alrededor del Sol (traslación) estos dos factores, influyen en el nivel de radiación que recibe el planeta condicionando las condiciones climáticas.

Continentalidad: Se refiere a la situación geográfica de un lugar con base en la presencia o ausencia de masas de agua condicionando las variaciones de temperatura y humedad. El agua actúa como regulador térmico, enfriando el ambiente en la noche y templándolo en el día. Además influye en el movimiento de las masas de aire. Sabemos que existen diferencias térmicas entre tierra y mar, debido a la capacidad del agua para conservar el calor más tiempo que el suelo.

En las regiones continentales alejadas del mar se dan cambios térmicos notorios, debido a que el calentamiento del suelo durante el día y el enfriamiento durante la noche, se produce muy rápidamente. Cuando las regiones continentales quedan cercanas al mar o litorales, los cambios térmicos son más lentos o menos bruscos, puesto que el agua actúa como moderador en las oscilaciones de temperatura.

Ahora, se puede resaltar que la mayoría de la superficie terrestre emergida se encuentra al norte del Ecuador provocando que este fenómeno térmico sea el responsable de que el clima del hemisferio norte sea más continental y el sur más oceánico.

Corrientes oceánicas

El océano está en movimiento constante, siendo más intenso en la superficie; las olas y las corrientes superficiales promueven la mezcla de aguas oceánicas (agua dulce y la salada del mar), los vientos producen las olas y las corrientes en el océano y éstos a su vez están influenciados por el calor generado por el sol, por lo tanto las corrientes marinas transportan cantidades importantes de agua y energía en forma de calor lo que marca la distribución de la salinidad y de la temperatura, afectando como resultado el clima.

Hay varios puntos a tomar en cuenta dentro de este factor, uno de ellos toma de base que el agua funge como regulador térmico, se sabe que en este medio se mantiene más tiempo el calor generado por la radiación solar que en tierra firme, otro se debe al movimiento de la Tierra (rotación) ya que lo que se mueve en la superficie no sigue una línea recta, sino que se gira hacia un lado (efecto Coriolis) que tiene un efecto directo en el movimiento de las corrientes y los vientos; la diferencia de densidades de agua dulce contra salada, los vientos, entre otros tienen efectos sobre las corrientes oceánicas afectan de forma importante al clima de determinadas regiones costeras, por su capacidad para el intercambio térmico de las corrientes entre diferentes latitudes.

Temperatura media

Los promedios de temperatura o temperaturas medias son valores de referencia importantes en climatología. El conocimiento de las temperaturas del aire es fundamental para cualquier estudio climatológico, sin ellas no se puede establecer una distribución de temperaturas, y por ende definir los fenómenos del clima.

Elementos Climáticos

Los elementos que constituyen el clima son un conjunto de fenómenos relacionados entre sí. Son principalmente las temperaturas, vientos, presión atmosférica y precipitaciones (no confundir elementos climáticos con factores climáticos, éstos últimos tienen que ver más bien con las características geográficas en que se desarrollan los elementos climáticos) (Educarex, 2013).

Así, la temperatura del aire depende de la radiación solar; los vientos y la presión atmosférica, están relacionados con la altitud; y elementos como la humedad, nubosidad, precipitaciones y evaporación, están íntimamente ligados y se producen de forma encadenada. De todos estos elementos, los que se consideran más determinantes para la clasificación de los climas son las temperaturas y las precipitaciones (Educarex, 2013).

Temperaturas

El conocimiento de las temperaturas del aire es fundamental para cualquier estudio climatológico, sin ellas no se puede establecer una distribución de temperaturas, y por ende definir los fenómenos del clima (Natureduca, 2013). La temperatura atmosférica nos indica la cantidad de energía calorífica acumulada en el aire.

De manera general, la temperatura del planeta tiene variaciones geográficas, se reflejan con una disminución de temperaturas desde el Ecuador hacia los polos, y dentro de la misma latitud temperaturas más frías en los continentes que en los océanos, precisamente por las características ya comentadas de capacidad del mar para conservar mejor el calor con respecto a tierra.

Las variaciones entre los climas oceánicos y continentales pueden diferenciarse conociendo la llamada amplitud térmica, consistente en la diferencia entre temperaturas medias más altas y más bajas de un mes o un año. Comparando las temperaturas de los meses cálidos con los fríos (enero y julio) se obtiene la amplitud térmica.

Vientos y Presiones

La presión atmosférica está en relación directa con el aire, su temperatura y la altura del lugar. Esta presión es máxima al nivel del mar y va disminuyendo con la altitud, pero no es constante, ya que dependiendo de la temperatura del aire éste pesa más o menos, y por tanto la presión sube o baja. Es decir, si el aire se calienta pesa menos y tiende a elevarse, mientras que si se enfría pesa más y tiende a descender (Natureduca, 2013).

Las responsables de que se formen las zonas de altas y bajas presiones son las oscilaciones de temperatura o sea, zonas de aire caliente o baja presión (ciclones o borrascas) y zonas de aire frío o alta presión (anticiclones). Debido a las diferencias de presión atmosférica en diversas partes del planeta, se realizan los desplazamientos de aire de un sitio a otro, dando lugar a los Vientos.

Los vientos se miden en dirección e intensidad mediante la veleta y el anemómetro, respectivamente (Natureduca, 2013). Hay una división de los tipos de vientos de acuerdo a su frecuencia y a su intensidad, la primera de éstas se refiere a la circulación general en la atmósfera en todo el globo terráqueo y se dividen en constantes, periódicos y variables; la segunda referente a la intensidad donde los vientos se clasifican en débiles, moderados, fuertes, violentos y huracanados.

- *Vientos constantes:* como su nombre lo dice, mantienen movimientos constantes y se dan por el intercambio térmico del viento, son por ejemplo los alisios, soplan del noreste y sureste desde las altas presiones subtropicales hacia las bajas presiones tropicales del Ecuador. Los que soplan desde el noreste en el hemisferio norte, se llaman Alisios del Norte; y los que soplan desde el sureste en el hemisferio sur son llamados Alisios del Sur.
- *Vientos periódicos:* muestran una tendencia cíclica, recurrente o estacional, no son constantes, se deben a la variación de la posición del eje de la Tierra, las estaciones del año, y a la morfología del paisaje. son por ejemplo los monzones, que soplan de forma regular en diferentes regiones del mundo, pero muy especialmente en las tropicales, producidos cuando ocurre el enfriamiento-calentamiento de los continentes y los océanos en distintas estaciones del año. Por su intensidad se distinguen los monzones de los mares de la China y océano Índico.
- *Vientos variables:* son de carácter local, cuya periodicidad es difícil de establecer, algunos ejemplos son: la brisa de valle, brisa de montaña, vientos catabáticos que van de las alturas al fondo de los valles con desplazamiento de aire frío y denso al ras del suelo, vientos anabáticos que van de las partes bajas a las altas a medida que el sol calienta el relieve. En México se conocen como Nortes, que es el resultado de una masa de aire frío que se desplaza del norte del país hacia el sur.

Precipitaciones

El estudio de la humedad en el aire, tanto por estar en el origen de las precipitaciones, como por las consecuencias para la producción biológica que se derivan de sus variaciones, es esencial en climatología.

El nivel y régimen de precipitaciones son factores trascendentales en lo que respecta a la vida sobre la tierra; así, de ellos se derivan los diferentes tipos de vegetación, la formación de los suelos, su productividad, la capacidad de sedimentación y erosión sobre las rocas, entre otras numerosas cuestiones de carácter físico, geofísico, biológico, biogeográfico, e incluso de las actividades económicas de seres humanos (Natureduca, 2013). Los constantes movimientos del aire en la atmósfera provocan que éste se renueve constantemente, incluyendo ciertos grados de humedad (partículas o vapor de agua). El grado de humedad puede ser medido pues varía pues presenta grandes fluctuaciones temporales y espaciales.

Humedad absoluta y relativa

Humedad absoluta se define como la masa total de agua en el aire (peso del vapor de agua) por unidad de volumen. La humedad relativa es la relación expresada en porcentaje de la cantidad de agua en el aire real y la máxima que podría absorber a la misma temperatura, por ejemplo, si la humedad relativa es del 70%, significa que el aire aún puede absorber hasta un 30% más de vapor de agua.

Capacidad de absorción del aire

La capacidad de absorción del aire es proporcional a su nivel de temperatura, es decir, a mayor temperatura del aire mayor capacidad de absorción, lo cual significa que el agua del mar, ríos, lagos y la contenida en cualquier cuerpo de agua, necesitan calor para su evaporación y posterior absorción por el aire. Por el contrario, a menor temperatura, menor capacidad de absorción.

Sin embargo, si ocurre un descenso de la temperatura y el aire contiene el 100% de humedad, se produce la condensación y luego la precipitación en sus diversas formas, una de ellas la lluvia. Lo anterior sucede si existen núcleos de condensación, que son diminutas partículas suspendidas en el aire que facilitan al vapor de agua pasar a estado líquido, mismas que se unen en gotas y que cuando alcanzan el peso y volumen adecuado precipitan en forma de lluvia.

Precipitación.

Es el aporte de agua procedente de la atmósfera y que en forma sólida o líquida se deposita sobre la superficie terrestre a manera de lluvia, nieve, granizo, llovizna, entre otras.

Precipitaciones por convección y relieve: De convección o convectivas: Este tipo de precipitaciones es usual de las latitudes cálidas y de las tormentas de verano de la zona templada. Son producto del calentamiento de masas de aire sobre una fuente local, las capas de aire que están en contacto con la superficie terrestre se hacen más ligeras, se expanden y suben. Durante el ascenso se enfrían, se condensa la humedad contenida en el aire y se produce la precipitación. Pueden producirse en zonas llanas o con pequeñas irregularidades en el terreno, como es el caso de Yucatán.

Orográficas: Cuando una masa de aire húmeda choca con un obstáculo montañoso que al chocar asciende por la ladera orientada al viento (barlovento) y se condensa produciendo la precipitación; al contrario de la ladera opuesta (sotavento) donde no se producen precipitaciones, puesto que el aire desciende calentándose perdiendo humedad lo que lo hace más seco.

Frontales o ciclónicas: Este tipo de precipitación se produce en las latitudes templadas al entrar en contacto dos masas de aire de diferente temperatura y que desarrollan un movimiento ciclónico, como las provocadas por el frente polar que es la zona de contacto entre las masas de aire polares (frías) y tropicales (cálidas); o simplemente las lluvias que ocurren a lo largo de un frente o superficie de contacto de ambas masas (lluvias frontales).

Precipitaciones sólidas

Las precipitaciones sólidas se presentan como nieve o granizo cuando la temperatura de la masa de aire es inferior a 0° C llegan a la superficie terrestre conservando ese estado, sólo si las diversas capas de aire que atraviesan mantienen una temperatura igual o muy cercana a los 0° C.

La formación y caída de la nieve es muy similar a las gotas de lluvia, que se origina a partir de la condensación del vapor de agua contenido en el aire atmosférico, aunque el elemento temperatura es el que determina si el agua llega a la superficie terrestre como gotas de lluvia o nieve. La nieve puede tener forma de cristales de hielo que se precipitan por separado o varios de éstos como copos de nieve.

Este fenómeno sólo se presenta en nubes tipo cúmulos o cumulonimbos (nubes de tormenta muy grandes), pueden ser de formas y tamaños muy diversos, por lo general redondos y no rebasan los 2 cm de diámetro, el tamaño que puede alcanzar depende de la fuerza del viento que puede mantenerlo suspendido mientras se unen más cristales de hielo y finalmente caen a la superficie terrestre.

Las precipitaciones también se pueden presentar como tormentas de granizo (forma sólida de precipitación). De manera gráfica se observa la formación de una en la Figura 118. Cuando las partículas de granizo se hacen demasiado pesadas para ser sostenidas por las corrientes de aire, caen hacia el suelo pudiendo tener diámetros que varían entre 2 mm y 13 cm, pudiendo llegar a ser muy destructivas. A veces, varias piedras pueden solidificarse juntas formando grandes masas informes y pesadas de hielo y nieve (CENAPRED, 2010).

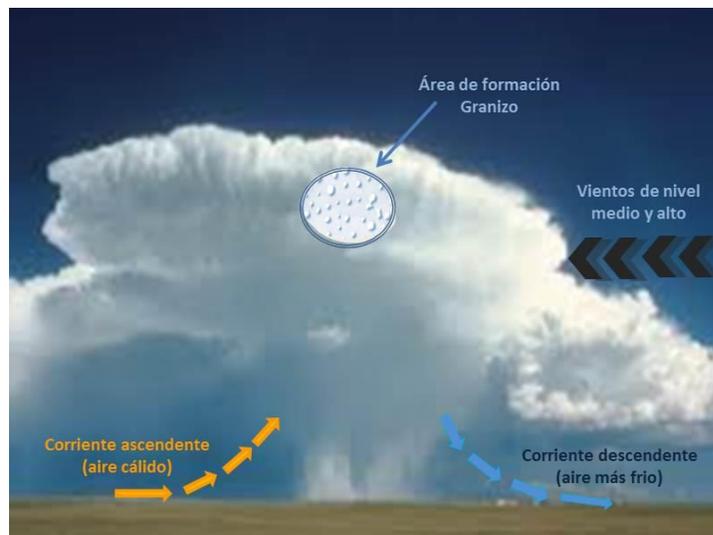


Figura 118. Formación de Tormentas de granizo (Modificado de ALERMET, 2011).

Una tormenta eléctrica se forma por una combinación de humedad, entre el aire caliente que sube con rapidez y una fuerza capaz de levantar a éste, como un frente frío, una brisa marina o una montaña (CENAPRED, 2010), son descargas bruscas de electricidad atmosférica que se manifiestan por un resplandor breve (rayo) y por un ruido seco o estruendo (trueno). Las tormentas se asocian a nubes convectivas (cumulonimbus) y pueden estar acompañadas de precipitación en forma de chubascos; pero en ocasiones puede ser nieve, nieve granulada, hielo granulado o granizo (OMM, 1993).

VIII.1.1.2. Método de Trabajo

Los peligros por fenómenos hidrometeorológicos por lo general tienen su origen en las anomalías que presentan algunos de los agentes meteorológicos como precipitación, presión y temperaturas. Por lo tanto, para poder determinar las zonas que podrían presentar problemas por este tipo de fenómenos, es importante hacer un análisis de las diversas variables meteorológicas para conocer la influencia que estas pueden ejercer en el origen y desarrollo de dichos fenómenos.

En las estaciones meteorológicas se registran las condiciones del estado del tiempo en un lugar determinado, realizándose mediciones de diversas variables meteorológicas como: la cantidad de precipitación (mm) que cae en cierto espacio, la temperatura máxima y mínima (°C) a diversas horas del día y la temperatura media registrada, por otra parte también se pueden contabilizar las granizadas y tormentas que se presentan.

En el estado de Yucatán, existe una red de estaciones meteorológicas a partir de las cuales se analizarán los datos climatológicos con el fin de correlacionarlos con los diferentes tipos de fenómenos hidrometeorológicos y determinar cuáles son las zonas que podrían presentar problemas de inundaciones u otros fenómenos que afecten a la población y su infraestructura.

Para el desarrollo de este tema sólo se llevan a cabo dos de las tres etapas del Método General de Trabajo mencionado anteriormente, las realizadas en gabinete mismas que se describen en la Figura 119 y más adelante dentro del texto.

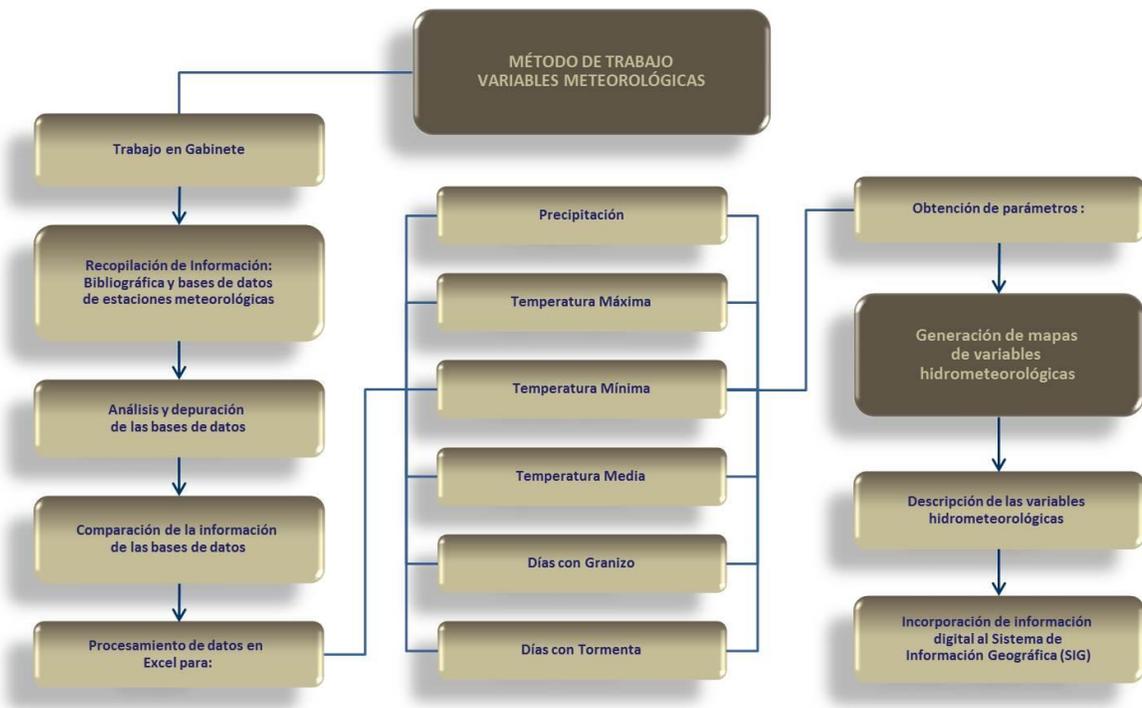


Figura 119. Método de trabajo para Climatología.

El primero de los pasos es la recopilación de información relacionada con el tema, en diversas dependencias y organismos, buscando que sea completa y que sea mayor a 30 años para que las interpretaciones sean válidas según expertos en el tema.

Partiendo de bases de datos con registros históricos de estaciones meteorológicas que hay en el Estado compiladas de diversas dependencias, Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y del Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán (CICY), donde se reportan variables diversas y que para el caso del 'presente trabajo son: Precipitación, Temperatura máxima, mínima y media, días con granizo y días con tormenta.

Los datos requeridos de las variables aquí analizados se extrajeron y conjuntaron del Sistema CLICOM (Sistema de Clima Computarizado) con información hasta el año 1990 proporcionada por CONAGUA, una versión más actualizada del mismo archivo con datos hasta el 2001; otra base de datos proporcionada por CONAGUA Yucatán de Estaciones Meteorológicas Automatizadas (E.M.A.) aunque son de un periodo más reciente, abarcan menos años y sólo se utilizaron para complementar bases de datos contiguos que faltaran, una más, proporcionada por el CICY (Centros de Investigaciones Científicas del estado de Yucatán).

De estos registros se obtuvo que en Yucatán existen un total de 92 estaciones climatológicas, algunas de las cuales están fuera de funcionamiento, las restantes tienen valores incompletos y muy pocas tienen un rango de años con datos de más de 40 años. Para elegir qué estaciones serían tomadas en cuenta, se realizó el análisis de cada una y se eligieron un total de 22 estaciones (Tabla 80), siendo 17 para el Estado y cinco más ubicadas en la cercanía del límite estatal (Campeche y Quintana Roo).

Algunos de los criterios para decidir cuáles estaciones analizar fueron:

- Contar con información de un periodo mayor a 30 años, que es más del límite mínimo inferior representativo de cada estación (García, 1989)
- Que dicha información no tuviera faltantes de 3 años consecutivos y la información de cada estación tuviera más del 80% de datos.

Tabla 80. Coordenadas de las estaciones meteorológicas analizadas.

X	Y	Z	ESTACION	NOMBRE	MUNICIPIO	ESTADO
313160.64	2346296.89	6	31003	Buctzotz	Buctzotz	Yucatan
146134.78	2309361.45	3	31004	Celestún (SMN)	Celestún	
229376.94	2356972.31	0	31007	Chicxulub Puerto	Progreso	
345958.09	2255457.50	26	31008	Chanchichimilá	Chikindzonot	
303917.03	2366828.57	2	31010	Dzilam De Bravo	Dzilam De Bravo	
341116.42	2304948.69	20	31011	Dzitás	Dzitás	
429742.90	2379450.07	2	31012	El Cuyo	Tizimín	
381044.71	2365805.55	10	31017	Loche	Panabá	
262738.83	2332641.25	7	31020	Motul	Motul	
217093.21	2268423.48	29	31021	Muna	Muna	
296316.31	2226264.44	35	31022	Peto (DGE)	Peto	
381206.93	2387912.96	4	31024	Rio Lagartos	Rio Lagartos	
185278.08	2343519.54	1	31029	Sisal	Hunucmá	
243492.30	2284651.60	10	31032	Telchaquillo	Tecoh	
260594.46	2235886.50	31	31033	Tekax de Alvaro Obregon	Tekax	
279275.75	2238775.88	33	31035	Tixméhuac	Tixméhuac	
449566.48	2332892.22	33	23011	Kantunilkin	Lazaro Cardenas	Quintana Roo
357258.42	2233529.14	62	23024	Tihosuco	Felipe Carrillo Puerto	
355730.05	2178280.39	28	23031	X-Pichil		
227180.26	2166977.95	80	4017	Iturbide	Hopelchen	Campeche
180369.00	2261610.00	16	4064	Becal	Calkiní	

Los registros históricos deben corresponder a una serie de años consecutivos, los cuales son representados de manera gráfica en la Figura 120, a partir de 20-30 ó más años, teniendo en cuenta que éstos sean consecutivos o que no tengan espaciamentos de más de 3 años sin datos. El periodo de años analizado es de 1960 al año 2000.

El archivo de los registros originales (CLICOM) viene en formato de texto, para poder visualizarla completa, pues en una hoja de Excel no es posible, por lo que debe abrirse en Word Pad o en Block de Notas (Figura 121).

Tabla 81. Variables reportadas en los registros históricos de CLICOM.

CLAVE	ELEMENTO
002	Temperatura Máxima (°C)
003	Temperatura Mínima (°C)
005	Precipitación en 24 hrs (mm)
030	Días con Tormenta (0 no hay, 1 si hay)
031	Días con Granizo (0 no hay, 1 si hay)

Según la Organización Mundial Meteorológica (OMM), los registros históricos pueden considerarse válidos si se tiene más del 80% de la información y que contengan información consecutiva de cada año, en caso de tener en una estación meteorológica un faltante de tres años seguidos, no se deberá considerar en el análisis.

Los registros en el Sistema CLICOM vienen en crudo, con anotaciones para cada valor, entre los más notorios está el -99999 que significa Valor no existente o perdido y junto a éste hay una letra M (missing - perdido), copiar por partes al programa Excel como se muestra en la Figura 122, pueden copiarse, dividiendo la base de datos de las estaciones que se requieren en varios blocks de notas y guardarlas como texto. Posteriormente se abren en el programa Excel como texto delimitado por comas y se guarda en el mismo formato, con el fin de poder aplicar filtros, eligiendo el número de estación, la variable a analizar, años y meses elegir la información de cada variable.

Es importante mencionar que a esta información se le hace un tratamiento para quitar los valores que no son útiles como las columnas de las banderas (Flags) entre otros.

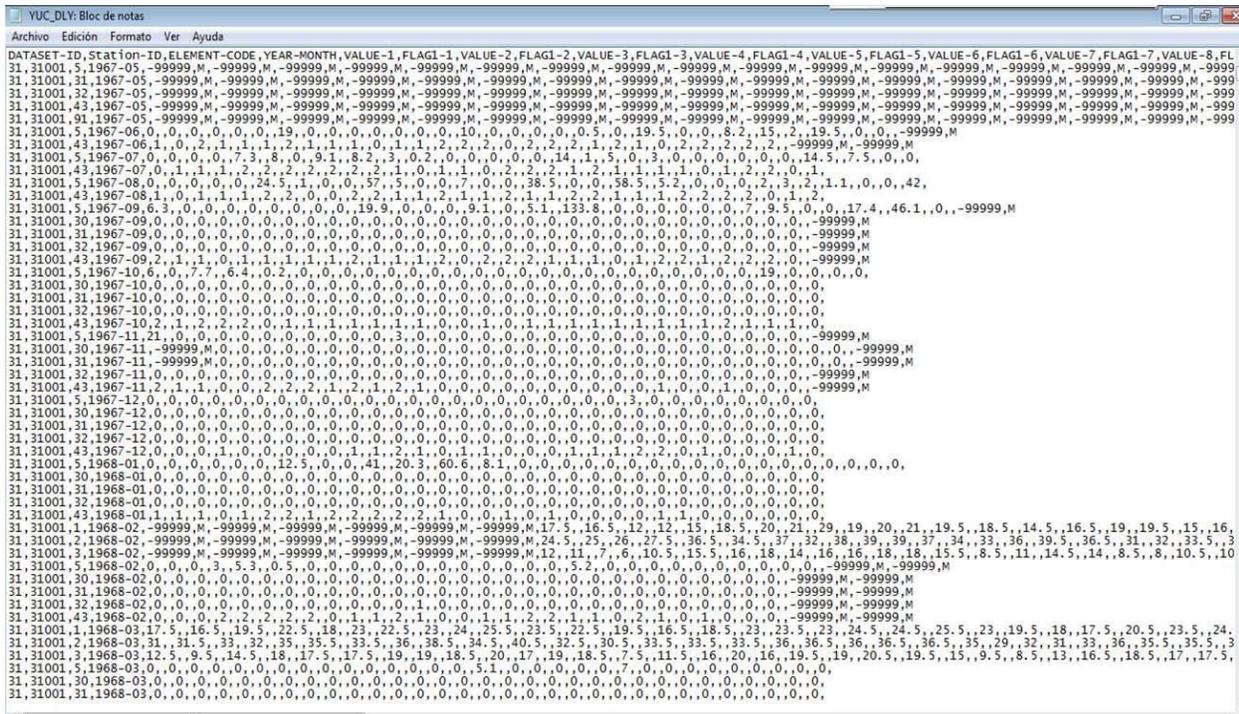


Figura 121. Base de Datos original (CLICOM).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL		
170	#	31004	5	1983	1	ENERO	6.5	9.5	0	20	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 122. Datos del Sistema CLICOM en Excel.

Teniendo ya la información de una o más estaciones, se procede a crear filtros para los campos: Estación, Variable, Año y Mes, de la cual se copian los valores de manera consecutiva para cada variable a analizar (Figura 123).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	
3064	31	31017	5	1975	1	ENERO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 123. Selección de datos por periodos continuos.

Para calcular la temperatura media, el programa deduce la media mensual de las temperaturas mínimas, sumando las temperaturas mínimas diarias observadas en el mes y las divide entre el número de días observados, obteniendo la media mensual de temperatura mínima. Después, de la misma manera, obtiene una media mensual de temperatura máxima. Estos dos promedios se suman y dividen entre dos, para obtener la temperatura media de cada mes. Para el caso de la precipitación total mensual, suma todos los datos diarios en cada estación. Estos datos fueron capturados en una hoja de cálculo para posteriormente procesarse en el manejador de bases de datos Excel (Amarillo-Azul).

Cada variable se almacena en una hoja de cálculo específica dentro de un mismo archivo para cada estación.

Es importante que al pasar los datos de una hoja de Excel a la hoja Amarillo-azul, hay que dejar el espacio de algún mes o meses que no contengan información, por ejemplo, el mes de junio no aparece en esta estación para el año 1975 (Figura 124), por lo que en la hoja de Excel con fórmulas se debe dejar en blanco el mes que le corresponda, este posteriormente será completado.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI				
1		AÑO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	ACUM MENSUAL	ACUM ANUAL				
2	ENERO	1960-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36	
3	FEBRERO	1960-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54	0	0	0	0	2		66				
4	MARZO	1960-03	4	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22.5		
5	ABRIL	1960-04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	MAYO	1960-05	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.5		
7	JUNIO	1960-06																																					
8	JULIO	1960-07	0	13	2	0	0	0	2	2	18	1	0	0	30	25	15	0	24	10	36	11	2	20	3	0	2	0	3	0	19	20		256	1036.5				
9	AGOSTO	1960-08	0	29	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	18	13	0	0	0	0	12	0	8	24	0	0	0	19	11	0	0		146						
10	SEPTIEMBRE	1960-09	3	7	10	0	12	12	9	22	1	0	4	0	19	37	0	0	0	3.5	8	42	19	6	0	2	2	12	7	0	27		260.5						
11	OCTUBRE	1960-10	0	10	4	0	40	1	0	4	3	46	0	18	0	18	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	169			
12	NOVIEMBRE	1960-11	0	0	0	0	10	0	0	14	0	19	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	66				
13	DICIEMBRE	1960-12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	10				
14	ENERO	1961-01																																		0			
15	FEBRERO	1961-02																																		0			
16	MARZO	1961-03																																		0			

Figura 124. Hoja de cálculo Amarilla-azul con fórmulas.

En ocasiones, ya pasados los datos a la hoja de Excel con las fórmulas, conviene comprobar la validez de las series, o completarlas cuando falta algún dato aislado, relacionando unas estaciones con otras por lo que se procede a completar los espacios en blanco estandarizando los datos, esto es, tomar en cuenta los registros inmediatos que se tengan antes y después del mes con ausencias de información. Se saca un promedio con los 10 datos más cercanos a la celda en blanco, ya sea años anteriores o posteriores, si existe aún la duda, se coteja si una estación cercana reporta valores similares (aunque la estación no este tomada en cuenta en la configuración de las variables). Una segunda porción de la hoja de cálculo Amarilla-azul se muestra en la Figura 125 donde se resumen los resultados de cada estación.

Posteriormente se adecua la información para obtener un valor que será el que se va tomar en cuenta para la realización de los mapas (ejemplo: Acumulado anual en una base de datos general donde se tienen las coordenadas de cada estación, los nombres de éstas y su clave).

AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN
MES	MAX MENSUAL	PROMEDIO MENSUAL	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978
ENERO	60.7	765.5	0.1	0.5	13	15.3	12.4	19	57	7	23.4	5	33.4	6.3	24.2	16.6	17.2	13.5	6	22.7	11.4
FEBRERO	80.7	586.6	0.9	5.5	10	10	3.2	20	38.5	6.5	3.7	7	6.3	0	9.4	6	4.1	11.7	7.2	45.2	24.7
MARZO	69.4	577.8	0	10	0	10.7	0	0.3	9	9	0	16.4	0	0	18	15.5	14	11.7	3	24.7	2.0
ABRIL	62.0	750.8	25.4	33	35	2	0	0.3	12.2	53	0	11	0	5.7	0	29.6	0	0	14.2	37.8	1.0
MAYO	81.7	1245.0	21.1	3.8	38	18.1	40.3	28.8	81.7	28.3	54.3	32	21	0	4.7	22.5	12.2	4.6	51	57.3	7.0
JUNIO	90.5	1709.5	65	38.1	85	36.4	34.3	54	28.4	17.6	64	23.5	39.2	46.6	47.3	42.3	16.3	23	27.2	85.5	3.0
JULIO	98.3	1661.8	37	51.3	30.4	24	77.2	34	41	37.4	23.3	98.3	36.4	37.1	32.2	43.7	14.2	38.8	22.4	48.6	2.0
AGOSTO	84.7	1615.0	40.7	56.5	16	46	20	33.5	30	36.8	40.5	35.7	17.4	33.2	38.2	58	12.3	84.7	32.6	30.5	2.0
SEPTIEMBRE	125.0	1877.9	41.5	48	66	79.3	34.6	20	28	35.3	41.3	58.2	24.4	19.2	17.4	15	92	38.4	41.7	48.7	2.0
OCTUBRE	80.1	1396.9	44.2	53	42.4	21.3	74	19	18.3	18	44.3	12	38.7	31.3	16.2	38.8	9.3	70.5	34.5	44.5	1.0
NOVIEMBRE	56.6	623.4	7.7	7	10.2	44.3	9	25	7.5	4.6	6.4	6	16.4	17.4	8.3	9.2	6.2	24.2	24.2	22.3	1.0
DICIEMBRE	62.0	740.2	9.9	21.6	0	20	46.5	30	14	0	1.8	3.6	0	33.2	30.6	13.5	11	4.6	14.2	12	3.0
125	MAXIMA		65	56.5	85	79.3	77.2	54	81.7	53	64	98.3	39.2	46.6	47.3	58	92	84.7	51	85.5	7.0
0	MINIMA		0	0.5	0	2	0	0.3	7.5	0	0	3.6	0	0	0	6	0	0	3	12	1.0
26.44	MEDIA		24.5	27.4	28.8	27.3	29.3	23.7	30.5	21.1	25.3	25.7	19.4	19.2	20.5	25.9	17.4	27.1	23.2	40.0	2.0
1031.28	ACUM ANUAL		986.8	833.1	962.2	997.7	926.6	986.9	934.1	993.4	990.9	989.9	825.2	958.6	966.6	1221	837.3	1188	1268	1715	11.0

Figura 125. Hoja de Cálculo Amarilla-Azul.

VIII.1.1.3. Análisis de Información y Generación de Mapas Base

La distribución de estas estaciones cubre en gran parte de la superficie estatal, tomando en cuenta que la morfología del Estado es casi homogénea, hay relieves pero estos no son tan marcados y la variable más importante es la cercanía – lejanía con la costa. La Organización Meteorológica Mundial (OMM) hace una categorización por regiones para determinar la superficie de influencia que tienen las estaciones meteorológicas (Tabla 82). El estado de Yucatán quedaría clasificado dentro de la Zona I con una superficie por estación cercana al límite superior de 3,000 Km² tomando en cuenta la cantidad de estaciones que por el rango de años podría ser considerada para el análisis.

Tabla 82. Densidad mínima para una red de estaciones meteorológicas.

CATEGORIA DE REGIONES	NORMAS PARA UNA RED MÍNIMA SUPERFICIE EN Km ² POR ESTACIÓN	NORMAS ADMISIBLES EN CIRCUNSTANCIAS ESPECIALMENTE DIFÍCILES SUPERFICIE EN Km ² POR ESTACIÓN
I Regiones llanas de zonas templadas, mediterráneas y tropicales	600 – 900	900 – 3,000
II Regiones montañosas de zonas templadas, mediterráneas y tropicales Pequeñas islas montañosas con precipitación muy irregular y red hidrográfica muy densa	100 – 250 25	250 – 1,000
III Zonas áridas y polares	1,500 – 10,000	
Fuente: Jauregui, 1973.		

Para determinar la superficie de influencia de cada estación utilizando los criterios de densidad mínima se manipuló el software ArcGis donde se realiza el cálculo por medios automatizados un buffer alrededor de cada estación con un radio de 30 Km, que da un área de aproximadamente 2800 Km², siendo que para el Estado se tiene una superficie de aproximadamente 39,800 Km² dando una cobertura de poco más del 70% (Figura 126) por lo que sumando la correspondencia de información consecutiva de las estaciones y esta superficie de influencia se tiene un buen análisis.

Aplicando polígonos de Thiessen se asocia un área de influencia a la estación meteorológica y se tiene que la cobertura que tiene cada estación alcanza a cubrir la superficie del Estado. Este método corrige errores por localización geográfica irregular, aunque cabe mencionar que están trazados con criterios meramente geométricos (Figura 127).

Los valores más comunes publicados son las temperaturas más altas y más bajas registradas durante un periodo especificado y la precipitación diaria más alta y la más alta y más baja mensual registradas en un periodo especificado.

Habiendo obtenido los datos de cada estación meteorológica, se revisa cuál método es el adecuado para la obtención de modelos de superficies, por medio de un análisis geoestadístico es posible crear una superficie continua ya sea a partir de datos puntuales, de una capa *raster* o de polígonos, para caso, a partir de datos puntuales.

Dentro del software ArcMap hay herramientas que se encargan de estos procesos, mediante la extensión Análisis Geoestadístico (*Geostatistical Analyst*) y con dos de sus tres submenús, el explorador de datos (Explore data) y el Asistente Geoestadístico (*Geostatistical Wizard*).

Mediante el primero de éstos módulos se puede examinar la distribución de los datos, detecta valores extremos de manera local y total buscando tendencias globales, se puede además examinar la autocorrelación espacial y la variación direccional de los datos.

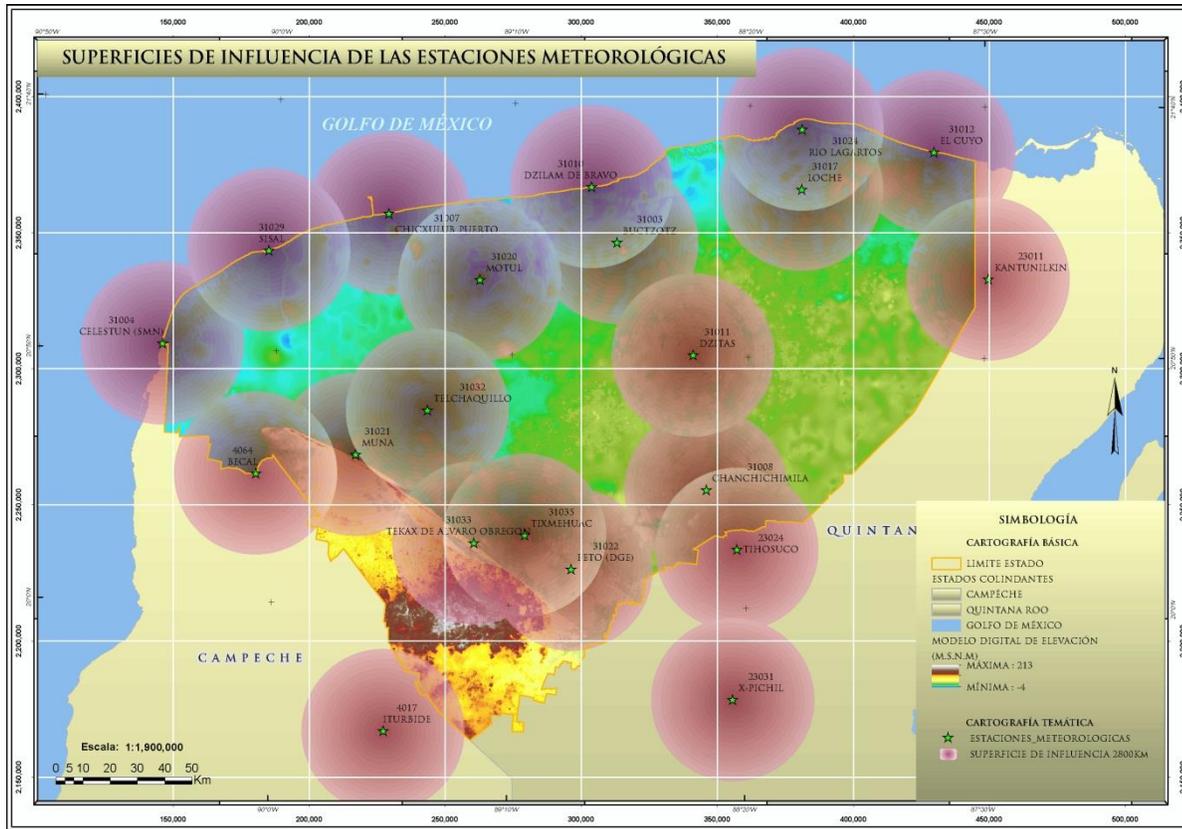


Figura 126. Estaciones meteorológicas y superficie sugerida por la OMM.

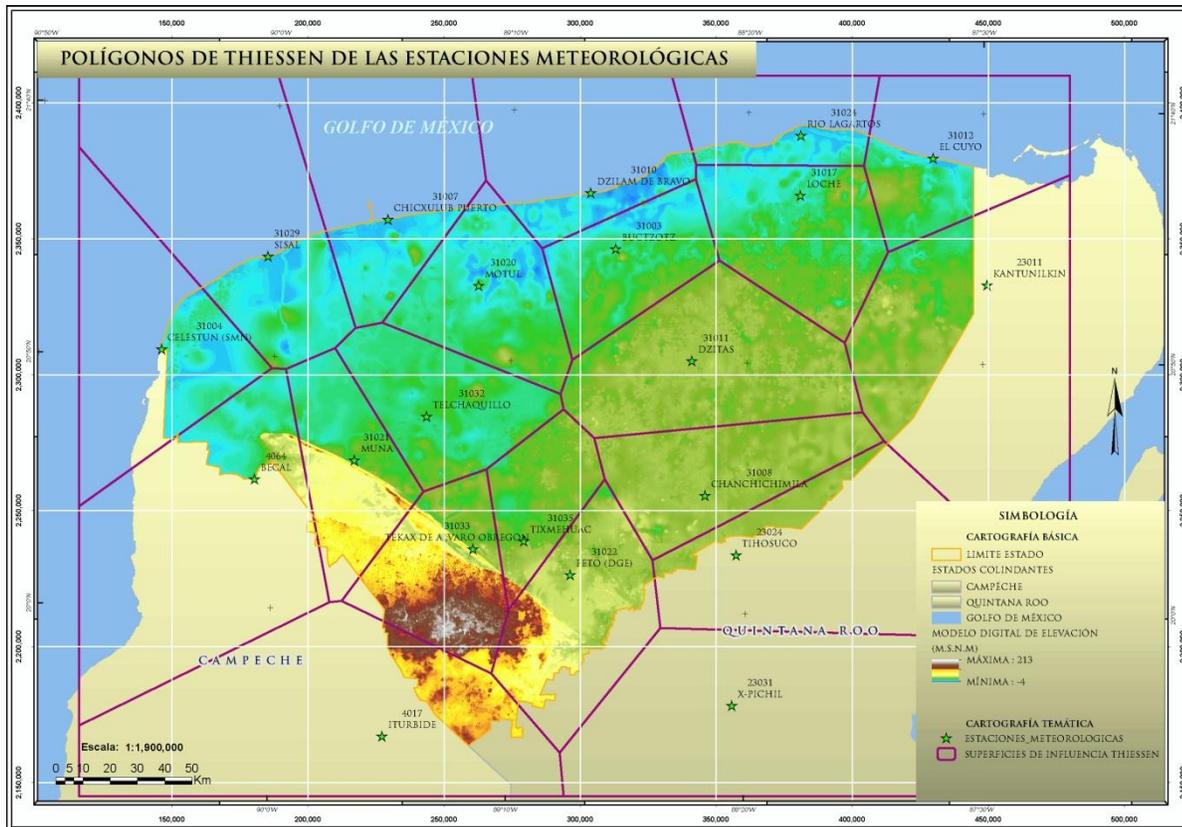


Figura 127. Estaciones meteorológicas y superficie por método Thiessen.

El asistente geoestadístico utiliza varias técnicas de interpolación, determinísticas y geoestadísticas. Para las técnicas determinísticas (directas) no se realiza un análisis previo de la variable a interpolar, se formulan suposiciones generales y no contrastadas sobre la superficie a interpolar y las funciones matemáticas de interpolación se aplican a ésta (ejemplo: IDW- Peso Inverso de la Distancia, Interpolaciones polinómicas).

Las técnicas geoestadísticas o probabilísticas (métodos analíticos) estudian el carácter de la autocorrelación espacial de la variable a interpolar utilizando los puntos muestrales, durante la fase de cálculo genera una función de interpolación que toma en cuenta el grado y tipo de autocorrelación de la variable, utilizan el variograma para describir y elaborar modelos espaciales, por ejemplo el *kriging* que predice valores en puntos no muestrales.

Para el caso de este trabajo se usa la interpolación con la Media Ponderada por el Inverso de la Distancia (IDW, *Inverse Distance Weighted* por sus siglas en inglés), en este método para predecir el valor de un lugar no muestral, utiliza los valores de los lugares muestrales que haya alrededor del lugar que se va a predecir.

Los datos de lugares más próximos al que se va a predecir tendrán más influencia y peso que los más lejanos. El IDW toma dentro de la superficie interpolada como valores máximos y mínimos sólo los valores muestrales que se establecen, esto es, hace la interpolación tomando en cuenta como límites máximos y mínimos los valores que se introdujeron en un inicio.

Teniendo los valores que se quieren interpolar en un archivo convertido a *shape*, se utiliza la herramienta de *Geostatistical Wizard* eligiendo el método determinístico de IDW, se van dando los parámetros que se solicitan para que se realice la interpolación y se utiliza una potencia por defecto de 2 que sería lo equivalente a la distancia inversa al cuadrado.

Obteniendo los *shapes* correspondientes a polígonos e isolíneas, se modifican la simbología y características que se le quiere dar a cada uno y la representación gráfica respecto al límite estatal. Se le da la plantilla establecida y se analiza cada variable en cuanto a distribución de los valores mostrados en los mismos.

VIII.1.1.4. Descripción e Interpretación de Mapas

Las interpolaciones IDW realizadas zonifican espacialmente los datos puntuales originales. En zonas con un poco de relieve, como la Sierra de Ticul el resultado no se asemeja fielmente a la realidad del lugar debido a la necesidad de mayor cantidad de estaciones meteorológicas o que las que existen tengan datos de por lo menos 30 años, que permitan mayor precisión en la interpolación. En el resto del Estado los resultados son mucho más congruentes por el poco relieve que se presenta en la Península.

Temperatura Máxima

Dentro del análisis del mapa de Temperatura Máxima es importante mencionar que históricamente la temperatura más alta para el estado de Yucatán, fue la reportada en la Estación Piste (con clave 31088) ubicada en el municipio de Tinum, con una temperatura de 49.6°C registrada el día 21 de mayo de 1995, misma que no se ve reflejada en este análisis puesto que la estación Piste no contó con los registros necesarios (número de años con información) para ser incluida.

La temperatura máxima absoluta mensual al abrigo fue estimada en grados Celsius enteros y décimas. La estimación de los valores extremos mensuales fue hecha en el período 1960 a 2000 a partir de los valores extremos diarios reportados en la tabla siguiente (Tabla 83).

Tabla 83. Valores de temperatura máxima.

ESTACION	NOMBRE	MUNICIPIO	ESTADO	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)
31003	Buctzotz	Buctzotz	Yucatán	44.5
31004	Celestún (SMN)	Celestún		45.5
31007	Chicxulub Puerto	Progreso		43
31008	Chanchichimilá	Chikindzonot		46
31010	Dzilam De Bravo	Dzilam de Bravo		46
31011	Dzitás	Dzitás		44
31012	El Cuyo	Tizimín		45
31017	Loche	Panabá		44.5
31020	Motul	Motul		46
31021	Muna	Muna		43
31022	Peto (DGE)	Peto		42.5
31024	Río Lagartos	Río Lagartos		41.5
31029	Sisal	Hunucmá		43.5
31032	Telchaquillo	Tecoh		45.2
31033	Tekax de Álvaro Obregón	Tekax		44.5
31035	Tixméhuac	Tixméhuac		44.5
23011	Kantunilkin	Lázaro Cárdenas	Quintana Roo	43
23024	Tihosuco	Felipe Carrillo Puerto		46.5
23031	X-Pichil			45.7
4017	Iturbide	Hopelchen	Campeche	44.5
4064	Becal	Calkiní		44.5

Con los datos anteriores y el método de IDW descrito en el método de trabajo, se realizó el mapa de temperaturas máximas, mismo del que se realiza la interpretación.

El mapa muestra la media de la temperatura máxima anual. En general se observa lo siguiente: De acuerdo a las estaciones meteorológicas analizadas, durante el periodo de 1960 a 2000, la temperatura máxima promedio anual osciló entre los 41.5 y 46°C y su distribución (Figura128) permite observar las zonas del Estado que presentan un incremento considerable de este parámetro.

Del análisis se desprende que la temperatura máxima de 46° se registró en tres estaciones, mismas que están ubicadas en una franja de la zona centro-norte hacia el centro-sureste, que en caso de haber incluido la estación donde se registró la temperatura más alta en el Estado, se notaría más o menos remarcada de manera similar esta zona. La porción norte-oeste presenta una disminución en las temperaturas registradas de la misma forma hacia el noreste donde el tipo de vegetación ayuda a mitigar el aumento de la temperatura.

Las zonas concéntricas de color rojo marcan las temperaturas máximas del periodo de tiempo analizado y en color amarillo los valores de máximas menos altos.

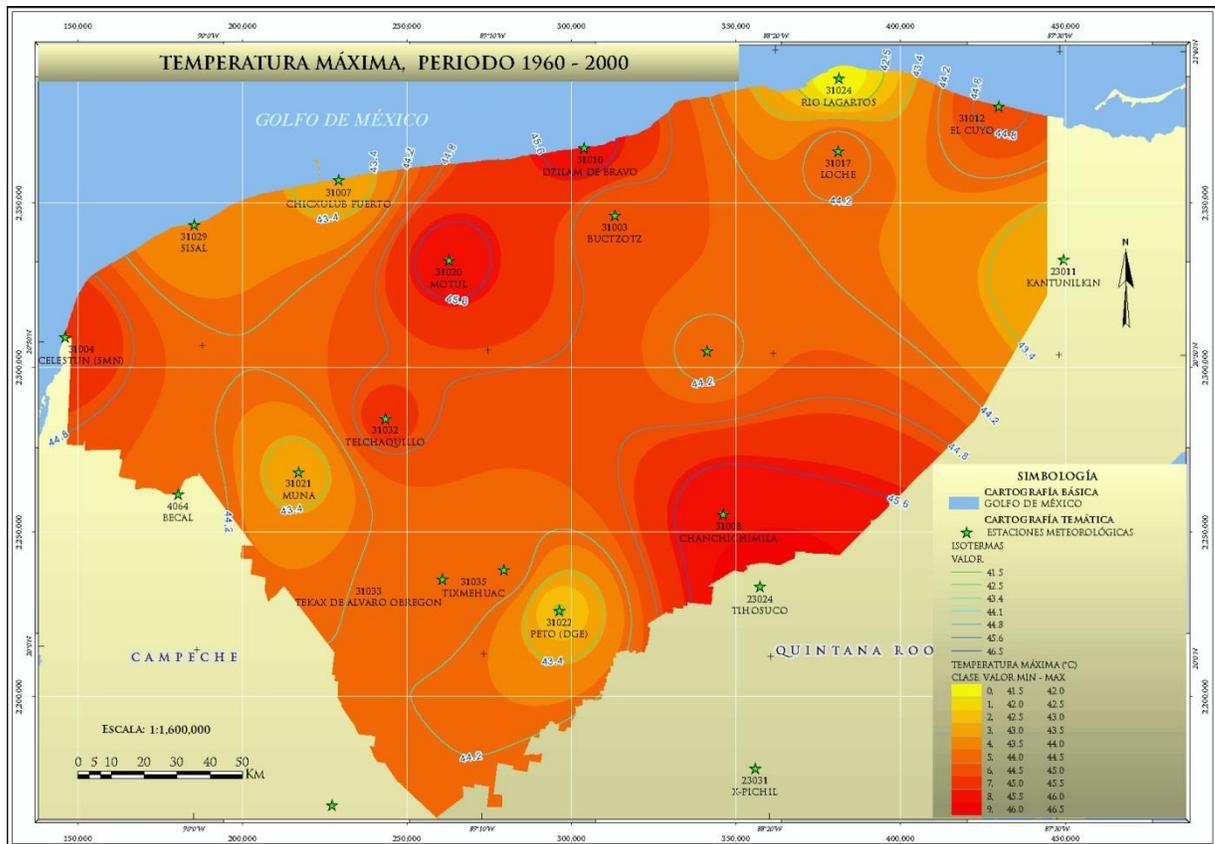


Figura 128. Distribución de los valores registrados de temperatura máxima.

Las tres estaciones que se destacan son: Chanchimila (31008), Dzilam de Bravo (31010) y Motul (31020), enseguida se muestran las gráficas del comportamiento de los datos de temperaturas máximas desde 1960 hasta el año 2000 para las éstas estaciones que reportaron temperaturas de 46°C.

Para la estación Dzilam de Bravo (Est. 31010) la temperatura máxima se registró en el día 23 del mes de abril de 2000 (Figura 129), siendo ésta de 46°C. En tres ocasiones se ha superado la temperatura de 40°C, en los años 1964, 1971 y 1988, durante los meses comprendidos entre marzo y mayo, en la transición de primavera y verano. En esta estación el comportamiento de la temperatura máxima tiende a aumentar con poca variación de 2 ó 3 grados.

La variación de las temperaturas máximas es desde los 35.5 a los 46° con una media anual de 39°C, con 15 años en los que se supera el valor de la media anual y 25 años donde se presentan valores menores a ésta.

El comportamiento del parámetro de temperatura máxima durante el periodo de los 40 años considerados se presenta de manera gráfica en la Figura 129 misma que presenta una tendencia cada vez al alza conforme pasa el tiempo.

Si se toma en cuenta el comportamiento mensual de la temperatura máxima, los meses en los que se presenta un incremento en las temperaturas para la estación Dzilam de Bravo (Figura 130), corresponde a los meses de abril y mayo, ampliando hasta el mes de julio. En esta gráfica se puede apreciar un cambio gradual de la temperatura máxima a lo largo del año, alcanzando su pico máximo en el mes de abril

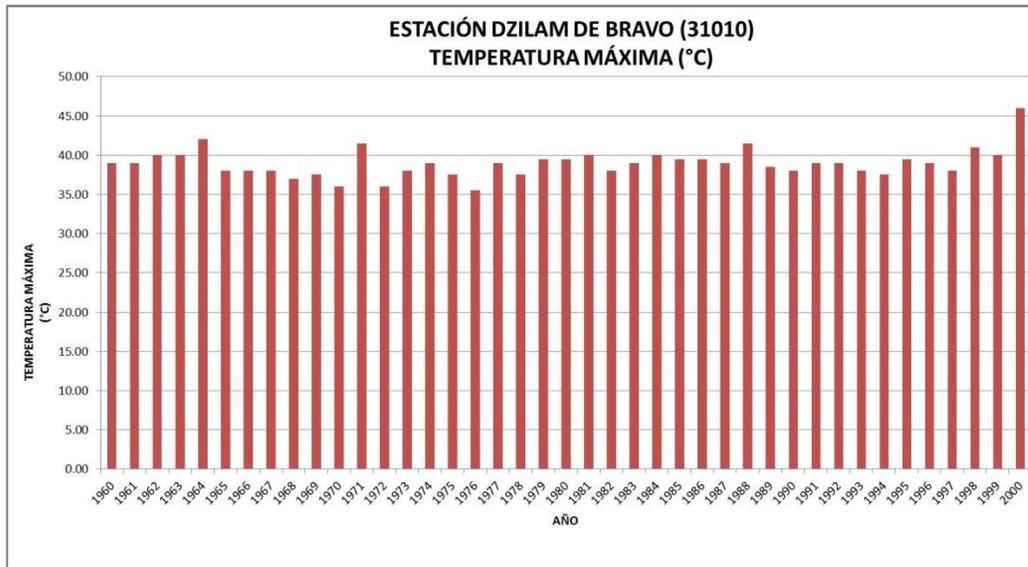


Figura 129. Registros de la temperatura máxima anual de la estación Dzilam de Bravo.

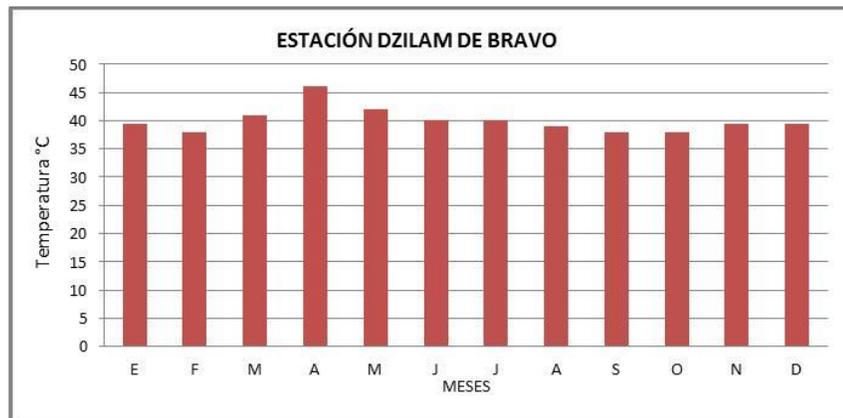


Figura 130. Comportamiento de la temperatura máxima mensual durante el periodo 1960-2000 en Dzilam de Bravo.

En la estación de Motul (est. 31020), la temperatura máxima se registró el día 4 de mayo de 1998 y cabe mencionar que alrededor de este día las temperaturas fluctuaron desde los 41 a 45°C, en el mes de abril de 1988, a partir del día 18 y casi por dos semanas se presentaron temperaturas desde los 40 a los 44°C, además cabe mencionar que en varios años consecutivos se presentaron temperaturas superiores a los 40°C por ejemplo de 1971 a 1974 en el mes de mayo para ambos casos.

Las temperaturas máximas para el caso de la estación Motul, se incrementan hacia los últimos años de análisis y la variación de éstas va desde los 37.7 a los 46 °C y una media anual de 40.26°C, en 17 años se supera el valor de la media anual y en 23 los valores son menores a ésta, como se aprecia en la Figura 131.

El comportamiento del parámetro de temperatura máxima en el área que corresponde a la estación de Motul en el lapso de años analizado se aprecia en la figura siguiente misma que presenta una tendencia al alza conforme el paso del tiempo.

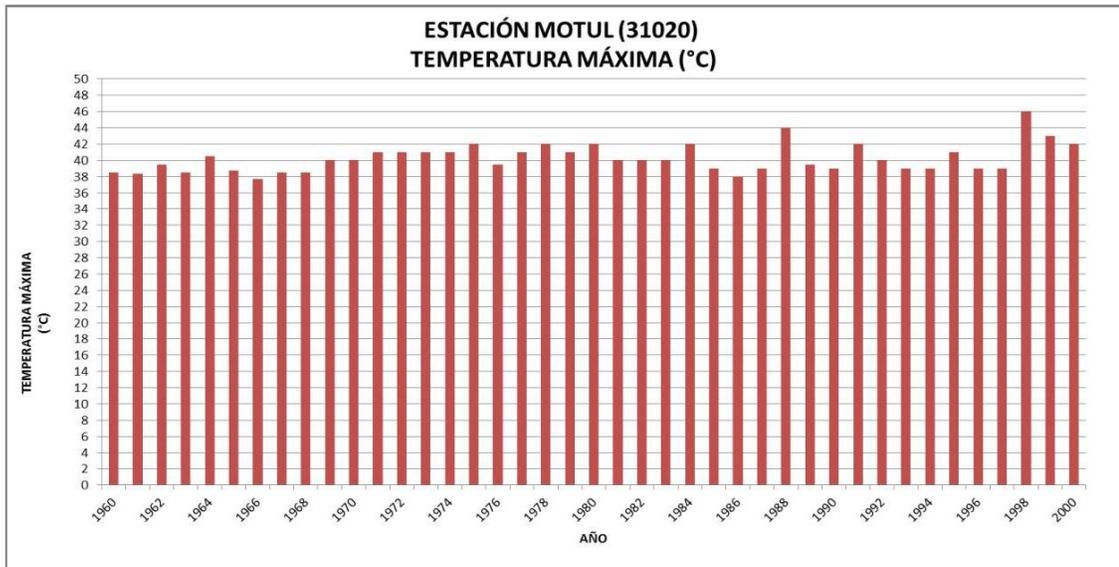


Figura 131. Registros de la temperatura máxima anual en la estación 31020, Motul.

De manera similar que la estación antes descrita, el comportamiento de la temperatura en cuanto a valores máximos de temperatura mensual es similar, donde el incremento se da desde los meses de marzo y abril (Figura 132), se puede apreciar un cambio gradual de la temperatura máxima a lo largo del año, alcanzando su pico máximo en el mes de mayo.

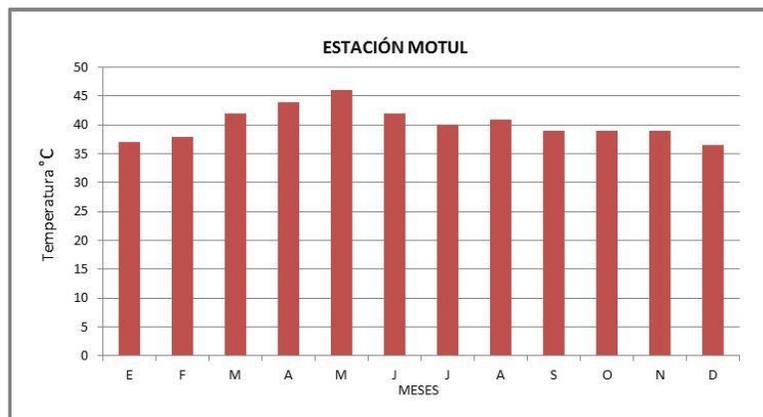


Figura 132. Comportamiento de la temperatura máxima mensual, estación Motul (1960 a 2000).

En los registros de la estación Chanchimila, la temperatura máxima, se registro el día 23 de abril del 2000, en los años 1964, 1971 y 1988, las temperaturas máximas reportadas superan los 41 grados Celsius y otros tantos llegan a los 40°C, esto durante los meses de abril, mayo (en su mayoría) y se extienden hasta el mes de junio.

Los valores de temperatura máxima para la estación Chanchimila (Figura) van en un rango desde los 35.5 a los 46°C, donde el valor de la media máxima anual es de 39°C para el cual 15 años sobrepasa dicho valor y 25 que están situados por debajo del mismo.

Una manera gráfica de representar las fluctuaciones en los valores de temperaturas máximas es la de la Figura siguiente (Figura 133).

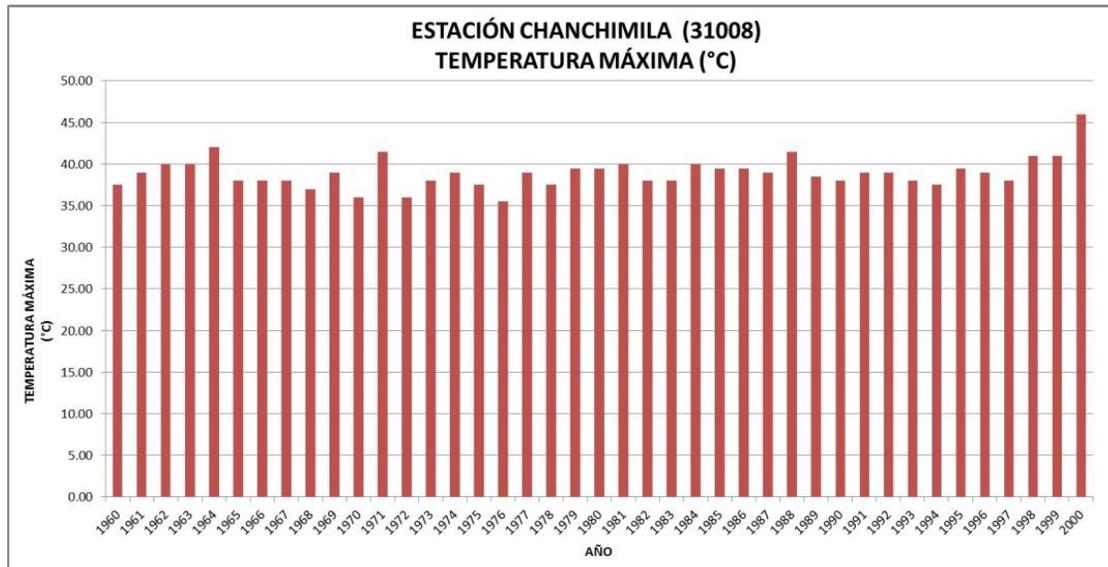


Figura 133. Registros de la temperatura máxima anual en la estación Chanchimila.

El mes en el que se registraron las mayores temperaturas de la estación Chanchimila es abril (Figura 134), se puede apreciar un cambio gradual de la temperatura máxima a lo largo del año, alcanzando su pico máximo en dicho mes.

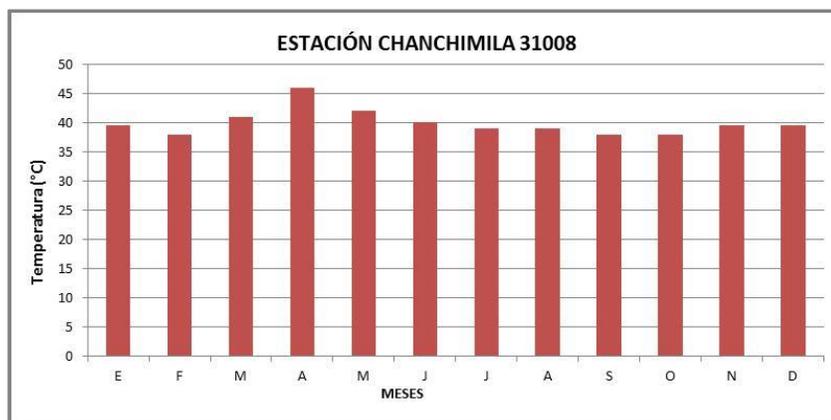


Figura 134. Comportamiento de la temperatura máxima en Chanchimila (Periodo 1960 a 2000).

En el parámetro de Temperatura máxima se observa una amplitud térmica de aproximadamente 6°C registros que van desde los 41.5 a los 46°C dentro del rango de temperaturas máximas de los años analizados para el Atlas.

Temperatura mínima

Históricamente dentro de los registros de la Comisión Nacional del Agua, CLICOM, la temperatura más baja reportada en el estado de Yucatán fue la de San Diego Buenavista (estación 31085) del municipio de Tekax con una lectura de 0.5°C en dos días consecutivos, el 17 y 18 de diciembre de 1996, aunque al no tener los suficientes años de registro, no fue incluida en el presente análisis.

La temperatura mínima absoluta mensual, fue reportada en grados Celsius enteros y décimas de la misma manera que la variable anterior, cabe mencionar que la lectura de este parámetro, al igual que la anterior, es tomada al abrigo. La estimación de los valores extremos mensuales fue hecha abarcando el período 1960 a 2000 a partir de los valores extremos mínimos de temperatura diarios.

Con los datos de la Tabla 84 se realizó el mapa donde se muestra la media de la temperatura mínima anual. En cuanto a las grandes regiones que se observan, tiene un comportamiento similar al de las temperaturas máximas: La mayor parte del Estado ha presentado temperaturas mínimas de hasta 10°C (tonos azules). En cambio, en la región al centro del Estado las temperaturas mínimas observadas son de hasta 2°C (tonos verdes) formándose una franja que atraviesa el Estado de norte a sur.

Tabla 84. Valores obtenidos de temperatura mínima.

ESTACION	NOMBRE	MUNICIPIO	ESTADO	TEMPERATURA MÍNIMA (°C)
31003	Buctzotz	Buctzotz	Yucatán	3.5
31004	Celestún (SMN)	Celestún		8
31007	Chicxulub Puerto	Progreso		6.5
31008	Chanchichmilá	Chikindzonot		4
31010	Dzilam De Bravo	Dzilam de Bravo		5.5
31011	Dzités	Dzités		4
31012	El Cuyo	Tizimín		10
31017	Loche	Panabá		5.5
31020	Motul	Motul		4
31021	Muna	Muna		2
31022	Peto (DGE)	Peto		3
31024	Río Lagartos	Río Lagartos		6
31029	Sisal	Hunucmá		7.5
31032	Telchaquillo	Tecoh		5
31033	Tekax de Álvaro Obregón	Tekax		5
31035	Tixméhuac	Tixméhuac		5
23011	Kantunilkin	Lázaro Cárdenas		Quintana Roo
23024	Tihosuco	Felipe Carrillo Puerto	5.3	
23031	X-Pichil		6.5	
4017	Iturbide	Hopelchen	Campeche	6
4064	Becal	Calkiní		7

La distribución de los valores de temperaturas mínimas reportados que se puede apreciar en la Figura siguiente, corresponde a los 40 años del análisis (Figura 135).

Obtenido del análisis, se tiene que las zonas concéntricas marcadas en azul se interpretan como los rangos relativamente mayores dentro de las temperaturas mínimas extremas y los tonos verdes marcan los valores menores reportados durante el periodo de 1960 al 2000 de las 21 estaciones tomadas en cuenta.

De manera complementaria a la descripción del mapa de temperatura mínima, se realiza la de estaciones donde se reportan las temperaturas mínimas comprendidas dentro de los 40 años examinados.

De las estaciones analizadas para la temperatura mínima, en la que registró la menor fue la de Muna (31021) del municipio del mismo nombre con lecturas que van de 2 a 10°C, la más baja de éstas, ocurrió el día 14 de diciembre de 1973. Una manera gráfica de representar el comportamiento de la temperatura mínima para la estación de Muna se muestra en la Figura 136.

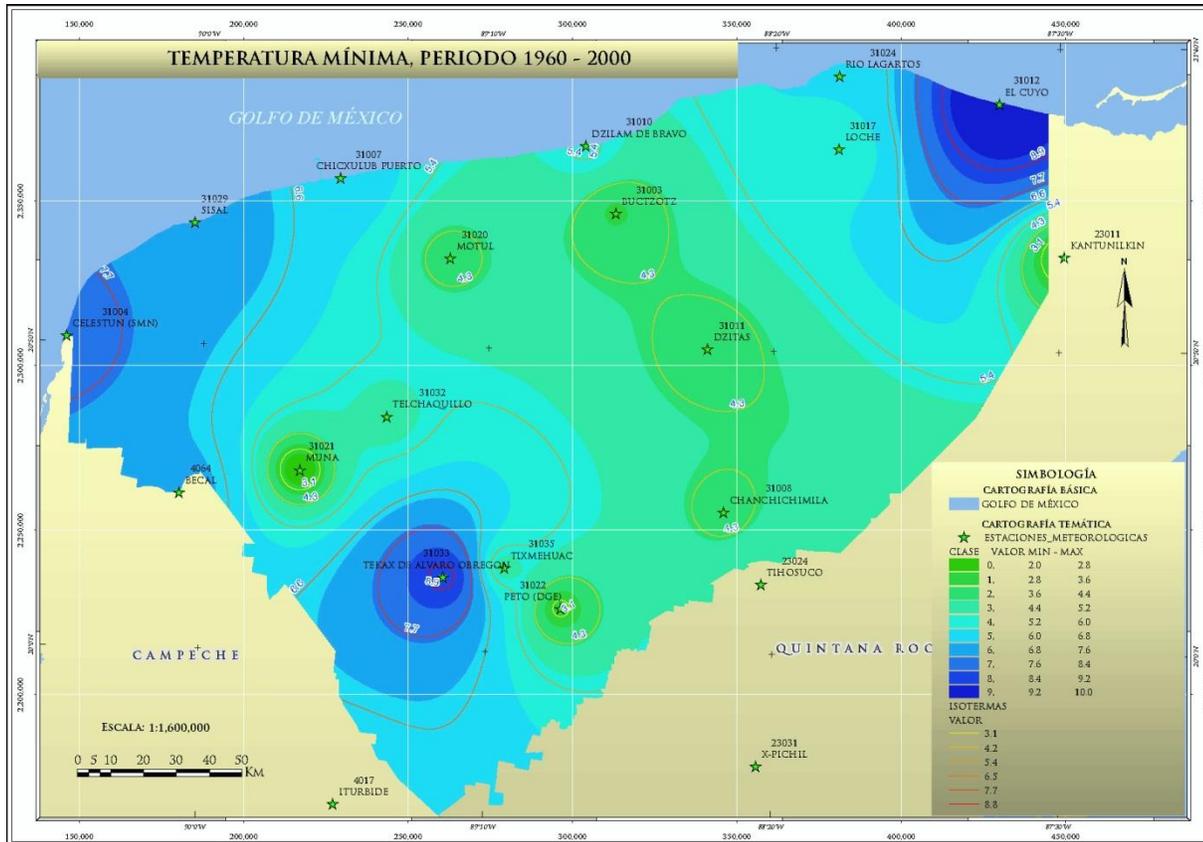


Figura 135. Distribución de las temperaturas mínimas registradas en 40 años (1960-2000).

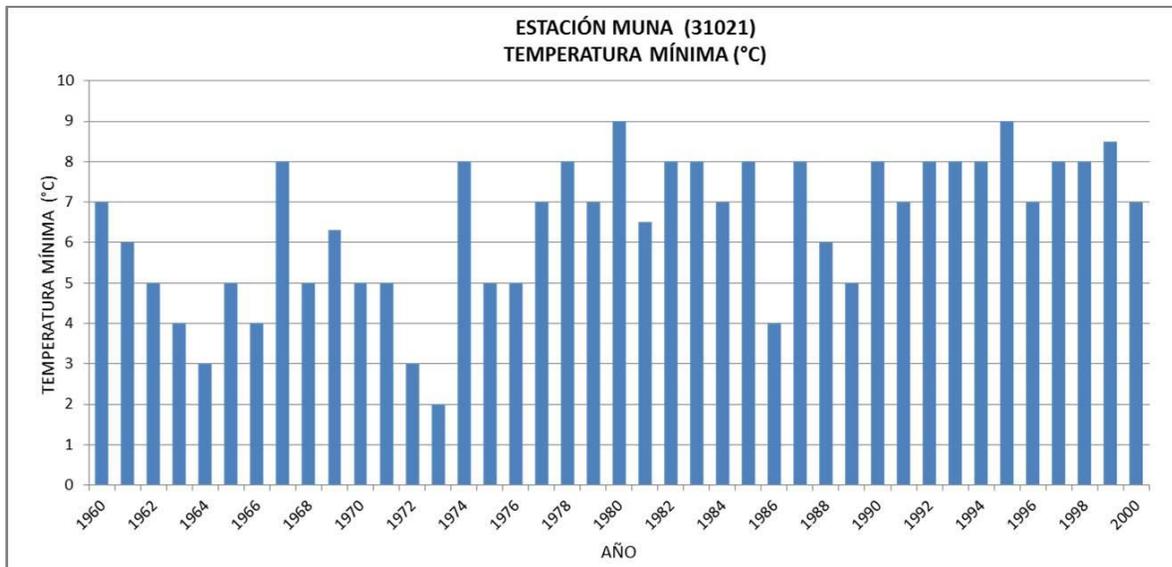


Figura 136. Registros de la temperatura mínima anual en la estación Muna.

Ahora, de manera mensual para la estación Muna (Figura 137), los meses más fríos son enero, febrero y diciembre, de estos, en diciembre se registró la temperatura mínima de 2°C fluctuando hasta los 11°C para junio.

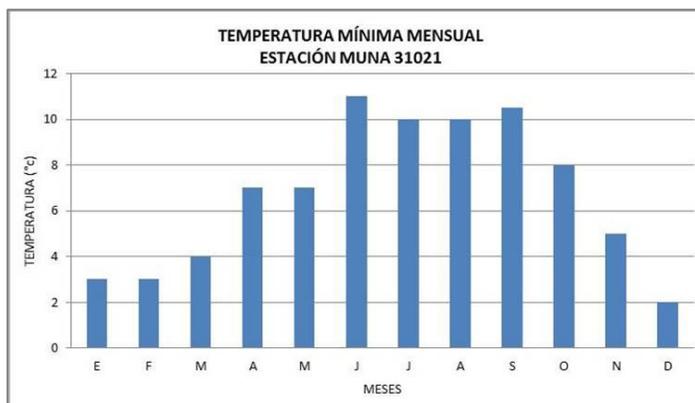


Figura 137. Comportamiento de la temperatura mínima mensual 1960-2000, (Muna).

En general, la amplitud térmica de los valores de temperaturas mínimas extremas para el estado de Yucatán es desde 2 a 10°C con una diferencia de hasta 8°C, estas temperaturas se presentan en invierno, en los meses de diciembre, enero y en ocasiones hasta el mes de febrero.

Temperatura Media

Para este parámetro, el valor se obtiene a partir del promedio de las temperaturas medias registradas en cada uno de los doce meses del año, para los 40 años que comprende este análisis. Para lo que se realiza la suma de la temperatura diaria mínima con la temperatura diaria máxima y se divide este valor entre dos, con lo que se obtiene la temperatura media diaria, necesaria para dichos promedios los datos obtenidos para cada estación se muestran en la Tabla 85.

Tabla 85. Valores obtenidos de temperatura media.

ESTACION	NOMBRE	MUNICIPIO	ESTADO	TEMPERATURA MEDIA (°C)
31003	Buctzotz	Buctzotz	Yucatán	25.6
31004	Celestún (SMN)	Celestún		25.9
31007	Chicxulub Puerto	Progreso		25.3
31008	Chanchichmilá	Chikindzonot		24.0
31010	Dzilam De Bravo	Dzilam de Bravo		24.4
31011	Dzitas	Dzitas		25.7
31012	El Cuyo	Tizimin		24.7
31017	Loche	Panabá		26.3
31020	Motul	Motul		25.3
31021	Muna	Muna		24.6
31022	Peto (DGE)	Peto		25.8
31024	Río Lagartos	Río Lagartos		25.2
31029	Sisal	Hunucmá		25.8
31032	Telchaquillo	Tecoh		26.5
31033	Tekax de Álvaro Obregón	Tekax		25.6
31035	Tixméhuac	Tixméhuac		25.4
23011	Kantunilkin	Lázaro Cárdenas		Quintana Roo
23024	Tihosuco	Felipe Carrillo Puerto	25.5	
23031	X-Pichil		26.1	
4017	Iturbide	Hopelchen	Campeche	26.3
4064	Becal	Calkiní		26.2

Mediante IDW se obtuvo el mapa que muestra el comportamiento de la temperatura media del periodo 1960 – 2000 donde se aprecian los sitios con los valores más altos de temperaturas medias en áreas concéntricas hacia 4 zonas, una al noreste del Estado y las otras 3 hacia los límites del Estado en colindancia con Campeche, en general se observa que las colindancias con Quintana Roo las temperaturas medias son menores (Figura 138).

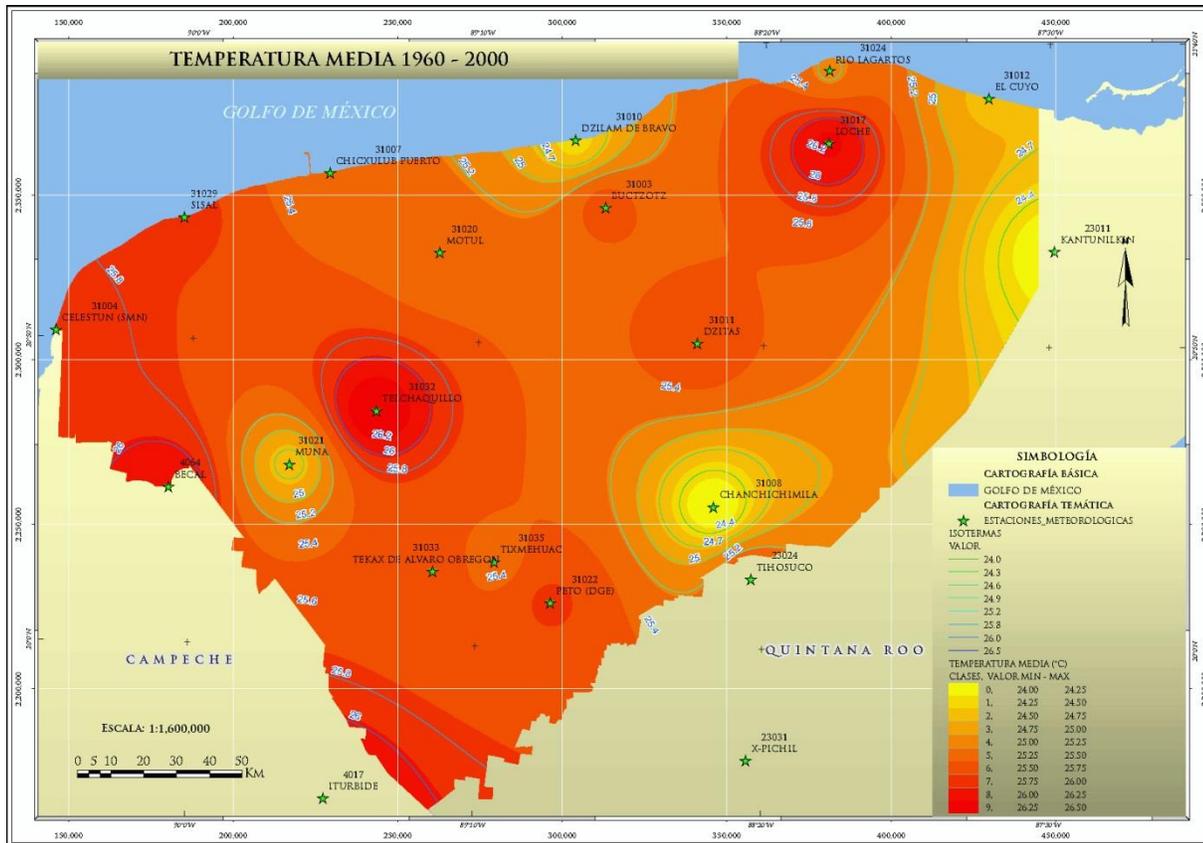


Figura 138. Distribución de las temperaturas medias registradas en 40 años (1960-2000).

La Temperatura Media que se reporta para el Estado es de aproximadamente 25.5°C donde el rango que se tiene es de 24 a 26.5°C (Figura 139), la distribución de estos valores es muy irregular y relativamente con poca variación, aunque se puede notar que hacia la porción oeste del Estado se aprecia una agrupación de temperaturas con alrededor de los 25°C.

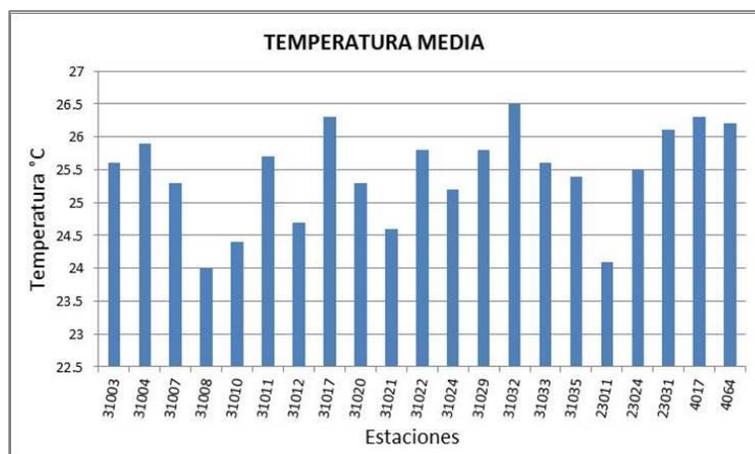


Figura 139. Temperatura media de las estaciones analizadas durante el periodo de 40 años.

Con los valores obtenidos podemos tener un conocimiento de las condiciones térmicas promedio de un lugar, pero habrá que tomar en cuenta que en ellos quedan ‘escondidas’ las variaciones entre verano e invierno que en ocasiones son muy grandes. Una manera de mostrar las temperaturas medias es la gráfica anterior que muestra las temperaturas medias de cada una de las estaciones analizadas dentro del periodo de análisis.

El comportamiento anual de las temperaturas medias en el Estado tiene poca variación durante el año, como se muestra en la Figura 140 donde el descenso de ésta se da para los meses de enero, febrero y diciembre.

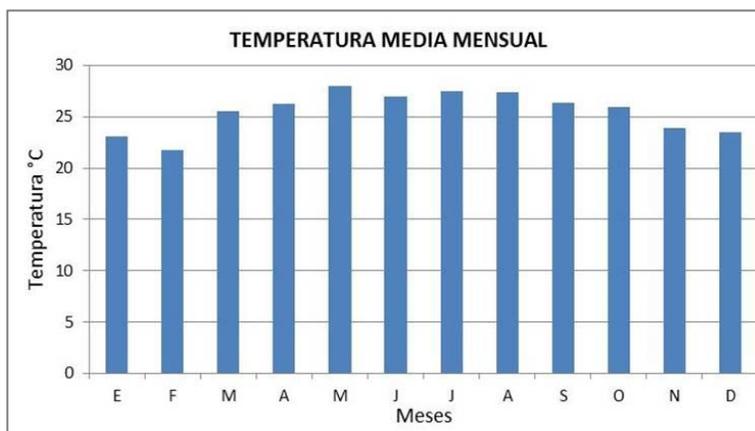


Figura 140. Comportamiento de la temperatura media mensual. Periodo 1960-2000.

Realizando una comparación entre los tres rangos de Temperatura (máxima, media y mínima), se muestra la variación temporal de la temperatura mensual multianual, se puede observar que hay un comportamiento más o menos uniforme en los valores, marcando la temperatura máxima tiene un aumento en los meses de marzo a mayo y de julio a octubre, y una disminución en los meses de enero y febrero, así como noviembre y diciembre, el máximo valor medio registrado es de 29.8 °C.

La temperatura promedio tiene poco variación en el año y oscila alrededor de 23 a 28 °C, finalmente la temperatura media mínima se mantiene aproximadamente constante durante el año y tiene disminución en el mes de febrero y otra a partir del mes de octubre, el mínimo valor medio mensual registrado es de 19.9 °C (Figura 141).

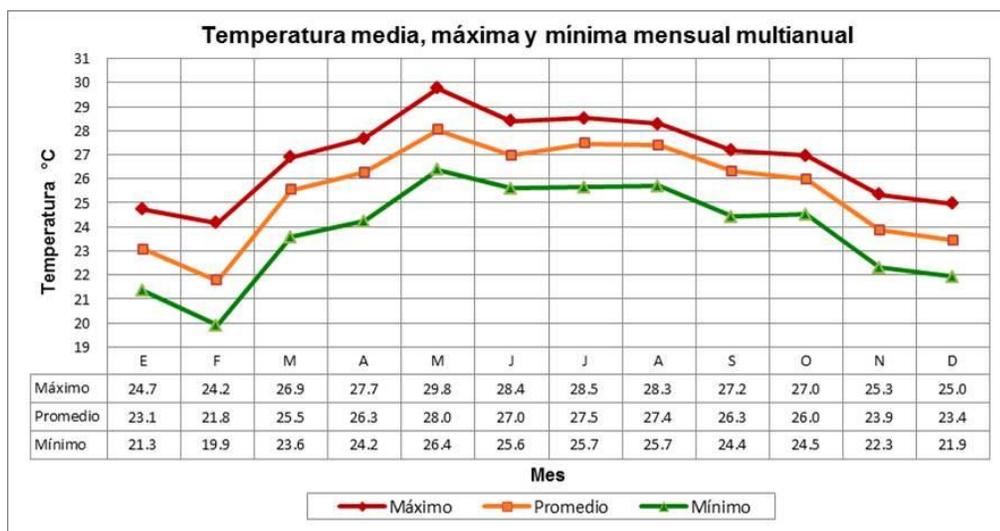


Figura 141. Comparación de las temperaturas medias mensuales. Periodo 1960-2000.

La amplitud térmica (diferencia entre el mes más cálido y el más frío de las temperaturas promedio) es de aproximadamente 4 °C lo que nos da la confirmación de que las lecturas corresponden a climas tropicales.

Precipitación total anual

Como se había mencionado en el apartado de conceptos básicos y, dado a que la precipitación es uno de los elementos que interactúan con varios de los factores climáticos, en la Península de Yucatán se presenta la combinación de varios de éstos. La precipitación presenta grandes variaciones de un año a otro y la de varios sucesivos, puede uno ser muy seco, el siguiente de lluvias torrenciales y el siguiente con precipitaciones moderadas, en sí no hay una tendencia general y más aún en la Península donde se presentan ciclones o efectos de Norte periódicamente, lo que tiene el efecto de variar el régimen de precipitación.

Los valores obtenidos de la suma de las precipitaciones diarias para obtener los valores de la precipitación acumulada de cada estación del periodo de 1960 al 2000 se muestran en la Tabla 86.

Tabla 86. Valores de Precipitación acumulada anual del periodo 1960 a 2000.

ESTACION	NOMBRE	MUNICIPIO	ESTADO	PRECIPITACIÓN ACUMULADA ANUAL
31003	Buctzotz	Buctzotz	Yucatán	999.9
31004	Celestún (SMN)	Celestún		785.7
31007	Chicxulub Puerto	Progreso		696.3
31008	Chanchichmilá	Chikindzonot		1094.8
31010	Dzilam De Bravo	Dzilam de Bravo		685.2
31011	Dzitás	Dzitás		1118.7
31012	El Cuyo	Tizimín		765.3
31017	Loche	Panabá		1179.4
31020	Motul	Motul		998.4
31021	Muna	Muna		895.3
31022	Peto (DGE)	Peto		1072.3
31024	Río Lagartos	Río Lagartos		615.3
31029	Sisal	Hunucmá		512.7
31032	Telchaquillo	Tecoh		947.4
31033	Tekax de Álvaro Obregón	Tekax		1079.7
31035	Tixméhuac	Tixméhuac		1094.1
23011	Kantunilkin	Lázaro Cárdenas	Quintana Roo	1270.9
23024	Tihosuco	Felipe Carrillo Puerto		1168.5
23031	X-Pichil			1089.8
4017	Iturbide	Hopelchen	Campeche	1038.7
4064	Becal	Calkiní		998.5

De los datos considerados en la tabla anterior, se obtuvo el Mapa de Precipitación acumulada anual (Figura 142).

En general es posible diferenciar zonas de régimen de lluvia en donde los rangos de precipitación van de los 500 a los 700 mm, ubicados hacia la Llanura costera del Golfo de México, al noroeste del Estado que sería una zona seca; el rango de mayor precipitación o más húmeda se ubica hacia la parte sur con rangos de 1000 a 1200 mm, resaltando el municipio de Panabá; el rango restante de los 700 a los 1000 se ubica en la porción central del Estado organizado de manera diagonal, de noreste a suroeste.

De una manera similar y simplificada, las Isoyetas nos indican puntos unidos con líneas donde se registra la misma cantidad de precipitación, éstas se pueden observar en el mapa donde los puntos de menor registro de lluvias se dan, como se mencionó anteriormente, hacia el noroeste del Estado, hacia la llanura costera, de Sisal, Celestún, Chicxulub Puerto y Dzilam de Bravo, extendiéndose hacia Río Lagartos y El Cuyo, en color amarillo; las de mayor precipitación en tonos rojos hacia el este del Estado en colindancia con Quintana Roo, teniendo una configuración casi paralela con dicha frontera.

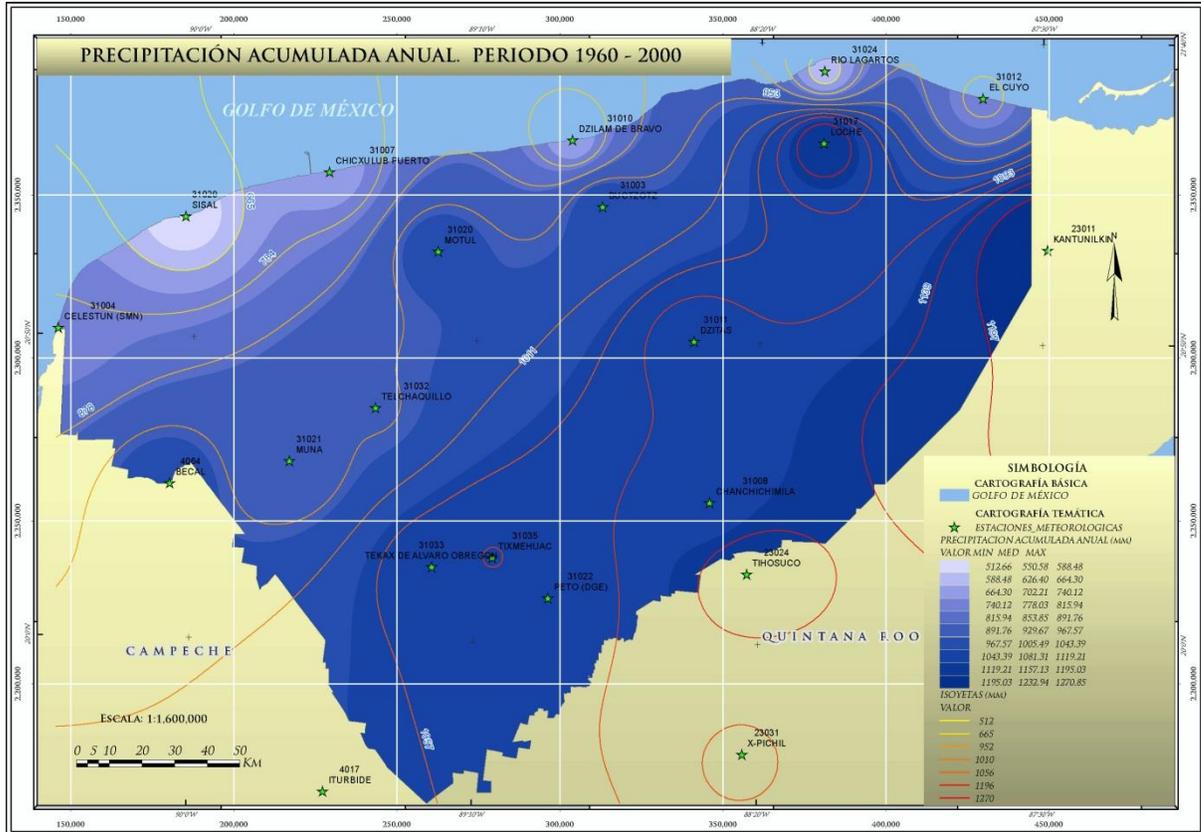


Figura 142. Distribución de la precipitación registrada en el periodo de 1960 al 2000.

El promedio de la precipitación acumulada anual es de 908 mm, contando únicamente las estaciones que se localizan dentro del Estado; si se incluyen las 21 estaciones el promedio resulta de 957 mm. El valor de la mínima de este promedio es de 512 mm y se registra en la estación 31029 Sisal, por otro lado, la máxima de la precipitación acumulada dentro del Estado es de 1179 mm del municipio de Panabá, en la estación Loche (31017), cabe mencionar que en el análisis se incluyeron las estaciones colindantes al límite estatal, por lo que la máxima precipitación acumulada se registró para Quintana Roo, en la estación Kantunilkin (23011) con un valor de 1270 mm (Figura 143).

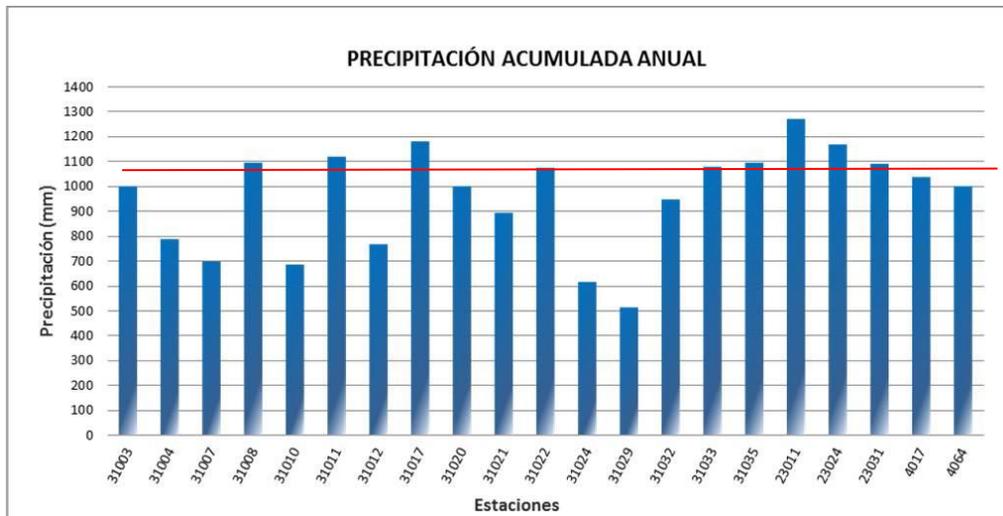


Figura 143. Valores obtenidos de la precipitación acumulada anual.

Del análisis estadístico de los valores de precipitaciones (lluvias) de la Tabla 87, se aprecia que la temporada de lluvias para Yucatán es desde mayo hasta octubre.

Tabla 87. Valores de la precipitación mensual acumulada para cada estación analizada.

ESTACION	NOMBRE	ESTADO	PRECIPITACIÓN MENSUAL											
			E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
31003	Buctzotz	Yucatán	11.9	30.9	23.2	27.9	68.3	146.6	165.1	170.6	187.3	107.7	42.7	40.5
31004	Celestún (SMN)		13.9	8.3	5.0	13.2	24.1	38.4	39.9	43.2	45.0	23.2	15.3	13.1
31007	Chicxulub Puerto		12.1	9.0	6.6	13.8	17.9	34.4	28.0	26.0	39.4	16.0	12.1	11.5
31008	Chanchichmilá		19.1	23.1	14.7	14.4	38.9	42.8	35.7	40.4	42.1	36.7	23.7	21.1
31010	Dzilam De Bravo		11.3	10.8	7.7	11.4	24.9	34.4	31.6	29.2	30.2	15.5	10.6	11.2
31011	Dzitás		16.0	14.9	15.8	23.5	45.2	54.6	39.1	43.0	50.5	22.5	17.3	12.8
31012	El Cuyo		42.7	39.9	31.3	29.2	59.2	98.3	84.3	83.8	117.9	92.3	46.8	41.2
31017	Loche		59.5	38.7	34.4	29.3	80.3	169.1	153.1	164.9	184.6	138.8	55.8	59.2
31020	Motul		33.7	23.9	19.0	24.1	62.9	150.2	152.9	163.1	176.3	107.0	43.8	37.4
31021	Muna		23.0	21.6	25.3	31.4	65.6	132.3	125.2	128.8	158.4	102.0	36.9	33.9
31022	Peto (DGE)		33.1	32.9	26.4	48.6	97.5	142.0	134.2	147.8	184.9	129.6	55.0	36.4
31024	Río Lagartos		41.2	28.0	28.2	21.1	35.9	69.3	71.5	56.9	93.9	87.8	53.0	37.6
31029	Sisal		21.8	18.0	9.8	11.1	30.6	73.3	72.9	59.9	91.4	71.0	25.8	27.0
31032	Telchaquillo		22.1	11.7	8.8	16.8	39.8	46.8	37.6	34.9	39.5	31.6	17.7	14.7
31033	Tekax de Álvaro Obregón		28.9	25.1	34.5	46.1	90.2	157.5	140.1	142.9	190.7	121.5	58.5	41.4
31035	Tixméhuac	33.5	27.8	38.0	38.2	94.6	151.9	131.0	170.8	177.3	106.7	53.2	34.9	
23011	Kantunilkin	Quintana Roo	18.6	19.9	27.4	24.3	39.7	50.2	50.0	53.0	53.8	40.3	26.6	23.3
23024	Tihosuco		19.2	18.3	21.8	24.5	34.1	45.0	38.1	40.7	47.4	48.7	25.2	25.8
23031	X-Pichil		22.9	17.1	20.3	22.2	35.7	36.3	35.0	37.5	45.7	29.9	26.0	20.0
4017	Iturbide	Campeche	17.5	14.5	17.6	20.2	36.2	39.2	36.5	35.1	56.0	36.2	24.3	14.0
4064	Becal		16.8	13.1	15.9	17.8	30.6	35.8	33.4	32.8	37.0	29.9	21.0	18.5

Del periodo de 40 años, el mes en que se registraron mayores niveles de lluvia es septiembre donde se registró una precipitación mensual acumulada de 1900 mm aproximadamente, la cantidad de lluvia comienza a descender a partir de noviembre donde esporádicamente se presenta algún ciclón, posteriormente baja aún más en diciembre y se mantiene en enero, luego en febrero y marzo se mantiene constante siendo estos meses más secos y comienza a presentar un aumento hacia abril (Figura 144).

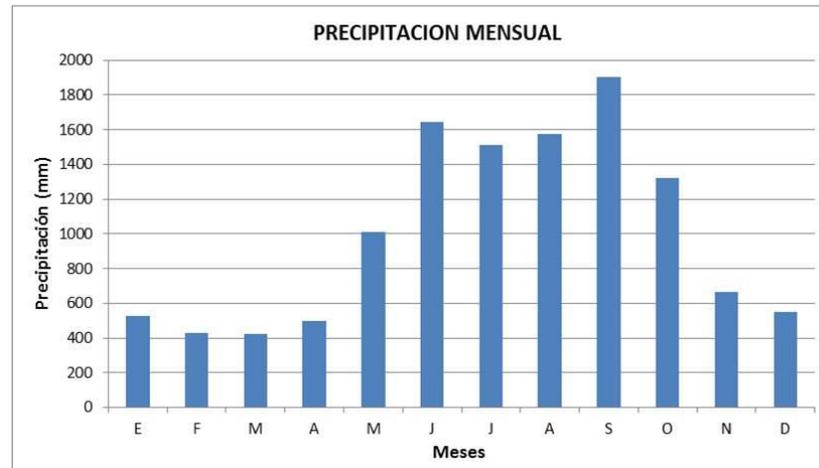


Figura 144. Comportamiento gráfico de la precipitación mensual para el periodo 1960-2000.

Se incluyen tres Climogramas para hacer notar las principales diferencias entre precipitación y temperatura de cada sitio y verificar el tipo de clima que se presenta en el Estado y para analizar la tendencia de la distribución de estas variables durante el periodo analizado de 40 años.

El primer climograma para la estación Sisal (Figura 145) corresponde a la zona más seca del Estado con rangos de precipitación acumulada de menos de 600 mm al año, los valores de las temperaturas medias están entre los 22 y 27°C lo que significa una amplitud térmica baja y señala el contacto con el océano; los periodos de aridez (meses en los que las temperaturas están encima de las precipitaciones) corresponden a los meses desde enero a mayo y luego de noviembre y diciembre.

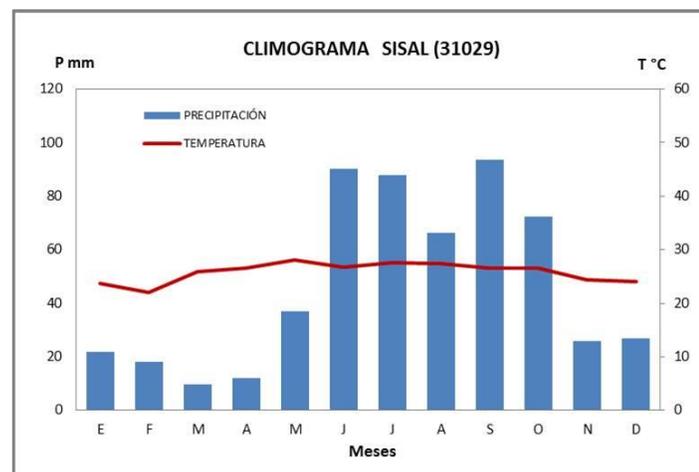


Figura 145. Climograma para la estación meteorológica de Sisal.

Para la estación de Buctzotz (Figura 146) ubicada un poco retirada de la costa, donde el rango de precipitación acumulada supera los 900 mm de lluvia al año y los valores de la temperatura media fluctúan entre los 21 y 28°C señalando una amplitud térmica baja, aunque sólo 2°C más que la estación descrita antes, para este sitio los periodos de aridez pertenecen a los meses de enero a abril así como noviembre y diciembre.

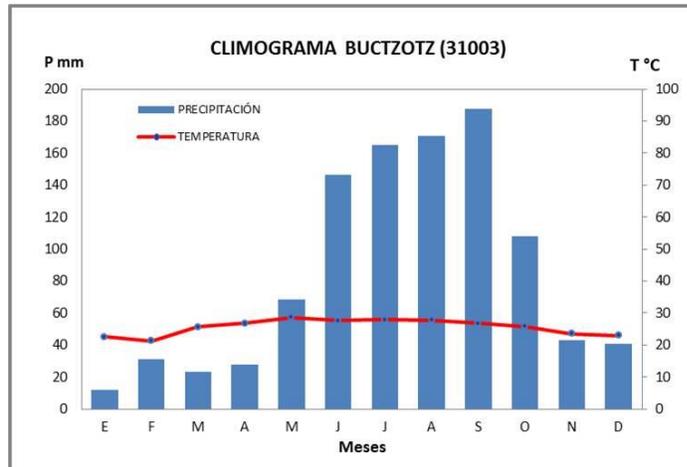


Figura 146. Climograma para la estación meteorológica de Buctzotz.

El climograma de la estación Loché, donde se tiene un registro de precipitación acumulada anual superior a los 1100 mm, las temperaturas medias oscilan entre los 21 y 28°C muy similar a la estación de Buctzotz, con poca amplitud térmica. Los periodos de aridez para este sitio varían con respecto a las dos estaciones anteriores, pues los meses secos son febrero, marzo y abril (Figura 147).

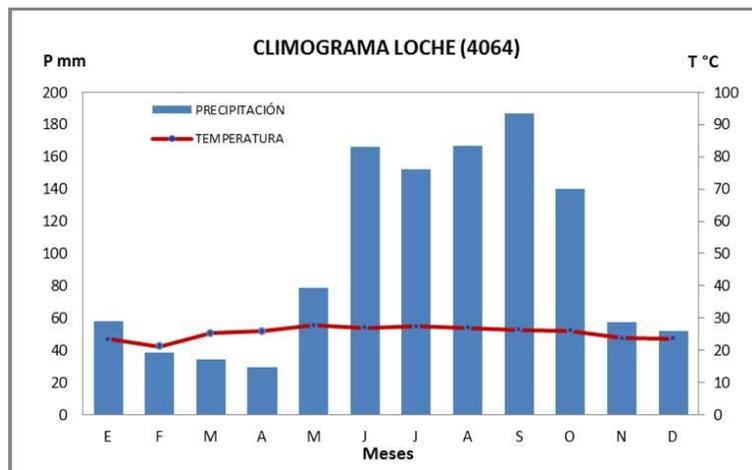


Figura 147. Climograma para la estación meteorológica de Loche.

Del análisis de los Climogramas anteriores se tiene que para el Estado se tiene un clima cálido donde los meses calurosos van de mayo a octubre con una amplitud térmica menor que nos marca la influencia del océano cercano y las precipitaciones son elevadas pero hay meses secos por lo tanto es tropical.

Las condiciones geográficas en las que se encuentra ubicado el estado de Yucatán, así como el poco relieve que se tiene, provocan que el tipo de precipitación que se da sea de tipo convectiva, típicas del verano. Además se presentan lluvias de tipo frontal (o nortes) en invierno.

De manera general, la Península de Yucatán está regida por patrones de circulación atmosférica propios de las zonas tropicales en el límite con las zonas áridas. La singularidad que tiene la región es la ausencia de orografía, lo cual no permite que se presente el efecto del ascenso orográfico de las nubes que descargan lluvia, como en otras regiones del país; el componente principal es el de lluvia convectiva. La Península es recorrida por los frentes fríos, los que, si están saturados de humedad, se denominan “nortes” y éstos depositan lluvia (SEDUMA, 2010).

Días con Granizo

La importancia de representar este fenómeno meteorológico en un mapa es para, de manera visual se puedan detectar las zonas donde se ocurrido más cantidad de granizadas y evitar daños o aminorarlos. Las zonas de inestabilidad ya sea por cambios en los elementos del clima, tales como temperatura, humedad en el aire, etc., provocan lluvias intensas, granizadas, tormentas.

Aplicando la misma metodología descrita anteriormente donde, a partir de bases de datos de la ocurrencia de granizadas durante el lapso de 40 años (1960 a 2000) se genera el mapa de Días con granizo (Figura 148).

En este mapa se puede apreciar que la zona sureste del Estado es donde han ocurrido más cantidad de días con granizo, porción congruente en comparación con el de precipitación mostrado antes, lo que significa que en estos lugares se presentan mayor cantidad de eventos climáticos que pueden generar granizo.

Las granizadas que se reportaron para las 21 estaciones dentro del rango de 1960 a 2000 fueron en total 19 días dentro del estado de Yucatán, 7 más en los estados colindantes. La estación que mayor cantidad de eventos de granizo fue Chanchimila (31008) con 4 días, el segundo sitio es en la estación 31035, Tixméhuac con 3 días (Tabla 88).

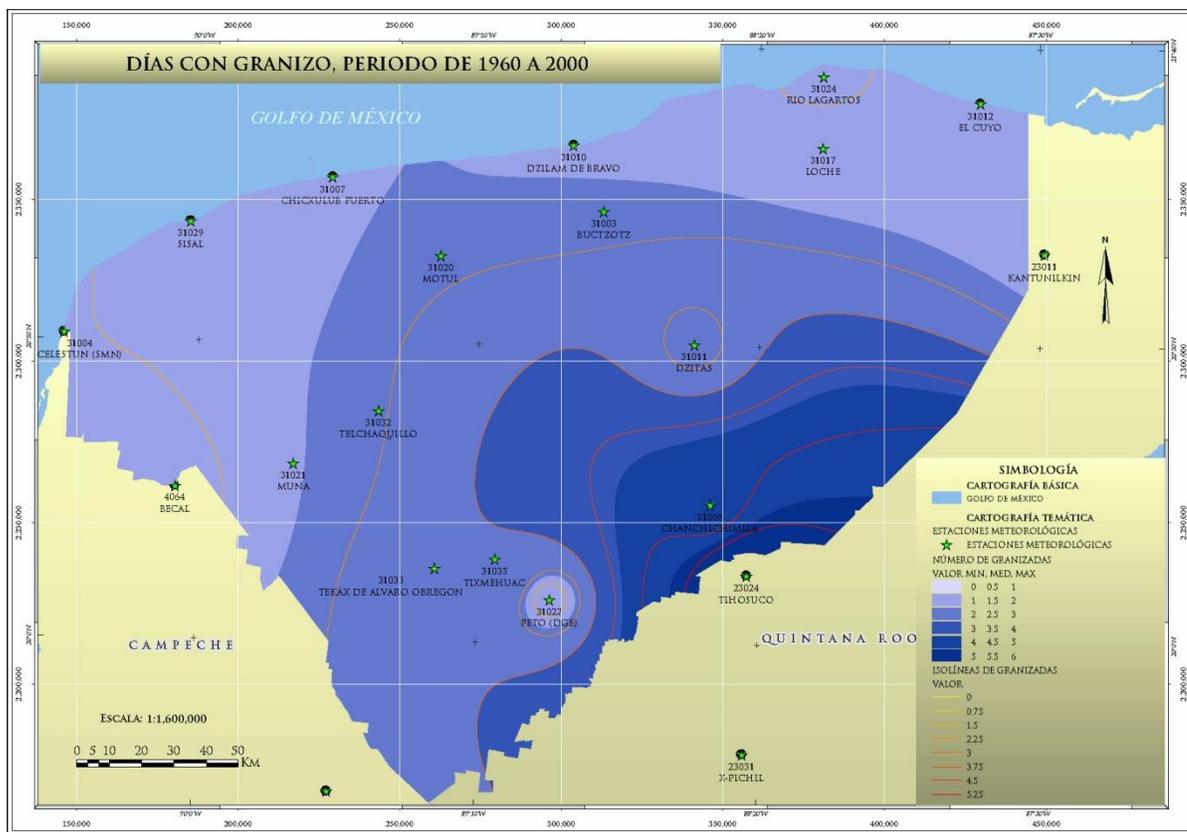


Figura 148. Distribución de la ocurrencia de Granizadas en Yucatán. Periodo 1960-2000.

Tabla 88. Relación del número de días con granizada por estación.

ESTACION	NOMBRE	MUNICIPIO	ESTADO	CANTIDAD DE DÍAS EN QUE SE PRESENTO GRANIZADA	
31003	Buctzotz	Buctzotz	Yucatán	0	
31004	Celestún (SMN)	Celestún		0	
31007	Chicxulub Puerto	Progreso		0	
31008	Chanchichimilá	Chikindzonot		4	
31010	Dzilam De Bravo	Dzilam de Bravo		2	
31011	Dzitas	Dzitas		2	
31012	El Cuyo	Tizimín		2	
31017	Loche	Panabá		2	
31020	Motul	Motul		0	
31021	Muna	Muna		2	
31022	Peto (DGE)	Peto		1	
31024	Río Lagartos	Río Lagartos		1	
31029	Sisal	Hunucmá		0	
31032	Telchaquillo	Tecoh		0	
31033	Tekax de Álvaro Obregón	Tekax		0	
31035	Tixméhuac	Tixméhuac		3	
23011	Kantunilkin	Lázaro Cárdenas		Quintana Roo	0
23024	Tihosuco	Felipe Carrillo Puerto			6
23031	X-Pichil				0
4017	Iturbide	Hopelchen		Campeche	0
4064	Becal	Calkiní	1		
Total				26	

En algunas estaciones no se registraron eventos, sin embargo es importante mencionar que los sitios que impacta el granizo siguen un “patrón lineal”, y pudo no haber sido registrada en la estación correspondiente pero sí una área próxima a ésta. Para el Estado durante los 40 años tomados en cuenta, se tiene que los meses de abril, mayo y junio (Figura 149) son los que registraron más eventos de granizada, entre 2 a 4 días en promedio.

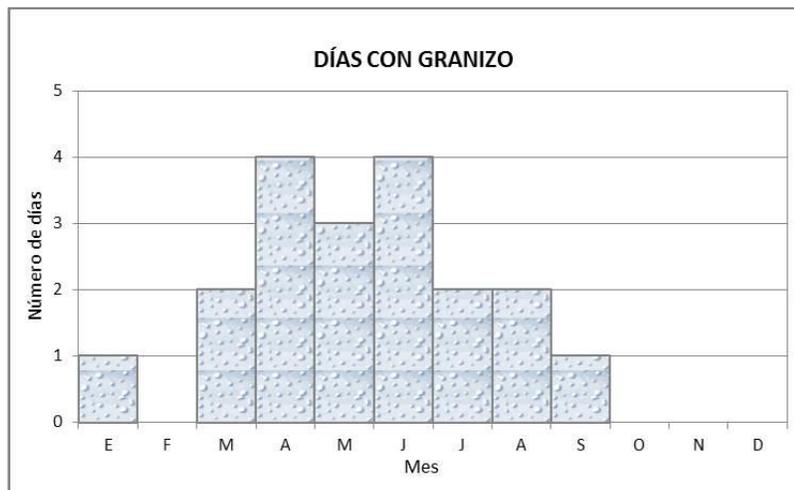


Figura 149. Número de días de ocurrencia de granizadas. Periodo 1960-2000.

Días con tormenta

En total fueron registradas 1555 tormentas en el periodo de 40 años para el estado de Yucatán (Tabla 89), la mayoría de éstas en la época de lluvias, Al año se registraron un promedio de 39 tormentas por año, desde el comienzo de la estación de lluvias del mes de junio al mes de octubre (5 meses) en promedio se presentaron 8 tormentas por mes. Es importante decir que para este fenómeno sólo se reporta si ocurrió o no una tormenta por día.

Tabla 89. Relación del número de tormentas por estación.

ESTACION	NOMBRE	MUNICIPIO	ESTADO	NÚMERO DE DÍAS EN LOS QUE SE PRESENTO TORMENTA
31003	Buctzotz	Buctzotz	Yucatán	4
31004	Celestún (SMN)	Celestún		74
31007	Chicxulub Puerto	Progreso		106
31008	Chanchichimilá	Chikindzonot		88
31010	Dzilam De Bravo	Dzilam de Bravo		0
31011	Dzitás	Dzitás		233
31012	El Cuyo	Tizimin		74
31017	Loche	Panabá		0
31020	Motul	Motul		9
31021	Muna	Muna		0
31022	Peto (DGE)	Peto		649
31024	Río Lagartos	Río Lagartos		2
31029	Sisal	Hunucmá		23
31032	Telchaquillo	Tecoh		5
31033	Tekax de Álvaro Obregón	Tekax		0
31035	Tixméhuac	Tixméhuac		288
23011	Kantunilkin	Lázaro Cárdenas	Quintana Roo	0
23024	Tihosuco	Felipe Carrillo Puerto		144
23031	X-Pichil			0
4017	Iturbide	Hopelchen	Campeche	0
4064	Becal	Calkiní		18
Total				1555

Con los datos de la Tabla anterior, se generó el mapa de tormentas, en el que puede notarse la distribución de las mismas en el territorio estatal. La zona sur - sureste del Estado, hacia el cono sur, es la porción donde se registran el mayor número de tormentas, disminuyendo ésta hacia la llanura costera del Golfo, sobre todo hacia Celestún y Sisal, y al extremo este de la costa, hacia El Cuyo (Figura 150).

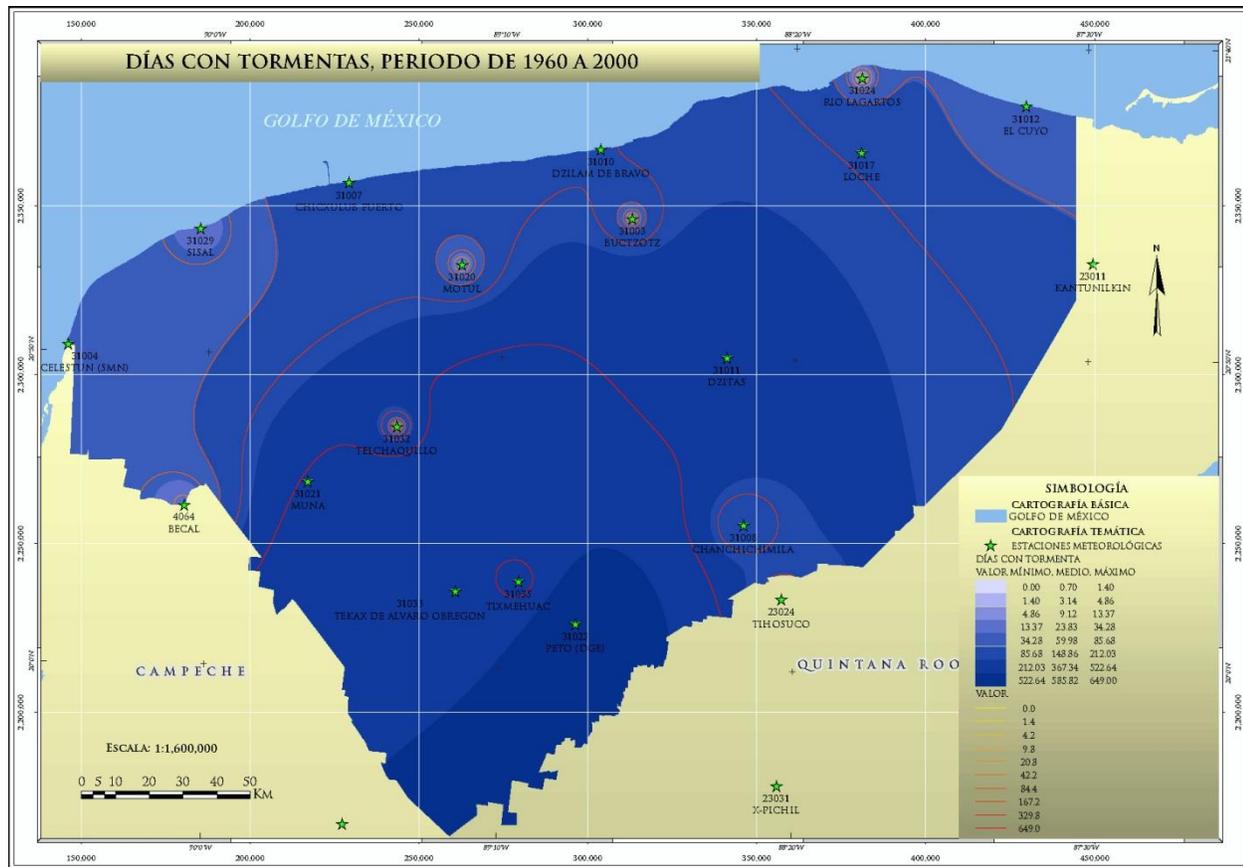


Figura 150. Distribución de la ocurrencia de Tormentas en Yucatán. Periodo 1960-2000.

Las tormentas se pueden presentar en cualquier época del año, aunque durante los meses de junio a octubre aumentaron la incidencia de 36 hasta 332 por mes por el periodo de tiempo de 40 años (Figura 151).

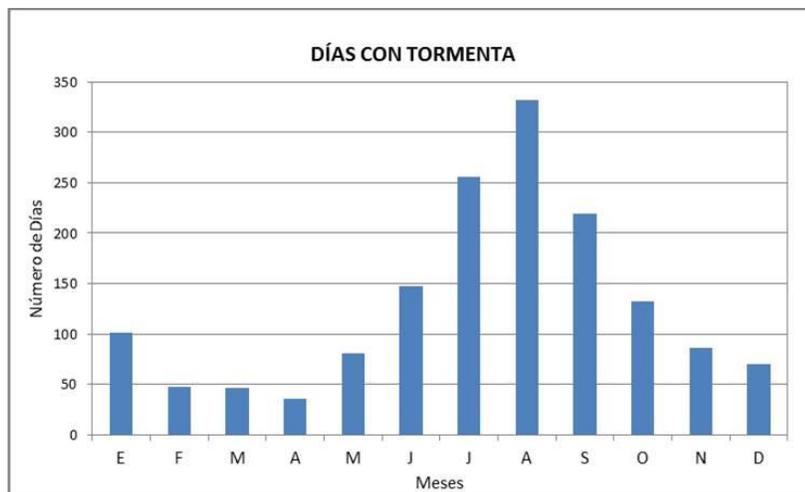


Figura 151. Número de días de ocurrencia de Tormentas. Periodo 1960-2000.

Por último, se hace la aclaración que, en el apartado de Anexos correspondiente a Peligros Hidrometeorológicos, se pueden consultar las gráficas, bases de datos y climogramas, de las 21 estaciones meteorológicas analizadas para el desarrollo de este apartado. En cada archivo de las estaciones viene una pestaña que indica cuál es el parámetro que incluye.

VIII.1.2. Vientos

Dentro de los fenómenos meteorológicos, el aspecto que mayormente genera daño es el viento, el cual, junto con la lluvia, es una de las principales manifestaciones para generar peligro por Fenómenos Hidrometeorológicos, siendo su estudio necesario y sumamente importante, no sólo en nuestro país sino también en todo el mundo, ya que es uno de los elementos del clima que influye de manera constante y, muchas de las veces sin percibirlo, sobre la vida del hombre y sus actividades.

Los vientos tienen gran importancia geográfica porque aparte de modelar el relieve del planeta, transportan masas de aire polar desde las zonas frías a las cálidas y viceversa, originando variaciones en la temperatura y humedad desde los océanos y mares a los continentes, provocando también zonas de abundante nubosidad y precipitación.

Este movimiento incesante de la masa de aire dentro de la atmósfera terrestre provoca manifestaciones extremas que se conocen como ciclones tropicales (el nombre del fenómeno varía, dependiendo del nivel de velocidades de viento que se generen y de la región geográfica sobre el globo terráqueo). En el caso de estas manifestaciones extremas, generadoras de vientos de altas velocidades, el problema más común en las edificaciones en zonas de pobreza y marginación, es la pérdida de los techos en las viviendas y con ello gran parte de las pertenencias personales, debido a la succión que se genera (Eagleman, 1985), ocasionando con ello el lanzamiento de proyectiles y problemas asociados al riesgo por impacto directo.

Teniendo en cuenta la importancia que los regímenes de vientos tienen en la vida de los pueblos, y que, los efectos que provocan sobre la economía, el hábitat, y las actividades del hombre en general, su estudio es relevante atendiendo a superar las deficiencias y retrasos en el tratamiento de este fenómeno en nuestro país. Contribuyendo este estudio también, en el proceso de toma de decisiones: planificación y programación, control y seguimiento de proyectos en los que se incluya o se tome en cuenta el fenómeno natural del viento.

Con ello, el estudio sistemático de las características de los vientos es muy importante en el ámbito del Sistema de Protección Civil ya que con este análisis se establecen límites de seguridad en estructuras, incluyendo su orientación así como manejar márgenes de confianza en el establecimiento de sus acciones directas sobre la población, alertamiento temprano al combinarse con otros elementos (mareas, arena, vegetación, etc.) o en el aumento de su intensidad y duración.

Con esta información ya sistematizada se tiende a realizar un análisis completo de la acción de los vientos, su intensidad, duración y periodicidad e incluirlo en el Atlas de Peligros del Estado de Yucatán, lo cual nos permite tener un conocimiento e identificación de los elementos adversos asociados a la naturaleza y origen de este fenómeno meteorológico, su representación cartográfica y valoración sistémica orientado hacia la prevención.

VIII.1.2.1. Conceptos Básicos

Los conceptos y la información que se expone a continuación sirven para una mejor comprensión y entendimiento del comportamiento de los movimientos horizontales del aire, es decir la circulación general de los vientos y los movimientos verticales del aire mejor conocidos como torbellinos. Ambos fenómenos atmosféricos se combinan con la acción del agua en sus formas físicas de lluvia, neblina y ciclones tropicales para crear microclimas a nivel de tierra.

Vientos

El viento es el desplazamiento horizontal del aire con respecto a la superficie terrestre sin embargo la meteorología estudia el viento como aire en movimiento tanto horizontal como verticalmente y a este último caso le corresponden los torbellinos.

Los movimientos verticales del aire caracterizan los fenómenos atmosféricos locales, como la formación de nubes de tormenta y la interrelación con otros fenómenos atmosféricos (Ciclones Tropicales, Turbonadas, Ondas de Calor Extremo y Frentes Fríos), (NOAA, 2013).

La dirección del viento depende de la distribución y evolución de los centros de una misma presión atmosférica medida en milibares (llamados isobáricos); que se desplaza de los centros de alta presión (anticiclones) hacia los de baja presión (ciclones) y su fuerza es el resultado de la diferencia entre estos centros. En su movimiento, el viento se ve alterado por diversos factores tales como el relieve y la aceleración de Coriolis. En superficie, el viento viene definido por dos parámetros: la dirección en el plano horizontal y la velocidad. (NOAA, 2013).

Circulación General de la Atmósfera

Es el movimiento del viento en la atmósfera en todo el planeta, que origina la formación de las celdas de circulación y se puede interpretar como una respuesta del sistema atmosférico al distinto campo de radiación solar que recibe la superficie terrestre. Dichas celdas se clasifican en tres denominaciones de tal manera que resaltan una serie de características planetarias para ambos hemisferios: *Celda de Hadley*, en las latitudes tropicales y subtropicales; *Celda de Ferrel*, en las latitudes medias y *Celda Polar* en las latitudes polares. Además se podrán observar otras características propias de cada celda o de la interacción entre ellas, tales como la circulación de los vientos superficiales (alisios, del oeste), o de los vientos de altura (contralisios, corrientes de chorro), etc. La Figura 152 ejemplifica la ubicación espacial de las celdas y como afectan en la generación de vientos y presiones.

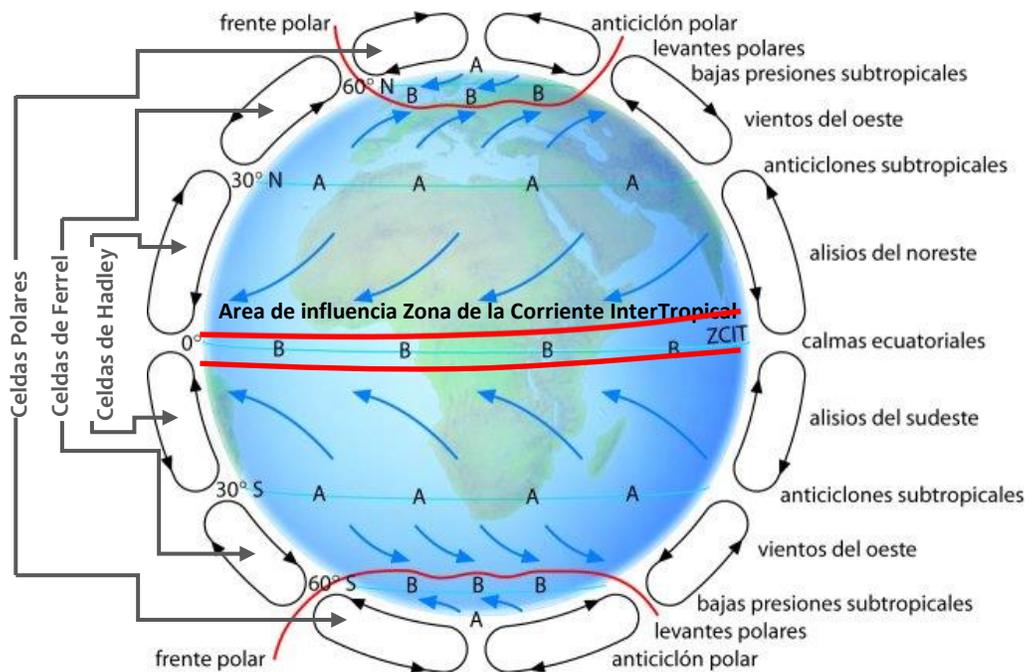


Figura 152. Circulación general de la atmósfera y la Distribución espacial de las Celdas Polares, de Ferrel y de Hadley y su acción para la generación de vientos locales. (Oxford, 2006 modificado por SGM para el Atlas de Yucatán).

Para una mejor comprensión de los elementos atmosféricos que componen el clima mundial y que aterrizan en la Península de Yucatán, a continuación se hace una breve descripción de los mismos:

Frente Polar: Consiste en la colisión de aire cálido procedente de los anticiclones subtropicales, con los aires fríos procedentes de los anticiclones polares. Está formado por la sucesión de frentes encadenados. En verano, el frente polar se desplaza hacia latitudes mayores; y en invierno, hacia menores latitudes. Un ejemplo de cómo se desarrolla a lo largo de su recorrido en las latitudes se puede apreciar en la animación que se encuentra en la liga: <http://www.bioygeo.info/Animaciones/Frentes.swf>. En general todo el año se están produciendo pero solo cuando la tierra entra primero en el equinoccio de otoño y posteriormente al solsticio de invierno estos se hacen más intensos y fuertes y es cuando son transportados en la atmosfera superior hasta las latitudes de la Península de Yucatán.

Anticiclón Polar: Son vientos denominados masas de aire en movimiento, que transportan aire frío hacia los trópicos y a su vez regresan con aire caliente de los trópicos hacia el polo. Utilizan el flujo superior de la atmósfera (corriente de Chorro) para poder moverse hacia las regiones tropicales.

Levantes Polares: Viento procedente del este, incluido entre los rumbos Este – Noreste (ENE) y Este – Sureste (ESE). Es conducido por las corrientes que se forman entre las Celda Polar y la Celda Ferrel.

Bajas Presiones Subtropicales y Anticiclones subtropicales: El viento siempre va de las altas a las bajas presiones. Se puede decir que las altas presiones son una especie de ventiladores, porque "soplan viento" y que las bajas presiones son como aspiradoras, porque "aspiran el aire". Cuanto más húmedo es el aire, también es más ligero, porque el vapor de agua pesa menos que el aire. Dentro de cada centro de altas o de bajas presiones, el aire gira formando remolinos. Y debido a la forma, a los movimientos y al magnetismo terrestre, lo hace siempre de una manera determinada. En el hemisferio norte, en las altas presiones el aire gira siguiendo el sentido de las agujas del reloj y de dentro hacia afuera (movimiento centrífugo). Y en las bajas presiones lo hace al revés y de fuera hacia dentro (movimiento centrípeto).

Vientos del Oeste: Son vientos constantes o planetarios que se producen de oeste a este en las latitudes subtropicales y medias de las zonas templadas en latitudes entre 30 y 60 grados de ambos hemisferios. A grandes rasgos, su trayectoria coincide con la de las corrientes oceánicas cálidas de las zonas templadas y vienen a cerrar hacia las altas latitudes el bucle iniciado por los alisios del lado del ecuador. Ambos tipos de vientos rodean los anticiclones dinámicos que se presentan en los océanos en las latitudes subtropicales y tropicales

Alisios del Noreste: Los vientos alisios soplan de manera relativamente constante en verano (hemisferio norte) y menos en invierno. Circulan entre los trópicos, desde los 30-35° de latitud hacia el ecuador. Se dirigen desde las altas presiones subtropicales, hacia las bajas presiones ecuatoriales. El movimiento de rotación de la Tierra desvía a los alisios hacia el oeste, y por ello soplan del nordeste al sudoeste en el hemisferio norte y del sudeste hacia el noroeste en el hemisferio sur (Wikipedia, 2013).

En el ecuador se produce un ascenso masivo de aire cálido, originando, una zona de bajas presiones que viene a ser ocupada por otra masa de aire que proporcionan los alisios. Las masas de aire caliente que ascienden, se van enfriando paulatinamente y se dirigen a bastante altura en sentido contrario a los alisios, hacia las latitudes subtropicales, de donde proceden éstos. Los vientos alisios forman parte de la circulación de Hadley que transporta el calor desde las zonas ecuatoriales hasta las subtropicales reemplazando el aire caliente por aire más frío de las latitudes superiores. Como ya se ha dicho, la rotación terrestre es la que produce la desviación hacia el oeste de estos vientos, desviación que se conoce como la fuerza o efecto de Coriolis. Yucatán se encuentra en una latitud de 21-19° Norte, y esto la favorece para que se vea afectada en diferentes épocas del año por los alisios del noreste, y los alisios del sureste. Estas dos corrientes de vientos convergen en el cinturón ecuatorial o región de Calmas.

Calmas Ecuatoriales: un fenómeno climático que se sitúa a la par del Ecuador terrestre, que se atribuye a los vientos suaves, que se denominan calmas, ya que nada en él se mueve y no existen vientos para navegar, y con sistemas de tormentas que se localizan sobre los océanos que lo atraviesan, que cambian de posición y el tamaño con el rumbo de las estaciones. La zona se sitúa característicamente, en el lugar donde predominan los vientos alisios del Hemisferio Norte y Sur. En estas zonas, el aire caliente de la superficie terrestre, asciende y fluye al noroeste y suroeste, a altitudes aproximadas de 800 y 1600 msnm, donde origina los vientos antialisios. Esta zona actúa como regulador de la Celda de Hadley de la Zona de Convergencia Intertropical. Mientras más calor se acumule y no circule más energía inyectara al aire. En el Ecuador terrestre, estas calmas tienen depresiones, mientras que en las latitudes que van de los 30° a 40° se presentan anticiclones, y generalmente, coinciden con las regiones en la que el viento se mueve en sentido vertical, ascendente o descendente.

Celdas de Circulación: En la superficie terrestre, los límites de cada celda están marcados por características muy bien definidas; por ejemplo, el cinturón de presiones altas, centrado alrededor de los 30° - 40° de latitud, en la región subtropical, separa las celdas Hadley y Ferrel; el frente polar, centrado alrededor de los 60°, separa las celdas Ferrel y Polar; la circulación de los vientos de ambos hemisferios converge en el ecuador.

Corriente de Chorro: Por otro lado, en los niveles superiores de la troposfera, los límites entre las tres celdas de circulación definen características muy importantes conocidas como corrientes de chorro: por ejemplo, entre las celdas Hadley y Ferrel se encuentra la corriente de chorro subtropical donde se da la distribución latitudinal de zonas de alta y baja presión y que incluye a) las Zonas ecuatoriales cálidas de baja presión, b) las Zonas subtropicales de alta presión (30° de latitud), c) las Zonas circumpolares de baja presión (60° de latitud) y d) Zonas polares frías de alta presión; entre la celda Ferrel y la Polar se encuentra la corriente de chorro polar, esta zona de choque entre los levantes polares fríos y los ponientes templados y constituye un área de gran inestabilidad atmosférica (borrascas) y que para el invierno provoca la crecida de los nortes que finalmente afecta la temperatura de la superficie del mar que es la que regula el clima (Figura 153).

Para más detalle se recomienda consultar la liga: <http://www.bioygeo.info/Animaciones/CGA.swf> que ilustra una animación de la circulación general de la atmósfera y sus elementos.

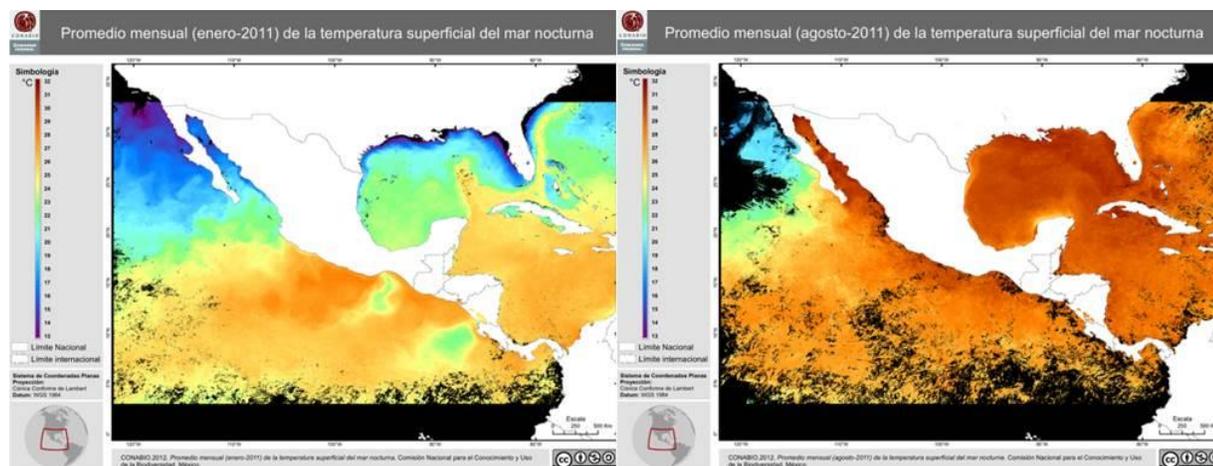


Figura 153. Ensemble de imágenes satelitales para la temperatura oceánica comparando enero como mes más frío y agosto como mes más caliente desde el punto de vista de las corrientes oceánicas. Se aprecia en la segunda la acumulación de las corrientes cálidas en el Mar Caribe y Golfo de México. (CONABIO, 2013).

Ondas Tropicales: Las ondas tropicales son perturbaciones que se forman en el seno del viento alisio en las capas bajas de la troposfera hasta unos 3000 metros de altitud y se deben a cambios en la dirección del viento. El viento alisio se curva hacia el norte y luego hacia el sur formando una onda; al eje del viento se le llama eje de la onda.

La zona de convergencia intertropical (ZCIT): es un cinturón de baja presión que ciñe el globo terrestre en la región ecuatorial (Figura 154). Está formado, como su nombre indica, por la convergencia de aire cálido y húmedo de latitudes al norte y al sur del ecuador. A esta región también se la conoce como frente intertropical o zona de convergencia ecuatorial. En inglés se conoce por el acrónimo ITCZ (*InterTropical Convergence Zone*).

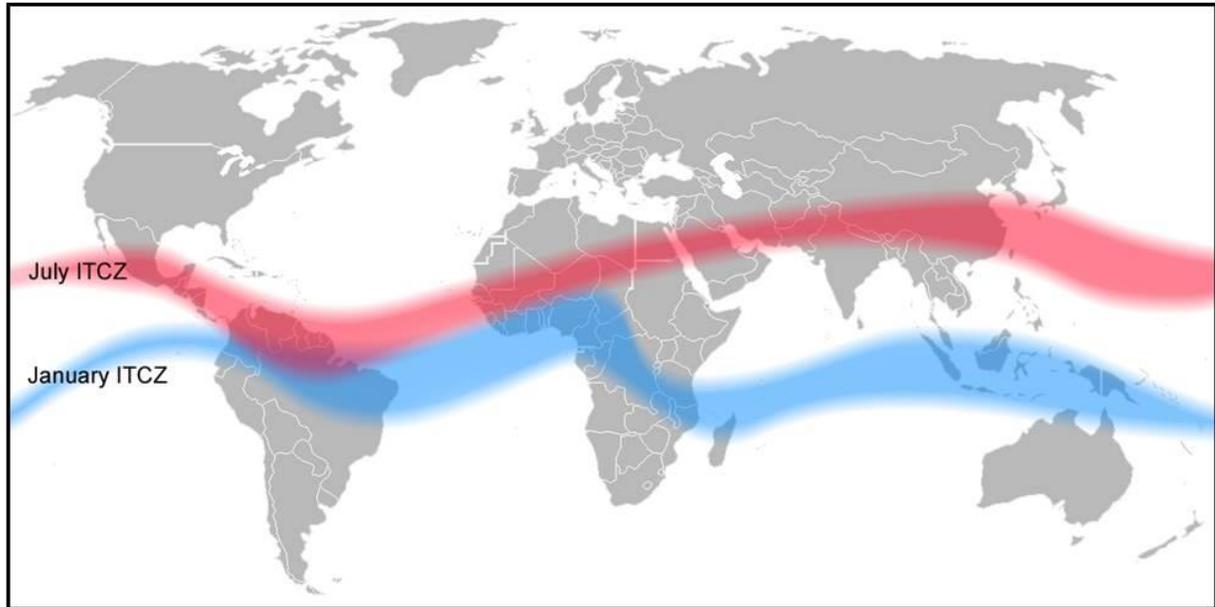


Figura 154. Modelos descriptivos a partir de mediciones satelitales del comportamiento de la Zona Intertropical que en época de verano trasporta los ciclones tropicales desde la costa de África (NASA, 2013).

El aire es empujado a la zona por la acción de la célula de Hadley, un rasgo atmosférico a mesoescala que forma parte del sistema planetario de distribución del calor y la humedad, y es transportado verticalmente hacia arriba por la actividad convectiva de las tormentas; las regiones situadas en esta área reciben precipitación más de 200 días al año.

La posición de la Región Intertropical de Convergencia varía con el ciclo estacional siguiendo la posición del N más al norte (8° N) durante el verano del hemisferio norte, y su posición más al sur (1° N) durante el mes de abril. Sin embargo la ZCIT es menos móvil en las longitudes oceánicas, donde mantiene una posición estática al norte del ecuador (Figura 155).



Figura 155. Imagen satelital del comportamiento de la Zona Intertropical en verano con fecha julio 12 del año 2000 (NASA, 2013).

Los efectos locales pueden ser la conducción de ciclones tropicales hacia el Mar Caribe o la inyección de aire húmedo tropical para finales de año y así como una mayor intensidad del fenómeno de Surada (viento procedente del suroeste, templados, relativamente húmedo y portador de lluvias).

Medición del Viento

Usualmente el viento es descrito mediante dos características: velocidad y dirección. La velocidad, es la rapidez alcanzada por una masa de aire que viaja en forma horizontal a través de la atmósfera y a menudo se mide utilizando un anemómetro, en kilómetros por hora (Km por hora), millas por hora (mph), nudos, o metros por segundo (mps). La dirección, es aquella desde la que éste sopla y se mide mediante un instrumento llamado veleta de viento.

La Escala de Beaufort es una medida empírica para estimar e informar sobre las velocidades del viento usando una escala numérica que va del 0 (calmo) al 12 (huracán), basada principalmente en el estado del mar, de sus olas y la fuerza del viento.

Para mayor información, los doce grados definen la relación causa/efecto de las diversas intensidades del viento sobre la superficie del mar, más precisamente sobre su aspecto en los efectos mar-tierra. Actualmente estos efectos se dejan para los informes o áreas de peligros ya que la medición se centra más en la velocidad de viento (nudos o Km/h) obtenida por instrumentación (Figura 156)

Número de Beaufort	Velocidad del viento (km/h)	Nudos (millas náuticas/h)	Denominación	Aspecto del mar	Efectos en tierra
0	0 a 1	< 1	Calma	Despejado	Calma, el humo asciende verticalmente
1	2 a 5	1 a 3	Ventolina	Pequeñas olas, pero sin espuma	El humo indica la dirección del viento
2	6 a 11	4 a 6	Flojo (Brisa muy débil)	Crestas de apariencia vitrea, sin romper	Se caen las hojas de los árboles, empiezan a moverse los molinos de los campos
3	12 a 19	7 a 10	Flojo (Brisa Ligera)	Pequeñas olas, crestas rompientes.	Se agitan las hojas, ondulan las banderas
4	20 a 28	11 a 16	Irresistible (Brisa moderada)	Borreguillos numerosos, olas cada vez más largas	Se levanta polvo y papeles, se agitan las copas de los árboles
5	29 a 38	17 a 21	Fresquito (Brisa fresca)	Olas medianas y alargadas, borreguillos muy abundantes	Pequeños movimientos de los árboles, superficie de los lagos ondulada
6	39 a 49	22 a 27	Fresco (Brisa fuerte)	Comienzan a formarse olas grandes, crestas rompientes, espuma	Se mueven las ramas de los árboles, dificultad para mantener abierto el paraguas.
7	50 a 61	28 a 33	Frescachón (Viento fuerte)	Mar gruesa, con espuma arrastrada en dirección del viento	Se mueven los árboles grandes, dificultad para caminar contra el viento
8	62 a 74	34 a 40	Temporal (Viento duro)	Grandes olas rompientes, franjas de espuma	Se quiebran las copas de los árboles, circulación de personas muy dificultosa
9	75 a 88	41 a 47	Temporal fuerte (Muy duro)	Olas muy grandes, rompientes. Visibilidad mermada	Daños en árboles, imposible andar contra el viento
10	89 a 102	48 a 55	Temporal duro (Temporal)	Olas muy gruesas con crestas empenachadas. Superficie del mar blanca.	Árboles arrancados, daños en la estructura de las construcciones
11	103 a 117	56 a 63	Temporal muy duro (Borrasca)	Olas excepcionalmente grandes, mar completamente blanca, visibilidad muy reducida	Destrucción en todas partes, lluvias muy intensas, inundaciones muy altas
12	+ 118	+64	Temporal huracanado (Huracán)	Olas excepcionalmente grandes, mar blanca, visibilidad nula	Voladura de autos, árboles, casas, techos y personas. Puede generar un ciclón o un tifón

Figura 156. Descripción de los elementos que se utilizan para la interpretación de la escala de Beaufort (Wikipedia, 2013).

Representación gráfica del viento

La fuerza del viento se debe ver y percibir como un vector, es decir, tiene dirección e intensidad y al mismo tiempo las veces que soplo en un sentido, a esto estadísticamente se le llama Frecuencia; por lo tanto, la representación gráfica del viento persigue que el lector pueda saber las veces la dirección, la intensidad y la frecuencia en una sola gráfica.

Considerando esta información como un vector con magnitud (dada por la velocidad) y dirección. Los meteorólogos crearon una gráfica llamada Rosa de los vientos (Figura 157) la cual permite representar simultáneamente la relación que existe entre las características que componen el viento, mostrando la siguiente información.

Frecuencia de ocurrencia de los vientos en 16 sectores de dirección (E, ENE, NE, NNE, W, WNW, NW, NNW, ESE, SE, SSE, S, SSW, N, WSW, SW) y en clases de velocidad del viento para una localidad y un periodo de tiempo dado. Como ya se mencionó anteriormente la clasificación más utilizada para el viento es la ESCALA BEAUFORT.

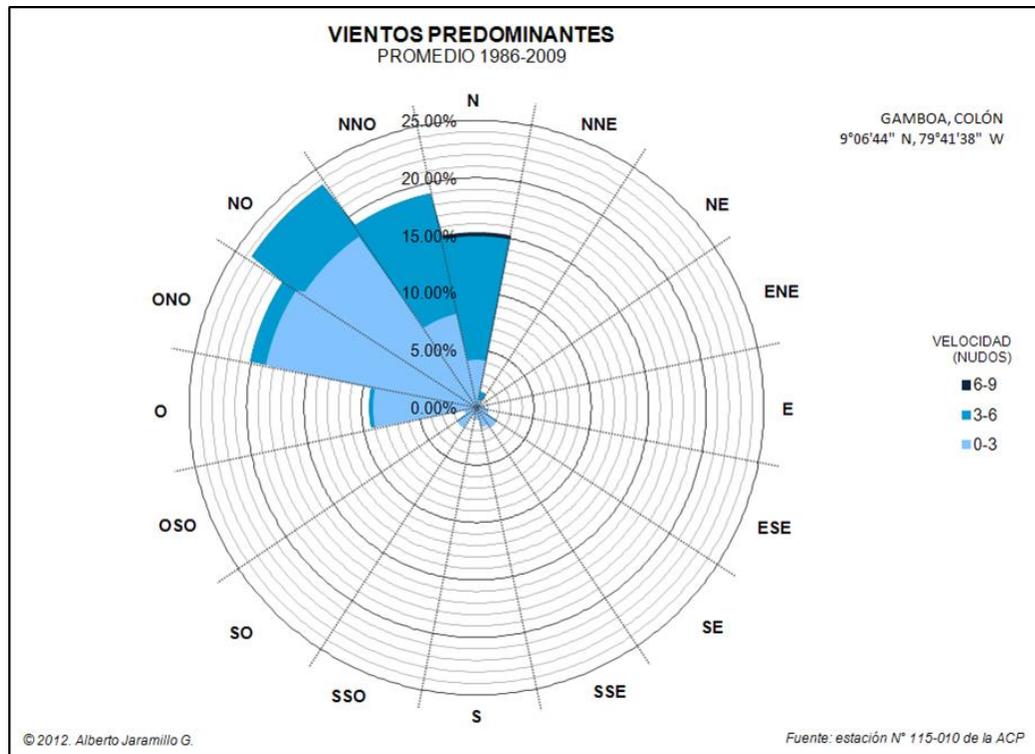


Figura 157. Rosa de vientos.

VIII.1.2.2. Antecedentes

En nuestro país son pocos los trabajos referidos a los vientos, siendo también muy escasos los que cuentan con cartografía específica de regímenes de vientos (por ejemplo: isolíneas de frecuencia de vientos según direcciones, de velocidad media del viento, etc.).

Los trabajos desarrollados para la descripción e interpretación de vientos en México están referidos principalmente a la generación de energía eléctrica (CFE, 2008; Saldaña *et al.*, 2009), para el diseño de estructuras (CFE, 2008; Muñoz *et al.*, 2009) y en circulación marina y oceanografía. Para el caso de las aplicaciones en estudios de peligros o de riesgos no existe publicación alguna que incluya o describa la acción de los vientos como componente del esquema en Protección Civil. Por lo tanto los estudios antes referidos sirvieron de pausa para establecer la metodología descrita en el siguiente capítulo (Figura 10) y las condiciones del desarrollo del capítulo.

VIII.1.2.2.1. Análisis de estructuras por viento de la CFE

El Manual de diseño de obras civiles, Diseño por viento de la Comisión Federal de Electricidad (2008) y desde la edición de 1993 ha presentado un importante avance en el desarrollo de metodologías para una mejor estimación de las acciones inducidas por el viento y sus efectos sobre las construcciones. Por otra parte, el incremento en pérdidas de vidas humanas, daños materiales e interrupción de servicios esenciales, ocasionados por vientos fuertes y huracanes que predominan en México, motivó la actualización de las técnicas empleadas para encaminarlas a optimizar el diseño y desempeño de las estructuras ante dichos efectos producidos por el viento.

La base de datos de los vientos máximos en el país con que cuenta el Instituto de Investigaciones Eléctricas ha sido actualizada y ampliada. El análisis probabilista de esta base de datos, ha permitido establecer una mejor estimación del peligro por viento en México, el cual es presentado en nuevos mapas de isotacas (líneas que unen puntos donde el viento sopla con la misma intensidad). Un mapa de isotacas a 500 hPa o 300 hPa delimitaría la situación aproximada de las diferentes corrientes en chorro del planeta.

En la determinación de las velocidades del viento, el manual de la CFE, sólo se consideró aquellos efectos producidos por las tormentas que ocurren normalmente durante el año en todo el país y los causados por huracanes en las costas del Pacífico, del Golfo de México y del Caribe. No se consideró la influencia de los vientos generados por tornados ni por tormentas locales de corta duración.

Es importante señalar que las recomendaciones presentadas por el manual de la CFE deben aplicarse para determinar la seguridad del sistema de la estructura principal y de sus partes, ante las acciones (empujes o succiones) producidas por el viento sobre las superficies de la construcción y que se transmiten a dicho sistema. Asimismo, estas recomendaciones se aplican en el diseño local de los elementos expuestos de manera directa a la acción del viento, tanto los que forman parte del sistema estructural, como cuerdas y diagonales, como los que constituyen sólo su recubrimiento, por ejemplo, láminas de cubiertas, elementos de fachada y vidrios.

Cabe hacer la aclaración que el Atlas de Peligros de Yucatán no persigue dentro de sus objetivos dar recomendaciones sobre la construcción de sistemas estructurales, la implementación o desplante civil de áreas urbanas o el comportamiento estructural de los edificios al ser sometidos a la acción del viento.

Para conocer, las áreas con mayor velocidad de vientos, a continuación se muestran los mapas de isotacas regionales correspondientes a los periodos de retorno de 200, 50 y 10 años (Figuras 158, 159 y 160), recomendados para el diseño por viento de estructuras de los Grupos A, B y C, respectivamente según descritas dentro del manual.

La interpretación está basada en que a mayor periodo de retorno (200 años) se generan áreas con mayor velocidad alcanzando en la región de Yucatán de hasta 220 a 230 Km/h en contraste con un lapso de tiempo mucho menor (10 años) la mayor velocidad que se puede generar o encontrar en los modelos es de 130 Km/h. Una de las preguntas que plantea el manual es cuánto tiempo se desea hacer perdurar la infraestructura o las construcciones en la región.

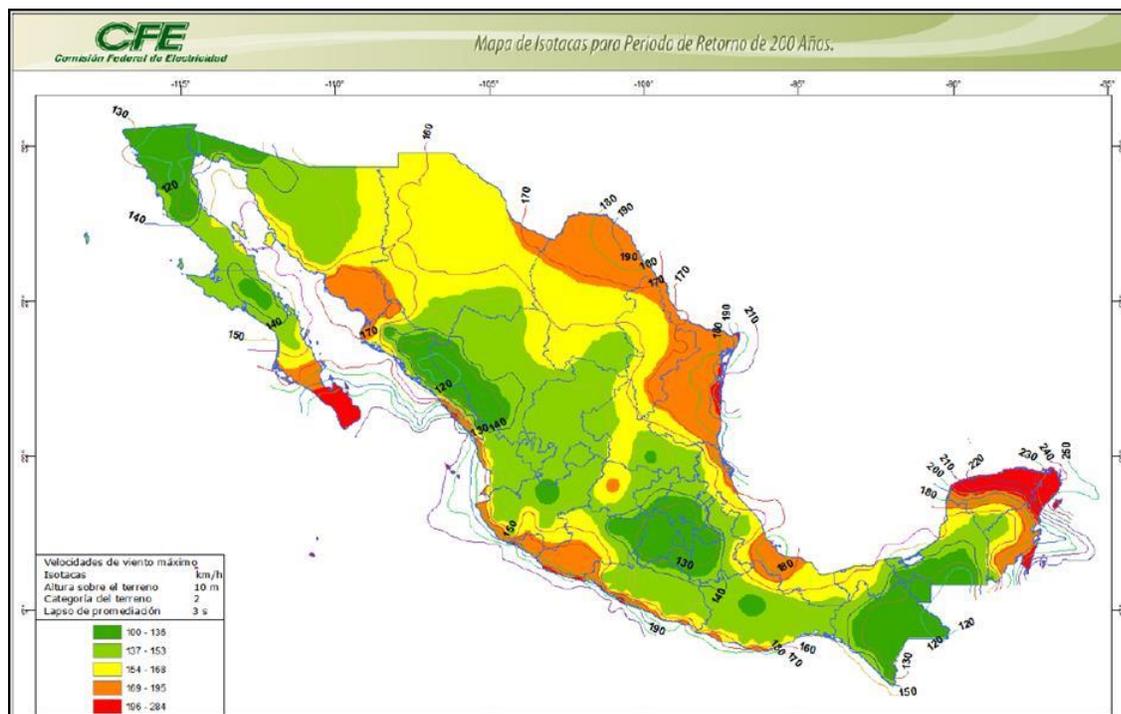


Figura 158. Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 200 años (CFE, 2008).

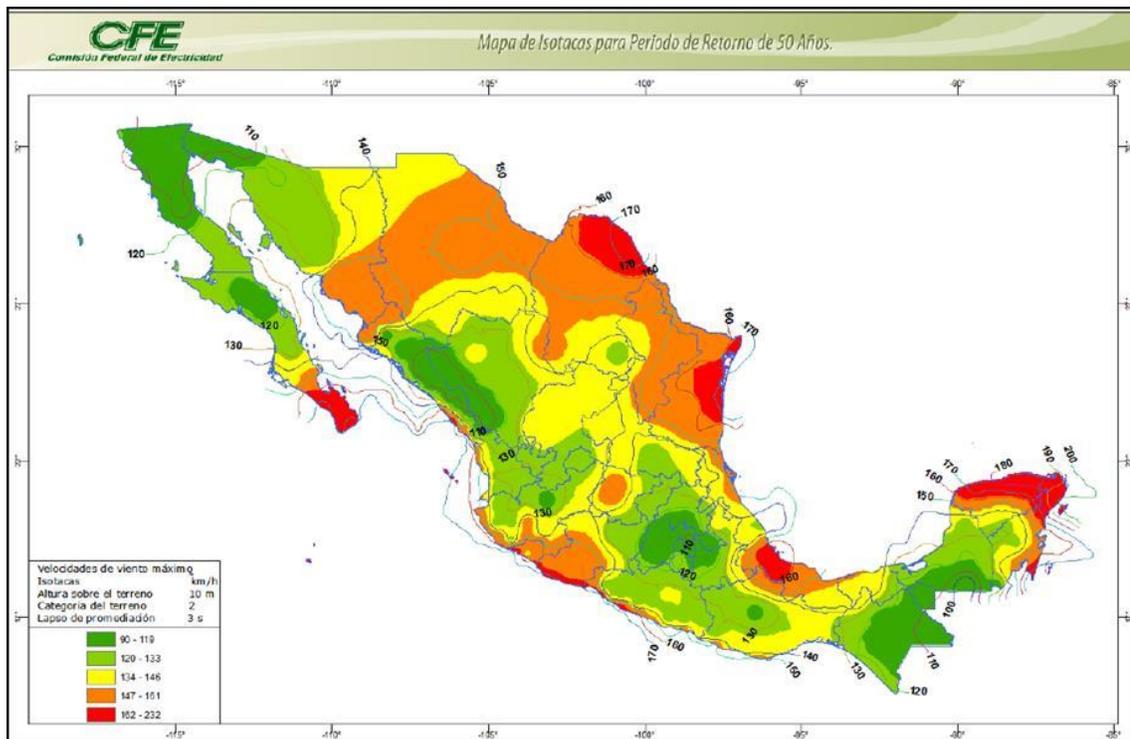


Figura 159. Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 50 años (CFE, 2008).

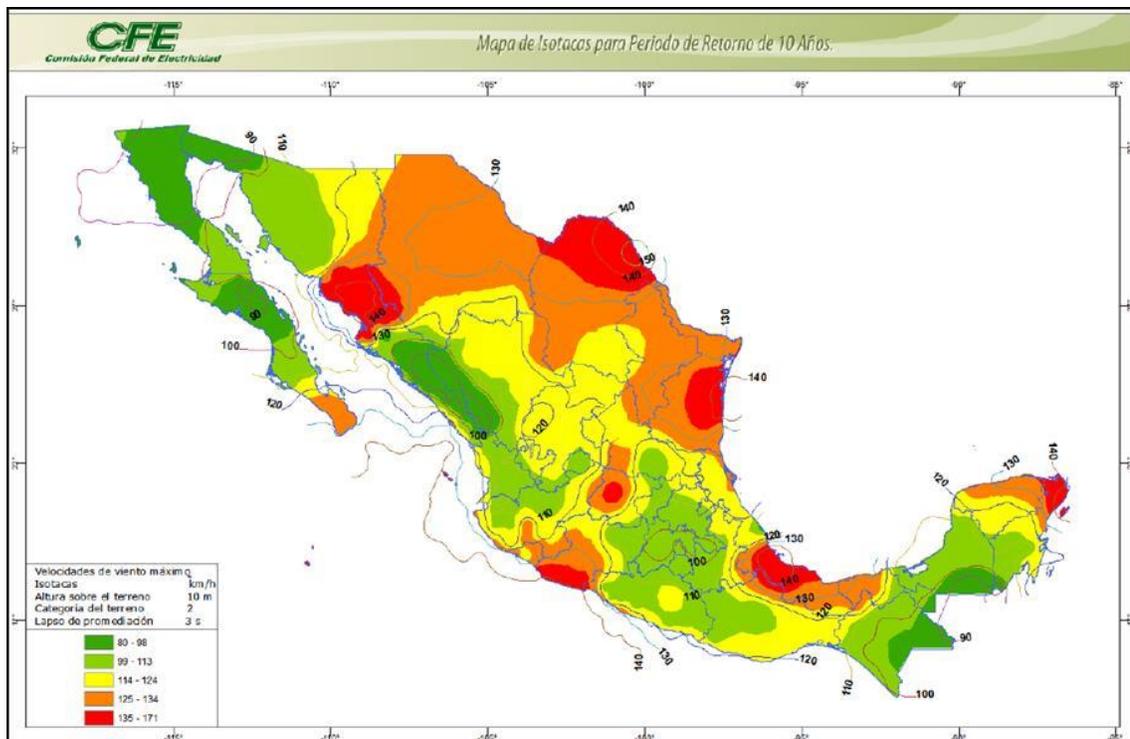


Figura 160. Mapa de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 10 años (CFE, 2008).

Factor de importancia de las pérdidas

Dentro del manual, CFE establece la velocidad regional óptima, V_{RO} , en Km/h, es la máxima velocidad para la cual se minimiza el costo total determinado con el costo inicial de la construcción más el costo de las reparaciones y de las pérdidas, directas e indirectas, en caso de presentarse una falla. El costo de la falla (reparaciones y pérdidas) se introduce en un parámetro adimensional, Q, llamado factor de importancia de las pérdidas. CFE lo representa y conjugado con los periodos de retorno de 200, 50 y 10 años en los siguientes mapas.

Los mapas de isotacas correspondientes a esos niveles de importancia de las pérdidas, se presentan en las Figuras 161 y 162, donde se proporcionan los valores de las velocidades regionales de ráfaga óptimas para diseño.

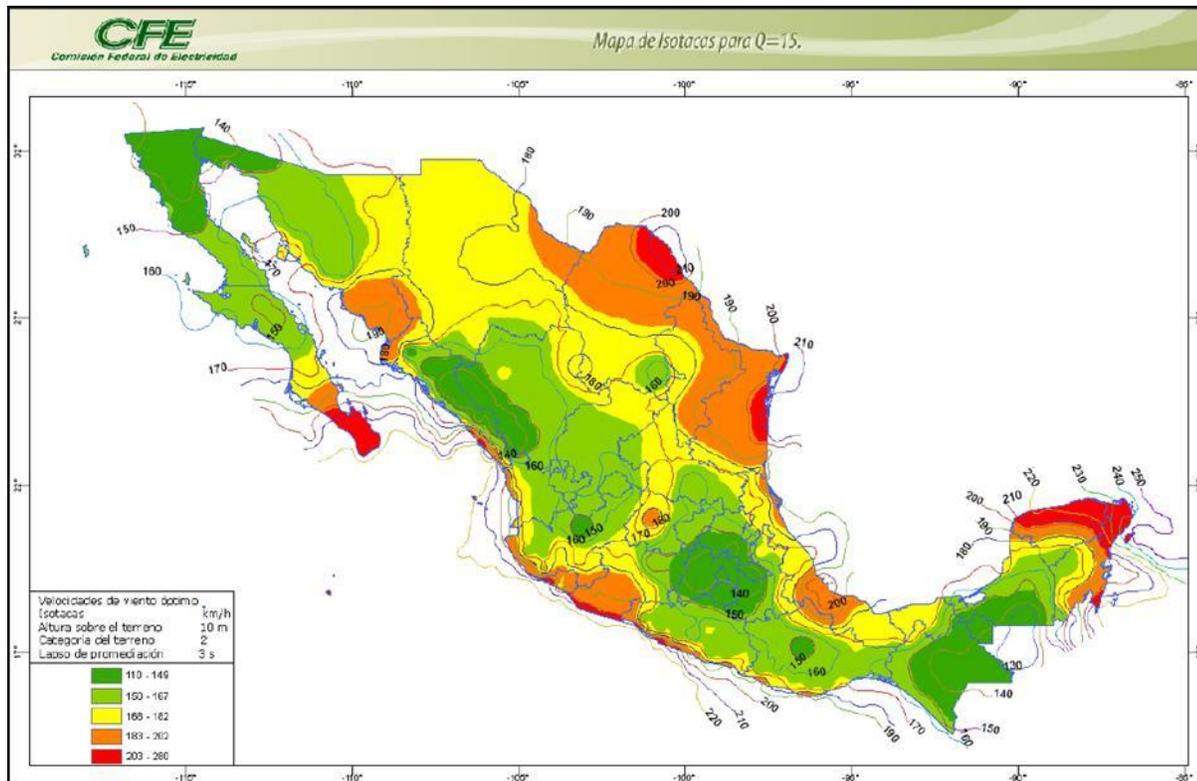


Figura 161. Mapa de isotacas para Q=15 (CFE, 2008).

Mucha de la información que maneja la CFE y que es ilustrada ampliamente en las figuras anteriores es a nivel nacional, dándose mayor importancia a las velocidades regionales con diferentes periodos de retorno. Para el estado de Yucatán se tienen que los datos generados por la CFE en su Manual de vientos son únicamente para tres estaciones de un total de 124 ciudades más importantes y que se muestran en la Tabla 90.

Tabla 90. Síntesis de la información construida por la CFE para el estado de Yucatán

CIUDAD	OBSERVATORIO CLAVE	LONGITUD	LATITUD	T _R 10	T _R 50	T _R 200	Q5	Q15
Mérida	31019	-89.65	20.98	126	172	213	170	214
Progreso	31023	-89.65	21.29	130	180	220	170	220
Valladolid	31036	-88.20	20.68	123	157	195	165	198

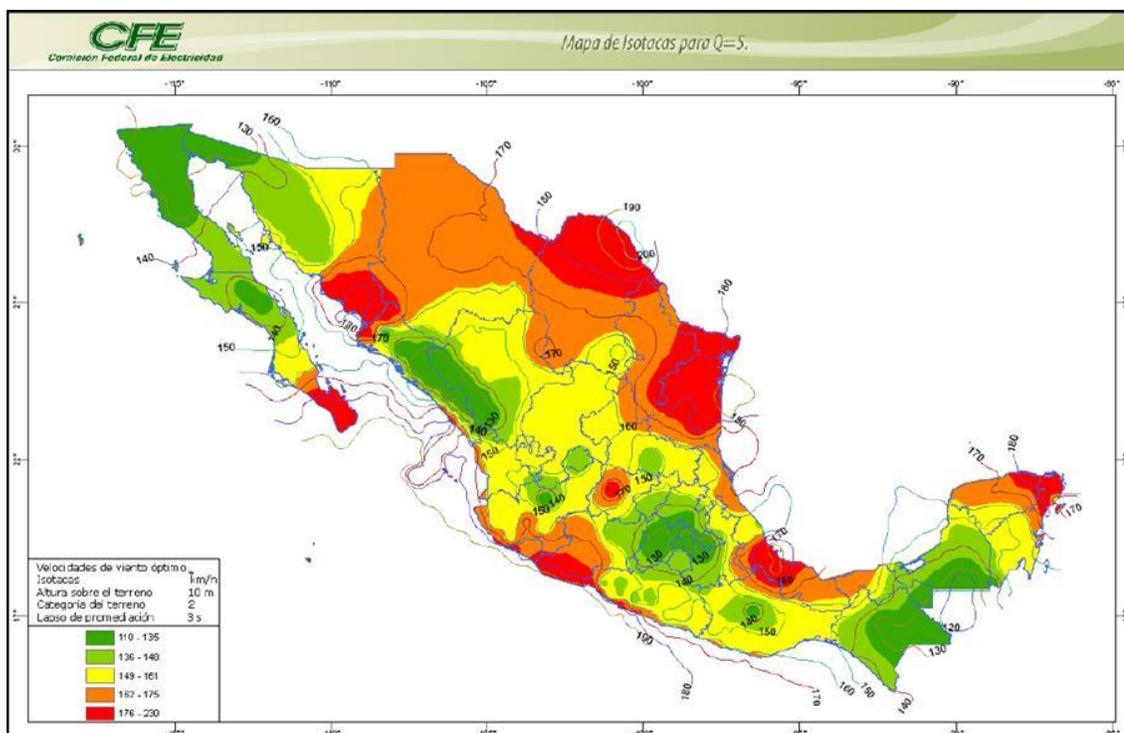


Figura 162. Mapa de isotacas para Q=5 (CFE, 2008).

De acuerdo a lo anterior y al tipo de información que se maneja, se considera que la metodología utilizada por CFE para su estudio de vientos, no es totalmente aplicable al Atlas de Peligros de Yucatán, ya que ambos persiguen diferentes objetivos. Pues mientras que para CFE el estudio de dicho fenómeno está enfocado principalmente en los efectos que este puede tener sobre las estructuras, para el Atlas de Yucatán está enfocado a su interrelación e influencia con otros fenómenos (huracanes, marea de tormenta, erosión, entre otros).

Otro estudio que modelo vientos para la costa de Yucatán es el desarrollado por Martínez-López y Pares-Sierra (1998) en el trabajo titulado Circulación del Golfo de México inducida por mareas, vientos y la corriente de Yucatán.

El tema de vientos dentro del Atlas de Yucatán, se refiere particularmente a el comportamiento visualizado por medio de una modelación llamada Rosa de Vientos y que puede proporcionar el flujo y la dirección, para ello el tipo de información y análisis que se llevará cabo, consiste en obtener una gráfica anual de los registros en 24 horas marcadas por hora y en frecuencia diaria desde el año 2000 al 2010 y donde los estudios realizados por CFE y Pares-Sierra sirven como referencia para conocer y/o determinar el comportamiento del viento y sus efectos.

VIII.1.2.3. Método de Trabajo.

Para el desarrollo de este tema, y partiendo de la búsqueda y análisis de los antecedentes, marco de referencia y resultados requeridos para el Atlas de Peligros de Yucatán, al no existir una metodología específica y validada por alguna institución de investigación que la haya certificado para los fines específicos de los Atlas de Peligros y Riesgos, el SGM propuso un método de trabajo basado en la capacidad de procesar toda la información generada por las seis estaciones automáticas del estado de Yucatán y operadas por la Comisión Nacional del Agua para obtener comportamientos anuales del viento, su estadística básica apoyado en la clasificación de la escala de Beaufort y mapas mensuales integrados por estación y periodos de tiempo determinados.

La Figura 163 explica gráficamente en un diagrama de flujo los elementos que se involucraron con el fin de obtener el mapa de susceptibilidad de vientos.

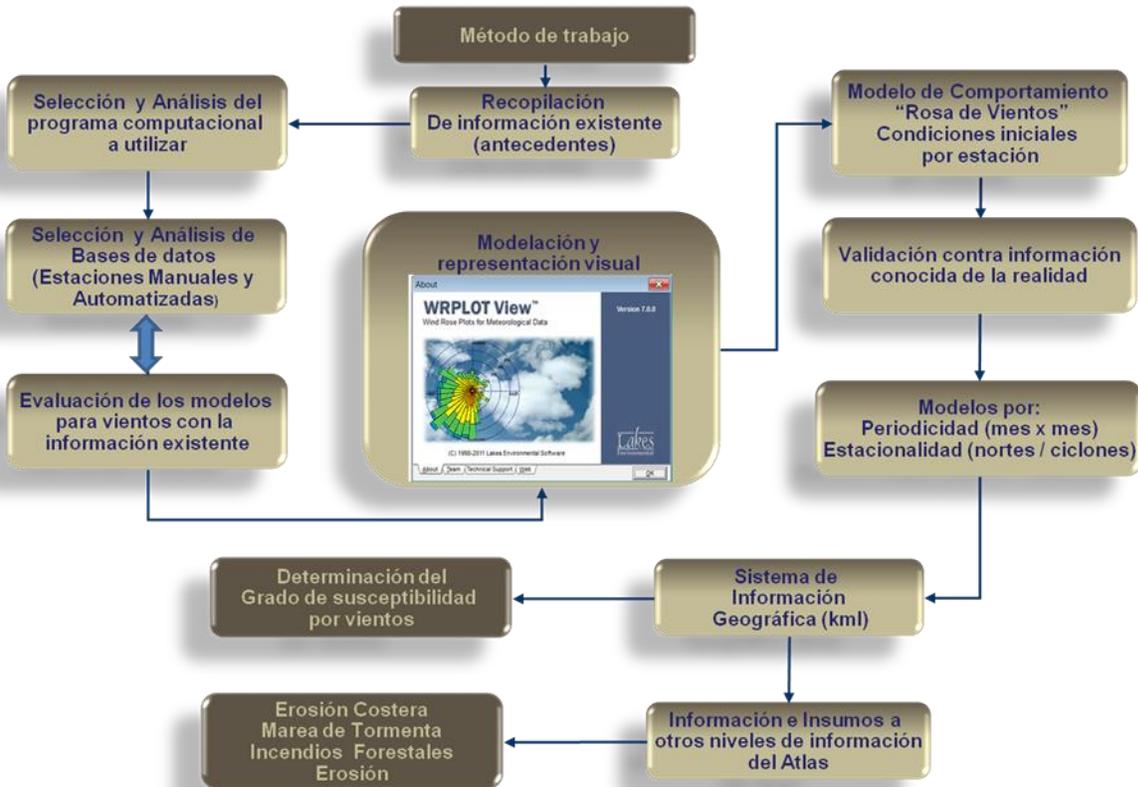


Figura 163. Metodología para determinar la susceptibilidad por vientos.

▪ Recopilación y análisis de Información existente

Como se mencionó en el apartado de los antecedentes, los trabajos desarrollados en el estudio de vientos son muy pocos y más los orientados hacia los atlas de peligros y riesgos dentro del Sistema de Protección Civil, sin embargo, se trató de recopilar todo tipo de información que pudiera ser de ayuda.

La información recopilada abarco desde los estudios locales para el comportamiento del viento hasta el seguimiento de las corrientes marinas trans-oceánicas que ha establecido la NOAA y la NASA (2013). A escala Regional se ubica el estudio de Martínez-López y Pares-Sierra (1998) titulado Circulación del Golfo de México inducida por mareas, vientos y la corriente de Yucatán y el estudio titulado Estudio del Potencial Eoloenergético en un Sitio de Interés Ubicado en la Zona Costera Norte de la Península de Yucatán de Saldaña-Flores Et., al (2009), que parte de mucha de la información de la CFE.

Para los comportamientos continentales se consultó la Tesis Doctoral Caracterización del Régimen de Vientos y Desarrollo de un Modelo de Predicción Eólica a Escala Local en el Estrecho de Gibraltar por la actual Dra. Palomares Losada (2002); el artículo Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático de Amador y Alfaro (2009); el artículo Estadística Preliminar de los Vientos para la Zona Urbana de Aguascalientes de López-López Et., al. (2008).

Con lo que respecta a la interpretación de los datos climatológicos y el uso del programa se basó en *Methods for Monitoring Climate in Southwest Alaska, Network Parks* (National Park Service, 2010); en lo correspondiente a la plataforma del ArcGis se utilizó Generación de un Mapa de Vientos en un SIG de González-Ferreiro y Bosque-Sendra (2008); finalmente para la comprensión del programa nos basamos en el WRPLOT View™ Version 7.0.0, Release Notes & User's Manual (2011). Muchos estudios del marco de referencia son de tipo descriptivo pero no se encontró un estudio que recree el comportamiento de los vientos en el estado de Yucatán.

Otra parte de la consulta estuvo enmarcada en entender como se había tratado el tema en las instituciones como el Centro Nacional de Prevención de Desastres. Cabe mencionar que gran parte de los estudios están orientados hacia la afectación en la infraestructura y vivienda, entre ellos por ejemplo, el Estudio de la seguridad de las edificaciones de vivienda ante la incidencia de viento de López-Bátiz y Toledo-Sánchez (2003) desarrollado como cuaderno de investigación no menciona metodologías que se pudieran aplicar en los Atlas de Peligros. Se encuentra también la presentación titulada Guía Metodológica para Elaborar mapas de riesgo ante la acción de vientos fuertes por López-Bátiz (2006) que se aplica únicamente a los tipos de vivienda que clasifica CENAPRED.

▪ Selección y análisis del programa computacional

Desde el inicio de la navegación la representación de los vientos ha sido una cuestión complicada ya que las mediciones exactas de intensidad y dirección se dieron a mediados del siglo XVIII. El problema que se presentaba era mostrar gráficamente un diagrama denominado “Rosa de Vientos” y que es muy usual realizarlo manualmente. Casi todos los programas computacionales desarrollados están orientados al registro de información con el fin de su utilización para la generación de energía eléctrica, en donde la orientación de las hélices no importaba porque eran fijas y por consecuencia no registraban la dirección y solo trabajaban arriba de una intensidad. (EPA, 2013). Solo la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos mantenía en su página un programa para la modelación de la información de su propia agencia climatológica (EPA, 2013).

El programa se llamaba “*Wind Plot*” y trabajaba con un módulo de generación de grafica llamada “*WR Plot*”, ambos en programación de MS-DOS. Actualmente la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (WebLakes, 2013) por medio de la compañía *Lakes Environmental* actualizó y fusiono los dos programas computacionales en una denominada *WR Plot (Wind Rose Plot)* que se desempeña en ambiente Windows y amigable con el usuario con arquitectura dinámica para aceptar cualquier base de datos meteorológicos de superficie para la modelación de vientos como son: *CD-144*, *SAMSON*, *HUSWO*, *TD-3505*, *CARB*, *SCRAM*, *AERMET*, *CALMET* y con *EXCEL* principalmente.

Para este caso los archivos fueron depurados en *EXCEL* y transformados a *SAMSON*. Otra bondad que se incluye en el programa es que ya desarrolla una interfaz con el visualizador *google earth* con salida independiente de un archivo **.kml* y que permite georeferenciar la información que se suba en esta plataforma.

▪ Selección y análisis de las bases de datos

Una vez evaluadas las bondades del programa computacional para procesar y graficar la información meteorológica, se procedió a seleccionar de las bases de datos existentes, su consistencia cronológica y de contenido a fin de analizar desempeño y con ello procesarla en el programa WR Plot.

Una de las opciones fueron las diez Estaciones Meteorológicas Automáticas de Protección Civil de Yucatán (EMAPYC), sin embargo una desventaja es que la información solo se disponía por episodios en los últimos dos años, otra desventaja es la falta de sensibilidad en la intensidad y dirección del viento. La base de datos refleja un promedio diario diurno sin demasiado rigor.

Otra opción fue los registros manuales que maneja el Organismo de Cuenca Península de Yucatán manejado por la CONAGUA para tres estaciones únicamente (Mérida, Tizimín y Valladolid). Esta información es recabada manualmente por un observador que anota la velocidad en m/s y la dirección en términos de 16 puntos cardinales. Los registros son continuos desde 1960 hasta el 2010, sin embargo no se pudo validar las etapas de recolección de información y diferenciación entre información de vientos máximos y vientos dominantes.

Finalmente se optó por las bases de datos de las estaciones automatizadas de los observatorios climatológicos de la CONAGUA para las estaciones de Celestún, Dzilam de Bravo, Mérida, Oxkutzcab, Ría Lagartos y Tantakin desde el 2000 al 2011 con mediciones cada 10 minutos y de sensibilidad en los registros para la dirección en grados de 0 a 359.99°. La otra ventaja y la principal es que un ordenador controla el censo de mediciones y de parámetros las 24 horas los 365 días del año.

▪ Modelos y representación visual

La información procesada para la realización de los modelos de comportamiento de los vientos, mejor conocida como rosa de los vientos y su representación cartográfica en formato de salida (*.kml) fue proporcionada por la Comisión Nacional del Agua.

Toda la información fue entregada en forma tabular electrónica, es decir en hojas de cálculo de Excel con registros de Date (fecha diaria), Time (hora cada 10 minutos), WSMDir, WSK, WSMK, AvgTemp (media estadística de temperatura), AvgBP (media estadística de presión barométrica), Rain (mm de lluvia), AvgSR (media estadística de la radiación solar) principalmente. Lo anterior lo ilustra la Figura 164 que ilustra el ejemplo de la hoja de cálculo.

Las aplicaciones de la información generada se puede entender en términos de las siguientes referencias.

WSMDir. *Trad: The direction of the peak wind reading.* La dirección del viento cuando el viento máximo se produjo. El rango es de 0 a 359 grados. NOTA: este se actualiza cada vez que un nuevo pico de velocidad se encuentra razón por la cual en las estaciones automatizadas se programa el lapso del tiempo en el cual el sensor graba la información. Si la velocidad pico se pone a cero, esta retendrá el valor antiguo hasta 5 segundos después de la nueva lectura conservándose en una jerarquía de valores el de mayor lectura (Giffen *et al.*, 2010).

WSK. Obtener la más reciente realizada en 10 minutos en velocidad media del viento. Se actualiza cada minuto. Las unidades son Km/h, y es el rango válido desde 0 hasta 409.5 Km/h. NOTA: para obtener 0 Km/h, tiene que haber habido cierres de viento en todas partes en el intervalo de tiempo dado. Incluso un cierre haría que el espectáculo velocidad del viento de 1,6 Km/h que se podría tomar como línea base. Estos cálculos suponen que la velocidad de un sensor de metal para viento MelOne y de ahí se deriva la información. Este valor se actualiza cada minuto. (Giffen *et al.*, 2010).

MSMK. Arroja el valor mayor del segundo 5 de la velocidad del viento que se ha producido desde la última vez que se leyó. Las unidades son Km/h, y el rango válido es de 0 a 409.5 Km/h. El pico salvado se restablece cada vez que se utiliza, por lo que no leen en intervalos irregulares si se desea que los datos sean consistentes. (Giffen *et al.*, 2010).

La Figura 164 también ejemplifica el total de columnas que arroja las estaciones climatológicas automáticas programadas para la recolección de información cada 10 minutos.

1	Estación: MERIDAot MERIDAob												
2	Operada por: SMN ESIME												
3	Longitud: 89°39'08"		Latitud: 20°56'49"		Altitud: 11								
4	Date	Time	Dir	WSMDir	WSK	WSMK	AvgTemp	AvgRh	AvgBP	Rain	AvgSR	Balt	SPANEL
5	2000 Jun 01	00:00	49	22	9	14.3	28.7	69	1011.8	0	38	13.4	13.5
6	2000 Jun 01	00:10	47	56	10.3	16	28.7	68	1011.8	0	21		
7	2000 Jun 01	00:20	61	54	12.3	19.5	28.7	66	1011.8	0	12		
8	2000 Jun 01	00:30	66	63	16	25.8	28.5	69	1012.1	0	6		
9	2000 Jun 01	00:40	58	52	11.5	17.7	27.7	71	1012	0	1		
10	2000 Jun 01	00:50	68	68	12.1	18.3	27.3	72	1012.1	0	-1		
11	2000 Jun 01	01:00	74	65	10.6	16.6	27.2	73	1012.3	0	-2		
12	2000 Jun 01	01:10	84	69	9	14.3	27.3	73	1012.5	0	-2		
13	2000 Jun 01	01:20	92	88	8.1	12.5	27.4	72	1012.5	0	-2		
14	2000 Jun 01	01:30	92	99	9	15.4	27.7	71	1012.6	0	-2		
15	2000 Jun 01	01:40	87	84	10	17.2	27.8	70	1012.8	0	-2		
16	2000 Jun 01	01:50	87	85	10.6	14.9	27.7	72	1012.9	0	-3		
17	2000 Jun 01	02:00	86	81	9.3	12.5	27.4	74	1013	0	-3		
18	2000 Jun 01	02:10	85	109	9.3	12.5	27	76	1013.1	0	-3		
19	2000 Jun 01	02:20	87	87	8.5	13.1	26.8	78	1013.1	0	-3		
20	2000 Jun 01	02:30	82	91	8.2	10.8	26.7	79	1013	0	-3		
21	2000 Jun 01	02:40	93	84	8.2	12.5	26.6	79	1013.1	0	-3		
22	2000 Jun 01	02:50	83	67	9	14.3	26.6	80	1013.2	0	-3		
23	2000 Jun 01	03:00	79	78	10	14.3	26.5	80	1013.3	0	-3	13.3	0.1
24	2000 Jun 01	03:10	79	79	12.2	20.6	26.6	80	1013.3	0	-3		
25	2000 Jun 01	03:20	74	78	11.6	20.6	26.7	80	1013.4	0	-3		
26	2000 Jun 01	03:30	77	83	11.3	16	26.7	80	1013.4	0	-3		
27	2000 Jun 01	03:40	86	73	11.9	18.3	26.7	80	1013.6	0	-3		
28	2000 Jun 01	03:50	88	69	10.7	15.4	26.7	80	1013.7	0	-3		
29	2000 Jun 01	04:00	93	78	11.2	17.2	26.6	81	1013.8	0	-3		
30	2000 Jun 01	04:10	96	80	11.8	18.3	26.4	82	1013.9	0	-3		

Figura 164. Ejemplo de la información base proporcionada por la CONAGUA para la modelación de los vientos en la estación Mérida

Las únicas columnas con las que se trabajó la unión de todos los meses del año eliminando las fracciones de hora son: Date, Time, Dir, WSMK. La Figura 165 muestra el ejemplo de la hoja de cálculo depurada.

1	Año	Mes	Día	Hora	Dirección	Velocidad
2	2000	4	16	24	30	25.8
3	2000	4	16	1	14	23.5
4	2000	4	16	2	17	17.7
5	2000	4	16	3	38	20
6	2000	4	16	4	81	16.6
7	2000	4	16	5	116	21.2
8	2000	4	16	6	109	20
9	2000	4	16	7	109	19.5
10	2000	4	16	8	121	13.7
11	2000	4	16	9	104	16
12	2000	4	16	10	105	16.6
13	2000	4	16	11	125	15.4
14	2000	4	16	12	127	17.2
15	2000	4	16	13	129	21.2
16	2000	4	16	14	143	28.1
17	2000	4	16	15	137	26.9
18	2000	4	16	16	145	24.1
19	2000	4	16	17	117	28.1
20	2000	4	16	18	87	24.1
21	2000	4	16	19	100	19.5
22	2000	4	16	20	57	21.2
23	2000	4	16	21	66	21.8
24	2000	4	16	22	33	32.7
25	2000	4	16	23	38	30.4
26	2000	4	17	24	48	29.2
27	2000	4	17	1	44	28.7
28	2000	4	17	2	50	25.8
29	2000	4	17	3	54	22.3
30	2000	4	17	4	71	19.5

Figura 165. Ejemplo de la información base proporcionada por la CONAGUA para la modelación de los vientos en la estación Mérida. Base de datos depurada para el software WR PLOT View.

El mismo proceso se realizó para obtener un archivo único por año de cada estación, de igual forma se procedió a seccionar los archivos para obtener información que pudiera ser modelada estacionalmente.

▪ **Software Empleado**

La justificante de trabajar un archivo único por año con los campos mostrados en la Figura 165 es por los requerimientos del software WRPLOT View V. 7.0.0, que de programación libre y realizada por la USEPA por medio de *Lakes Environmental*. Dicho programa procesa y genera modelos de dispersión de los vientos así como información estadística de cada estación alimentada en él. La Figura 166 ilustra la pantalla de inicio del programa.



Figura 166. Caratula del software al inicio del proceso.

El programa transforma las bases de datos de Excel y arroja formatos de salida compatibles para graficadores de viento. Las ventajas son que se permite una manipulación de las condiciones para ejemplificar mejor el comportamiento del viento como puede ser más segmentos en la frecuencia y con ello aumentar las columnas de la gráfica que se obtienen automáticamente (Figura 167).

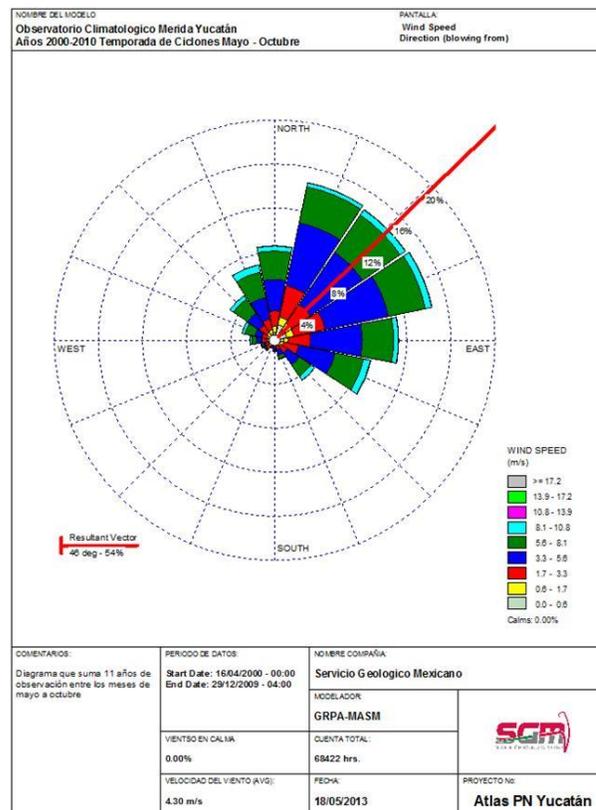


Figura 167. Rosa de los vientos resultado de la información generada por el programa WRPLOT.

Finalmente, las gráficas obtenidas pueden ser georeferenciadas en google earth, para su mejor representación, análisis e interpretación (Figura 168).

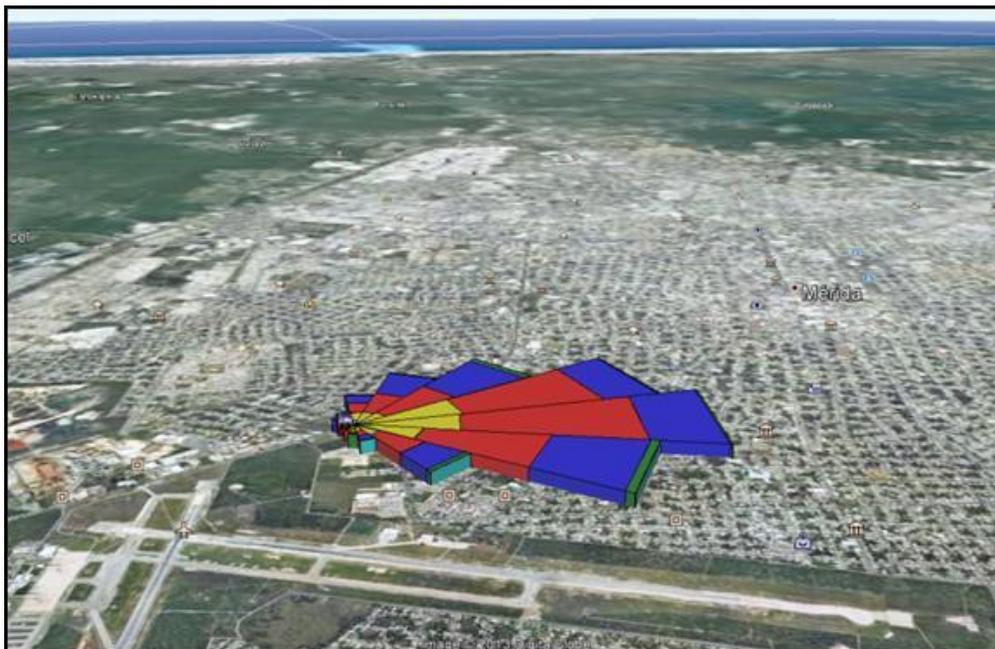


Figura 168. Gráfico georeferenciado en google earth que refleja el comportamiento del viento en la Ciudad de Mérida durante el año 2000.

▪ SIG

En la construcción de la arquitectura y manejo de datos del Sistema de Información Geográfica en la creación de mapas de vientos y corrientes, se cargan los archivos *.kml en el ArcGis para su representación gráfica y análisis espacial, que dependiendo de la agrupación temporal de los datos climatológicos, se puede manipular para el comportamiento anual o mensual, este último del promedio de todos los días para apreciar una dispersión estacional.

La creación de mapas anuales y estacionales puede ayudar a diferenciar en una configuración de puntos de monitoreo las estaciones, los patrones locales de dirección e intensidad de viento y algunas tendencias, con ello también dispersión de polvos, partículas y calor. Anualmente servirán para saber si ha cambiado el patrón natural de circulación de los vientos en la Celda de Headley o estacionalmente para trayectorias de meteoros ciclónicos.

Ya graficados todas las estaciones meteorológicas, se procesara para obtener estacionalmente el flujo del aire a través de la superficie por medio de vectores gráficos que señalen tendencias en el comportamiento del flujo de aire y se observen las causas y efectos adversos hacia el medio y con ello el probable origen de algunos peligros.

VIII.1.2.4. Análisis de Información

La medición y el registro de las variables meteorológicas permiten obtener información necesaria para controlar y comprender el cómo se comportan los fenómenos meteorológicos que son influenciados por el viento, y que pudieran ser causa de algún tipo de peligro.

Partiendo de lo anterior, este capítulo de Vientos dentro del Atlas de Peligros de Yucatán, determinará la acción de los vientos en la superficie del terreno y los elementos que interactúan con él.

Los efectos que pudiera tener el viento y los elementos que lo componen en relación a retroalimentar diferentes temáticas y su representación cartográfica es de suma importancia para entender la magnitud de la información que se necesita en la prevención de peligros y riesgos así como la mucha información que se puede llegar a generar para crear cartografía especializada que pueda ser entendible en los diferentes ámbitos de gobierno.

Los probables temas en donde los efectos del viento co-participan son:

Inundaciones: La caída de una gota de lluvia por gravedad cae en línea recta en un estado ideal, más sin embargo, al estar expuesta al medio actúan directamente sobre ella los mismos elementos atmosféricos que se describen en la Figura 1. La acción del viento inclina, direcciona y la proyecta como partícula, moviendo su área de impacto a otras superficies.

Incendios Forestales: Como se describió en este capítulo uno de los elementos que integra el triángulo de fuego es el oxígeno, este actúa como combustible e inyector de calor. El calor en si camina en el área delimitada por el combustible pero un medio alimentador y de transporte de calor (por radiación principalmente) se debe a la acción del viento. Se sabe que a donde sopla el viento el fuego consumirá todo material flamable en esa dirección y mientras más fuerte sea el viento más intenso será el fuego.

Erosión costera: La acción del viento se debe contemplar como elemento principal en la elaboración de un modelo de oleaje, y se requiere de un análisis complejo y detallado del viento y sus efectos sobre el mar, creación y conducción de las microcorrientes y de los efectos de la fuerza del oleaje y rompimiento en la playa o litoral que es modificado por la acción del viento que mueve al binomio agua-sedimento como ente erosionador y transformador del paisaje costero y con ello el trazo en la evolución de la línea de costa.

Marea de Tormenta. Va muy ligado a la erosión costera y comienza en las últimas clasificaciones de la Escala de Beaufort e inmediatamente después se retoma en la clasificación de la Escala Saffir-Simpson. Los efectos del viento acumulado y caliente alimentado por la superficie del mar y movido por el efecto Coriolis, es devastador cuando toca tierra y se suma igualmente los efectos de la inundación por lluvia y viento.

Huracanes: El huracán es el más severo de los fenómenos meteorológicos conocidos como ciclones tropicales, donde dependiendo de la velocidad máxima de los vientos sostenidos, adquieren la denominación de: depresión tropical, tormenta tropical o ciclón tropical. Y son sistemas de baja presión con actividad lluviosa y eléctrica cuyos vientos rotan antihorariamente (= en contra de las manecillas del reloj) en el hemisferio Norte.

En otras palabras, un ciclón tropical con vientos menores o iguales a 62 Km/h es llamado depresión tropical. Cuando los vientos alcanzan velocidades de 63 a 117 Km/h se llama tormenta tropical y, al exceder los 118 Km/h, la tormenta tropical se convierte en huracán.

▪ Análisis Regional

En la Península de Yucatán, la Circulación General de la Atmosfera proporciona y causa fenómenos atmosféricos que rigen las condiciones hacia las celdas de flujo local de energía y con ello eventos locales. Aportes locales de estos flujos como son los frentes fríos que viajan desde los polos a más de 8 Km de altura y se expande hasta las regiones tropicales sobrepasando los 14 Km provoca en promedio más de 45 frentes fríos al año. Por su parte la inyección de calor a nivel global junto con la humedad que viaja en las regiones intertropicales provoca más de 20 perturbaciones ciclónicas en promedio en el verano.

Este mecanismo global logra mover anualmente más de 12 mil billones de toneladas de agua en la atmósfera, principalmente como vapor y que los vientos movidos por la Celda de Hadley aterrizan en la Península de Yucatán y que activan la Corriente de Lazo entre el Mar Caribe y el Golfo de México, principalmente. Combinando la acción de ambos se logra determinar la afectación de los

vientos partiendo del supuesto que más del 98% de los días del año desde el 2000 al 2010 hay circulación. En Yucatán el viento se mueve entre el nivel de congelación y el nivel de condensación, en lo que se conoce como la fase de lluvia con más de 190 millones de toneladas de agua de precipitación local (BBC, 2010). Para el año 2011, se registró una precipitación acumulada de 1,210 mm en la Península de Yucatán.

El litoral de la Península de Yucatán, es sometido a la acción de la generación de humedad producto de la evaporación del agua de mar por la energía solar y que es convertida a energía cinética, representada por los vientos alisios convergentes en la región ecuatorial y con ello activando cada celda de Hadley; conforme el aire ascendente transporta calor y humedad a los niveles superiores, la energía cinética se transforma en energía potencial, representada por los conglomerados de cumulo nimbos, asociados a la zona intertropical de convergencia. Posteriormente, inmerso en los contralisios se presenta un transporte de calor, energía y masa, en forma de perturbaciones de menor escala, tales como las tormentas tropicales y ciclones.

Lo anterior para verano significa las intensas lluvias que comienzan en mayo alimentados por las corrientes del Mar Caribe y Golfo de México principalmente y en menor medida por la vertiente del Pacífico. Para finales de cada año los nortes transportan humedad tierra adentro ya que esta no se pudo evaporar por la disminución de la radiación solar y enfriamiento de los océanos.

En Figura 169, se aprecia el área real y mostrada por los satélites de la NASA el cubrimiento de las nubes características de la ITCZ y transportada por los vientos descendentes de la Celda de Hadley.

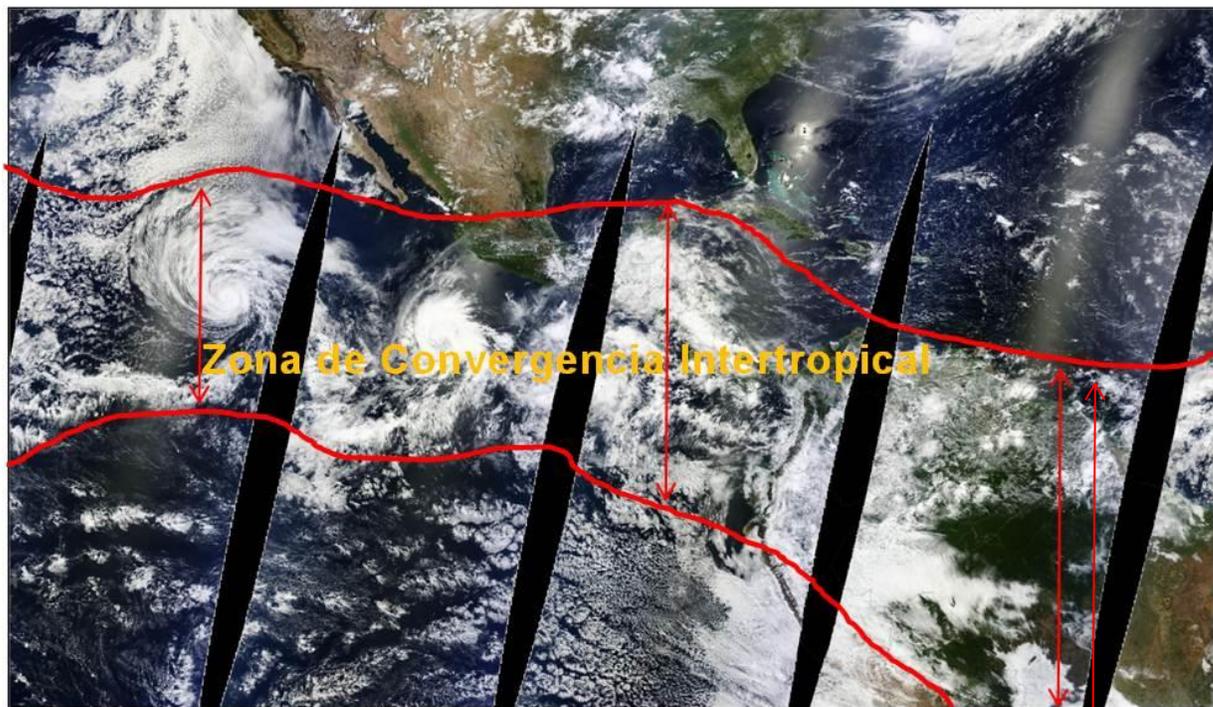


Figura 169. Ensamble de imágenes EOSDIS (The Earth Observing System Data and Information System) de la NASA para el 8 de julio del 2012, donde la ITCZ cubre la Península de Yucatán y se puede apreciar donde mueve los meteoros del Océano Pacífico y del Atlántico, en <http://earthdata.nasa.gov/labs/worldview/index.html?unsupported>.

El efecto de las celdas al inyectar o despejar el calor es directamente proporcional a la intensidad y frecuencia de los ciclones tropicales así como la definición de sus trayectorias. Mucho del viento que se adentra sobre la Península de Yucatán proveniente del Mar Caribe y por ello de la corrientes descendentes de la Celda de Hadley que transportan aire caliente, que incluye altas concentraciones de vapor y calor (formando el llamado bochorno de lluvia o tormenta) que se aprecia mejor en las tardes en las latitudes tropicales y que es medido también en los cambios barométricos y de generación de tormentas eléctricas. Esto se aprecia también en el cambio de color frente a las

costas de Yucatán por el aporte de agua fresca hacia el mar y resultado ya de las excesivas lluvias de la temporada, este fenómeno de balance hídrico se observa en la Figura 170, las lluvias son transportadas desde el Caribe y se nutren de todo el calor y humedad a su paso hasta encontrar un cambio en la temperatura del relieve, razón que enfría el aire que finalmente condensa la lluvia.

También existen pequeñas Celdas de Circulación a escala muy local y que se dan en la acumulación de calor formando torbellinos que azotan la zona de la cota de 10 msnm, especialmente en planicies muy bien definidas y áreas urbanas. Este fenómeno se da del mes de febrero al mes de abril principalmente, aunque existen episodios en los meses de mayo y junio cuando se inyecta calor desde el mar y la temporada regular de lluvias es desfasada. Para el 2011, el mes de mayo se caracterizó por presentar sequía en prácticamente todo el territorio nacional en distintas intensidades, la distribución de la sequía climatológica se vio acentuada por la sequía meteorológica. Al este y sureste en la región de la península de Yucatán se vivió una sequía excepcional, siendo esta última condición la que dominó con afectaciones graves a la agricultura e hidrología superficial (CONAGUA, 2013).

Para el área de la Península de Yucatán, la lluvia simplemente se intensifica con el aumento de la insolación a medida que el Sol ilumina otras latitudes. Existe también un ciclo diurno, en el cual se desarrollan cúmulos convectivos a mediodía y se forman tormentas por la tarde, en la época más marcada del verano, en los meses de junio y julio, de agosto



Figura 170. Cambios de color en la imagen satelital por aportes de agua de lluvia precipitados por cambio de temperatura en los vientos dominantes del Caribe. La flecha indica la dirección del flujo de los vientos alisios.

Los vientos alisios que predominan en Yucatán tienen direcciones este y noreste. Se mantienen durante todo el año y alcanzan velocidades máximas en rachas de hasta 30 Km/h, en promedio. En diciembre, cuando se da inicio al invierno en el Hemisferio Norte y comienza el enfriamiento del continente, estos vientos son más fuertes y nos trae el frío de invierno. Como viene sobre el mar, arrastra vapor de agua y pueden causar fuertes precipitaciones e inundaciones en el Caribe Centroamericano.

Las ondas tropicales que se forman en el viento alisio sobre el Mar caribe y el Océano Atlántico tropical en la periferia sur del anticiclón de las Azores, no se observan en ninguna otra región

del planeta. Se manifiestan durante todo el año, pero son más frecuentes durante el periodo comprendido entre mayo y octubre, debido a que es el periodo de mayor calentamiento de esta área (04, 2011).

La Figura 171 ejemplifica los cambios de régimen climático provocados por los elementos que modifican las celdas de circulación en todo el hemisferio Norte con la ubicación geográfica del estado de Yucatán. Para el periodo estacional la inyección de los vientos que llegan a la península como nortes aumentan su residencia en la troposfera con una corriente subtropical fortalecida. Para el verano, la inyección de aire caliente ascendente por la radiación solar sobre el Mar Caribe y Golfo de México reduce la circulación de la Corriente Subtropical y con ello el aumento en volumen de la Celda de Hadley.

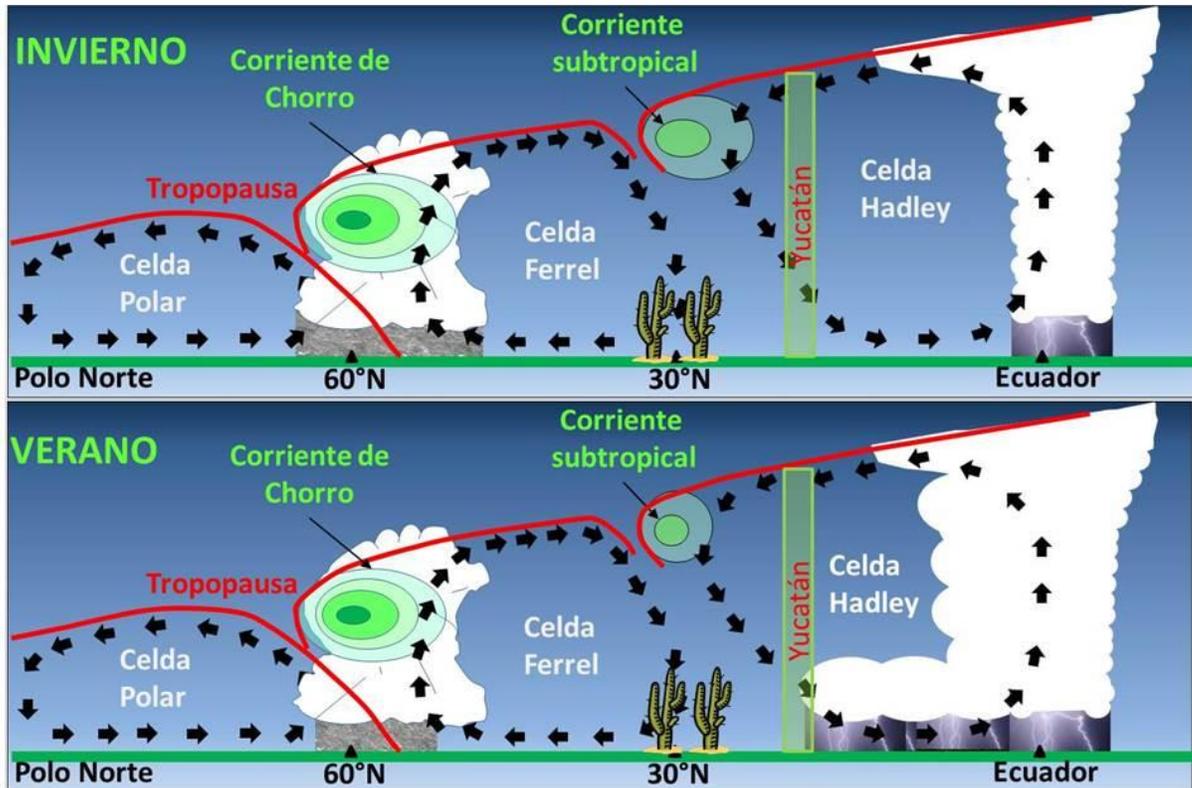


Figura 171. Modelo conceptual del comportamiento de los vientos dentro de la Circulación general de la atmósfera para la estación de invierno y verano. Se muestran elementos que modifican el microclima y los vientos a escala local. Elementos como la Corriente de Chorro y la Corriente Subtropical modifican el comportamiento climático en las latitudes de la Península de Yucatán y alentados por los frentes fríos en invierno y las corrientes calientes en verano.

La literatura consultada sobre la circulación producida por el viento difiere en el origen del giro anticiclónico observado como una característica semipermanente en la parte occidental del Golfo de México (GDM) (Sturges y Blaha, 1976; Elliot 1982 dentro del mismo artículo). Elliot (1982) utilizando datos de viento del *National Climatic Center*, refuta la idea propuesta por Sturges y Blaha (1976) sobre la contribución del viento como mecanismo dominante en la circulación anticiclónica de la región occidental del GDM, concluyendo que los remolinos que se desprenden de la Corriente de Lazo, son importantes para mantener la circulación anticiclónica de esta zona. Para obtener un patrón de circulación de verano e invierno en el GDM se corrió el modelo por un periodo de un año, utilizando como único forzamiento un campo de viento promedio mensual calculado a partir de datos de vientos COADS (*Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set*) desde 1980 a 1991. Los campos mensuales utilizados son similares a los que utilizó Elliot (1982).

Los resultados de esta simulación constituyen una serie de campos horarios de corrientes y para 40 días de verano y 41 días de invierno. Estos periodos comprenden del 11 de julio al 20 de

agosto y del 11 de enero al 20 de febrero. Se realizó un promedio para los 14 días centrales de estos intervalos y el patrón resultante se tomó como el característico de la estación (invierno y verano).

Lo anterior se hizo con la finalidad de poder estimar posteriormente la contribución de la marea y la corriente de Yucatán a la circulación residual del GDM y confirmar la teoría de la importancia de la corriente de Lazo dentro de la circulación local de vientos. Los otros vientos se relacionan a la corriente del Caribe y su temperatura que influencia enormemente a Yucatán y Quintana Roo.

VIII.1.2.5. Generación de Mapas y Descripción de datos

VIII.1.2.5.1. Modelo de comportamiento de los vientos

Para la generación de los mapas y obtención de datos resultantes se tomó en cuenta la información de las observaciones comprendidas desde enero del 2000 a diciembre del 2010 de seis estaciones climatológicas referenciadas en la Tabla 91, en periodos de observación de la temporada de Nortes (enero a abril y de noviembre a diciembre) y de Ciclones (mayo a octubre).

Tabla 91. Listado de las estaciones automáticas de la CONAGUA en Yucatán.

ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	AÑOS DE OBSERVACIÓN
Celestún	20°51'29"	90°22'59"	2000-2010
Dzilam de Bravo	21°23'26"	88°54'15"	2008-2011
Mérida	20°56'47"	89°39'04"	2000-2010
Oxkutzcab	20°17'28"	89°23'41"	2008-2011
Ría Lagartos	21°34'16"	88°09'37"	2000-2010
Tantakin	20°01'49"	89°02'50"	2003-2010

Para la descripción que se hará de cada estación es importante hacer notar la diferencia entre los vientos de altura, es decir, los formados en las capas altas de la atmósfera y debidos a la circulación general de la atmósfera y los vientos de superficie que están más relacionados con las condiciones locales del clima y con la topografía y lo llano del terreno. La fricción o rozamiento, por tanto, es la última fuerza principal que afecta al viento. Este fenómeno es muy observable en la cobertura forestal que en la península de Yucatán no va más allá de los 10 metros de altura, siempre parejo y como que cortado a propósito.

Esta capa de rozamiento, empieza a actuar cerca de la superficie terrestre hasta que llega a altitudes aproximadas de 500 a 1.000 m y es donde podemos apreciar los microclimas muy cálidos en la época de ciclones. La topografía del terreno, como se podría esperar, afecta sobre todo al flujo del aire más próximo a la superficie terrestre. Los rasgos topográficos afectan a la atmósfera de dos maneras: térmicamente (a través del calor) y geoméricamente (o mecánicamente). La turbulencia térmica se produce por el calentamiento diferencial, es decir la cobertura vegetal y en algunas ocasiones los incendios forestales.

Los objetos emiten calor en tasas distintas, Por ejemplo, un área recubierta de vegetación no emite la misma cantidad de calor que una zona asfaltada y/o urbana. Por otro lado, la turbulencia mecánica es causada por el viento que fluye sobre objetos de tamaños y formas diferentes. Por ejemplo, el flujo del viento que rodea un edificio será diferente del de un cultivo. El efecto de la fricción en el viento influye significativamente en el transporte de los elementos de peligro en el aire.

Aunque la dirección de los vientos está fuertemente influida por la orografía o por los contrastes térmicos derivados de la distribución de las grandes masas de agua que provocan

alteraciones locales en el régimen del viento (brisas costeras), en general y durante el invierno, predominan los vientos de componente oeste en la península, mientras que durante el verano el flujo de procedencia marítima es más persistente, lo que para algunos autores constituye una señal del carácter altamente tropical (selva siempre verde) de la península, consecuencia de la configuración de ésta como un pequeño continente.

▪ Temporada de Nortes

Estación Climatológica Mérida

La Figura 172 representa la Rosa de los vientos para la estación climatológica de Mérida, con un registro total de 32,093 horas de proceso que comenzaron el 16/04/00 y terminaron el 29/12/2009.

El vector resultante de los vientos está orientado a los 37 grados con rumbo NE con un 51% de eventos hacia esta dirección. La predominancia de los vientos en esta estación es de Brisa Ligera con 4.68 m/s. El programa estableció que el halo máximo de frecuencia en los eventos es del 15% con intervalos de 3% cada uno, por lo tanto los eventos graficados no sobrepasan la cantidad límite.

Desde el punto de vista de la Escala de Beaufort, Figura 173, los vientos que más soplaron fueron las Brisas moderadas con un 35.2% de las veces y la Brisa Fresca con un 30.7% de las veces.

Solo un 6.7% se registró una Brisa Fuerte característica de los nortes en el Golfo de México y en el otro lado, un 14.8% de las veces hubo una Brisa Ligera, todos estos eventos por la temporada estuvieron combinados con humedad ambiental superior al 80%. Los vientos fuertes casi no se dieron (0.2%).

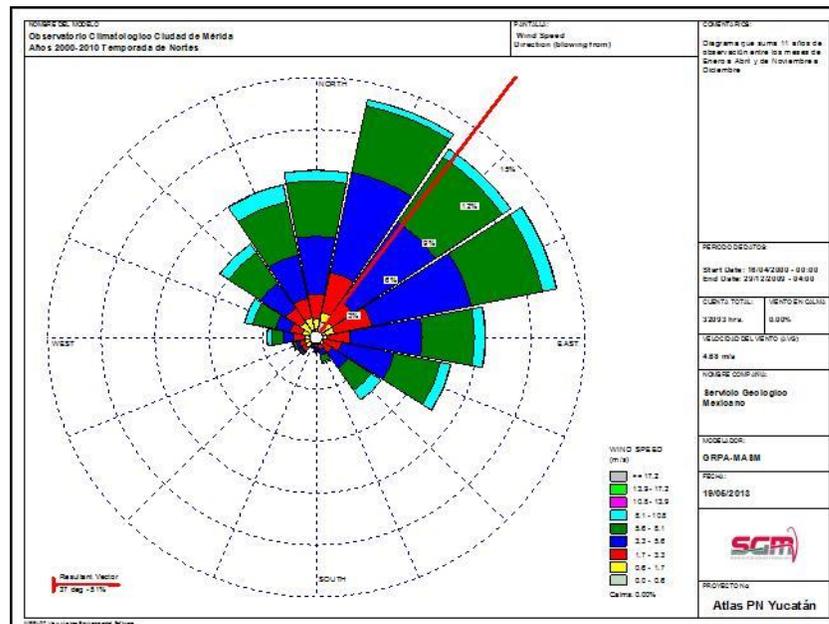


Figura 172. Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Mérida en la época de Nortes.

Los tres mayores eventos temporalmente ocurridos estuvieron en las direcciones NNE, ENE y NE con 14.2, 13.8 y 13 % respectivamente de frecuencia de dirección de flujo, es decir de donde sopló el mayor número de veces en estas direcciones. Le siguen comportamientos frecuentes similares para el Norte y Este franco con 9.2 % y una dirección al ONO con 9% de la frecuencia de las veces que se presentó el viento en dicha dirección. Podemos decir que el viento en esta temporada no se agrupa o tiende a soplar en una sola dirección, clasificándolo de errático. Esto a que los vientos del mar Caribe conservan un poco de calor y se da la posibilidad de tormentas tropicales en Febrero. También es

notoria la predominancia de los vientos alisios (del NNE, NE y ENE) contra un débil norte y norte –noroeste.

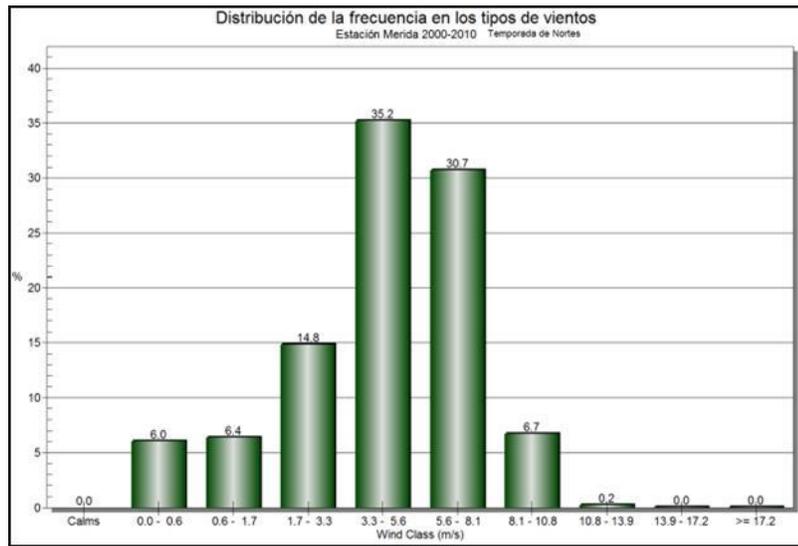


Figura 173. Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Mérida en época de Nortes.

Estación Climatológica Ría Celestún

La Figura 174 representa la Rosa de los vientos para la estación climatológica de la localidad de Ría Celestún, con un registro total de 31,989 horas de proceso que comenzaron el 01/11/00 y terminaron el 15/12/2011.

El vector resultante de los vientos está orientado a los 61 grados con rumbo NE con un 58% de eventos hacia esta dirección. La predominancia en la estación Ría Celestún es de 6.02 m/s correspondiendo a una Brisa Moderada. El programa estableció que el halo máximo de frecuencia en los eventos es del 20% con intervalos de 4% cada uno, por lo tanto los eventos graficados no sobrepasan la cantidad límite. Aquí se observa mayor número de frecuencia de eventos.

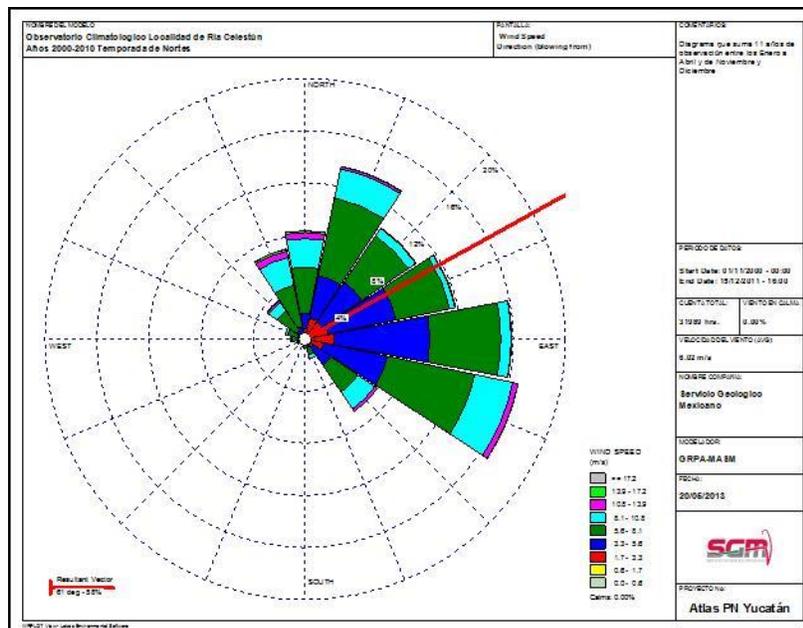


Figura 174. Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Ría Celestún en la época de Nortes.

El mayor evento tuvo un flujo en la dirección soplando desde el ESE con un 17% de las veces alimentado por una combinación de brisa ligera, moderada y fresca. El segundo flujo en frecuencia fue el que se registró soplando desde el E con un 15.9% igualmente una combinación de brisa ligera, moderada y fresca. El tercer evento en magnitud es el que sopla desde el NNE con un 13.5% de la veces por brisas moderadas.

A pesar de que la localidad de Ría Celestún está en la costa y de frente al Golfo de México, no recibe flujo importante de los nortes que azotan esta región y que derivan de ahí su nombre. Podemos decir que el viento en esta temporada en esta estación no se agrupa o sopla desde una sola dirección, clasificándolo de errático. Se sigue observando la predominancia de los vientos alisios (ENE, E y ESE). Sin embargo este flujo de los vientos, con esta dirección e intensidad, crea zonas de turbulencia a nivel superficie ya que las corrientes marinas soplan perpendiculares a la línea de costa. Aquí el viento tiende a alejar la línea de costa y es probable que los esteros tienda a quedarse sin agua o surjan más por la acción de la reducción en la línea de costa.

Desde el punto de vista de la Escala de Beaufort, Figura 175, los vientos que más soplaron fueron las Brisas Fresca con un 39% de las veces y la Brisa moderadas con un 30.5% de las veces.

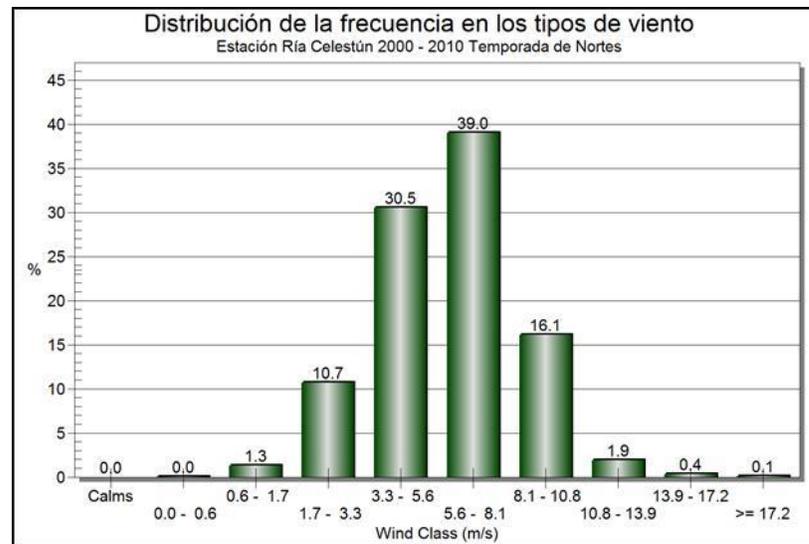


Figura 175. Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Ría Celestún en época de Nortes.

Solo un 16.1% se registró una Brisa Fuerte característica de los nortes en el Golfo de México y con mayor efecto en zonas costeras y en el otro lado, un 10.7% de las veces hubo una Brisa Ligera. Para estos dos tipos de vientos se dio un efecto inverso contra la estación meteorológica de Mérida. El efecto de humedad se potencializa por su cercanía al mar sobrepasando el 95%. Los vientos fuertes se dieron en un 1.9% y hubo registros de Temporal (viento duro) y Temporal fuerte (viento muy duro).

Estación Climatológica Río Lagartos

La Figura 176 representa la Rosa de los vientos para la estación climatológica de la localidad de Ría Lagartos, con un registro total de 26,766 horas de proceso que comenzaron el 19/04/00 y terminaron el 31/12/2009.

El vector resultante de los vientos está orientado a los 75 grados con rumbo NE con un 59% de eventos hacia esta dirección. La predominancia en la estación Ría Lagartos es de 6.80 m/s correspondiendo a una Brisa Moderada. El programa estableció que el halo máximo de frecuencia en los eventos es del 20% con intervalos de 4% cada uno, por lo tanto los eventos graficados no sobrepasan la cantidad límite. Aquí se observa un mayor número de frecuencia de eventos.

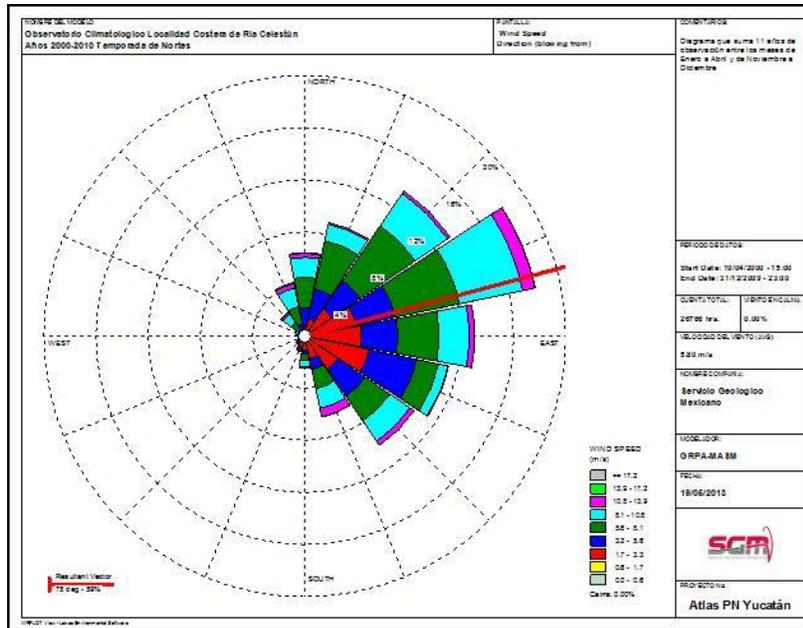


Figura 176. Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Ría Lagartos en la época de Nortes.

El mayor evento tuvo un flujo en la dirección soplando desde el ENE con un 18.5% de las veces alimentado por una combinación de las categorías de Brisa muy débil hasta Brisa fuerte, cabe señalar que con este mismo rumbo y como ya se mencionó se localiza el vector resultante para esta estación climatológica con componentes más de brisa ligera y moderada.

El segundo flujo en frecuencia fue el que se registró soplando desde el NE con un 13.5% igualmente una combinación de brisa ligera, moderada y fresca, pero con mayor énfasis la segunda. El tercer evento en magnitud es el que sopla desde el E con un 13% de las veces por partes iguales de las clasificaciones desde brisas muy débiles hasta Brisa fresca, el registro de brisa fuerte probablemente se deba a los episodios de temporal como tormentas tropicales que se resienten más en las líneas costeras.

Es notorio el comportamiento similar con la estación climatológica de Mérida en los pétalos que apuntan a los rumbos de ENE, E, SE y SSE en lo referente a intensidades y frecuencia de los vientos en Brisas Ligeras y Brisas Moderadas presumiendo el mismo origen de los vientos o al menos la entrada de estos a la Península denotando la predominancia de los vientos alisios del Mar Caribe.

Desde el punto de vista de la Escala de Beaufort, los vientos que más soplaron fueron la Brisas Moderada con un 27.9%, le sigue una Brisa muy débil con 22.7%, una Brisa Ligera con 21.2% y finalmente una brisa fresca con un 20%. Estas clasificaciones suman el 91.8% de los flujos de vientos. En esta estación se clasifica un 3.8 en brisa Fuerte, la más alta registrada de las estaciones meteorológicas (Figura 177).

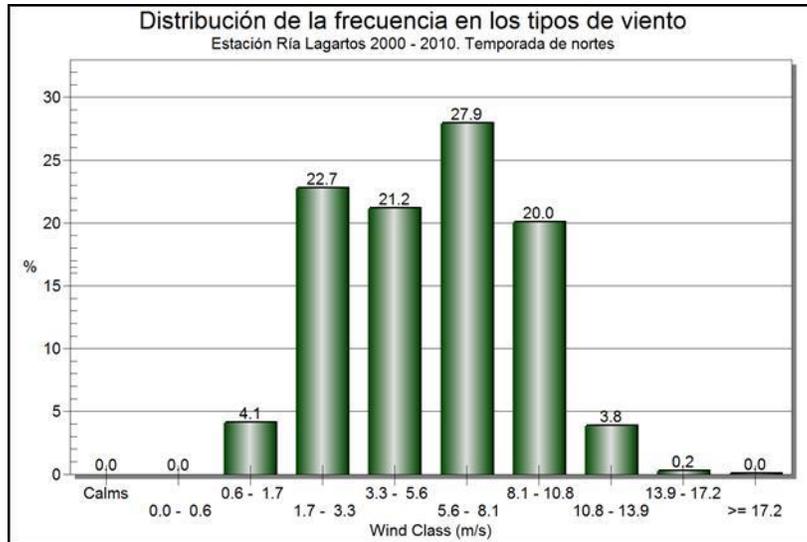


Figura 177. Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Ría Lagartos en época de Nortes.

Tanto el diagrama de pétalos como el de barras muestra un comportamiento más homogéneo en el flujo del viento y su distribución e igualmente se observa la predominancia de los vientos alisios del entre los 45° y 135° que son los que alimenta el Mar Caribe y su corriente oceánica.

Estación Climatológica Dzilam

La Figura 178 representa la Rosa de los vientos para la estación climatológica de la localidad de Dzilam de Bravo, con un registro total de 14,218 horas de proceso que comenzaron el 02/04/08 y terminaron el 15/12/2011.

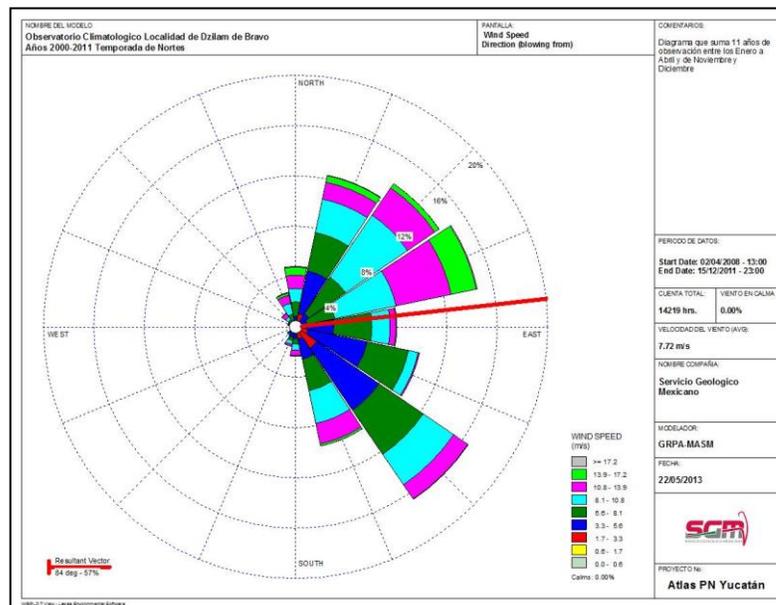


Figura 178. Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Dzilam tos en la época de Nortes.

El vector resultante de los vientos está orientado a los 84 grados con rumbo NE con un 57% de eventos hacia esta dirección. La predominancia en la estación Dzilam es de 7.72 m/s correspondiendo a una Brisa Moderada. El programa estableció que el halo máximo de frecuencia en los eventos es del 20% con intervalos de 4% cada uno, por lo tanto los eventos graficados no sobrepasan la cantidad límite. Aquí se observa un mayor número de frecuencia de eventos.

El mayor evento tuvo un flujo en la dirección soplando desde el rumbo lateral SE con un 17% de las veces alimentado por una combinación de las categorías de Brisa Ligera y Brisa Moderada principalmente. La entrada en esta dirección se puede atribuir a los vientos que se vienen desde el Mar Caribe perpendiculares a este rumbo y que rompen en la costa de Quintana Roo donde rompen arriba de la Bahía del Espíritu Santo y orientados por factores como el cambio en el relieve y la temperatura del mismo (la temperatura de la superficie del Mar Caribe es más estable que la del Golfo de México en época invernal), este fenómeno tiende a ocurrir en los tres primeros meses del cada año don de los vientos que viajan por el Atlántico y que conducen los nortes llegan al mar caribe y se va presentando conforme se acerca la primavera y las aguas tienden a ser más cálidas.

Los tres siguientes eventos muy similares en intensidad soplan con el rumbo lateral de NE y los colaterales de ENE y NNE con intensidades de 15%, 14% y 12.5% respectivamente. Estas direcciones de flujo están muy bien correlacionadas con la entrada de vientos invernales que tienden a 4 a 8 cm/s en las costas de Yucatán y que son alimentados por los frentes fríos que rompen en el litoral. Sin embargo sigue siendo viento de origen marítimo tropical de fuerte intensidad que puede llegar a los Vientos Fuertes con la consecuencia de las restricciones a la navegación. En estos tres casos la constante es la Brisa Fresca e impulsada por Brisa Fuerte.

Desde el punto de vista de la Escala de Beaufort, los vientos que más soplaron fueron las Brisas Moderada con un 25.0%, le sigue una Brisa Fresca con 24.6%, una Brisa Ligera con 22.6% y finalmente una Brisa Fuerte con un 14.8%. Se presentan remanentes para Brisa Muy Débil y Viento Fuerte con 4.3% (Figura 179). Estas clasificaciones suman el 99% de los flujos de vientos. Cabe mencionar que esta estación recibe el mayor aporte de Viento Fuerte del Mar Caribe de todas las estaciones analizadas de la costa de Yucatán.

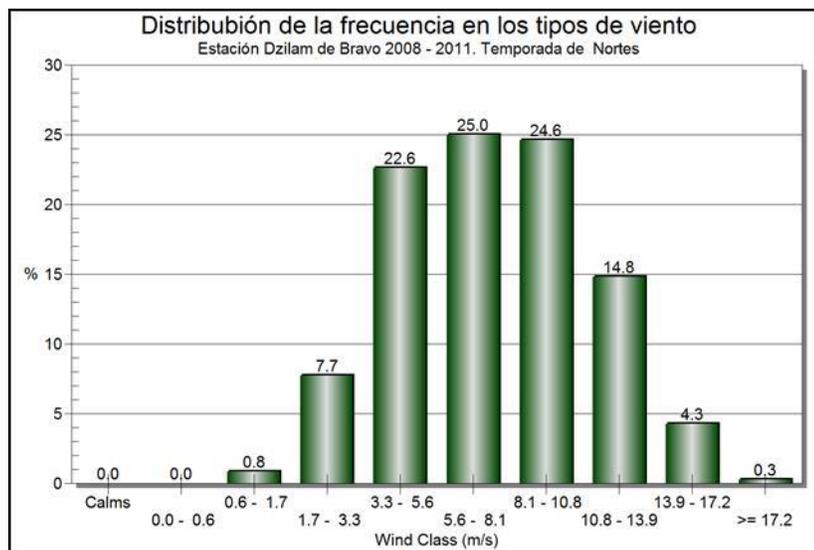


Figura 179. Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Dzilam en época de Nortes.

Estación Climatológica Oxkutzcab

La Figura 180 representa la Rosa de los vientos para la estación climatológica de la localidad de Oxkutzcab, con un registro total de 8,990 horas de proceso que comenzaron el 02/04/08 y terminaron el 08/12/2010.

El vector resultante de los vientos está orientado a los 96 grados con rumbo SE con un 30% de eventos hacia esta dirección. La predominancia en la estación Oxkutzcab es de 3.61 m/s correspondiendo a una Brisa Débil.

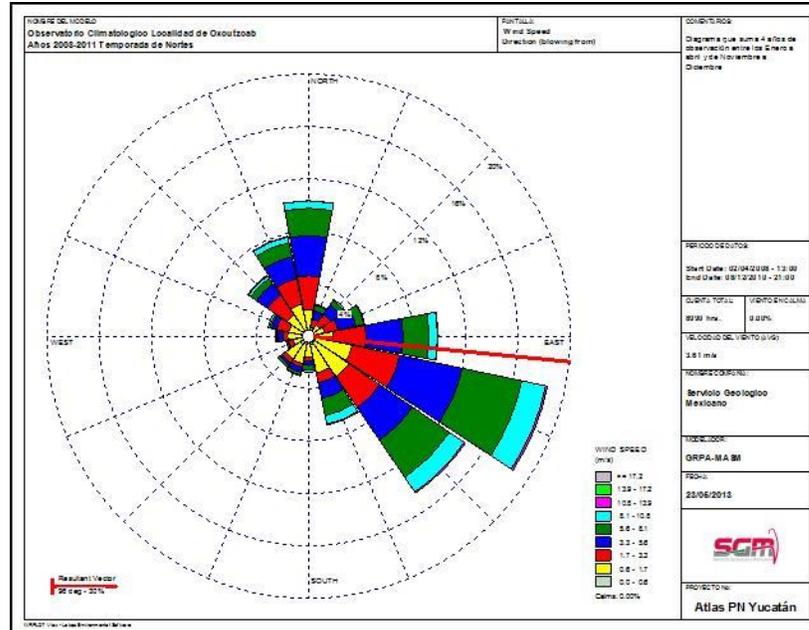


Figura 180. Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Oxkutzcab en la época de Nortes.

El programa estableció que el halo máximo de frecuencia en los eventos es del 20% con intervalos de 4% cada uno, por lo tanto los eventos graficados no sobrepasan la cantidad límite. Aquí se observa un mayor número de frecuencia de eventos.

Una característica que tiene la estación climatológica de Oxkutzcab y de Tantakin es que están en la ladera de la Sierra de Ticul, por lo tanto, los vientos que entran en el litoral de Yucatán y en el de Q. Roo tienden a seguir el rumbo lateral SE-NO que se puede apreciar en la gráfica anterior.

La mayor intensidad tiene un flujo colateral desde el SEE de un 18.5% de la frecuencia de los eventos registrados, impulsado por vientos en la misma proporción desde la Brisa Muy Débil hasta la Brisa Fresca y en segundo lugar con un 14.5% en un rumbo lateral SE, este pétalo señala una reducción en la Brisa Ligera. Ambos pueden ser catalogados vientos alisios que ingresan desde los litorales del Mar Caribe.

Los siguientes en intensidad e igualmente correlacionados con los vientos alisios es el rumbo lateral SE con un 14% de las veces impulsado por una combinación de vientos marcados desde las calmas hasta las Brisas Frescas.

Existen aportes directos desde el N franco superiores al 10% de las veces al igual que el que sopló en la dirección E franco.

Desde el punto de vista de la Escala de Beaufort, los vientos que más soplaron fueron la Ventolina (Aire Ligero), con un 24.0%, esto se llama la atención que siempre existe en Oxkutzcab viento que circulando no importando la dirección pero de baja intensidad, se podría presumir que son corrientes encerradas que chocan con los accidentes orográficos y por lo tanto siempre hay presencia de viento; le sigue una Brisa Débiles y Flojas con 22.4%, una Brisa Muy Débil con 21.3% y finalmente una Brisa Moderada con un 17.7%. Se presentan remanentes para Brisa Fresca y Calma con 6.4% y 7.6% respectivamente.

Estas clasificaciones suman el 99% de los flujos de vientos (Figura 181). Cabe mencionar que esta estación recibe el mayor aporte de Viento Fuerte del Mar Caribe entrando por la vertiente del litoral de Q. Roo y de todas las estaciones analizadas de la costa de Yucatán.

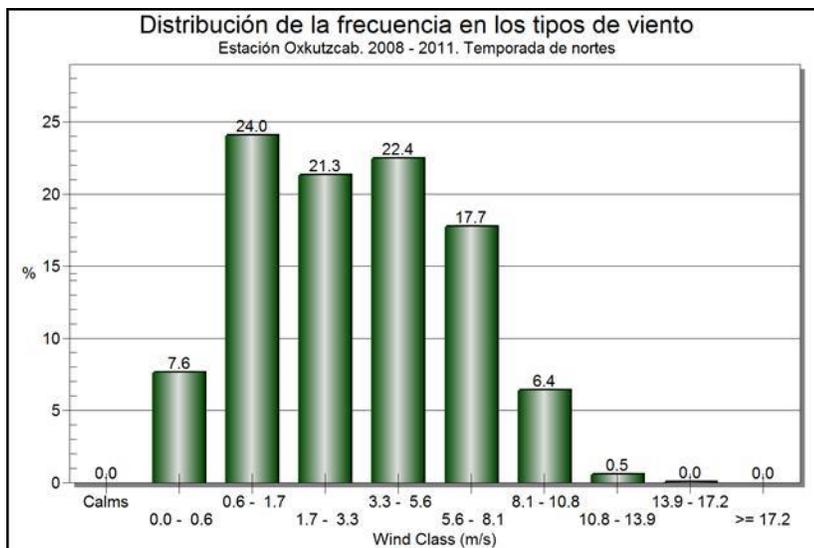


Figura 181. Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Oxkutzcab en época de Nortes.

Estación Climatológica Tantakin

La Figura 182 representa la Rosa de los vientos para la estación climatológica de la localidad de Tantakin, con un registro total de 13,971 horas de proceso que comenzaron el 04/02/2003 y terminaron el 11/11/2009.

El vector resultante de los vientos está orientado a los 85 grados con rumbo NE girando hacia el rumbo colateral NEE con un 35% de eventos hacia esta dirección. La predominancia en la estación Tantakin es de un registro de 4.86 m/s correspondiendo a una Brisa Débil. El programa estableció que el halo máximo de frecuencia en los eventos es del 25% (probablemente a la dispersión en la dirección de los vientos) con intervalos de 5% cada uno, por lo tanto los eventos graficados no sobrepasan la cantidad límite. Aquí se observa un diversos eventos en distribuidos a lo largo de la figura radial indicando con ello el aporte y concurrencia de flujos de direcciones diversas.

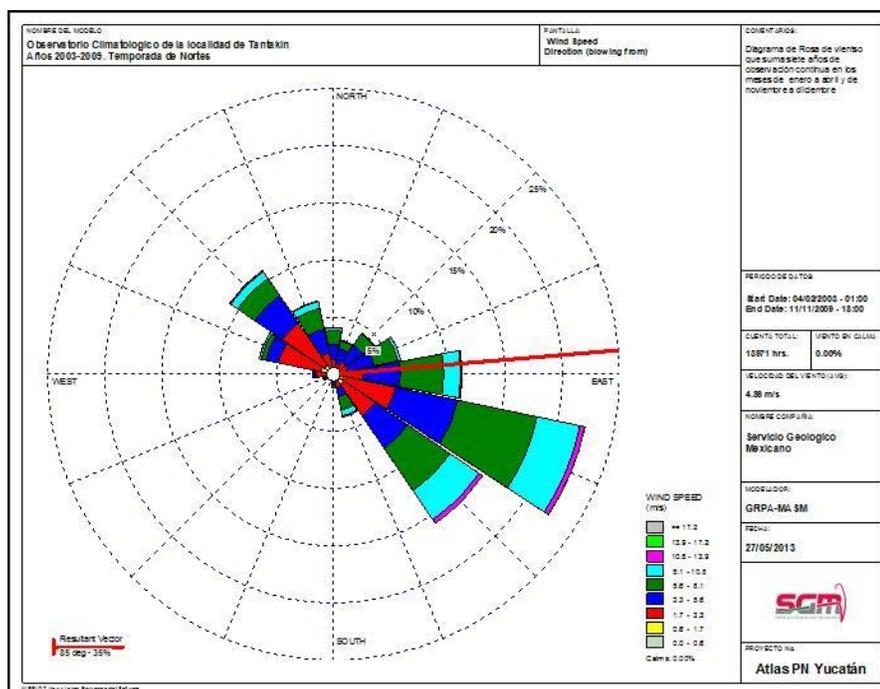


Figura 182. Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Tantakin en la época de Nortes.

Una característica que tiene la estación climatológica de Oxkutzcab y de Tantakin, como se mencionó, es que están en la ladera de la Sierra de Ticul, por lo tanto, los vientos que entran en el litoral de Yucatán y en el de Q. Roo tienden a seguir el rumbo lateral SE-NO que se puede apreciar en la gráfica anterior, sin embargo en esta estación que se localiza debajo de la estación climatológica de Oxkutzcab es más evidente el fenómeno, tal vez por estar más al NO donde empieza la Sierra y por lo tanto también el ingreso de humedad, que en la selva tropical el promedio es de 85%.

El mayor registro se ilustra en el pétalo que tiene un rumbo colateral de SEE con un 22% de las veces que se sopla en esta dirección, con una combinación en intensidad de Brisa Débil a Brisa Fresca. Cabe destacar que en esta rosa se ilustra muy bien para la temporada de nortes la correlación entre los vientos que soplan desde, principalmente desde el SEE o el SE hasta el NO y que lleva la misma dirección de la Sierra de Ticul, ya que la evidencia indica que no se registran vientos que soplen desde el SO pero si del NE. Lo anterior hace suponer pero no corroborado que arriba de la sierra en este rumbo existe viento conducente y probablemente la formación de lluvias locales.

Desde el punto de vista de la Escala de Beaufort, Figura 183, los vientos que más soplaron fue la Brisa Débil y Floja, con un 27.0%, le sigue una Brisa Moderada con 26.3%, y una Brisa Muy Débil con 25.7%. Se presentan remanentes para Brisa Fresca y Calma con 11.1% y 8.7% respectivamente. Estas clasificaciones suman el 99% de los flujos de vientos. Cabe mencionar que esta estación recibe el mayor aporte de Viento Fuerte del Mar Caribe entrando por la vertiente del litoral de Q. Roo y de todas las estaciones analizadas de la costa de Yucatán.

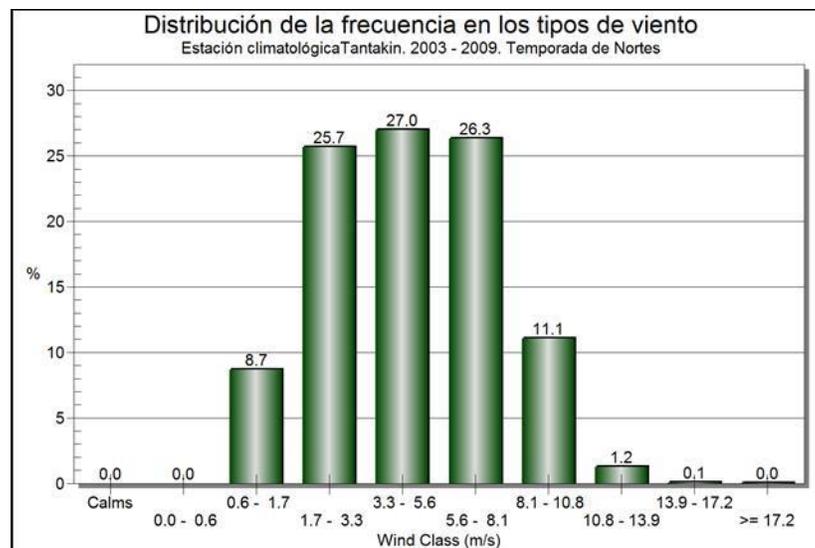


Figura 183. Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Tantakin en época de Nortes.

En resumen, para este apartado y como se aprecia en las Figuras 184 y 185; en la primera figura se agruparon la dirección de donde soplaron los vientos y poder ilustrar la predominancia de los vientos alisios a pesar de la estacionalidad de los nortes y que a pesar de ello se pueden observar con un valor cercano al 8%.

En la segunda es donde se ilustran espacialmente el comportamiento del viento y como se distribuyen los pétalos para la temporada de nortes (abarcado desde enero a abril y en noviembre a diciembre) podemos afirmar que es más disperso y variadas la corrientes apreciándose puntos de dirección desde el Norte (atribuido a los frentes fríos invernales) y la acción siempre local de los vientos alisios pero con menor fuerza que entran por el litoral de Q. Roo. Igual es notoria la acción de los vientos perpendiculares a la línea de costa donde existen efectos por cambios de relieve continental que influyen en la dirección

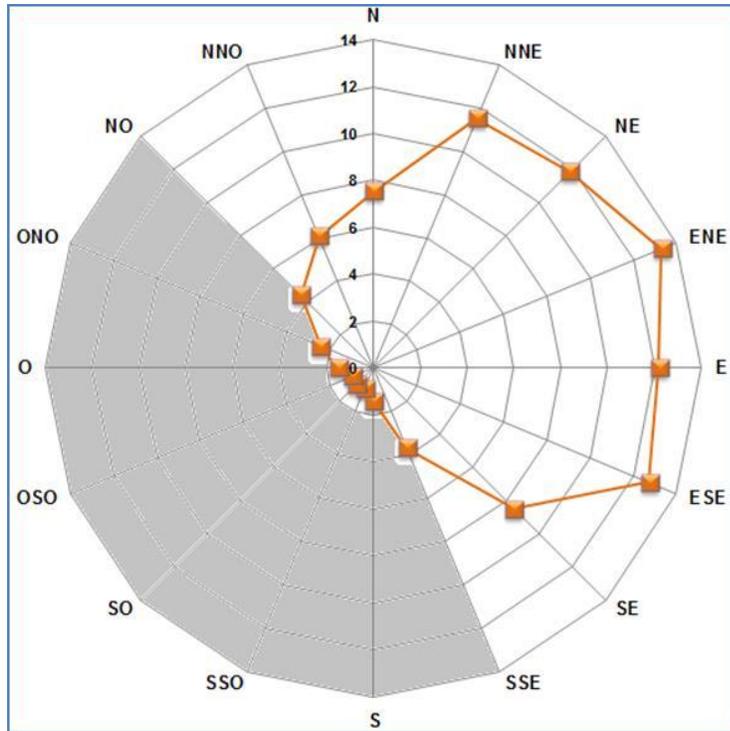


Figura 184. Diagrama de dispersión que ilustra las frecuencias de las direcciones de vientos, la zona gris indica los rumbos de donde el soplo del viento no es relevante y que está por debajo de los 75% del valor.

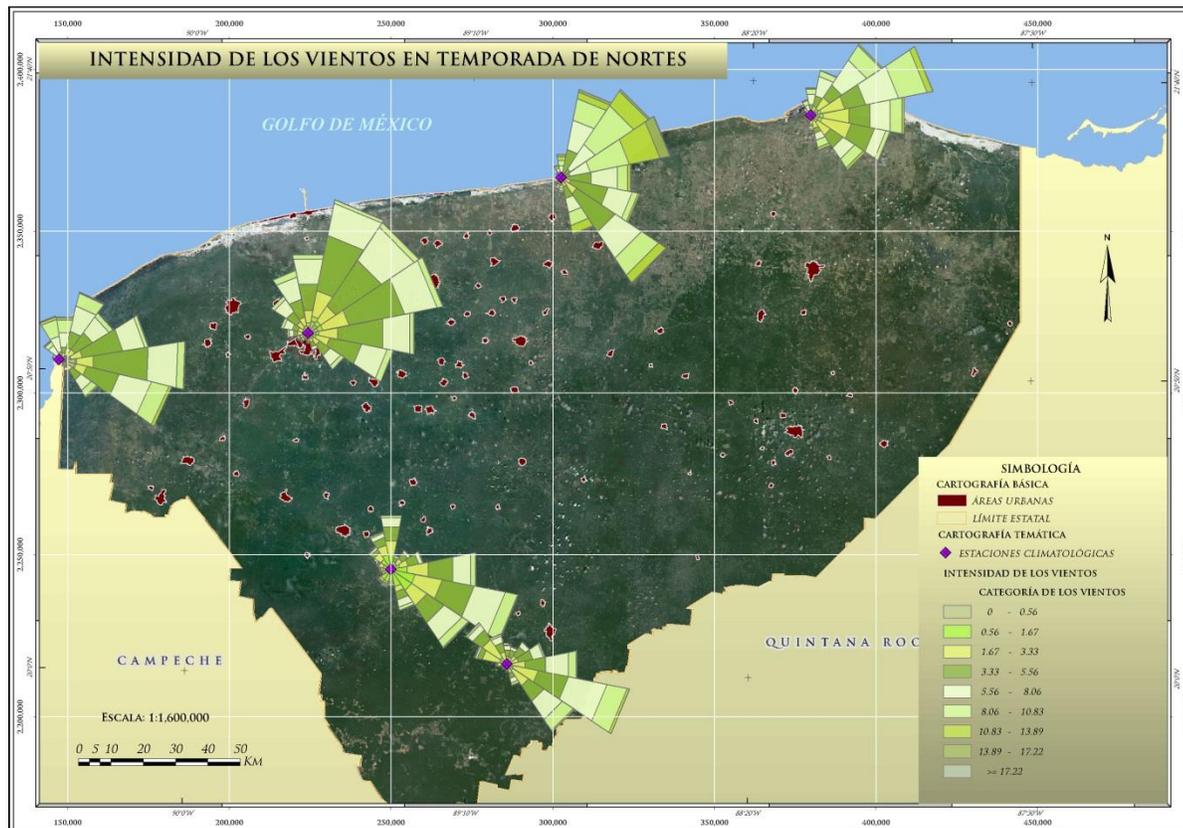


Figura 185. Mapa que integra las seis estaciones climatológicas para la temporada de nortes y donde se aprecia espacialmente el comportamiento de los pétalos de cada rosa de los vientos.

▪ Temporada de Ciclones

Estación Climatológica Mérida

La Figura 186 representa la Rosa de los vientos para la estación climatológica de la ciudad de Mérida, con un registro total de 36,329 horas de proceso que comenzaron el 01/06/00 y terminaron el 31/10/2009.

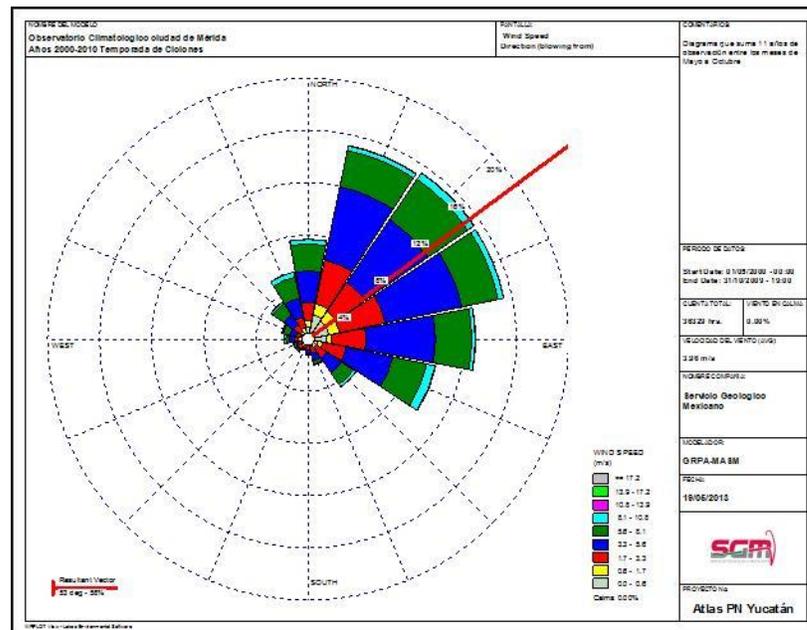


Figura 186. Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Mérida en la época de Ciclones.

El vector resultante de los vientos está orientado a los 53 grados con rumbo NE con un 58% de eventos hacia esta dirección. La predominancia en la estación de Mérida es de 3.96 m/s correspondiendo a una Brisa Ligera o Débil. El programa estableció que el halo máximo de frecuencia en los eventos es del 20% con intervalos de 4% cada uno, por lo tanto los eventos graficados no sobrepasan la cantidad límite. Aquí se observa un mayor número de frecuencia de eventos.

Como la temporada de calor y por ello la de eventos ciclónicos en el Mar del Caribe inyecta vientos alisios con mayor estabilidad que no son influenciados por islas frías atmosféricas y ello se refleja en un diagrama de pétalos con distribución estable desde el NNE al ENE.

Se registraron tres flujos que provienen de estas direcciones (NNE, NE y ENE) con la misma intensidad y dirección y que suman cerca del 45% de las veces que el viento soplo de estas direcciones. Igualmente se registró una similitud en los vientos que soplan en N y E franco, dando la suma de ellos un valor cercano al 23%. En resumen el cuadrante del rumbo N – E suma un valor que sobrepasa al 75% de los eventos que soplan desde estas direcciones.

Desde el punto de vista de la Escala de Beaufort, los vientos que más soplaron fueron la Brisas Ligeras con un 35.0%, le sigue una Brisa Moderada con 22%, y en tercer lugar una Brisa Muy Débil. Estas clasificaciones suman el 77.3% de los flujos de vientos. En esta estación se clasifica un 3.8 en brisa Fuerte, la más alta registrada de las estaciones meteorológicas. El diagrama comienza con un valor de 11.7% de frecuencia en vientos que soplaron con una intensidad de Calma, que es característico de las ITCZ en las épocas más intensas de calor (Figura 187).

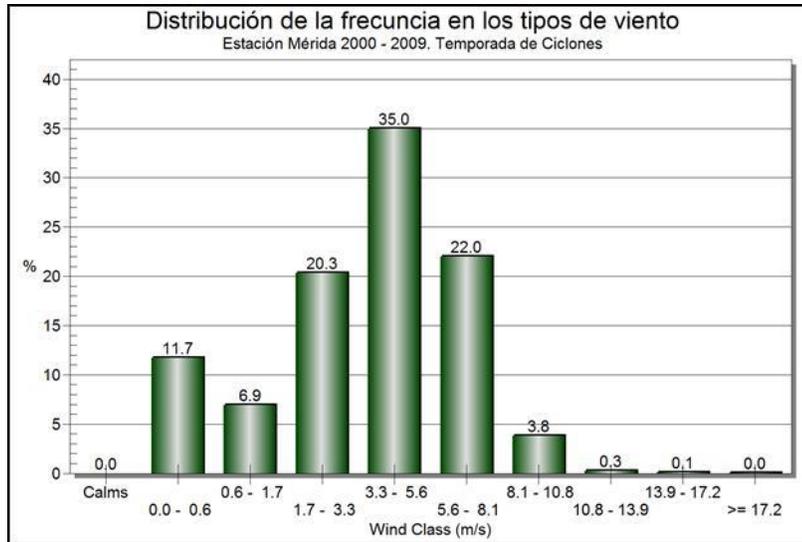


Figura 187. Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Mérida en época de Ciclones.

Estación Climatológica Ría Celestún

La Figura 188 representa la Rosa de los vientos para la estación climatológica de la población de Ría Celestún, con un registro total de 33,852 horas de proceso que comenzaron el 01/05/00 y terminaron el 31/10/2011.

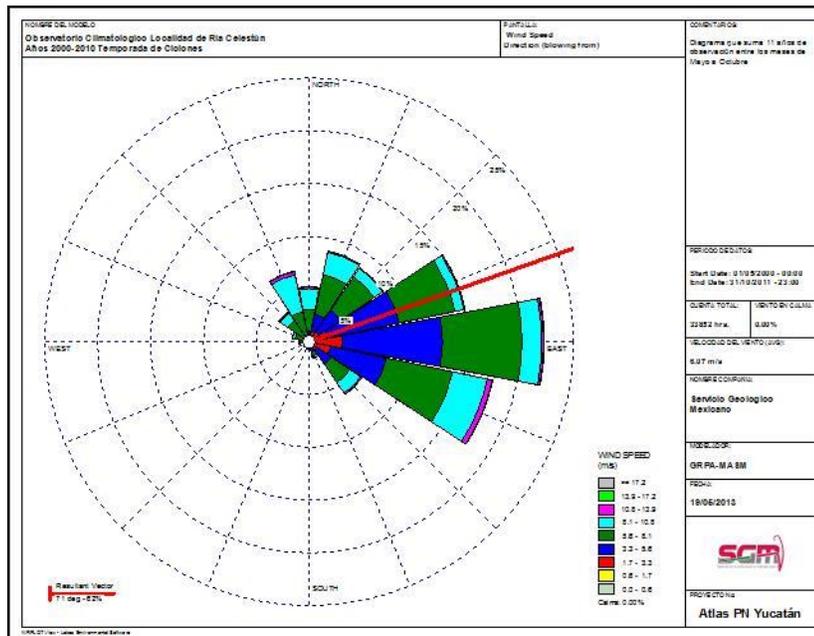


Figura 188. Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Ría Celestún en la época de Ciclones.

El vector resultante de los vientos está orientado a los 71 grados con rumbo NE con un 58% de eventos hacia esta dirección, más específico hacia ENE. La predominancia promedio en la estación de Ría Celestún es de 6.07 m/s correspondiendo a una Brisa Moderada. El programa estableció que el halo máximo de frecuencia en los eventos es del 25% con intervalos de 5% cada uno, por lo tanto los eventos graficados no sobrepasan la cantidad límite. Aquí se observa todavía un mayor número de frecuencia de eventos agrupados y menor dispersión. Se dibuja una mayor dirección de flujo con una apertura de apenas 45°.

El régimen climático que predomina en la temporada ciclónica tiende a inyectar calor principalmente de la corriente Atlántica del Caribe, pero la acción convectiva por la generación de vapor en el mar convierte a los vientos alisios en corrientes inestables, sin embargo al entrar a tierra desde la costa de Q. Roo con una vegetación homogénea en altura y cobertura sin topografía complicada arroja estabilidad a los vientos registrados en la costa del Golfo de México.

El principal flujo sopla desde la dirección del E franco en un 22% de las veces que se registró con Brisas Débil y Brisas Moderadas principalmente y el segundo evento en frecuencia de veces desde donde sopló el viento fue el rumbo colateral ESE con un 17.5% impulsado por brisas moderadas y el tercer evento lo registro en el rumbo colateral ENE con un 15% de las veces en la frecuencia impulsado por las Brisas Moderadas. El rumbo lateral NE y el colateral NNE con valores similares de 8.5% cada uno fueron impulsados por Brisas ligeras.

Estos cinco eventos agrupan un 71.5% de los eventos desde donde sopla el viento las veces abriéndose una amplia la brecha desde 22.25° hasta los 112.5° que corresponde por predominancia a los vientos alisios.

Desde el punto de vista de la Escala de Beaufort, los vientos que más soplaron fueron la Brisas Moderada con un 37.5%, le sigue una Brisa Débil con 30.7%, una Brisa Fresca con 17.6% y finalmente una Brisa muy Débil con un 10.9%. Estas clasificaciones suman el 97% de los flujos de vientos y observándose que existe en la gráfica un comportamiento normal descrito estadísticamente (Figura 189).

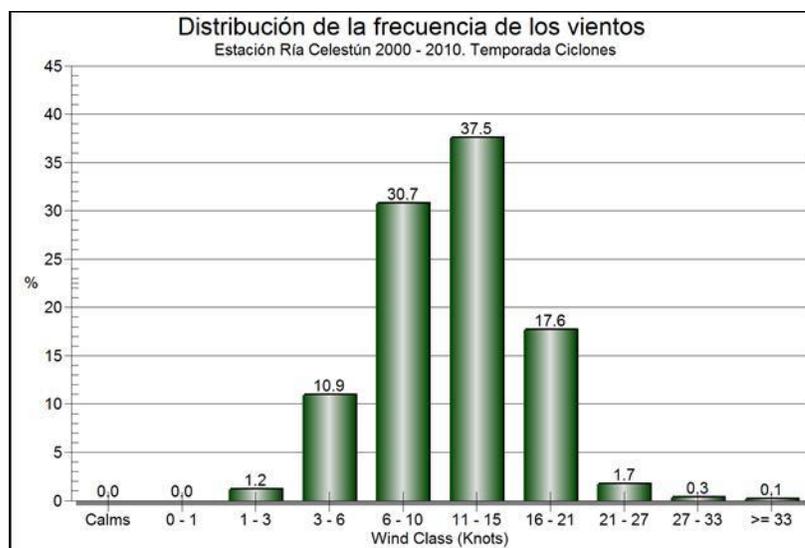


Figura 189. Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Ría Celestún en época de Ciclones.

Tanto el diagrama de pétalos como el de barras muestra un comportamiento homogéneo en el flujo del viento y su distribución e igualmente se observa la predominancia de los vientos alisios del entre los 67.5° y 112.5°.

Estación Climatológica Ría Lagartos

La Figura 190 representa la Rosa de los vientos para la estación climatológica de la población de Ría Lagartos, con un registro total de 24,392 horas de proceso que comenzaron el 01/05/00 y terminaron el 31/10/11.

El vector resultante de los vientos está orientado a los 71 grados con rumbo NE con un 84% de eventos hacia esta dirección, más específico hacia el E franco. La predominancia promedio en la estación de Ría Celestún es de 5.28 m/s correspondiendo a una Brisa Débil.

El programa estableció que el halo máximo de frecuencia en los eventos es del 25% con intervalos de 5% cada uno, por lo tanto los eventos graficados no sobrepasan la cantidad límite.

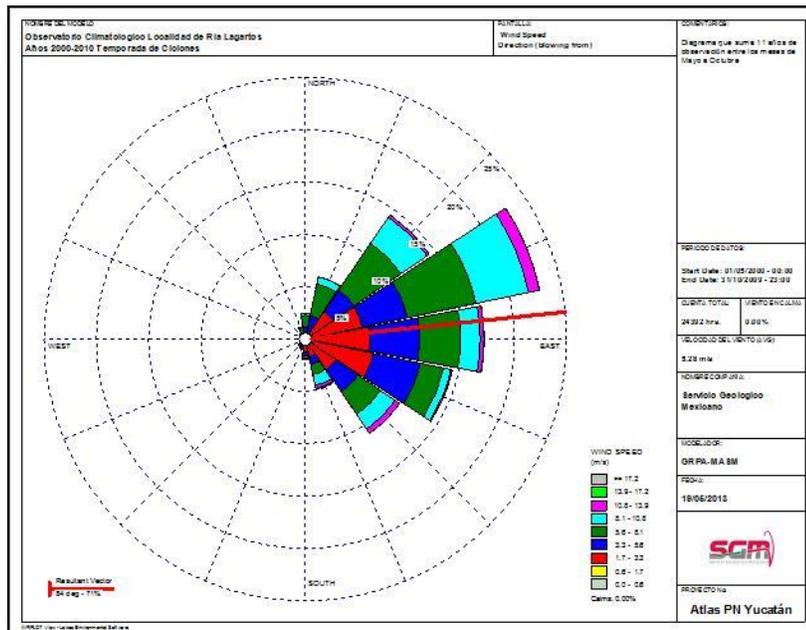


Figura 190. Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Ría Lagartos en la época de Ciclones.

La inyección de calor que aportan las corrientes oceánicas marinas y aéreas contrastan al tocar la línea de costa por el cambio de temperatura derivado del relieve continental, los sistemas de irradiación de calor en mar son menos efectivos que los de tierra proporcionando en este medio, mayor estabilidad y fuerza a los vientos.

La mayor intensidad provino del rumbo colateral ENE con 23% de las veces ha desde esa dirección impulsado en primera por Brisas Moderadas y en Segundo por Brisas Ligeras. La segunda mayor intensidad se dio al E franco con 18% de las veces y le siguen en la mismo porcentaje de la veces pero no en intensidad los el rumbo colateral ESE y el lateral NE, ambos con 14.5%.

Resalta que para los rumbos ENE, E y ESE se tiene registrada la misma intensidad de Brisas Ligera, lo cual indica que gran parte del tiempo que se registra el fenómeno este viento solo varia la dirección pero no la intensidad y con ello es constante el arrastre de los vientos de los meteoros en el Mar Caribe. Otro viento constante en estos tres rumbos son las brisas muy débiles, por lo tanto se observa que se produce inestabilidad cuando se escala la intensidad de los Brisas a la categoría de Brisa Fresca y Brisa Fuerte, cercana a los 50 Km/h.

Desde el punto de vista de la Escala de Beaufort, los vientos que más soplaron fueron la Brisas Moderada con un 27.4%, le sigue una Brisa Muy Débil con 26.1%, una Brisa Ligera con 22.9% y finalmente una Fresca con un 14.7%. Estas clasificaciones suman el 91.1% de los flujos de vientos y observándose que existe en la gráfica un comportamiento similar en intensidad de frecuencia en los tres primeros descritos estadísticamente (Figura 191).

Tanto el diagrama de pétalos como el de barras muestra un comportamiento homogéneo en el flujo del viento y su distribución e igualmente se observa la predominancia de los vientos alisios del entre los 67.5° y 112.5°.

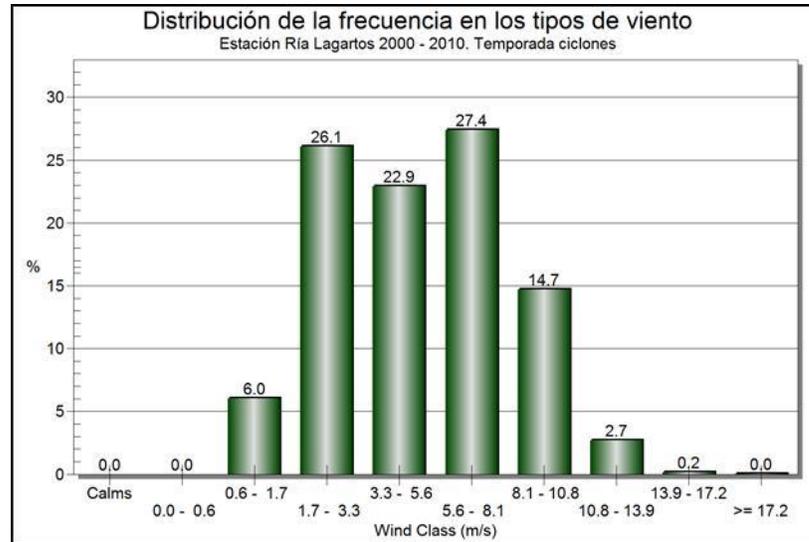


Figura 191. Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Ría Lagartos en época de Ciclones.

Estación Climatológica Dzilam

La Figura 192 representa la Rosa de los vientos para la estación climatológica de la población de Dzilam de Bravo, en temporada de Ciclones, con un registro total de 16,499 horas de proceso que comenzaron el 01/05/08 y terminaron el 31/10/11.

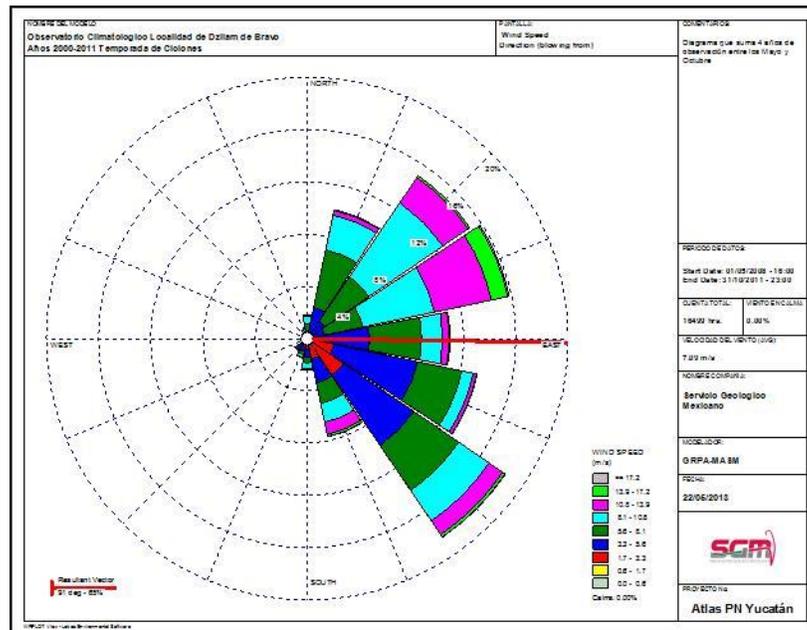


Figura 192. Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Dzilam tos en la época de Ciclones.

El vector resultante de los vientos está orientado a los 91 grados con rumbo NE con un 65% de eventos hacia esta dirección, más específico hacia el E franco. La predominancia promedio en la estación de Dzilam de Bravo es de 7.09 m/s correspondiendo a una Brisa Moderada. El programa estableció que el halo máximo de frecuencia en los eventos es del 20% con intervalos de 5% cada uno, por lo tanto los eventos graficados no sobrepasan la cantidad límite, son eventos más agrupados y de menor dispersión hacia un sentido del flujo del viento, el cual se puede registrar como alisios.

El principal flujo se da al SE con un 18.5% de las veces, con un fuerte segmento en Brisa Ligera, se le suma una Brisa Moderada e incluye dos fragmentos de Brisa Fresca y Brisa Fuerte y un leve registro de viento fuerte y viento duro. Este fenómeno también se registra en el rumbo colateral ENE y lateral NE con intensidades de 16 y 15% respectivamente, donde ya se dan evidencias mayores de Brisa Fuerte, Viento Fuerte y Viento Duro.

Para el cuadrante N-E y desde el mes de mayo, los vientos de mar tienden a seguir esta dirección a tierra con intensidades que pueden incluir temporales y paso de Tormentas Tropicales; conforme se va calentando la superficie del mar hacia el mes de septiembre y la actividad de la Celda de Hadley de incrementa sumado a la acción de la ITCZ, los vientos se registraran en el cuadrante SE.

Esta variación de los vientos se registra mejor en las estaciones climatológicas del litoral ya que ahí el viento solo es conducido por la acción convectiva del calor del mar y la rotación del planeta son la acción de la orografía. Este segundo cuadrante (SE) en los meses más calurosos justifica el porqué de las trayectorias de las Tormentas Tropicales y de los Ciclones arrastrando intensas lluvias, lo cual es recomendable monitorearlo.

Desde el punto de vista de la Escala de Beaufort, los vientos que más soplaron fueron las Brisas Moderada con un 26.8%, le sigue una Brisa Ligera con 25.8%, una Brisa Fresca con 23.7% y finalmente una frecuencia muy similar entre la Brisa Muy Débil y la Brisa Fuerte, estas con un 10.1% y 10.5% respectivamente. Es notorio que ya se dan en esta estación valores para Viento Fuerte y Viento Duro (Figura 193).

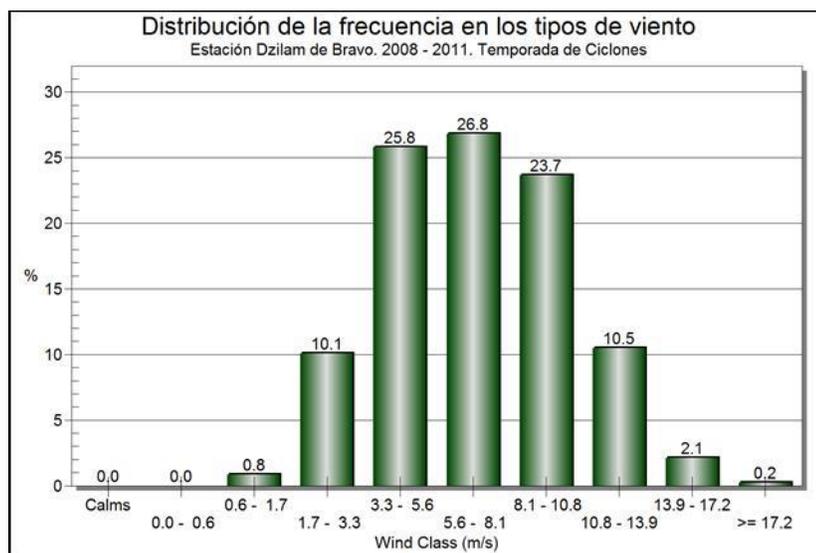


Figura 193. Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Dzilam en época de Ciclones.

Esto último, muy probablemente atribuido a los registros de los eventos climatológicos de tormentas y ciclones tropicales o al menos, a algunos temporales empujados por las corrientes del Mar Caribe y vientos alisios y que son alimentados por las aguas cálidas y que a su vez generan grandes masas de vapor que llega a los litorales y que se mueven de norte a sur desde mayo hasta octubre.

Estación Climatológica Oxkutzcab

La Figura 194 representa la Rosa de los vientos para la estación climatológica de la localidad de Oxkutzcab, con un registro total de 11,043 horas de proceso que comenzaron el 01/05/2008 y terminaron el 31/12/2010.

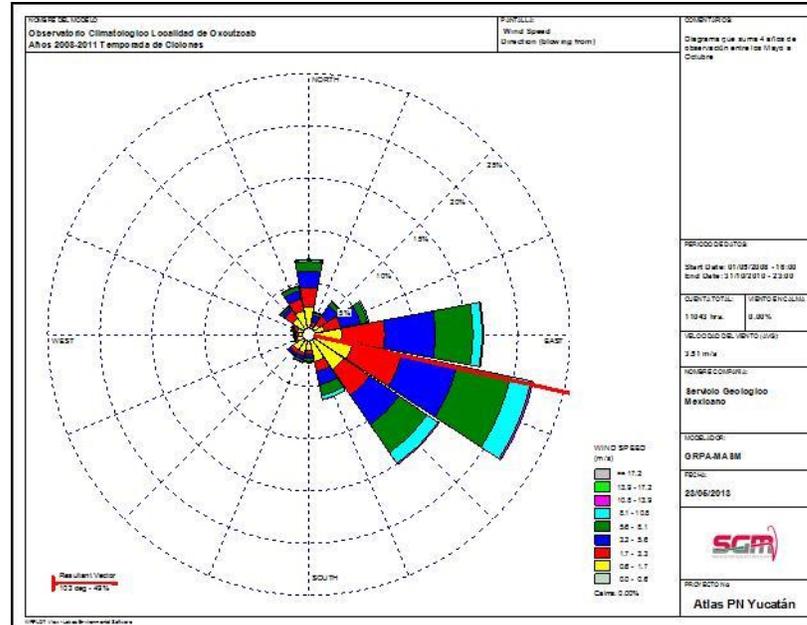


Figura 194. Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Oxkutzcab en la época de Ciclones.

El vector resultante de los vientos está orientado a los 103 grados con rumbo SE con un 49% de eventos hacia esta dirección, más específico hacia el rumbo colateral ESE. La predominancia en velocidad del viento promedio en la estación de Oxkutzcab es de 3.51 m/s correspondiendo a una Brisa Débil. El programa estableció que el halo máximo de frecuencia en los eventos es del 25% con intervalos de 5% cada uno, por lo tanto los eventos graficados no sobrepasan la cantidad límite.

Las condiciones de trayectoria del viento como se ha estado describiendo para las estaciones anteriores en la temporada de ciclones ejemplifica una mejor agrupación y comportamiento de los vientos ya que se evidencia la inyección de calor que aportan las corrientes oceánicas marinas y aéreas del Mar Caribe y que contrastan al tocar la línea de costa por el cambio de temperatura derivado del relieve continental, los sistemas de irradiación de calor en mar son menos efectivos que los de tierra proporcionando en este medio, mayor estabilidad y fuerza a los vientos.

La peculiaridad de esta estación y de la de Tantakin es que la Sierra de Ticul sirve como medio condicionante sobre la trayectoria de los vientos.

Desde el punto de vista de la Escala de Beaufort, los vientos que más soplaron fueron la Ventolina con un 26.0%, le sigue una Brisa Débil con 22.8%, una Brisa Muy Débil con 21.4% y finalmente una Brisa Moderada. Como es una estación tierra adentro es poca o casi nula la evidencia de vientos más intensos (Figura 195).

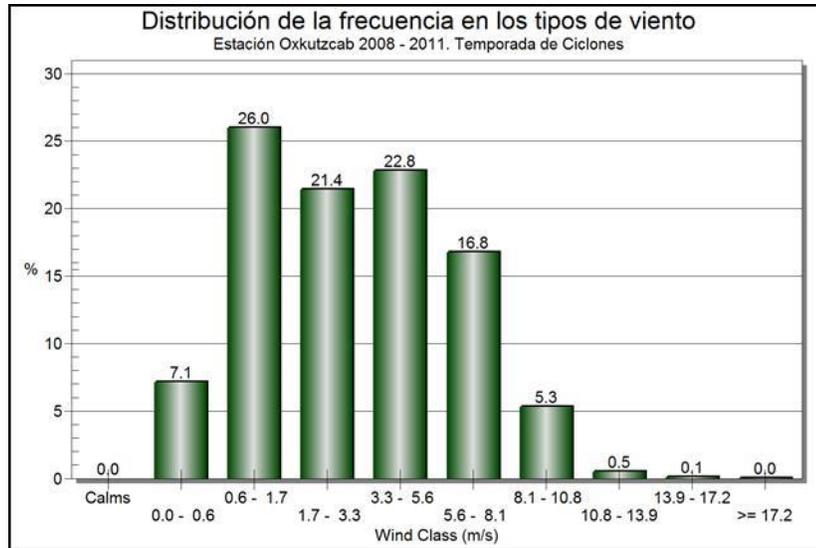


Figura 195. Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Oxkutzcab en época de Nortes.

Esto último, y sumado a que en la región de Oxkutzcab por la vegetación circundante y la alta humedad, el efecto del calor es más intenso y por lo tanto la radiación de este hacia la atmosfera dispersa la entrada de vientos o al menos degrada la intensidad quedando en Brisas Débiles.

Otro fenómeno que se da en temporada de ciclones es la absorción de calor que provoca micro climas derivando las corrientes del Mar Caribe.

Estación Climatológica Tantakin

La Figura 196 representa la Rosa de los vientos para la estación climatológica de la localidad de Tantakin, con un registro total de 14,703 horas de proceso que comenzaron el 01/05/2003 y terminaron el 07/019/2009.

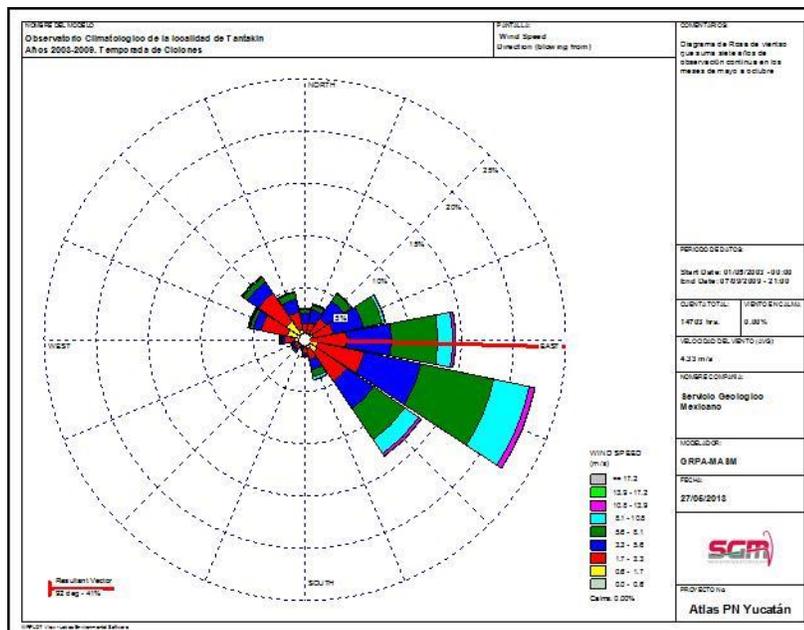


Figura 196. Modelo de comportamiento de los vientos para la estación climatológica de Tantakin en la época de Ciclones.

El vector resultante de los vientos está orientado a los 92 grados con rumbo E franco con un 41% de eventos hacia esta dirección. La predominancia en la estación de Mérida es de 4.33 m/s correspondiendo a una Brisa Débil o Floja. El programa estableció que el halo máximo de frecuencia en los eventos es del 25% con intervalos de 5% cada uno, por lo tanto los eventos graficados no sobrepasan la cantidad límite. Aquí se observa un mayor número de frecuencia de eventos que en general se comportan muy agrupados y bien definidos los pétalos con mayor intensidad.

El pétalo con mayor intensidad es el que y como ya se ha mencionado, sigue en paralelo a la Sierra de Ticul. El rumbo colateral tomado desde donde sopla con mayor intensidad es el ESE con un 22.5% de la frecuencia, es impulsado principalmente por Brisas Moderadas y Brisa Débil, se observa también la evidencia de Brisas Fuertes más en este rumbo que en los otros correlacionando el origen por la entrada de aire marítimo tropical proveniente del Mar Caribe. Le sigue el rumbo con el E franco con 14.5% de las veces que se sopló en esta dirección con un mismo valor para la Brisa Débil y la Brisa Moderada y en tercer lugar con un rumbo lateral SE e igualando las condiciones anteriores. Estos tres pétalos indican que el origen es marcado al producido por los vientos alisios del Mar Caribe.

Desde el punto de vista de la Escala de Beaufort, los vientos que más soplaron fueron la Brisa Débil con un 27.5%, le sigue una Brisa Moderada con un 25.9%, la Brisa Fresca tiene un 21.2% y una Brisa muy Débil con 15.9%. Los vientos persistentes y con más intensidad se dieron desde la Brisa Débil hasta rastros de Viento Fuerte (Figura 197).

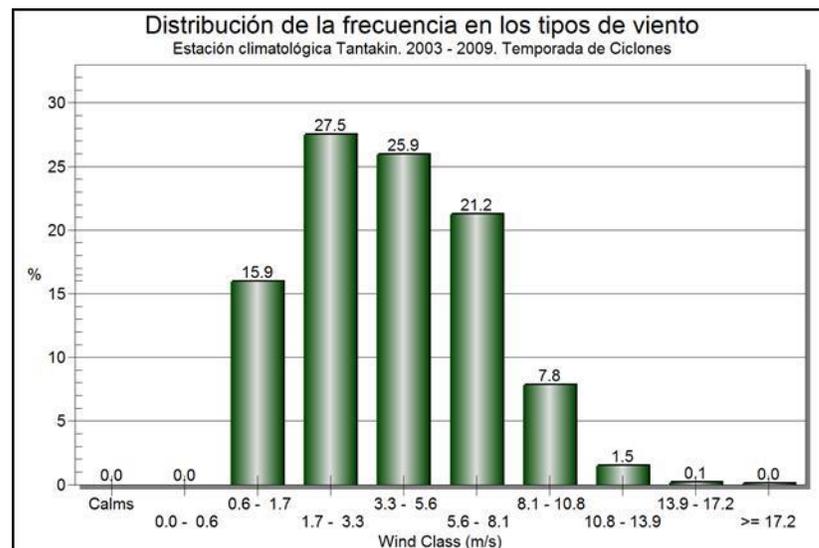


Figura 197. Gráfica de vientos de mayor intensidad según la estación climatológica Tantakin en época de Ciclones.

Esta estación recibe los vientos que ingresan por el litoral de Q. Roo y conducidos por la Sierra de Ticul, lo interesante está en el registro de un alto porcentaje de los vientos que pueden ser considerados de temporal tal como la Brisa Fuerte y el Viento Fuerte. El comportamiento es muy agrupado a la curva de normalidad y cargado hacia más hacia las calmas en contra posición de Dzilam de Bravo que muestra el mismo comportamiento pero inclinado hacia los Vientos Fuertes.

Las Figuras 198 y 199 ejemplifica espacialmente el comportamiento de cada uno de los modelos obtenidos para describir la temporada de ciclones y con ello como los pétalos de cada rosa señalan y evidencian los vientos que soplan desde y principalmente el Mar Caribe y los arrastres que pudiera dar las corrientes del Atlántico que se conjugan con el vapor de agua producto de la alta temperatura de la superficie del Mar y con ello la inyección de calor y humedad.

Para la Figura 198, se entiende mejor la agrupación de vientos provenientes del Este franco y que representan a los alisios señalados en naranja en una ventana de 45 grados. A diferencia de la temporada de Nortes, donde se registra evidencia de las variadas direcciones e intensidades, en estos meses esto no existe ya que y como se menciono es alta la influencia de los vientos marítimos del Mar Caribe hacia las zonas continentales.

Para la Figura 199, se traduce en que los pétalos señalan únicamente rumbos asociados al Este y que solo el accidente orográfico de la Sierra de Ticul desvía algunos rumbos dirigiendo los vientos hacia la parte norte – noroccidental de Yucatán.

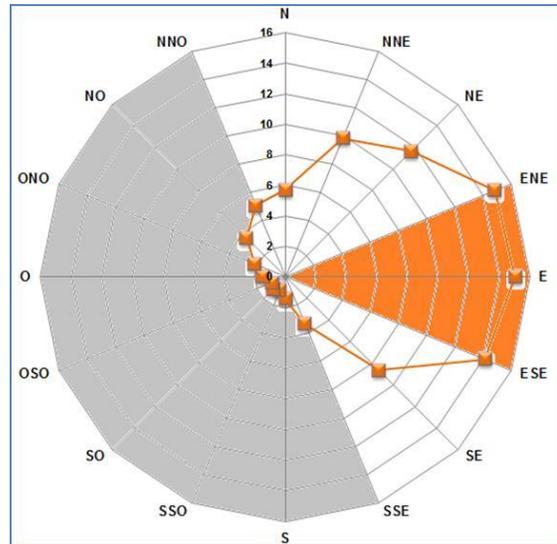


Figura 198. Diagrama de dispersión que ilustra las frecuencias de las direcciones de vientos para la temporada de ciclones, la zona gris indica los rumbos de donde el soplo del viento que no es relevante, y que está por debajo de los 75% del valor. Se adición una señalización en color naranja para indicar la predominancia de los vientos alisios.

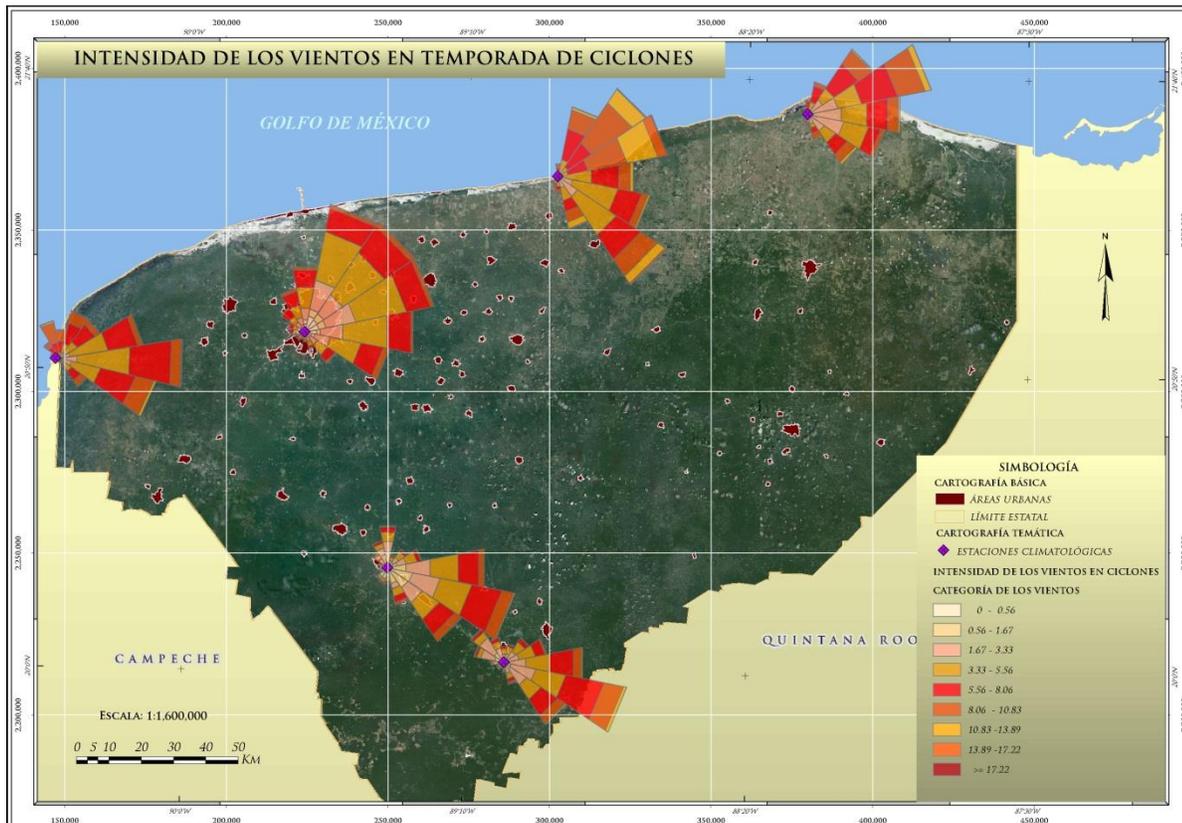


Figura 199. Mapa que integra las seis estaciones climatológicas para la temporada de ciclones y donde se aprecia espacialmente el comportamiento de los pétalos de cada rosa de los vientos. En esta conjunción de modelos se observa el efecto potencializado de los vientos alisios.

Las simulaciones que recrean las temporadas de nortes y de ciclones muestran un factor común en la predominancia de los vientos alisios, estos son persistentes todo el año no importando la condición de estacionalidad. Cuando se corre una simulación del comportamiento de los vientos para todos los registros que existen de cada estación climatológica, que lo llamaremos “todos los tiempos”, la estadística cambia en función de los eventos acumulados por dirección de donde sopla el viento.

Podemos observar que esta simulación está muy correlacionada con la obtenida para la temporada de ciclones y podemos establecer que es más la permanencia de los vientos del Mar Caribe y Atlántico (por la inyección, transporte y permanencia del calor en el agua) que los vientos de rebote del Golfo de México y en mucho menor medida los que provienen del sur.

La Figura 200 ilustra esta simulación y se observa una mayor intensidad de los pétalos en los rumbos señalados de donde sopla los vientos alisios. No se tienen registros para la parte este del estado de Yucatán que incluye las localidades de Valladolid y Tizimín con lo cual se podría establecer el punto de dispersión y rompimiento de los vientos que ingresan por el litoral de Q. Roo.

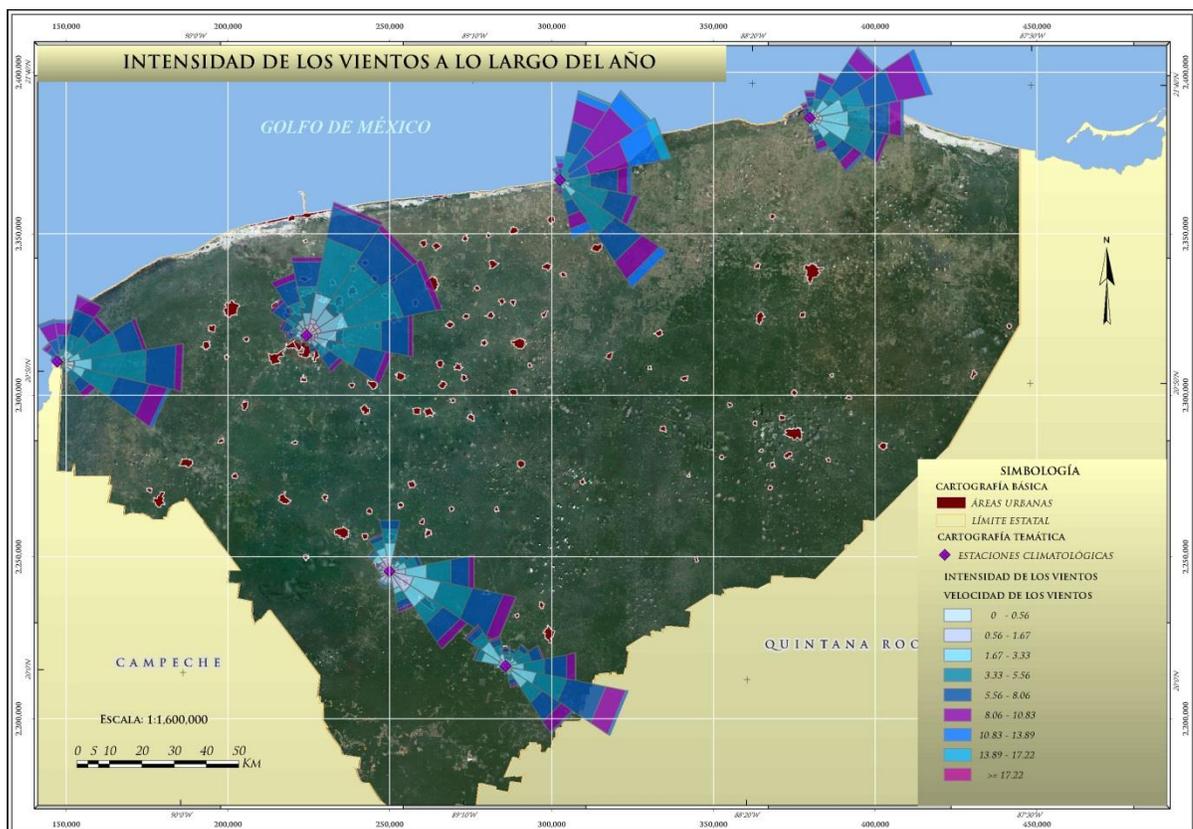


Figura 200. Mapa que integra las seis estaciones climatológicas para la Todos los tiempo En esta conjunción de modelos se observa el efecto potencializado de los vientos alisios y su fuerte predominancia.

Como se ha mencionado anteriormente, los diagramas y modelos de Rosa de los Vientos sirven para ilustrar la concurrencia de elementos como dirección e intensidad hacia un solo punto cuando no es posible aplicar una malla de valores (Xi, Yj) y su evolución contra el elemento tiempo, es decir, realizamos una simulación en cuatro dimensiones.

Sin embargo estas simulaciones, requieren un alto grado de conocimiento, no importando cuanto se simplifique la información; los modelos creados para cada estación en temporada de nortes y de ciclones fueron desarrollados con cientos de horas de proceso, históricamente hablando.

VIII.1.2.5.2. Modelos de Flujo vectorial del viento

En muchas ocasiones la consulta y entendimiento de la información generada cartográficamente no puede ser entendida rápidamente por complejidades de los modelos, diagramas o simulaciones; de ahí, la necesidad de la creación de modelos simplificados del flujo del viento, que representan de manera sencilla las direcciones y velocidades del viento obtenidas de las estaciones utilizadas asociadas a puntos nodales que concentran y reciben la información (estaciones climatológicas) teniendo como función primordial, proporcionar ayuda en una toma de decisiones rápidas para contingencias climatológicas y/o eventos adversos hacia el medio

La generación de mapas vectoriales de flujo de viento, producto de la simplificación del modelo de Rosa de vientos, señala la dirección (regida por el tamaño de la flecha en orden de magnitud) y la dirección promedio de la velocidad del desplazamiento del aire. Otra vertiente de su importancia radica en su practicidad y que, por lo mismo, es fácil combinar con otros temas transversales dentro de los Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales como son las precipitaciones, granizadas, ciclones tropicales y sus efectos asociados. Su generación también tiene la ventaja que es dinámica y basada en una arquitectura de información simple y estadísticamente validada.

La ilustración de las flechas está regida por el área de acción de los vientos que se mueven dentro del radio de acción (sensibilidad) de la estación climatológica y por lo tanto indican de donde sopla el viento y por donde se podría conectar con otros flujos en corredores de vientos que podrían en determinado escenario transportar o alimentar algún fenómeno natural.

Temporada de Ciclones.

Los modelos simplificados como el que ilustra la Figura 201, describe y para este caso la temporada de ciclones con los flujos del aire vectorizados en promedio de dirección y velocidad y ligados a un valor que representa el tamaño de la flecha. El programa no diferencia valores cercanos dentro de una unidad, como es el ejemplo de los rumbos colaterales ENE – ESE y el rumbo franco N con el colateral NNO, razón por la cual se repite el valor en ellos.

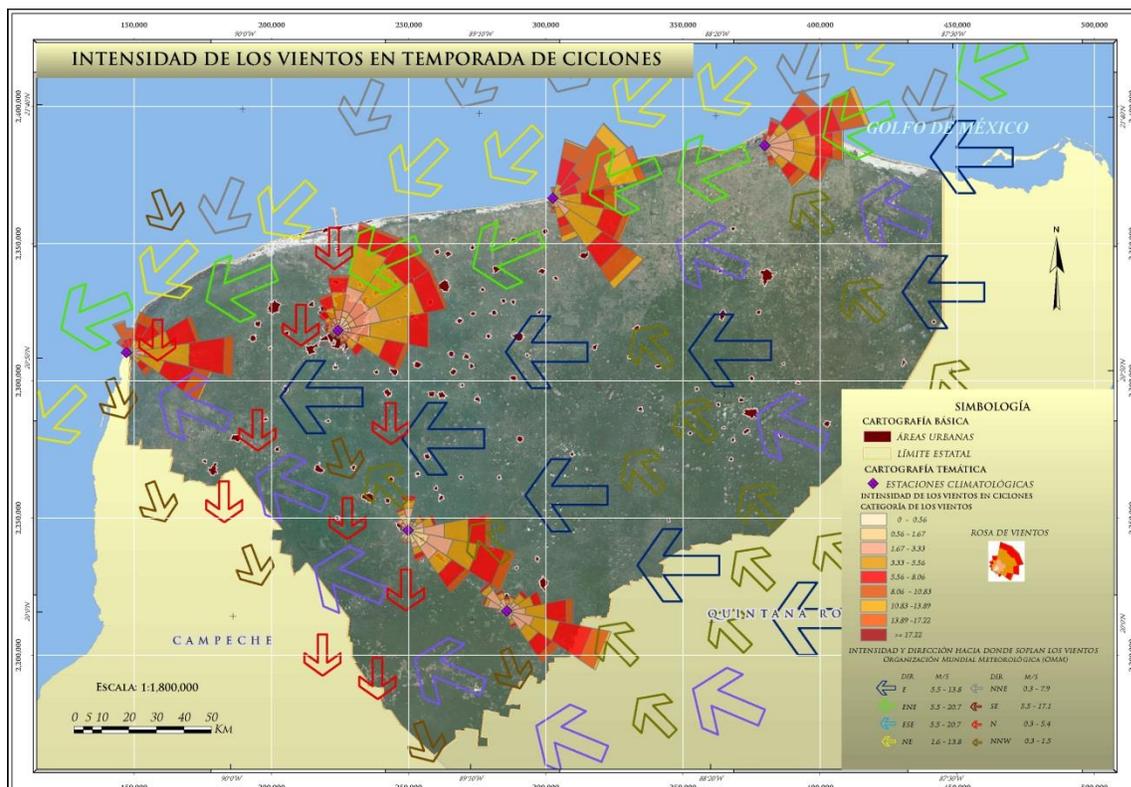


Figura 201. Flujo vectorial (predominante) del viento en temporada de ciclones.

Se observa en la figura que los flujos del cuadrante Norte al Este son más intensos en la costa y existe en el borde entre oriente de estado de Yucatán, donde se une el Golfo de México con el Mar Caribe una serie de direcciones que indican flujos turbulentos ligados a la corriente de lazo y la inyección de calor del propio Golfo. Los flujos predominantes (alisios) siguen siendo los que provienen del Atlántico Central y Mar Caribe, directamente de las direcciones ligadas al Este.

La Tabla 92, simplifica y ejemplifica los cálculos con que se alimentó el modelo. Las partes en verde son las que están dentro de un valor de confianza mayor al 95% y la parte en rojo indica que los valores se despreciaron por no ser representativos.

Tabla 92. Información Estadística descriptiva e Inferencial del modelo simplificado de vientos para ciclones.

Dirección	Estaciones climatológicas						Total	%	Dir.	%	Valor	m/s
	R. Celestum	Dzilam	Merida	Oxkutzcab	R. Lagartos	Tantakin						
N	1,767	305	5,539	796	604	445	9,456	5.70	E	15.02	1.00	5.5-13.8
NNE	2,970	1,662	9,437	250	1,482	516	16,317	9.84	ENE	14.83	0.90	5.5-20.7
NE	2,872	2,482	9,262	431	3,498	801	19,346	11.66	ESE	14.12	0.90	5.5-20.7
ENE	5,090	2,603	9,531	649	5,572	1,161	24,606	14.83	NE	11.66	0.80	1.6-13.8
E	7,506	1,801	7,482	1,840	4,165	2,117	24,911	15.02	NNE	9.84	0.70	0.3-7.9
ESE	5,990	2,189	6,035	2,417	3,494	3,302	23,427	14.12	SE	8.66	0.60	5.5-17.1
SE	2,041	3,027	3,000	1,663	2,658	1,983	14,372	8.66	N	5.70	0.50	0.3-5.4
SSE	537	1,265	1,226	705	1,190	581	5,504	3.32	NNO	5.08	0.50	0.3-1.5
S	257	402	711	298	477	252	2,397	1.45	NO	3.63	N/A	0.3-1.5
SSO	90	255	523	305	246	142	1,561	0.94	SSE	3.32	N/A	0.3-1.5
SO	117	193	803	275	231	227	1,846	1.11	ONO	2.20	N/A	0.3-1.5
OSO	198	46	857	163	117	213	1,594	0.96	O	1.47	N/A	0.3-1.5
O	348	21	1,456	158	95	362	2,440	1.47	S	1.45	N/A	0.3-1.5
ONO	563	49	1,946	194	68	822	3,642	2.20	SO	1.11	N/A	0.3-1.5
NO	1,188	74	3,115	374	189	1,083	6,023	3.63	OSO	0.96	N/A	0.3-1.5
NNO	2,318	125	4,456	525	306	696	8,426	5.08	SSO	0.94	N/A	0.3-1.5

El cálculo también incluyó una estimación promedio de los máximos y mínimos que se manejaron en la Rosa de Vientos y que están ligados a la dirección del flujo del viento en esta temporada. Las flechas más grandes, partiendo de los vientos que soplan del Este tienen valor de uno y así sucesivamente descendiendo. El programa, por medio de aplicaciones de asociación de vecindad distribuyó las flechas por área donde se encuentre su acción directa e inmediata. Por ejemplo la representación no en la parte de Ría Celestún es diferente a la graficada en Ría Lagartos.

Temporada de nortes

La representación de la temporada de nortes es más complicada en términos de que los vientos se comportan menos agrupados, existe más variación en los rumbos de donde soplan y su comportamiento en el continente.

Los vientos comprendidos para los meses de enero a abril y de noviembre a diciembre están sometidos a la acción de lo que se denomina “Nortes” o “Frentes Fríos Polares”, que tienden a crear amplios frentes de aire frío originando movimientos de anticiclón y con ello una mayor dispersión de los vientos al tocar el Golfo de México y encontrarse con las corrientes calientes del Mar Caribe (Figura 202).

En la temporada de Nortes, se pierde un poco el efecto de la predominancia de los vientos alisios del este franco y también disminuye su fuerza con que entran en tierra firme desde el litoral de Quintana Roo, en su lugar vientos provenientes del Noreste y atravesando Yucatán dan un ligero giro hacia la costa de Campeche y Tabasco.

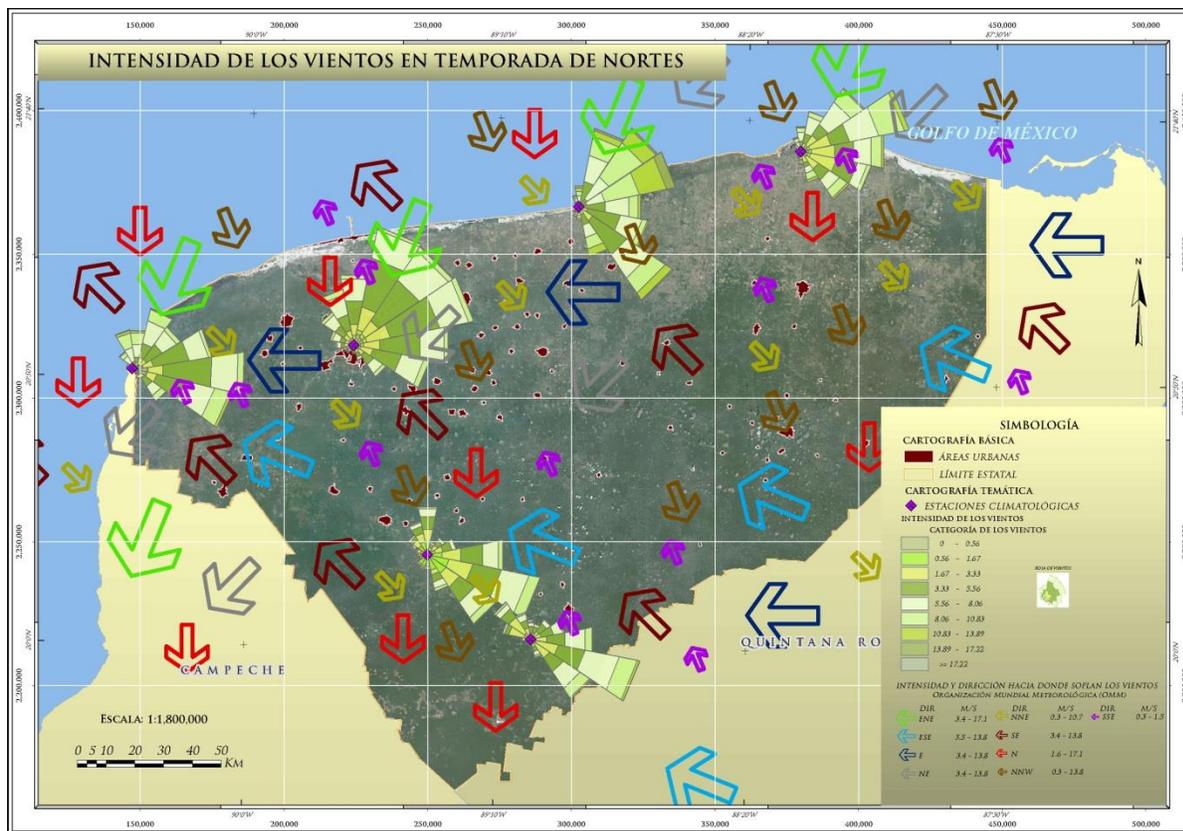


Figura 202. Flujo vectorial (predominante) del viento en temporada de nortes.

La Tabla 93, muestra que solo 8 rumbos laterales y colaterales son de importancia dentro del número de eventos y porcentaje representado en el valor de las flechas.

Tabla 93. Información Estadística descriptiva e Inferencial del modelo simplificado de vientos para Nortes.

Dirección	Estaciones climatológicas							Info Modelo				
	R. Celestum	Dzilam	Merida	Oxkutzcab	R. Lagartos	Tantakin	Total	%	Dir.	%	Valor	m/s
N	2,655	5,539	684	927	1,711	569	12,085	7.49	ENE	13.29	1.00	3.4-17.1
NNE	4,326	9,437	1,747	226	2,377	429	18,542	11.49	ESE	12.77	0.90	5.5-13.8
NE	3,304	9,262	1,956	307	3,603	612	19,044	11.81	E	12.15	0.90	3.4-13.8
ENE	3,770	9,531	2,088	393	4,818	836	21,436	13.29	NE	11.81	0.80	3.4-13.8
E	5,057	7,482	1,139	888	3,472	1,569	19,607	12.15	NNE	11.49	0.80	0.3-10.7
ESE	5,340	6,035	1,424	1,673	3,003	3,129	20,604	12.77	SE	8.50	0.70	3.4-13.8
SE	2,145	3,000	2,354	1,298	2,712	2,199	13,708	8.50	N	7.49	0.60	1.6-17.1
SSE	498	1,226	1,372	621	1,696	536	5,949	3.69	NNO	6.11	0.50	0.3-13.8
S	225	711	331	246	656	160	2,329	1.44	NO	4.39	N/A	0.3-1.5
SSO	78	523	226	277	324	80	1,508	0.93	SSE	3.69	N/A	0.3-1.5
SO	108	803	119	262	222	90	1,604	0.99	ONO	2.46	N/A	0.3-1.5
OSO	203	857	58	159	133	132	1,542	0.96	OSO	1.52	N/A	0.3-1.5
O	369	1,456	38	225	114	253	2,455	1.52	S	1.44	N/A	0.3-1.5
ONO	508	1,946	92	284	204	928	3,962	2.46	SO	0.99	N/A	0.3-1.5
NO	1,144	3,115	193	506	597	1,534	7,089	4.39	O	0.96	N/A	0.3-1.5
NNO	2,259	4,456	398	698	1,124	915	9,850	6.11	SSO	0.93	N/A	0.3-1.5

Como se ha mencionado, la velocidad dada en máximos y mínimos son de las rachas registradas a lo largo de todos diez años de observación. Se observa también que a diferencia de la temporada de ciclones que los porcentajes están mejor distribuidos casi en forma equitativa dentro de los seis primeros rumbos. Igualmente se observa y para ser congruente a la temporada de nortes que la apertura de 90 grados comenzando desde el NO y en sentido de las manecillas del reloj hasta el NE muestra la influencia de los frentes fríos en el litoral.

Todos los tiempos

Como se puede observar en la figura 64. La representación del comportamiento de todos los vientos a lo largo de todo el tiempo y como se ha mencionado anteriormente, tiende a coincidir mucho con la temporada de ciclones por la alta predominancia de los vientos alisios.

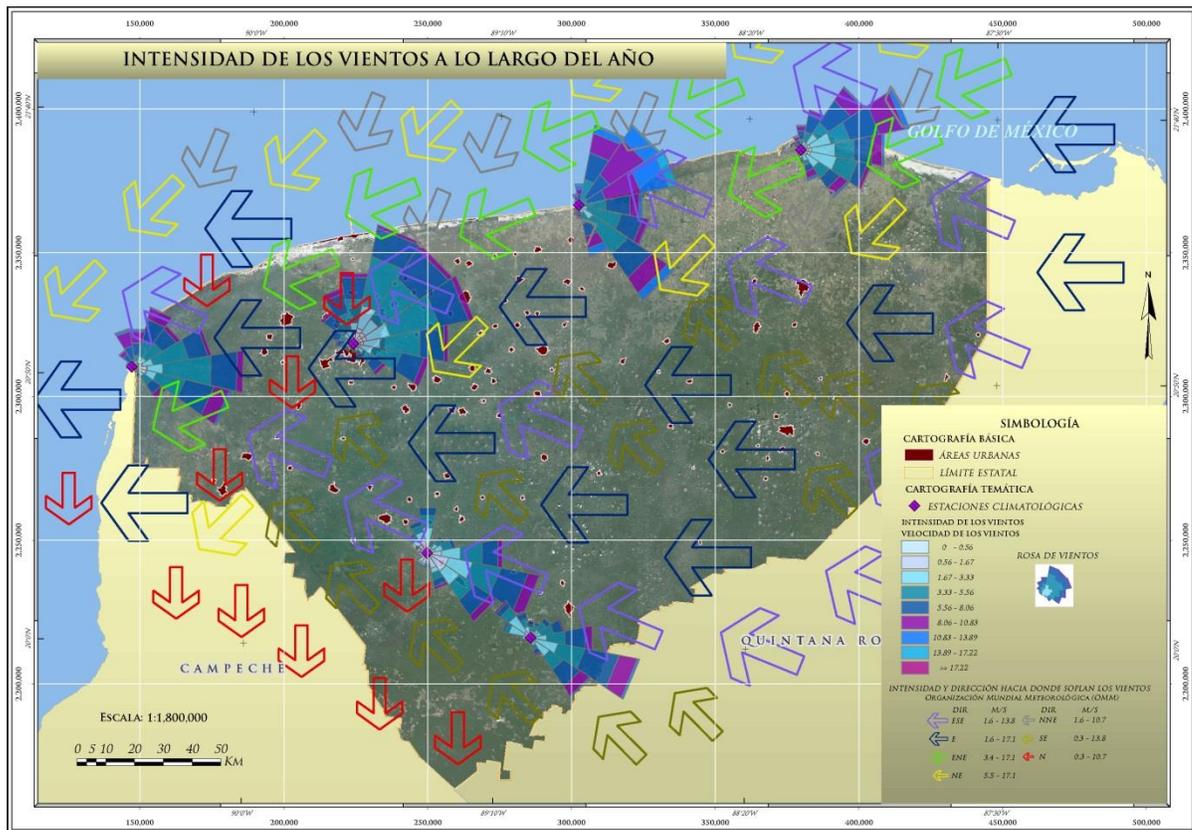


Figura 203. Flujo vectorial (predominante) del viento en todo el tiempo.

Los vientos se concentran desde la entrada en el litoral del de Q. Roo mayormente del E y ESE tal como se puede ver en la Tabla 94. El segundo grupo de vientos se observa concentrado a lo largo del litoral de la costa yucateca y cuyo origen son los vientos producto de las corrientes calientes del Mar Caribe y que finalmente atraviesan el Estado para entrar nuevamente a las tierras mexicanas por el Campeche y Tabasco.

La tabla 94, que muestra la información simplificada para el modelo de flujo vectorial basado en la Rosa de Vientos, señala los valores que más frecuencia presentaron y como se mencionó, fueron del E y ESE (vientos alisios) y la influencia de los nortes y corrientes oceánicas del Golfo de México y de las del Atlántico Central.

Tabla 94. Información Estadística descriptiva e Inferencial del modelo simplificado de vientos para todos los tiempos.

Dirección	Estaciones Climatológicas						Total	%	Dir.	%	Valor	m/s
	R. Celestun	Dzilam	R. Lagartos	Merida	Oxkutzcab	Tantakin						
N	3860	804	2479	5539	1723	1014	15,419	6.13	ESE	14.39	1.00	1.6-13.8
NNE	6159	3041	4111	9437	476	945	24,169	9.61	E	14.14	1.00	1.6-17.1
NE	5165	3594	7600	9262	738	1413	27,772	11.05	ENE	13.89	0.90	3.4-17.1
ENE	7579	3750	11011	9531	1042	1997	34,910	13.89	NE	11.05	0.80	5.5-17.1
E	10832	2405	8412	7482	2728	3686	35,545	14.14	NNE	9.61	0.70	1.6-10.7
ESE	9769	2696	7157	6035	4090	6432	36,179	14.39	SE	9.54	0.70	0.3-13.8
SE	3776	4294	5781	3000	2961	4183	23,995	9.54	N	6.13	0.60	0.3-10.7
SSE	973	1981	3157	1226	1326	1117	9,780	3.89	NNO	5.25	0.50	0.3-7.9
S	471	508	1351	711	544	412	3,997	1.59	NO	3.90	N/A	0.3-1.5
SSO	159	403	702	523	582	222	2,591	1.03	SSE	3.89	N/A	0.3-1.5
SO	203	269	567	803	537	317	2,696	1.07	ONO	2.24	N/A	0.3-1.5
OSO	357	81	317	857	322	345	2,279	0.91	S	1.59	N/A	0.3-1.5
O	659	49	277	1456	383	615	3,439	1.37	O	1.37	N/A	0.3-1.5
ONO	980	116	353	1946	478	1751	5,624	2.24	SO	1.07	N/A	0.3-1.5
NO	2083	223	875	3115	880	2618	9,794	3.90	SSO	1.03	N/A	0.3-1.5
NNO	3940	459	1511	4456	1223	1611	13,200	5.25	OSO	0.91	N/A	0.3-1.5

VIII.1.2.5.3. El viento y su influencia con otros fenómenos.

La información que se obtiene al hacer un análisis de las características y efectos de la acción del viento, nos permite en cierto grado conocer y entender la influencia que este tiene sobre otros fenómenos. Para su mejor comprensión, a continuación se hace una breve descripción de algunos casos de fenómenos que se han presentado en la Península de Yucatán, y donde la acción del viento interviene de manera decisiva y directa.

Huracanes

Los vientos de un huracán no se limitan a dañar la estructura de los edificios, sino que la enorme cantidad de escombros que arrastran representa una amenaza. Los vientos de intensidad de huracán también pueden dañar los edificios altos, especialmente en los pisos más altos, ya que la fuerza del viento suele aumentar con la altura. Por ejemplo, en promedio, los vientos en el techo de una torre de 30 pisos serán 30 Km/h (20 mi/h) más fuertes que en el suelo, el equivalente de una categoría de la escala Saffir-Simpson.

Ciclones tropicales.

El ciclón tropical Deán podría haber sido el primer huracán del Atlántico de la temporada 2007, pero días después de la primera formación, también se clasificó entre los huracanes más fuertes registrados. Se convirtió en un huracán de categoría 5 antes de tocar tierra en la península de Yucatán, el 21 de agosto. Deán comenzó como una perturbación de onda como en las bandas de nubes frente a América del Sur, que se reunieron para formar un sistema de tormenta el 13 de agosto. Impulsado por las profundas aguas cálidas del Caribe, Deán se convirtió rápidamente en un huracán mayor, alcanzando su punto máximo justo antes de tocar tierra. A medida que viajaba por el Caribe, la tormenta también causó grandes daños a Jamaica, Islas Caimán y otras islas caribeñas (Figura 204).

La visualización de datos del huracán (Figura 204), muestra las observaciones del satélite QuikSCAT el 20 de agosto de 2007, a las 5:31 pm hora local (23:31 GMT). En ese momento, Deán se encontraba en el Golfo de México entre Cuba, Jamaica y la península de América Central en dirección a la Península de Yucatán con vientos máximos de alrededor de 250 kilómetros por hora (155 millas por hora, 135 nudos), con esas velocidades Deán alcanzó la categoría 5.

La imagen representa la velocidad del viento en el color y la dirección del viento con pequeñas púas que están asociadas a la escala de Beaufort de Fuerza de Vientos. Las mayores velocidades del viento, que se muestran en púrpura, rodean el centro de la tormenta. Los vientos más fuertes en el lado norte de la pared del ojo se representan en color rosa. Áreas de lluvia, que se muestran con barbas blancas, se corresponden con los vientos más fuertes.

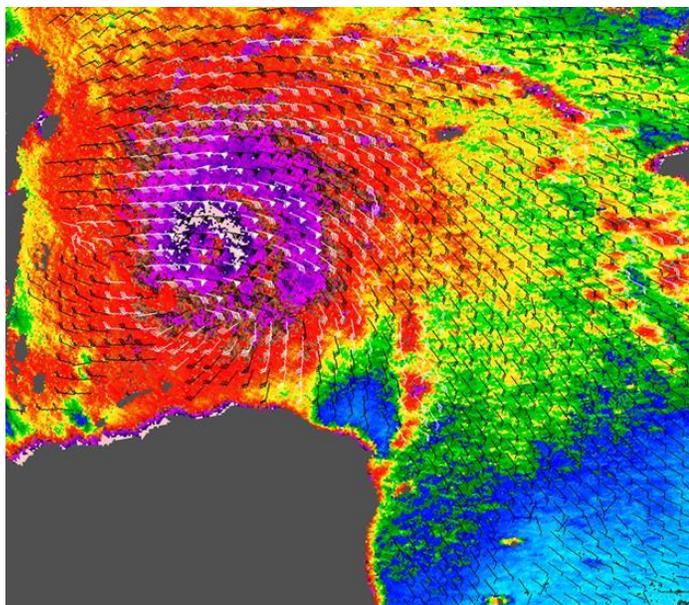


Figura 204. Modelo basado en registro de radar y boyas marinas para el flujo de vientos del Ciclón Tropical Deán al aproximarse a la Península de Yucatán. Los símbolos corresponden a velocidades de los vientos en la escala de fuerzas de vientos.

La Figura 205 también muestra el cubrimiento total que hizo el ciclón Deán en su paso por la Península de Yucatán y donde la mayor acumulación de los vientos de superficie que impulsan las rachas se dan y en similitud al efecto Doppler hacia adelante, dejando tras de él una calma de Brisas Ligeras y alta radiación solar.

En el caso del huracán Wilma (Figura 206) que se muestra aquí como observada por el satélite de la NASA QuikSCAT el 18 de octubre de 2005, a las 23:31 UTC (19:31 hora del este). En ese momento, el huracán había sostenido vientos de 130 Km/h (80 millas por hora, 70 nudos). Sin embargo, dentro de las doce horas siguientes a esta observación, Wilma aumentó el poder de manera espectacular, cubriendo toda la gama completa de la escala de intensidad de huracanes hasta la categoría 5 con vientos sostenidos de 280 Km/h (175 mph, 150 nudos). En ese momento, Wilma se convirtió en la tormenta más poderosa en términos de la velocidad del viento y la presión del aire medidos en un huracán del Atlántico. La imagen representa la velocidad del viento en el color y la dirección del viento con pequeñas púas. Barbas blancas indican las zonas de fuertes lluvias.

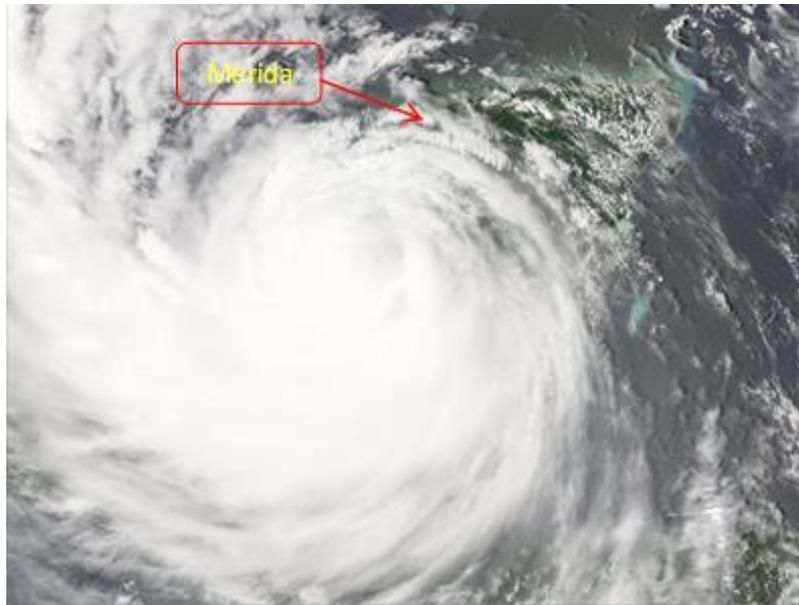


Figura 205. Imagen satelital del QuikSCAT el 20 de agosto de 2007, a las 5:31 pm hora local Tropical Deán al aproximarse a la Península de Yucatán.

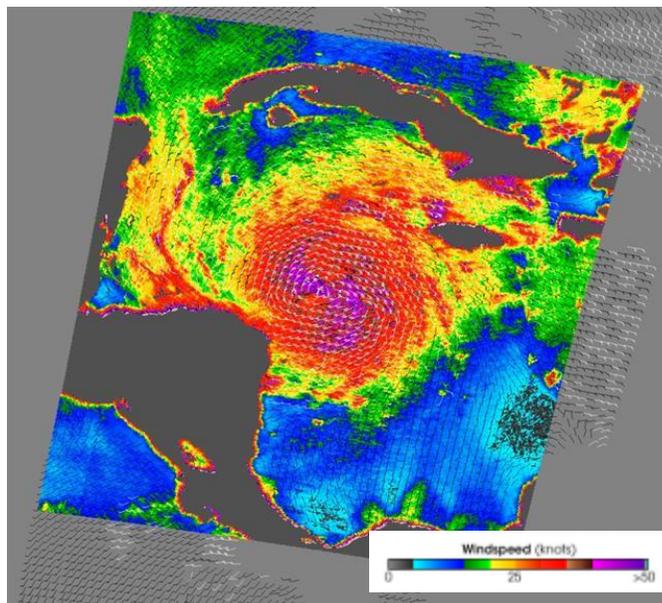


Figura 206. Modelo basado en registro de radar y boyas marinas para el flujo de vientos del Ciclón Tropical Wilma al aproximarse a la Península de Yucatán. Los símbolos corresponden a velocidades de los vientos en la escala de Beaufort de fuerzas de vientos.

El 21 de octubre, Wilma tocó tierra en la península de Yucatán (Figura 207) como un poderoso huracán categoría 4, con vientos por encima de las 250 mi/h. El ojo del huracán pasó primero sobre la isla de Cozumel, antes de tener su primer contacto "oficial" sobre la península cerca de Playa del Carmen, en el estado de Quintana Roo. Algunas partes de Cozumel experimentaron la calma en el ojo de Wilma por varias horas, con cielos azules y algunos momentos soleados. Los daños en dicha isla fueron devastadores, lo mismo que toda la parte Norte del estado de Quintana Roo. El ojo se movió lentamente hacia el norte, pasando justo al Este Noreste de Cancún.



Figura 207. El huracán Wilma sobre tierra (Imagen por cortesía del NOAA).

Hay que recordar que se trata de términos relativos cuando se refiere a la intensidad y dirección del viento, ya que dependiendo de dónde azote y de los peligros particulares que acarree, a veces un huracán de categoría más baja causa más daños que uno de categoría más alta. De hecho, las tormentas tropicales también pueden causar daños considerables y cobrar muchas vidas, principalmente debido a las inundaciones provocadas por la lluvia que a menudo cae en grandes regiones del interior.

En general, el mecanismo con que se desarrolla un ciclón tropical y la interrelación y dependencia con los vientos se ilustra en la Figura 208, en ella se observa que la perturbación acumula el calor y la energía que se necesitan para la formación del ciclón tropical a través del contacto con las aguas oceánicas cálidas. Los vientos cerca de la superficie del océano rotan en espiral hacia la zona de baja presión de la perturbación. Las aguas oceánicas calientes agregan calor y humedad al aire, que asciende. Conforme la humedad se condensa y forma gotas, se libera más calor, lo cual introduce energía adicional que alimenta el ciclón. Se forman bandas de tormentas y los topes de las nubes del ciclón alcanzan niveles atmosféricos cada vez más altos. Si los vientos en estos niveles altos se mantienen relativamente calmados (poca o ninguna cizalladura del viento), el ciclón puede mantenerse intacto y seguir intensificándose y de ahí surge el campo de vientos que rodea y transporta todo huracán y a las bandas de lluvia (Comet, 2013).

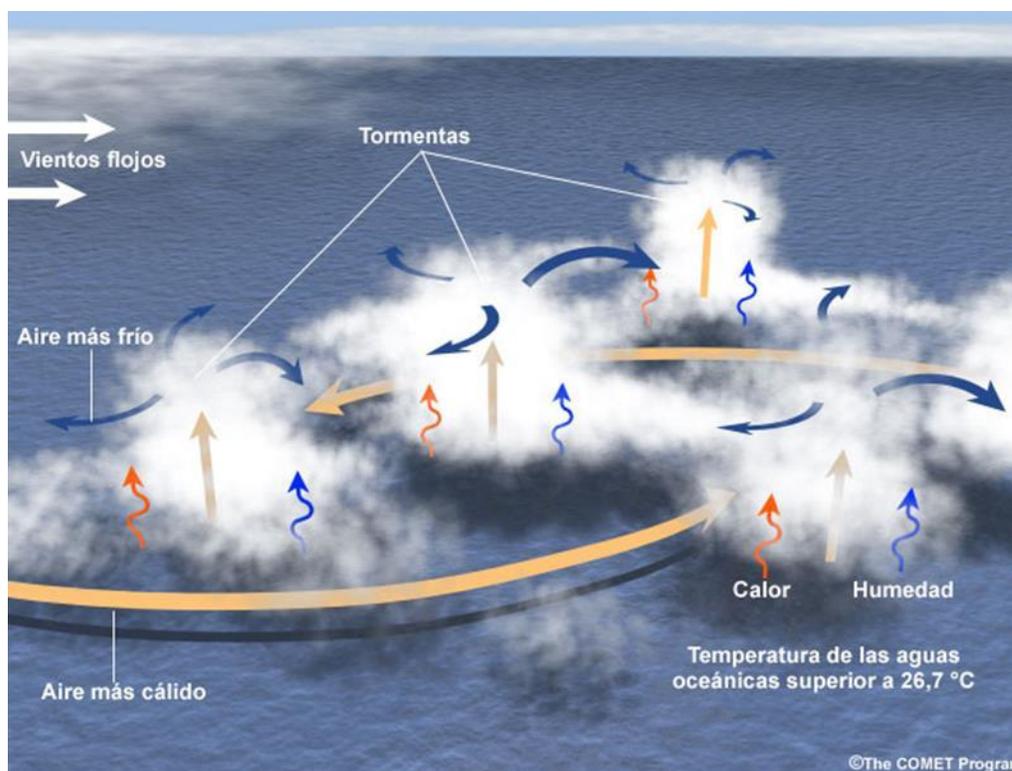


Figura 208. Ilustración del comportamiento del viento en la formación de los huracanes y como parte de su mantenimiento con vida.

Los vientos de intensidad de huracán pueden extenderse a una distancia de 40 Km (25 millas) desde el centro de un huracán pequeño y hasta 250 Km (150 millas) desde el centro de un huracán grande. La zona en la cual se pueden experimentar vientos de tormenta tropical es aún mayor. Estos vientos pueden llegar a entre 200 y 280 Km (125 a 175 millas) de distancia del centro, aunque en un huracán grande pueden extenderse hasta 500 Km (300 millas). En el hemisferio norte, los vientos de los huracanes rotan hacia la izquierda (en sentido anti horario) alrededor del centro. Esto significa que la dirección del viento en determinado lugar depende de la ubicación el ojo del huracán. Un barco al norte del ojo de un huracán estaría sometido a vientos del este, mientras que un barco al sur del ojo se enfrentaría a vientos del oeste.

Precipitación e Inundación

Cuando hablamos de trayectorias de los meteoros, estamos describiendo fenómenos climáticos muy inestables en el sentido de rutas fijas. Estas trayectorias variables pueden ser difíciles de pronosticar y tienen repercusiones importantes en términos de peligros. Típicamente, la velocidad media de avance de un ciclón tropical es de aproximadamente 24 Km/h (15 mi/h). Sin embargo, algunos ciclones tropicales pierden velocidad y a menudo causan lluvias devastadoras. Por ejemplo, tormenta tropical Allison (2001) atravesó muy lentamente la región de Texas oriental y dejó más de 75 cm (30 pulgadas) de lluvia en la zona de Houston, provocando inundaciones extremadamente dañinas. Otros son capaces de acelerar hasta alcanzar velocidades de más de 95 Km/h (60 mi/h).

Cuando un huracán toca tierra, es común que cubra una amplia zona con 15 cm (6 pulgadas) o más de lluvia, lo cual a menudo provoca inundaciones mortales y devastadoras. Las lluvias torrenciales de estas tormentas pueden durar varios días. Tales inundaciones han sido una de las causas principales de la pérdida de vidas (niños, en muchos casos) relacionada con los ciclones tropicales en los últimos 30 años.

Las lluvias intensas no se limitan a las regiones costeras. Pueden acumularse enormes cantidades de lluvia a miles de kilómetros en el interior. Buena parte de los daños provocados por 4 de

los 20 ciclones tropicales más costosos no fueron producto de los vientos, sino el resultado de las inundaciones causadas por las lluvias torrenciales en el interior.

Marejada Ciclónica

La marejada ciclónica, que a veces recibe los nombres de marea de tormenta, surgencia de tormenta e incluso oleada de tormenta, es el aumento anormal del nivel del mar provocado por un huracán u otra tormenta intensa por encima de la marea astronómica prevista o normal. Su causa principal es la acción de los vientos del huracán, que empujan el agua sobre la costa, aunque la baja presión en el ojo del sistema contribuye en parte, pero en mucha menor medida. El grado de aumento del nivel del mar generado por la marejada ciclónica es la diferencia en la costa entre el nivel observado de la superficie del mar y el nivel que se hubiera producido en ausencia del ciclón tropical.

En el ejemplo siguiente, la marejada ciclónica en la costa mide 6 metros (20 pies) por encima del nivel de la marea normal. Conforme aumenta la altura, la profundidad del agua disminuye, pero las áreas a menos de 6 metros de altura quedan vulnerables a inundaciones (Figura 209).

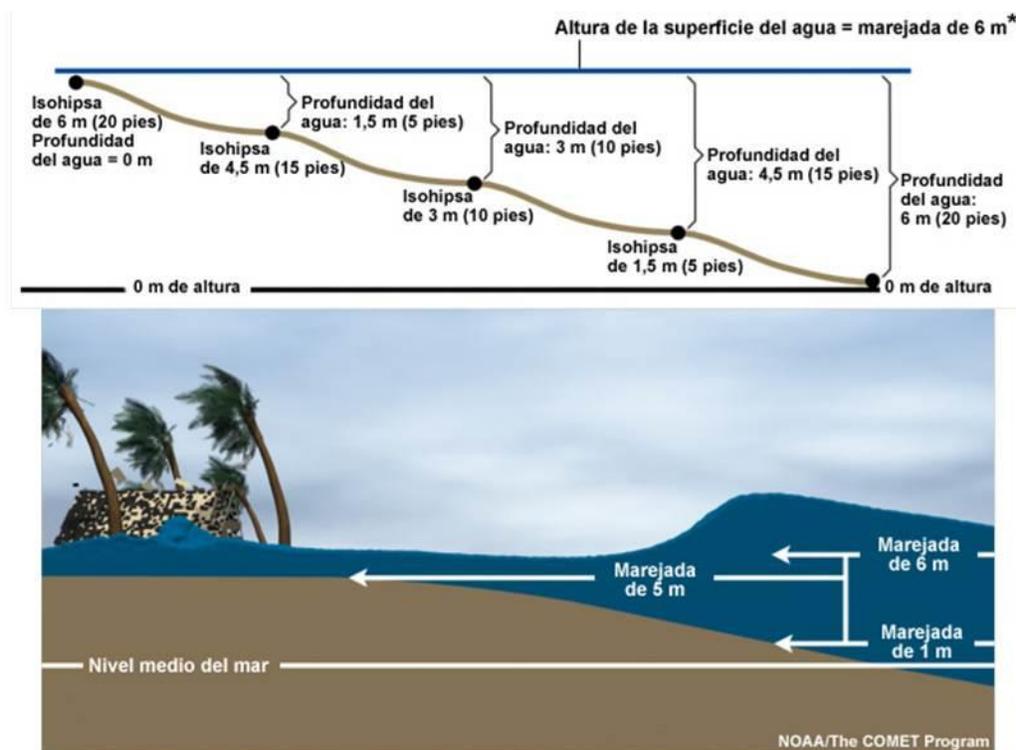


Figura 209. Ejemplo de cómo se comporta la marea de tormenta y la acción directa del viento en ella para un ejemplo de marejada de 6 metros.

La marea de la tormenta es el aumento del nivel del mar que ocurre al sumarse la marejada ciclónica a la marea astronómica, lo cual significa que el nivel del agua será particularmente alto cuando la marejada ciclónica coincide con la pleamar. Por ejemplo, durante huracán Katrina (2005) en la mayoría de los lugares junto a la costa de Misisipi la marea de la tormenta superó los 6 metros de altura, lo cual explica por qué el agua puede penetrar 10 y hasta 15 Km en el interior. A medida que entra la marejada ciclónica, antes de que el ojo toque tierra, el agua sube y pasa casi como un "baldócer", arrasando casas y destruyendo otros edificios a lo largo del litoral. El agua se lleva las playas, los vehículos, los árboles y cualquier otra cosa que se halle en su camino. Las zonas de tierras bajas quedan bajo el agua que penetra tierra adentro, causando grandes inundaciones.

VIII.2. Erosión

Habitualmente nos referimos a la erosión como un fenómeno negativo, derivado de la acción del hombre. Sin embargo, se olvida frecuentemente que la erosión es un proceso natural controlado por la gravedad, a través del cual los relieves e irregularidades de la corteza terrestre se equilibran. Cuando el relieve de cualquier parte de la tierra sobrepasa un valor del ángulo de pendiente, el cual es característico para cada tipo de roca, la presión que ejerce la gravedad es tal que supera a la fuerza de cohesión y se producen derrumbes o los materiales caen pendiente abajo. Conforme la pendiente disminuye, esa presión es menor y los materiales son entonces mayoritariamente evacuados por el efecto de arrastre del agua. Cualquier desequilibrio en los perfiles del suelo, ya sea por una elevación del terreno derivada de la actividad tectónica, por el encajamiento de la red fluvial o por incisiones en laderas producidas por la actividad humana, tendrá de nuevo al equilibrio convirtiéndose en una superficie erosiva (Marelli H. *et al*; 1984).

Por otra parte para mejorar la información generada es importante tomar en cuenta la erodabilidad de los suelos ya que es considerada como una propiedad inherente, que depende de numerosos parámetros hidrológicos, texturales y estructurales. Conseguir entender como cada uno de estos parámetros afectan la erodabilidad es valioso, ya que con ello se logran predicciones de la susceptibilidad de un suelo a la erosión, con menos esfuerzo, costos y tiempo, que los requeridos por medios experimentales bajo lluvia natural o bajo lluvias simuladas.

La información generada nos permite establecer índices de erodabilidad para un uso directo en la cuantificación de producción y de pérdida de material edáfico por hectárea, mediante la combinación de parámetros básicos (textura, porosidad, permeabilidad etc.) del suelo.

VIII.2.1. Conceptos Básicos

- **Desprendimiento de partículas** o porciones de roca madre o bien la rotura de los agregados del suelo. Este desprendimiento se produce habitualmente por la acción de la gravedad o con la ayuda de fuerzas como la acción del viento, del agua o del hielo; mientras que la rotura de agregados del suelo se produce por el impacto de las gotas de lluvia o granizo.
- **Transporte**; estas porciones y partículas desprendidas son transportadas por la acción de los agentes erosivos, principalmente por la gravedad, el agua y el viento. Durante su transporte, las partículas pueden actuar a su vez como agentes abrasivos que al impactar sobre la roca o el suelo provoca el desprendimiento de nuevas partículas o la rotura de otros agregados del suelo.
- **Deposición de las partículas**; cuando la energía de los agentes de transporte no es suficiente para seguir arrastrándolas o cuando estas son retenidas en las irregularidades del terreno o por la vegetación. Cada una de estas fases está controlada por multitud de factores como el clima, la litología, la pendiente o los seres vivos y se rige por las leyes físicas que determinan el comportamiento de los distintos agentes que intervienen (Marelli H. *et al.*, 1984).

Es por tanto, un fenómeno natural que debe enmarcarse en la interface entre la litosfera, la atmosfera y la biosfera, cuya principal fuerza automotriz es la gravedad. Sin embargo el hombre ha agudizado voluntaria o involuntariamente los procesos erosivos a través del aprovechamiento secular de los recursos naturales. Así, la puesta en cultivo, los incendios forestales y la construcción de infraestructuras o más localmente el pisoteo de animales, el arrastre de troncos o piedras son algunos ejemplos a partir de los cuales se pueden desencadenar episodios erosivos importantes en laderas que ya se encontraban en un punto de equilibrio o muy cerca de él. En este contexto, la erosión del suelo se considera uno de los factores que contribuyen a la desertificación; entendida esta como la pérdida de capacidad de los suelos de sustentar la vida.

Como ocurre con otros procesos naturales, la erosión actúa a escalas espacio – temporales muy dispares. Espacialmente abarca desde el nivel microscópico, como es la escala de los agregados del suelo, en un extremo, hasta el continental en el otro, con todas las posibilidades intermedias.

En cuanto a la escala temporal, existen episodios de muy corta duración, como una tormenta que dura unos minutos, pero hay otros que pueden durar años o siglos, como el encajamiento de la red fluvial o se miden por miles o millones de años, como la degradación de una cordillera (Adema E. *et al.* 2003).

La interdependencia de los factores que controlan la erosión, el amplio orden de magnitud de las escalas espacial y temporal en que se manifiesta el proceso y como consecuencia, la variación del peso relativo de cada uno de dichos factores en cuanto a los diferentes rangos de escalas de tiempo y espacio que se consideren, hacen de la erosión un fenómeno complejo con variadas manifestaciones.

La capacidad de las aguas fluviales de modelar el paisaje es acelerada debido a la topografía abrupta y llanuras aluviales; la pérdida de suelo por acción de la lluvia y la escorrentía se considera importante. A este último proceso, habitualmente conocido como erosión hídrica, es al que vamos a referirnos en este capítulo y su importancia radica en que afecta a un recurso de muy baja tasa de renovación en la cual se sitúa la base de los ecosistemas.

Los mecanismos relacionados con la erosión hídrica de los suelos son tres: el impacto de las gotas de lluvia, la acción de la escorrentía y los movimientos en masa.

- Gotas de lluvia al impactar sobre el suelo desprotegido puede romper los agregados que conforman la estructura superficial del mismo, transportando a distancia trozos de la estructura o partículas minerales que los constituyen por efecto de la salpicadura.
- Escorrentía se produce cuando el suelo no es capaz de absorber toda el agua que está recibiendo en un momento dado y se origina un manto de agua que fluye ladera abajo arrastrando las partículas desprendidas y arrancando a su vez nuevas partículas.

Se genera habitualmente durante lluvias intensas o duraderas. Rara vez este manto de agua es regular; lo habitual es que no lo sea y que se remuevan más sedimentos de unos sitios que de otros de manera que, si esta heterogeneidad espacial de la acción del agua persiste, llega a formar regueros e incluso cárcavas. La diversidad de la escorrentía se genera por la propia irregularidad del terreno, la cual depende a su vez de la topografía y de la presencia de obstáculos como: piedras, plantas y rocas. En estos dos mecanismos expuestos, el agua afecta los primeros milímetros o centímetros del suelo, arrancando y arrastrando las partículas.

- Movimientos en masa; el agua que se encuentra saturada a varios metros de profundidad del suelo o sedimentos, produce que estos se conviertan en un auténtico fluido viscoso que al exceder el punto de cohesión con el resto de los sedimentos de la ladera hacen que fluyan por efecto de la gravedad.

Entre los tres procesos expuestos hay diferencias importantes de magnitud. Así, mientras que el impacto de una gota de lluvia es el mecanismo más frecuente en el tiempo, la magnitud de la erosión que produce es muy baja, pero afecta una vasta superficie; en el caso de la escorrentía, es menos frecuente en el tiempo y se concentra más espacialmente, aunque su magnitud ya es considerable, sobre todo si existen y se forman cárcavas; por último, en el caso de los movimientos en masa, su frecuencia temporal y su escala espacial son las más bajas de todas, pero, por su magnitud puede ser incalculable la pérdida de material edáfico.

VIII.2.2. Clasificación

En la República Mexicana predomina la erosión hídrica laminar seguida de la eólica, aceleradas por la actividad humana.

Erosión hídrica laminar: en términos generales, es aquella producida por el agua, a través del impacto de las gotas sobre la superficie del terreno y cambios de regímenes de humedad, generando desprendimiento, arrastre de partículas y masas de suelos. La intensidad de lluvia es el factor primordial del fenómeno, ya que la velocidad de penetración del agua en el suelo, es frecuentemente insuficiente cuando esta cae con gran intensidad, la llegada al suelo de una elevada cantidad de agua en un periodo corto de tiempo, produce rápidamente escorrentía, no es entonces tan importante la lluvia como su intensidad (Figura 210).

$\text{Escorrimento} = \text{Intensidad de lluvia} - \text{velocidad de infiltración.}$

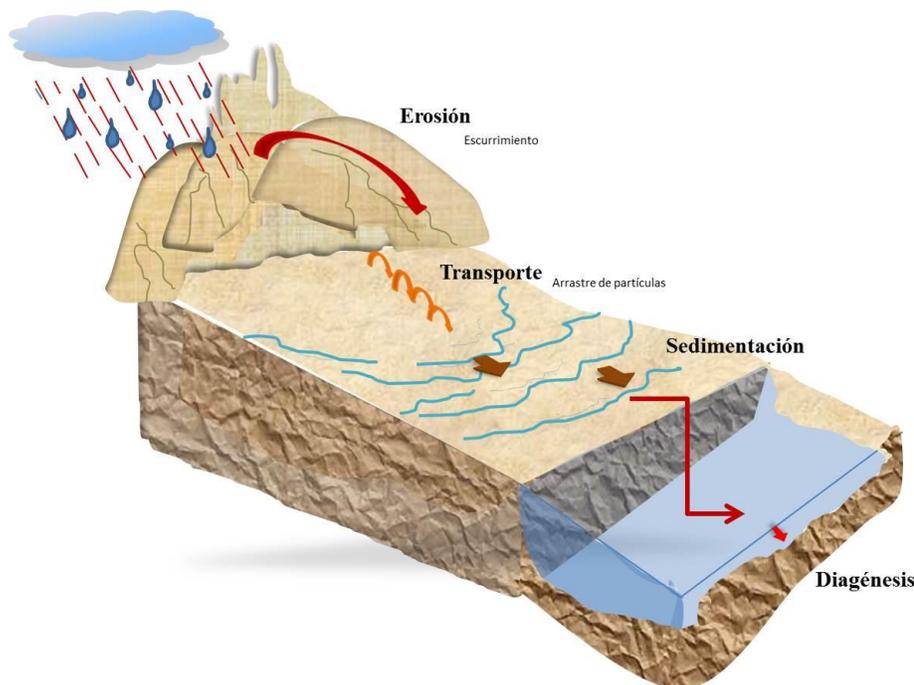


Figura 210. Erosión hídrica laminar, la escorrentía no encauzada puede fluir en una lámina uniforme sobre la superficie, donde normalmente se pierde la capa superficial del suelo.

La *pendiente de terreno* en condiciones normales, sería de esperar que la erosión se incrementara conforme lo hicieran el grado y la longitud de la pendiente, como resultado de los respectivos incrementos en velocidad y volumen de la escorrentía superficial, mientras en una superficie plana el golpeteo de las gotas de lluvia arroja las partículas de suelo al azar en todas direcciones, condiciones de pendiente inclinada, más suelo es salpicado hacia debajo de ella incrementando la proporción conforme lo hace el grado, (Morgan, 1986). Si la pendiente del terreno aumenta cuatro veces, la velocidad del agua que fluye sobre él, se duplica y su capacidad erosiva se cuadruplica.

El *grado de pendiente*, regula la velocidad de circulación del agua sobre la superficie de forma casi exclusiva, en los trópicos húmedos, el efecto de la pendiente en combinación con las copiosas tormentas tropicales es decisivo en la generación de pérdida de suelo (Zingg, 1940), aún para pendientes con poca inclinación, las pérdidas de suelo resultan significativas, los reportes de erosión de suelos en parcelas de experimentación realizadas por el INIFAP (2009) y escuelas superiores de Agricultura en la Península de Yucatán registran pérdidas de 10.5, 5.5 y 4.5 Ha/t (Grado de erodabilidad).

La longitud de la pendiente incluye en la velocidad por las alturas del agua acumulada en la parte baja de la pendiente, tales alturas son mayores cuanto más extensas son las vertientes en la parte superior (Suárez, C. F., 1980).

Erosión eólica: se presenta cuando el viento transporta partículas diminutas que chocan contra algunas rocas y se dividen en más partículas que van colisionándose contra otras cosas. Esta actividad erosiva del viento en comparación con la erosión hídrica, tiene un impacto menor en el país ya que se hace presente de manera local. Este tipo de erosión se produce cuando algunos factores climáticos (erosividad) como el viento, supera la resistencia del suelo, de manera similar a la hídrica. No siempre fluye ladera abajo sino que sigue direcciones predominantes, que pueden ser cambiantes estacionalmente e incluso en un mismo evento.

Existen dos tipos fundamentales de erosión eólica:

- *Deflación, o erosión por cizalla:* Cuando la fuerza del viento es superior a la resistencia del suelo; pueden observarse en forma de depresiones planas, inundables, de diversos tipos. En ocasiones presenta una acumulación a sotavento (lunette).
- *Abrasión o reptación:* Las partículas que están en movimiento actúan como proyectiles que golpean otras superficies, pudiendo arrastrar a su vez mas partículas sueltas; las formas de acumulación son muy variadas ya que se pueden observar en forma de manto eólico, que es la acumulación arenosa de grandes extensiones, sin formas definidas; o bien en dunas de muy diversos tipos (Honorato, 2000).

La erosión superficial de suelos, agrupa las formas de deterioro que tienen lugar sobre las superficies estudiadas, cuya expresión responde a una gradualidad en sus manifestaciones: erosión por salpicadura, laminar, concentrada y en cárcavas. Las tres primeras ya fueron descritas anteriormente, una vez que se inicia la formación de cárcavas, esta evoluciona según la consistencia relativa que presentan los diferentes horizontes de suelo (**erosión diferencial**), cuando la consistencia del material es relativamente uniforme, las paredes de la cárcava son más o menos verticales, en tanto cuando se presenta un aumento en la resistencia de las capas inferiores, se desarrollan en forma de "V", (FAO, (1967), describe el crecimiento de las cárcavas como resultado de los siguientes procesos, los cuales actúan o bien aislado o en combinación de la siguiente manera:

- *Flotación en el fondo o en los lados de la cárcava* por la corriente de agua y las materias abrasivas (partículas de suelo o restos de sedimentos u objetos que arrastra el agua).
- *Erosión por el agua que se precipita en la cabecera de la cárcava* y que ocasiona la regresión progresiva de ésta.
- *Desmoronamiento en lados de la cárcava* por la acción lubricante de las aguas de infiltración.

Los movimientos de masas han sido desatendidos en el contexto del estudio por erosión de suelos (Morgan, 1986), sin embargo en muchos casos son ellos la forma dominante de los procesos de deterioro, su importancia realzada en ciertas condiciones climáticas, es aún más clara si se entienden estos movimientos como precursores de otros procesos erosivos, dado que los agentes deteriorantes, se benefician de la generación de superficies altamente susceptibles a su intervención; las masas de suelo desplazadas pierden usualmente la cubierta vegetal protectora, favoreciendo el procesos de infiltración, de esta forma alcanzan plena expresión la separación-disgregación de partículas y el escurrimiento superficial, esta última variable se asocia a condiciones geomorfológicas. La morfología de un movimiento de masas, permite obtener valiosa información tanto del tipo de movimiento como de su génesis en los procesos de remoción de masas.

VIII.2.3. Antecedentes

La degradación y erosión de los suelos en la República Mexicana, muestra que los suelos afectados representan el 47% de la superficie total del país; de esta superficie, el 5% presenta un deterioro severo o extremo y 95% queda ubicado dentro de los márgenes de ligero a moderado. Los principales procesos de degradación en el país son la degradación química, la erosión hídrica y eólica, responsables en conjunto del 87% de la superficie afectada, con 34.9, 23 y 18.5 millones de hectáreas respectivamente (SINADES, 2003).

De acuerdo a un estudio realizado por la Universidad Autónoma de Tabasco en el 2004, determinaron que de acuerdo a las características topográficas que presenta el estado de Yucatán la erosión potencial es del 5% en zonas con erosión baja, el 93% tiene erosión moderada lo cual es la mayor parte del territorio, 2% aproximadamente de moderada a fuerte y la menor extensión con erosión fuerte. Los impactos generados por la erosión del suelo son diversos y las consecuencias económicas son difíciles de estimar; la erosión hídrica que es la que más afecta al Estado ocasiona una pérdida de la capa fértil de los suelos; fomentada por la agricultura, pastoreo, tala indiscriminada, construcción de carreteras y edificios que eliminan comunidades vegetales autóctonas.

Con lo que respecta a erodabilidad; en las últimas décadas en México los esfuerzos de investigación han impulsado el desarrollo de varias metodologías cuantitativas y cualitativas. donde domina el cálculo de la pérdida de suelo a nivel puntual y experimental mediante parcelas de escorrentía, las cuales abarcan el 45% de los estudios; los estudios elaborados mediante modelos, como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo cubren el 32% del total; abarcando superficies de distintos tamaños (parcelas, laderas, cuencas y regiones). El interés principal de los estudios se ha enfocado a cuantificar erosión a nivel parcelario (68% de los estudios) y con menos intensidad a otras escalas (ladera 16%, cuenca 10% y región 6%) mediante la utilización de distintos métodos (Cotler, 2007).

En el estado de Yucatán, la investigación se ha centrado principalmente en la disminución del rendimiento de cultivos causado por la erosión, donde la mayoría de las investigaciones giran en torno a nivel parcela, por lo tanto se desconoce el grado de erodabilidad, no existen estudios que citen y demuestren cuantas toneladas de suelo por hectárea se pierde anualmente a nivel regional y estatal.

VIII.2.4. Método de Trabajo

Para el proceso del tema de erosión, se desarrollaron y se llevaron a cabo dos métodos de trabajo, uno para determinar el tipo y grado de erosión y otro para determinar el grado de erodabilidad; esto debido a que esta se considera como parte de la erosión; por lo tanto se requiere de información y datos independientes; sin dejar de tomar en cuenta que ambos métodos están relacionados con la degradación de los suelos.

A continuación se hace la descripción de cada una de las metodologías empleadas.

Grado de Erosión

En referencia a la erosión de suelos, no existe una metodología abalada por la autoridad rectora, de peligros y riesgos, es decir, por el Centro Nacional de Prevención de Desastres, por lo cual la metodología aquí empleada y que a continuación se describe fue desarrollada por el SGM (Figura 211).

En una primera instancia se integró y analizó información bibliográfica y cartográfica, ya sea impresa o en formato digital. Posteriormente se llevaron a cabo trabajos de campo y de gabinete, en ambos casos conjuntado e integrado la información en un Sistema de Información Geográfica (SIG), mediante el cual se generó un mapa con distintas regionalizaciones en función de los tipos de erosión definidos y las condiciones naturales de la región.

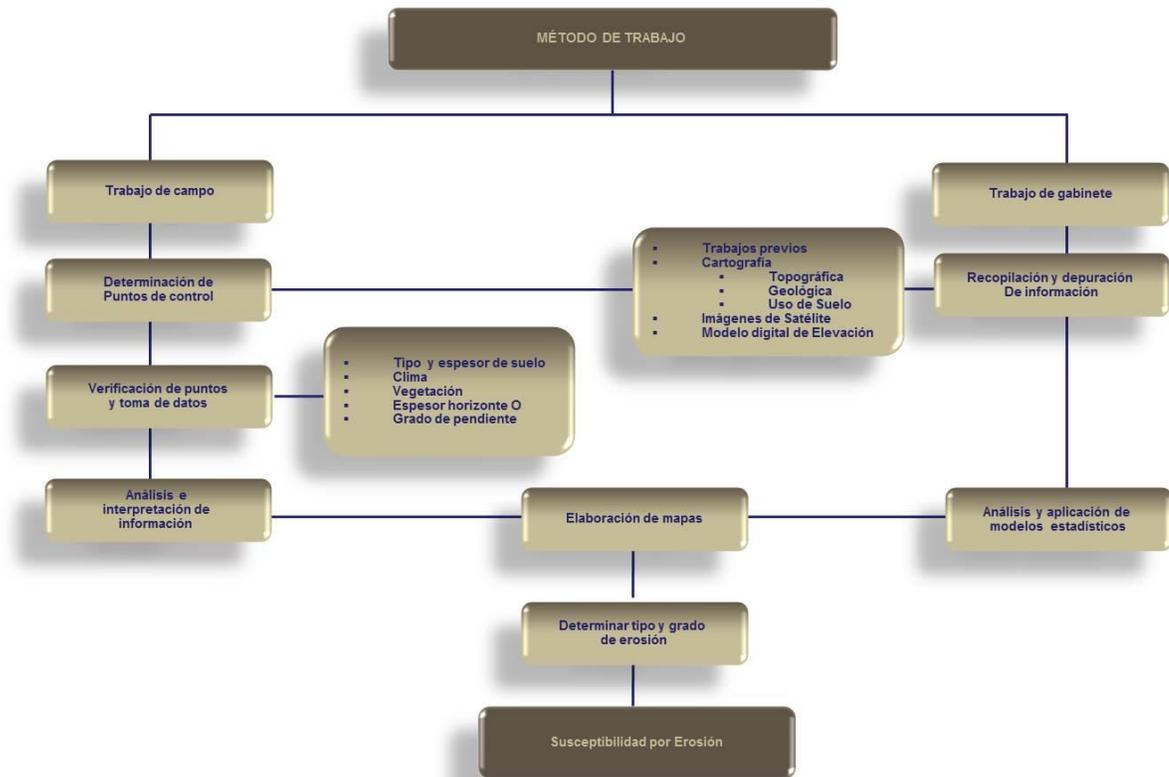


Figura 211. Metodología para determinar la susceptibilidad por Erosión.

Para los trabajos de campo se utilizaron cartas topográficas, escala 1:50,000, edafológicas y de vegetación escala 1:250,000 y geológicas escala 1:500,000, para definir los puntos a verificar.

Con la finalidad de obtener mayor información, se diseñaron fichas técnicas o bitácoras de campo, compuestas de datos de localización e identificación de la zona visitada (clave del punto de verificación, coordenadas en sistema UTM, localidad, nombre del municipio y región) y datos técnicos asociados al tipo de erosión (edafología, precipitación, geología, clima y pendiente), además de llevar un registro fotográfico de cada punto para complementar la base de datos (Figura 212). La prospección en campo, está en función de la fisiografía de la región, factores antropogénicos, condiciones del terreno, entre otros.

Datos de localización.

- Clave del punto de verificación.
- Coordenadas en el sistema UTM; latitud (x), longitud (y), altura (z)
- Localidad
- Nombre del municipio
- Clave de la carta topográfica utilizada
- Región
- Fecha

Datos técnicos para cálculo de Erosión de suelos.

- Tipo y grado de erosión observada en la zona (Eh) Unidad geotécnica
- Micro relieve
- Tipo de clima
- Uso de suelo
- Tipo de vegetación predominante



ATLAS DE PELIGROS POR FENOMENOS NATURALES DEL ESTADO DE YUCATÁN

EROSIÓN

UBICACIÓN

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

PUNTO DE CONTROL YE113
 FECHA 12/06/2012
 ESTADO YUCATAN MUNICIPIO CHOCHOLA
 LOCALIDAD CHOCHOLA
 CARTA TOPOGRÁFICA OPICHEN
 CLAVE DE LA CARTA F16-C61 ESCALA 1:50,000
 COORDENADAS UTM WGS84
 LATITUD X 200288.2
 LONGITUD Y 2292131.1
 ELEVACIÓN Z -1.6 REGIÓN I PONIENTE



DESCRIPCIÓN

TIPO DE EROSIÓN HIDRICA LAMINAR
 GRADO DE EROSIÓN MODERADA
 CLAVE CARTOGRÁFICA EH2
 ROCA AFLORANTE CALIZAS
 TIPO DE SUELO LEPTOSOLES
 MICRORELIEVE LIGERAMENTE ONDULADO
 INCLINACIÓN EN GRADOS 3-5°
 TIPO DE CLIMA CALIDO HUMEDO TROPICAL
 CLAVE DE CLIMA Ax' (W0)
 VEGETACIÓN PREDOMINANTE SELVA BAJA CADUCIFOLIA



OBSERVACIONES

AREA AFECTADA POR VEGETACION INTENSIVA, SE OBSERVA VEGETACION SECUNDARIA.

REALIZO ALEJANDRA ESPINOSA



Figura 212. Ficha de campo de erosión.

Trabajo de Campo

La regionalización y delimitación de los distintos tipos de erosión cartografiados, se traducen en un mapa de tipología de erosión, integrado por distintos polígonos, los cuales se clasificaron de acuerdo al tipo y grado de erosión. A esta clasificación se les asigna un valor del 1 al 3 para indicar de manera cualitativa el grado de erosión; donde 1 representa una erosión hídrica en grado débil, 2 atribuye a una erosión hídrica en grado moderado y 3 equivale a una erosión hídrica en grado alto (Tabla 95).

Tabla 95. Clasificación de los tipos de erosión de acuerdo a su grado erosivo.

TIPOS Y GRADOS DE EROSIÓN	CLAVE	VALOR
Hídrica débil	Eh1	1
Hídrica moderada	Eh2	2
Hídrica alta	Eh3	3

Factor Clima

Los climas muchas veces condicionan el tipo de vegetación y está a su vez los tipos de suelo, de tal forma que se convierte en una determinante importante para que ocurran algunos procesos erosivos; con base en la clasificación de climas de Köppen, modificada por E. García (2010), se asignaron valores del 1 al 4 de acuerdo a la temperatura media y humedad relativa que prevalece a la Entidad, el valor de 1 se asignó a los climas intermedios subhúmedos, 2 a climas secos, 3 climas semiáridos y 4 climas áridos (Tabla 96).

Tabla 96. Clasificación de los climas que prevalecen en la entidad.

CLIMA	VALOR
Intermedio Subhúmedo	1
Más seco	2
Semiárido	3
Árido	4

Factor Precipitación

Es una de las principales condicionantes, con lo cual se aceleren los procesos erosivos y esta se clasifico de acuerdo a la precipitación media anual que predomina en la entidad, se asignaron valores de 1 al 4, el valor de 1 se asignó a precipitaciones que oscilan entre 500 y 600 mm, 2 entre 700 y 800 mm, 3 entre 900 y 1000 mm y 4 entre 1100 a 1200 mm (Tabla 97).

Tabla 97. Precipitación media anual (mm) en el estado de Yucatán.

PRECIPITACIÓN	VALOR
500-600	1
700-800	2
900-1000	3
1100-1200	4

Factor Pendiente

El grado de inclinación del terreno es un punto importante con respecto a la pérdida de material edáfico, por lo que se otorga cierta categoría a los valores de la pendiente que presenta la fisiografía de la región de estudio, el valor 0° y 2° corresponde a un grado bajo de arrastre de material, 3°- 4° representa un grado medio y > 5° significa un grado alto (Tabla 98).

Tabla 98. Clasificación del grado de pendiente asociado a la Erosión.

RANGO DE PENDIENTE	VALOR
0°-2°	1
3°-4°	2
> 5°	3

Factor Horizonte O

Un factor importante para reducir los efectos erosivos es el espesor del horizonte O, el cual es un excelente amortiguador contra los impactos directos de las gotas de lluvia y viento, se asignaron valores entre 1 y 5; de acuerdo al espesor que presentan, 1 a los de mayor espesor y 5 a los de menor espesor (Tabla 99).

Tabla 99. Clasificación por comunidades vegetales y uso de suelo.

ESPESOR DEL HORIZONTE O	VALOR
5	1
4	2
3	3
2-2.5	4
0-1-5	5

Factor Edafología

Teniendo como guía la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB) 2007, se clasificaron los tipos de suelo de acuerdo a la susceptibilidad que presentan a la degradación.

Los puntos se seleccionaron dependiendo del tipo de suelo y zona fisiográfica a la que pertenecen; los valores asignados entre 1 y 5 está en función de la profundidad, así como de las características propias de cada suelo, el valor de 1 corresponde a suelos con mayor profundidad, valor de 5 a suelos con menor espesor (Tabla 100).

Tabla 100. Espesor de suelo (cm) para determinar la susceptibilidad.

EDAFOLOGÍA	VALOR
> 100	1
46-68	2
30-45	3
19-29	4
0-18	5

Finalmente la suma de los valores interrelacionados de cada factor se agrupan en tres rangos, el 1 representa los valores comprendidos entre 41-60 y representa el peligro bajo, el 2, involucra las sumatorias que van de 61-83 y corresponden al peligro medio, el 3, se constituye por valores comprendidos del 84-90 representando así el peligro alto (Tabla 101).

De acuerdo a estos 3 rangos se genera el escenario de susceptibilidad a la erosión hídrica, conjugando así, las características de cada lugar y lo cartografiado en los recorridos de campo con ayuda del programa Arcmap versión 10.1.

Tabla 101. Clasificación del tipo de peligro por erosión.

PELIGRO POR EROSIÓN	RANGO	VALOR
Bajo	41-60	1
Medio	61-83	2
Alto	84-90	3

Grado de Erodabilidad

Este apartado se elaboró de manera independiente, con la finalidad de obtener un método que facilite el desarrollo para estimar las pérdidas de suelo; esto representa una importante herramienta, para su posterior aplicación en los procesos de planificación del uso del suelo en forma clara, ordenada y además viable económicamente, dependiendo de algunos parámetros hidrológicos, texturales y estructurales de los suelos.

A partir de esta metodología tomada de Wischmeier y Smith modificada por el Servicio Geológico Mexicano, se puede entender como cada uno de los parámetros considerados que influyen sobre la erodabilidad de los suelos, pudiendo así determinar cuántas toneladas de material edáfico se pierden anualmente en cada una de las 7 regiones geográficas en las que se divide el Estado (Figura 213).

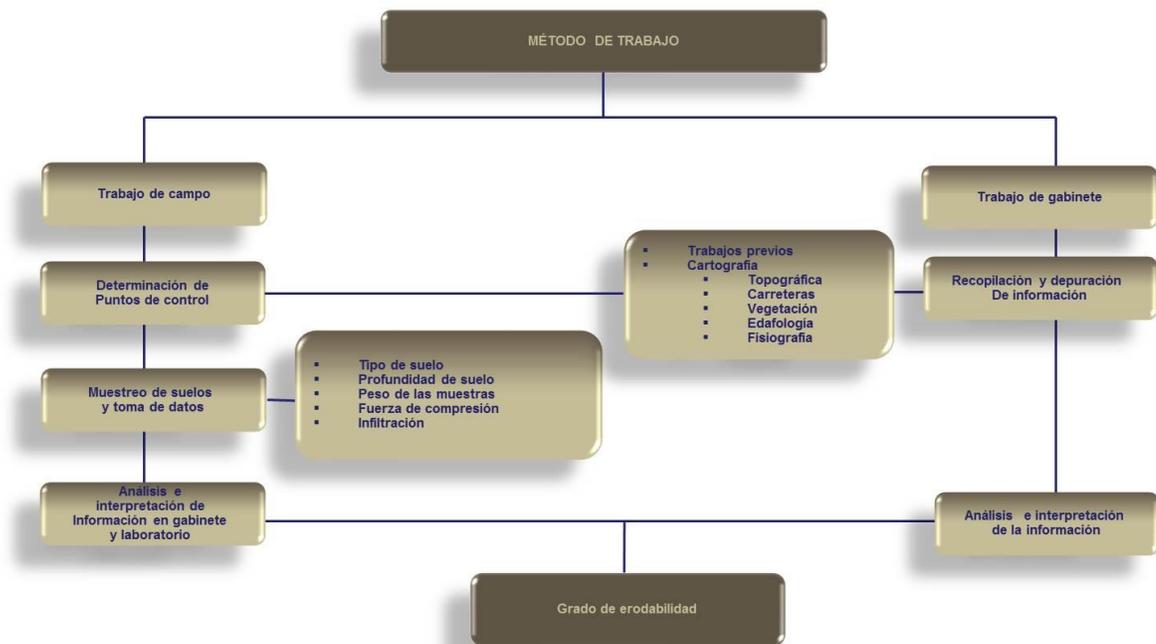


Figura 213. Metodología general de muestreo de suelos.

Para este muestreo, también se generó una ficha técnica especializada, que además de los datos de localización e identificación de la zona visitada, incluyen datos técnicos asociados al tipo de erosión y muestreo de suelo, que se integraron a un mapamovil Trimble Nomand Modelo 800B para control y manipulación de la información.

Datos de localización.

- Clave del punto de muestreo
- Coordenadas en el sistema UTM; latitud (x), longitud (y), altura (z)
- Localidad
- Nombre del municipio
- Clave de la carta topográfica utilizada
- Región
- Zona fisiográfica
- Fecha

Datos técnicos.

- Tipo de suelo
- Profundidad del suelo
- Peso de la muestra y submuestras
- Fuerza de compresión
- Tiempo de infiltración de agua

Factor Tipo de Suelo

Tomando como referencia la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo 2007, se muestrearon los suelos que se encuentran dentro de las zonas fisiográficas, por cada tipo de unidad edáfica, se tomaron 5 muestras de 2 Kg., y 5 submuestras en tubos de cobre de 5 centímetros de largo y 2 pulgadas de diámetro alrededor de la muestra principal. Una vez obtenida se rotula con los datos antes mencionados y se pesan con una báscula digital modelo KS1401 para conocer la humedad relativa.

Factor profundidad de suelo

Con una varilla graduada se midió la profundidad del suelo, se realizaron 5 mediciones por cada punto de muestreo para verificar la profundidad; ya que a menudo la punta choca con piedras en suelos rocosos, lo cual da la impresión de que el suelo es menos profundo de lo que en realidad son; y se asigna la moda de la medición.

Factor peso

Con una balanza digital modelo KS1401, se pesan las muestras en campo para determinar el contenido de humedad natural, con la finalidad de conocer la relación del cociente del peso de las partículas sólidas y el peso de agua que guarda.

Factor de fuerza de compresión

En cada punto de muestreo con un penetrómetro modelo 6100, se determina la resistencia a la penetración del suelo, para esto se introducen los primeros 5 centímetros de la punta cónica del penetrómetro, donde la resistencia a la penetración es la presión (fuerza por unidad de superficie) necesaria para introducir la punta cónica hasta una cierta profundidad en el perfil del suelo.

Factor Infiltración

Con un tubo de PVC de 50 centímetros de longitud y 5 pulgadas de diámetro, se determina la capacidad de infiltración de los suelos, se introducen los primeros 10 centímetros del tubo, una vez que se encuentra instalado se coloca en el interior del mismo una regla metálica de 30 centímetros, se le agregan 2 litros de agua y con un cronometro modelo Kk-1041 se mide el tiempo de infiltración.

VIII.2.5. Análisis de Información y Generación de Mapas Base

Factores Relacionados a la Erosión y Erodabilidad

La erosión es uno de los procesos de degradación que ha influido de manera determinante en el ambiente y en el desarrollo de la sociedad; este proceso es originado por factores naturales como la vegetación o inducido por la creciente actividad humana (Uso de suelo). Cuando se debe solo a causas naturales puede haber una tendencia al equilibrio entre los procesos de formación y los de desgaste del suelo; pero cuando el hombre usa y maneja inadecuadamente este recurso, altera dicho equilibrio acelerando la erosión y degradación la cual es responsable del deterioro de cientos de hectáreas en la entidad. Por lo cual se generaron mapas base de ambos factores para conocer que tanto se relacionan con los procesos erosivos y el grado de erodabilidad (Rivera, P. 2003).

Vegetación

Las modificaciones de la cubierta vegetal que han determinado en México las actividades humanas en general no son aun tan profundas como las causadas en algunas otras partes de la tierra, que han sido densamente pobladas desde hace muchos siglos. Sin embargo, la situación varía notablemente de una región a otra, cabe observar que en las últimas décadas, la destrucción y la perturbación de la vegetación natural en este país han alcanzado intensidad y rapidez inusitadas.

Los métodos de destrucción y perturbación de la vegetación han sido diversos, algunos de ellos de impacto directo y otros indirectos. Entre los primeros, cabe mencionar como principales: el desmonte, el sobrepastoreo, la tala desmedida, los incendios y la explotación selectiva de algunas especies útiles. Los segundos, tienen que ver principalmente con la modificación o eliminación del ambiente ecológico necesario para el desarrollo de una determinada comunidad biótica, causando su desaparición; aquí puede citarse, entre otros, a la erosión o al cambio de las características del suelo, a las modificaciones del régimen hídrico de la localidad, a veces del clima mismo así como contaminación de aire y agua.

El rumbo actual de los conocimientos acerca de la cubierta vegetal no permite aun apreciaciones comparativas de gran detalle; salvo en muy contados estudios locales en los que se ha buscado la definición de asociaciones; en general el enfoque de las investigaciones realizadas se ha mantenido en las últimas décadas a nivel de tipos de vegetación que equivalen aproximadamente a las formaciones vegetales (Rzedowski, J.2005). En virtud de tal circunstancia, estas serán también las categorías que se emplearan en el presente análisis.

Desde el punto de vista natural, el estado de Yucatán constituye un caso particular aparentemente es muy homogéneo en cuanto a su composición vegetativa, sin embargo esto no es del todo cierto; al realizar un análisis más profundo, se observa que existe una gran variabilidad; y si se le agregan impactos ambientales derivados del desarrollo socioeconómico, a través de su devenir histórico se encuentra aún una mayor diversidad espacial, expresada en diferentes comunidades vegetales.

La selva mediana subcaducifolia es la que predomina en el Estado con más del 62 % al sur y sureste; la distribución de este tipo de vegetación es a menudo muy difícil de interpretar y cartografiar, debido a que con frecuencia forma mosaicos complejos con otros tipos de vegetación. Tales mosaicos son particularmente frecuentes en sitios de terreno quebrado, donde diferencias de exposición o de localización topográfica determinan la presencia de uno o de otros tipos de comunidades vegetales (Figura 214).

La selva mediana caducifolia se distribuye al norte y noroeste cubriendo un 20% de la superficie estatal; y la selva baja caducifolia con el 8% al norte del Estado; la erosión en este tipo de comunidades vegetales, en corto tiempo se verá acelerada si no cuenta con una capacidad protectora suficiente sobre la superficie del suelo.

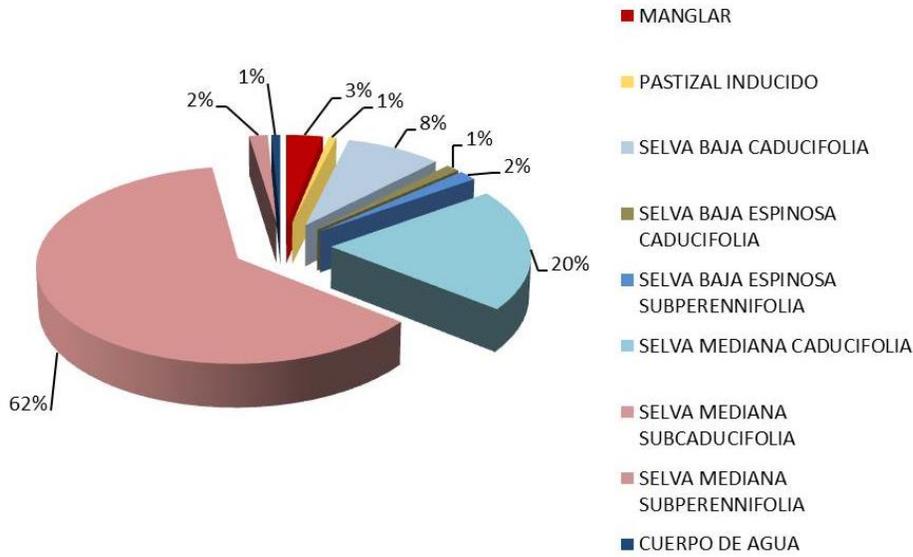


Figura 214. Porcentaje de Uso de suelo de cubierta vegetal en el estado de Yucatán.

Al contrario de otros estados de la República Mexicana, en el estado de Yucatán en vez de una degradación de la cubierta vegetal; en los últimos 10 años de 1998 al 2007-2010, se observa un aumento del más del 10 % de selva mediana subcaducifolia (tipo de vegetación que predomina en la entidad), existen 8 municipios donde a través de programas de reforestación y planes de manejo han incrementado notablemente el número de hectáreas de este tipo de vegetación (Figura 215). Así como también el aumento de la temperatura ocasionado por el cambio climático ha favorecido el incremento y desarrollo de algunas comunidades vegetales (Baeza S. *et al*, 2006).

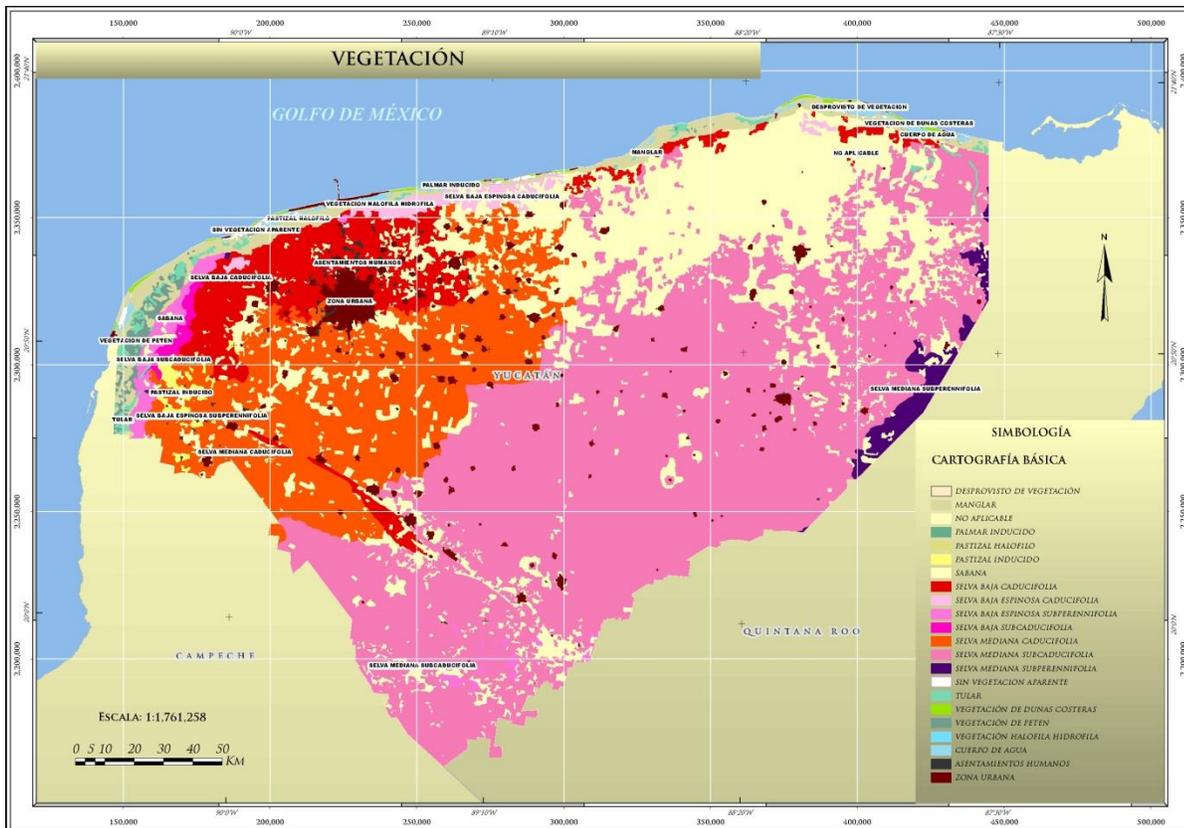


Figura 215. Distribución espacial de cubierta vegetal en el estado de Yucatán.

Tizimín es el municipio que más ha incrementado el número de hectáreas reforestadas con el 32% de selva mediana subcaducifolia, seguido de Peto con el 19%, Chemax 17%, Espita 11 %, Chankom 8%, Cenotillo 6%, Santa Elena 5% y Dzilam González con el 2% (Figura 216).

El incremento de cubierta vegetal presenta características que contribuyen a frenar el desgaste de la superficie del suelo; por un lado el follaje y la hojarasca de los arbustos reducen la velocidad y por consiguiente, la energía de las gotas que impactan el suelo. Por otro lado, el tronco y las raíces disminuye la capacidad de los distintos agentes climáticos para transportar materiales (Espinoza y Návar 2005); es decir las gotas que precipitan lo hacen con menos violencia y capacidad de remoción del suelo y el agua que escurre lo hace a menor velocidad tomando en cuenta que el relieve es semiplano, arrastrando así una menor cantidad de material particulado.

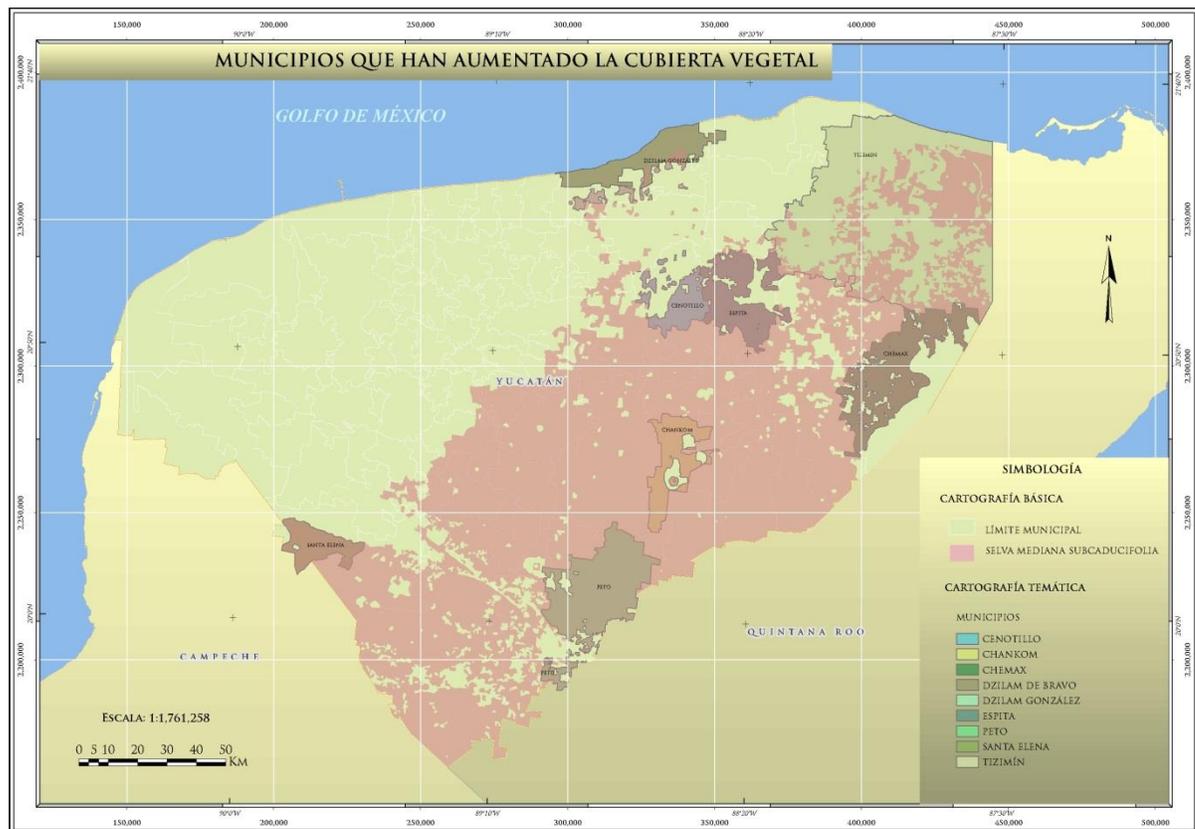


Figura 216. Municipios que han aumentado la cubierta vegetal en los últimos 10 años.

Uso de Suelo

Los estudios sobre el cambio en la cobertura y uso del suelo proporcionan la base para conocer las tendencias de los procesos de deforestación, degradación y pérdida de la biodiversidad de una región determinada (Lambin E. *et al*, 2001). Aunque existen eventos naturales como los huracanes, que propician variaciones en la cobertura natural, durante las últimas décadas las actividades humanas se han convertido en el principal desencadenador de transformación de los ecosistemas (Vitousek P. *et al*, 1997).

El uso del suelo esta inherentemente ligado con la sustentabilidad del uso de los recursos naturales. La forma e intensidad en que se modifica la cubierta vegetal determina la persistencia de los ecosistemas y por ende, de los recursos y servicios que estos proporcionan. Es fundamental, por tanto, entender en detalle los procesos de cambio de uso del suelo y sus efectos.

En la Figura 217 se muestra la tendencia actual del estado de Yucatán, más del 49 % de la superficie está ocupado por cobertura vegetal, el 39 % es destinado para uso pecuario, 10 % para uso agrícola y 2% para desarrollo urbano.

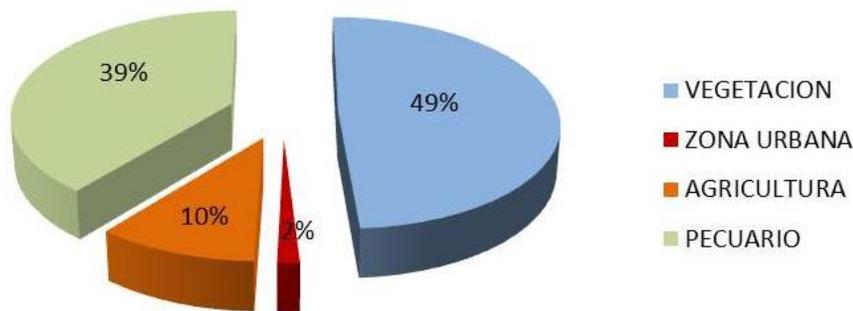


Figura 217. Porcentaje actual de uso de suelo.

A diferencia de las actividades agrícolas y crecimiento de las zonas urbanas, el uso pecuario ejerce un impacto directo sobre las comunidades vegetales, estas alteraciones perturban a su vez el ciclo hidrológico, la capa superficial del suelo y vegetación en su conjunto, trayendo como consecuencia mayor susceptibilidad a la erosión, pérdida de biodiversidad o al menos cambios en la composición en la cobertura vegetal propiciando otros riesgos como incendios, acelerando la degradación de los suelos.

VIII.2.6. Descripción e Interpretación de Datos Tomados en Campo

Regionalización empleada para determinar el tipo y grado de erosión

Para poder hacer una mejor descripción de la información fue necesario dividir el Estado en regiones, haciéndose un análisis para poder determinar cuál sería la más adecuada.

Algunas de las regionalizaciones consideradas, fueron: la propuesta por la SEMARNAT, basada en diversos rasgos naturales, o aquella propuesta por García de Fuentes y Córdoba (2010), en donde se toman en cuenta factores socio productivos y de biodiversidad. Sin embargo, para fines descriptivos, en este apartado se utiliza la regionalización elaborada por la COPLADE en el 2007 (Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado) y propuesta por protección civil del estado, para efectos de planeación y desarrollo económico la cual se encuentra dividida en 7 regiones diferentes (Figura 218). Donde previamente delimitadas facilitan el manejo de información y comportamiento de los procesos erosivos; ya que es un medio para expresar, de forma simplificada y resumida, la gran cantidad de información que es necesario manejar para elaborar una síntesis integrada de las características físicas del territorio. Una de las ventajas es que al realizar los procesos de esta forma se puede analizar estadísticamente una gran cantidad de niveles de información; entre las cuales existen relaciones espaciales que no podrían tenerse en cuenta sistemáticamente de otra manera.

Es importante mencionar, que si no se tomara como base esta regionalización y se manejara la información como una sola unidad (nivel estatal), la superposición de mapas temáticos produciría un elevado número de unidades territoriales, cuya definición y descripción llega a ser redundante, resultando su agrupación y trabajo más difícil y problemático. A demás, la superposición sistemática de elementos del territorio puede no resultar el método más adecuado para poner de manifiesto las relaciones entre ellos (clima, edafología, vegetación, precipitación etc.). Con lo cual se recurriría a una visión global o de conjunto, sin respetar temas o aspectos físicos individualizados y sin haber suposiciones "a priori" sobre los parámetros que van a desempeñar un papel importante en la diferenciación de divisiones espaciales sobre el territorio, manifestándose así tendencias de variación y grupos de variables espacialmente relacionados como por ejemplo la vegetación y los climas.

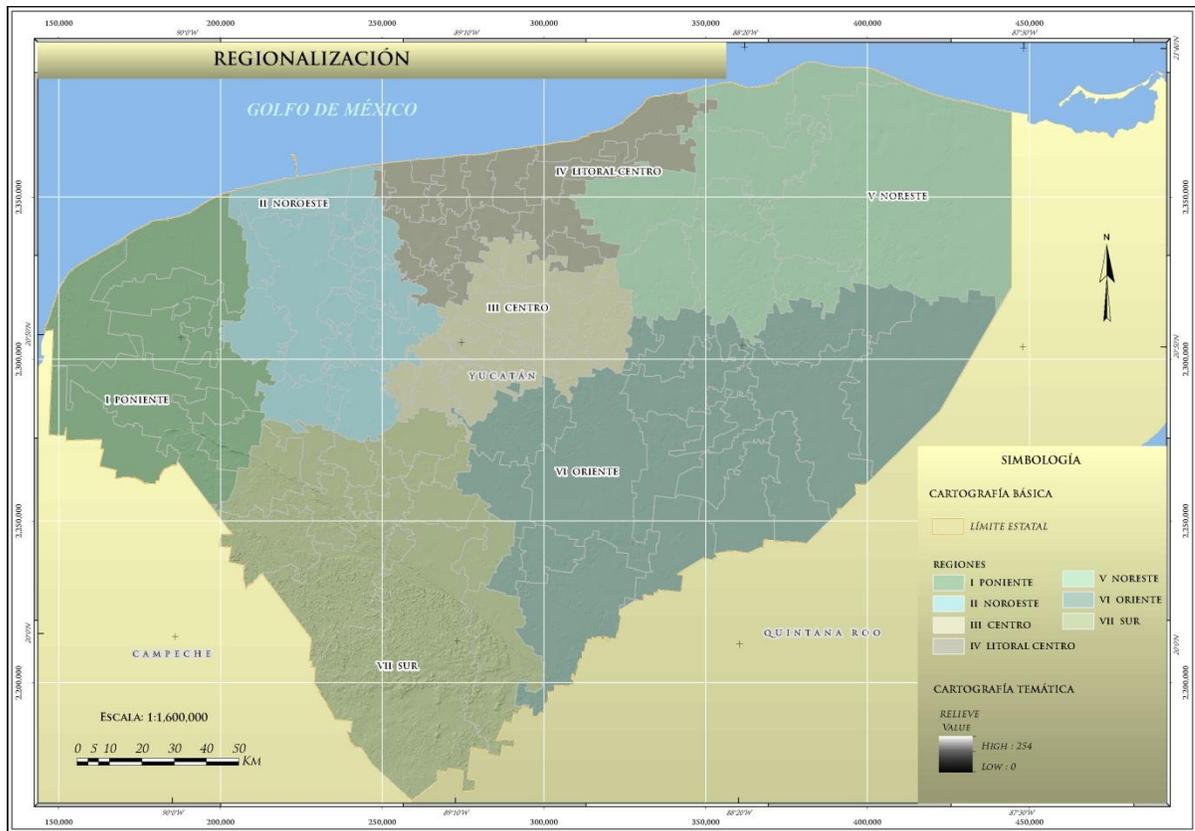


Figura 218. Regionalización del estado de Yucatán.

La forma en cómo se determinó el tipo y grado de erosión puede hacerse con facilidad teniendo como base una regionalización ya que con el valor de cada variable discriminante están asociados conjuntos de distintos tipos. De esta forma, cualquier porción del territorio puede ser fácilmente descrita en términos de porcentaje de superficie degradada en cualquier tipo y grado de erosión.

Tomando como base la regionalización descrita anteriormente, se determinaron diversos tipos y grados de erosión. En la Figura 219, las zonas en color rojo representan la erosión hídrica laminar en grado alto (Eh3), actualmente es una zona sometidas a procesos erosivos graves debido a la deforestación, cultivo intensivo de áreas vulnerables, sobre pastoreo, mal manejo de suelo y mantos acuíferos aunado al relieve y microrelieve abrupto con pendientes mayores a los 5° fomenta este tipo de erosión; las zonas en color amarillo representan áreas susceptibles a la erosión hídrica laminar media (Eh2) la cual, predomina en la mayor parte del territorio como: Santa Elena, Yaxcabá y Peto; generando impactos significativos en la vida de los habitantes locales y en la capacidad productiva de los recursos naturales, contribuyendo a profundizar la marginidad y pobreza en amplios sectores de la población por la sobre explotación del recurso (suelo), y por ultimo las áreas en color verde, son zonas con erosión hídrica lamiar baja (Eh1), las cueles están sujetas a severos procesos de degradación; generando un desgaste estructural de la capa superficial del horizonte A, contaminación salina al noroeste y noreste, contaminación química principalmente en zonas de cultivo, contaminación de los recursos hídricos subterráneos así como la modificación en la composición de la cubierta vegetal.

En la zona sur y sureste del Estado, la erosión hídrica tiene una relación directa con la precipitación media anual, y la cubierta vegetal profusa, en términos de protección. Sin embargo, cuando la cobertura vegetal es removida parcial o totalmente, la erosión hídrica aumenta en relación directa a la magnitud de la precipitación; debido a que la mayor parte del territorio se extiende principalmente entre las Isoyetas de 1000 mm y 1200 mm.

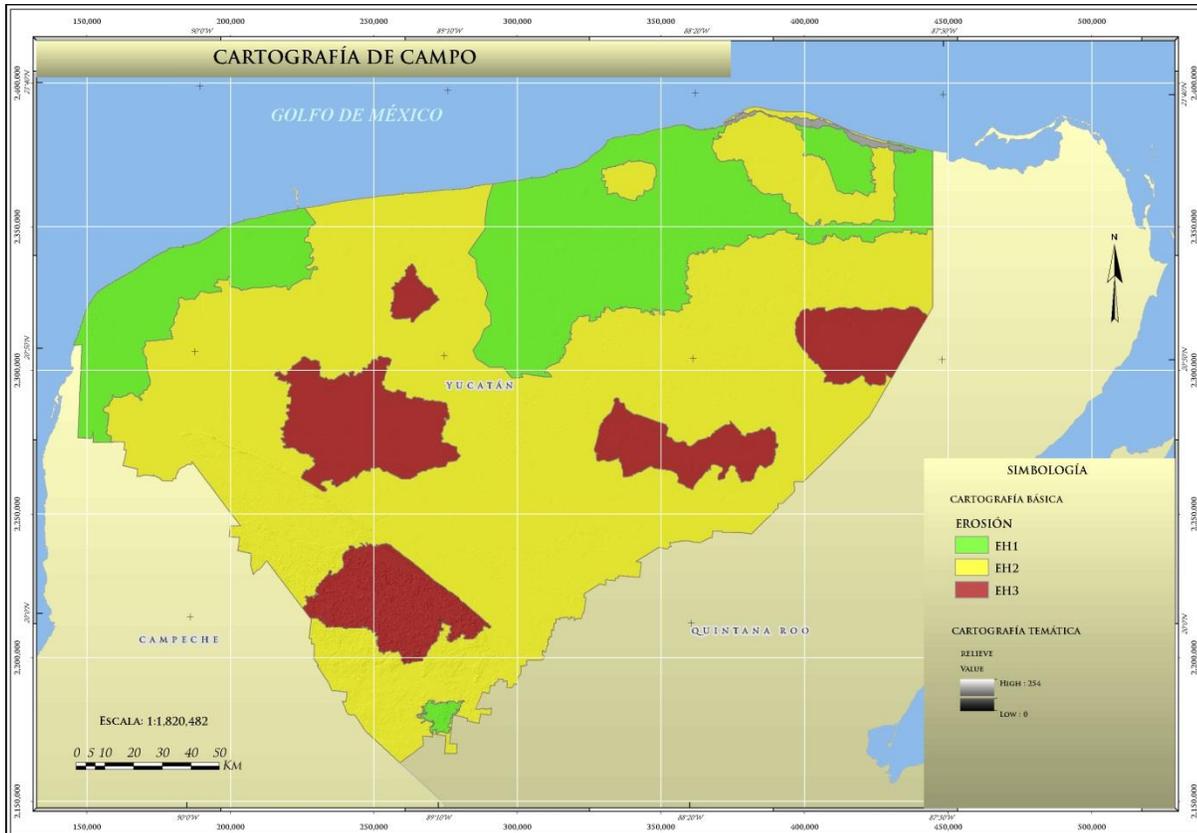


Figura 219. Polígonos de campo, para determinar el tipo y grado de erosión.

De acuerdo a la prospección los puntos que se verificaron en campo, demuestran que la erosión hídrica laminar en grado medio (Eh2) es la que predomina en la entidad con el 65 %, seguido de la erosión Hídrica laminar en grado bajo (Eh1) con el 22 % y erosión hídrica laminar en grado alto (Eh3) 13% (Figura 220). La degradación de los suelos puede estar más influenciada por las características de la lluvia, la topografía, la cobertura y el manejo que por las propiedades intrínsecas del mismo; sin embargo, cuando estos factores son iguales, algunos suelos se erosionan más fácilmente que otros.

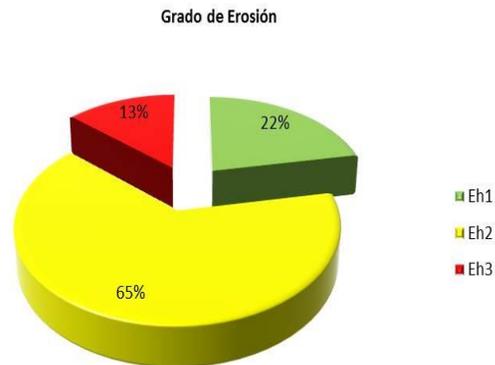


Figura 220. Grado de erosión de acuerdo a la prospección en campo.

Los suelos constituyen el sustento de muchas familias locales y regionales, sumado a la fragilidad de estos y su uso frecuentemente inadecuado, hacen necesaria una investigación y gestión tendientes a lograr la productividad sustentable de los mismos.

Zonificación empleada para determinar el grado de erodabilidad.

Para determinar el grado de erodabilidad se integró y analizó la información bibliográfica y cartográfica antes mencionada; se delimitó el área donde se tomó como unidad de muestreo cada uno de los tipos de suelo, tomando como base las 21 zonas fisiográficas propuestas por la Universidad Autónoma de Chapingo (UACH) 1991, las cuales fueron zonificadas de acuerdo a las variaciones que presenta el territorio yucateco.

En cuanto a su forma y a sus rasgos físicos más sobresalientes para la delimitación y caracterización de las regiones agrícolas que se observan en el interior de la entidad; se estableció la ubicación de 300 puntos para la toma de muestras de suelo (Figura 221), donde una vez analizadas algunas propiedades físicas como granulometría, textura, permeabilidad etc. Sirvió para determinar el grado de erodabilidad, el cual se describe más adelante.

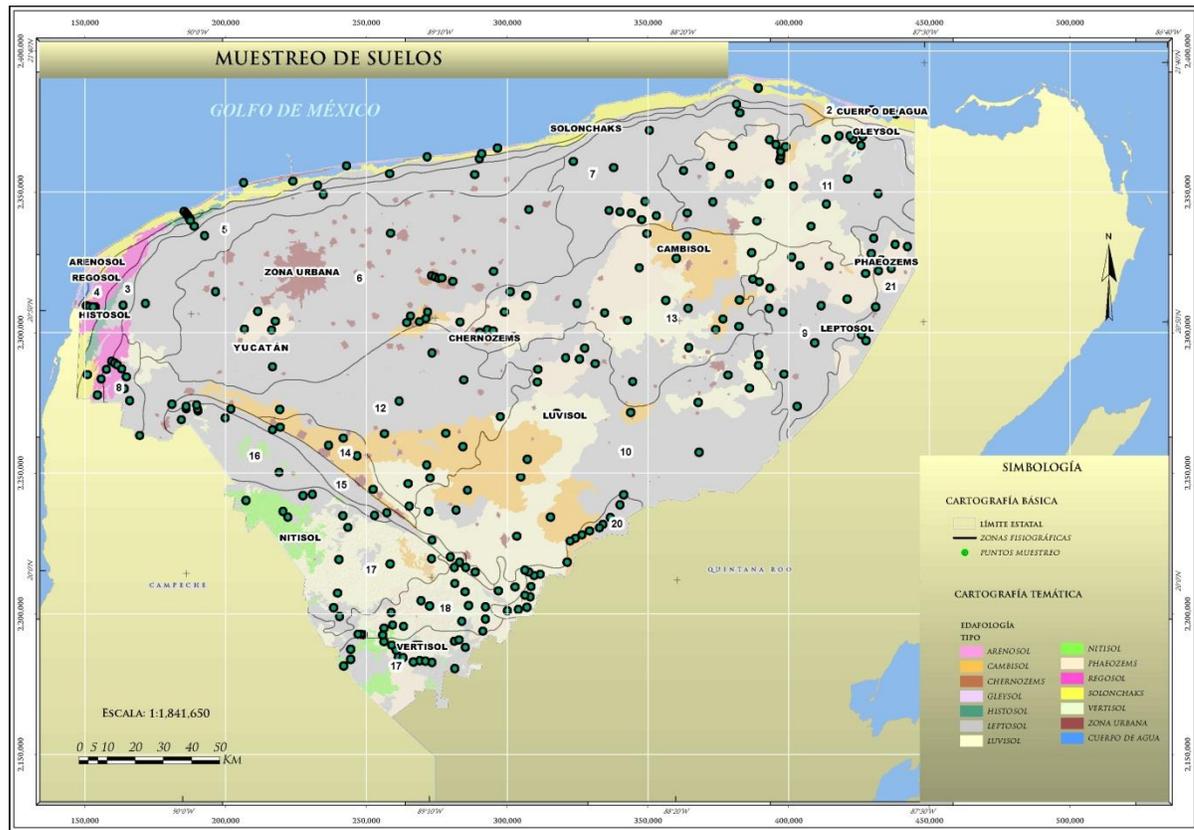


Figura 221. Puntos de muestreo de suelos en el estado de Yucatán.

Para la prospección de campo, se tomaron 5 muestras y submuestras por cada tipo de suelo que se encuentra dentro de cada una de las zonas fisiográficas, los puntos de muestreo se localizan sobre las principales vías de acceso, carreteras federales, estatales y terracería.

Con esta información se calculó el grado de erodabilidad de los suelos en la entidad; cuanto mayor sea la erodabilidad mayor porcentaje de erosión existirá, esto se encuentra condicionado por la precipitación, microrelieve, cubierta vegetal y prácticas de manejo.

Recorridos de campo

Los trabajos de campo se realizaron utilizando 59 cartas topográficas, escala 1:50,000, edafológicas y de vegetación escala 1:250,000 y geológicas escala 1:500,000. Donde se verificaron y cartografiaron 139 puntos vía terrestre y 136 puntos vía aérea en toda la entidad, en los cuales se tomó en cuenta el microrelieve del terreno, zonas agrícolas, tipo de vegetación, características edafológicas, pendiente del terreno, litología, precipitación y tipo de clima.

A estos puntos se les asignó una clave YE000, la cual ayuda a identificar principalmente el grado de erosión hídrica laminar en grado bajo (Eh1), erosión hídrica laminar en grado medio (Eh2) y erosión hídrica laminar en grado alto (Eh3). El manejo de los suelos que tradicionalmente se ha venido realizando, ha estado siempre en función de las circunstancias socioeconómicas y pocas veces se ha atendido la aptitud y vocación de este.

La parte más alterada ha sido la selva mediana subcaducifolia; esta predomina al este y sur del Estado; la cual ha sido remplazada gradualmente por zonas de uso agrícola y pecuario, espaciándose conforme se va perdiendo la fertilidad del suelo. Desarrollándose así, con el paso del tiempo vegetación secundaria (Fotografía 107) la cual, no aporta la protección necesaria contra los agentes erosivos como lo hace la vegetación primaria. Esta sucesión de vegetación se observó al noreste de la entidad, generando grandes manchones de erosión hídrica laminar en grado medio Eh2 (Fotografía 108).



Fotografía 107. Sucesión de vegetación primaria a secundaria, Municipio de Tizimin.



Fotografía 108. Cambio de uso de suelo, de forestal a agrícola Municipio de Tizimin.

De manera general, se observó que el continuo deterioro del medio natural sobre la zona centro, ha ocasionado una fuerte regresión de la vegetación, hacia unas formaciones vegetales alejadas del óptimo biológico (Fotografía 109) que no protege en su totalidad la capa superficial del suelo, la cual es proclive a la pérdida de los horizontes más fértiles.

Cuando la pérdida del suelo es superior a la capacidad de formación de éste, se produce una disminución progresiva de su potencial biológico y por tanto de su fertilidad, que puede llegar a concluir en condiciones de tipo desértico; este proceso se conoce como desertificación y se observa principalmente en grandes fragmentos en la zona centro y noreste, donde el suelo es casi nulo y extremadamente pedregoso (Fotografía 110); predominando la erosión hídrica laminar en grado medio (Eh2) con tendencia a alto (Eh3).

Considerando que la desertificación es la degradación del potencial biológico de la tierra, que puede concluir en condiciones de tipo desértico, el problema no puede tener una solución rápida, ni puede resolverse con acciones aisladas; para ello es necesario hacer programas de planificación, para mantener el equilibrio de los ecosistemas, de tal forma que permita sustentar la vegetación más adecuada para mitigar los efectos erosivos (Cotler, H. 2007).



Fotografía 109. Erosión hídrica laminar en grado alto Eh3, acelerada por la deforestación, es una zona en proceso de desertificación, Municipio de Tekit.



Fotografía 110. Erosión hídrica laminar en grado medio Eh2, la vegetación secundaria no es suficiente para mitigar los efectos erosivos.

Descripción del patrón de distribución y causas que aceleran la degradación de los suelos en cada una de las siete regiones.

Región I

Se ubica al noroeste del Estado (Figura 222), está constituida por las cartas: F15-D49, F15-D58, F15-D59, F15-D68, F15-D69 y parte de las cartas F16-C41, F16-C51, F16-C61, F16-C71 y F15-D79; limita al este con la región II, al sureste con la región VII y el estado de Campeche; en total en campo se verificaron 12 puntos en 11 localidades las cuales se distribuyen en 8 municipios y se describen en la Tabla 102.

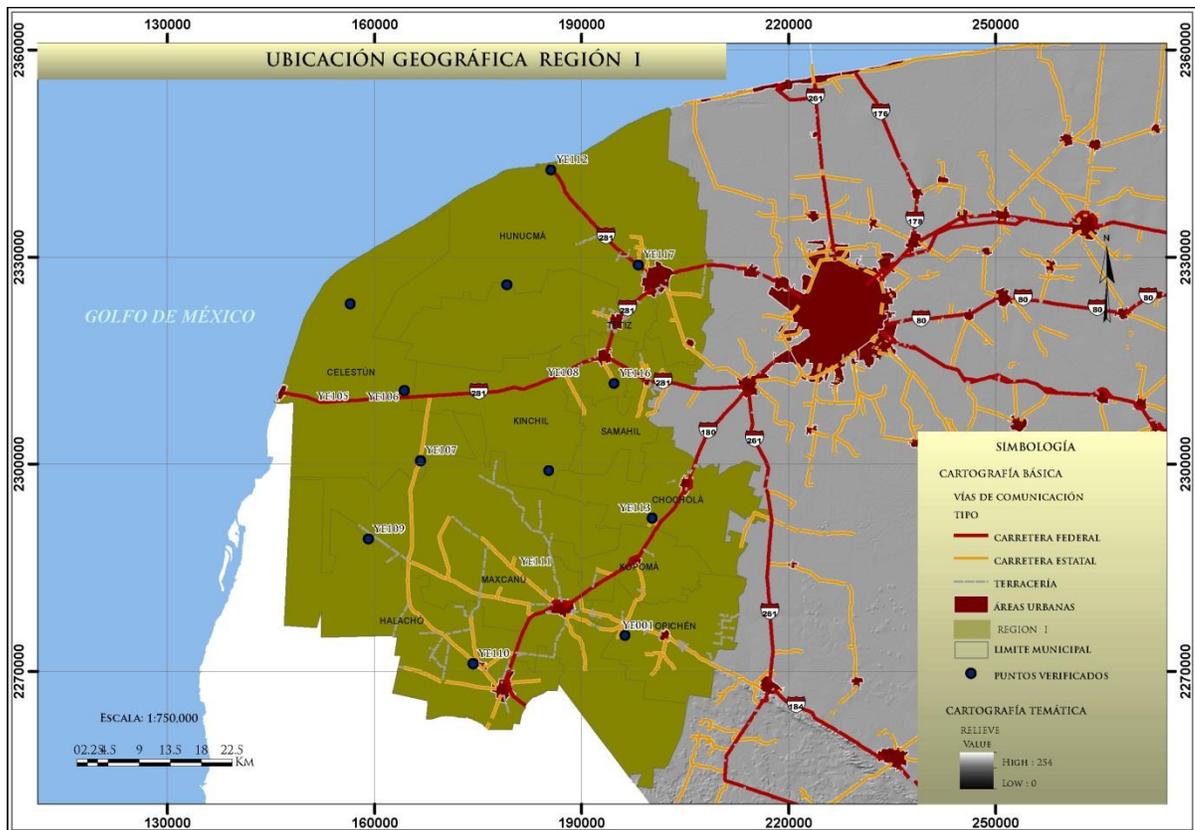


Figura 222. Ubicación geográfica y puntos de verificación en campo de la región I.

Tabla 102. Localización de puntos verificados en campo con problemas de erosión.

PUNTO	LOCALIDAD	MUNICIPIO	EROSION	X	Y
YE113	Chocholá	Chocholá	Eh2	200288	2292131
YE116	San Antonio Tamchen	Kinchil		194750	2311673
*YE117	San Pedro Jupche	Hunucmá		198224	2328813
YE001	La Colorada	Río Lagartos		196323	2275134
*YE105	Celestún	Celestún	Eh1	151006	2308327
*YE106				158628	2308244
YE107	Santa Julia			166675	2300505
YE108	Bella Flor	Kinchil	Eh2	184305	2311722
YE109	San Simon	Halacho		159089	2289090
YE110	Cepeda			174306	2271050
*YE111	San Bernardo	Maxcanú		180372	2284398
YE112	Sisal	Hunucmá	Eh1	185583	2342591

*Puntos de verificación con mayor grado de afectación.

El microrelieve en esta región es en su mayoría plano con pendientes que van de 0-0.3 a 0-0.5, el tipo de vegetación que predomina es selva mediana caducifolia con el 40 %, los suelos que existen son principalmente Leptosoles los cuales ocupan una extensión del 71% son poco profundos menores a los 20 cm. de profundidad lo cual hace que su degradación sea muy rápida y su recuperación muy lenta inapreciable a escala humana. La degradación es acelerada principalmente por los incendios forestales y deforestación; esto conlleva a la pérdida de gran cantidad de material edáfico, fomentado así, la erosión hídrica laminar en grado alto (Eh3), extendiéndose en el 58% de la superficie, siendo la zona centro del municipio de Maxcanú la más afectada como se puede observar en el punto de verificación YE111 (Fotografía 111).

La erosión hídrica laminar en grado bajo (Eh1), se observa al norte y noroeste abarcando una superficie de 41% aproximadamente; los municipios más afectados son Hunucmá y Celestún lo cual se pudo corroborar en los puntos de verificación YE105, YE106, YE107 y YE117; la cubierta vegetal primaria y secundaria ofrece protección al suelo frente al impacto de las gotas de lluvia y el viento así mismo sirve como una barrera natural ante el oleaje del mar (Fotografía 112). La deforestación y la ampliación de la zona urbana han acelerado los procesos erosivos; con la degradación de los suelos disminuye el funcionamiento óptimo de la tierra afectando así la estabilidad y estructura de los mismos.



Fotografía 111. Erosión hídrica laminar en grado alto Eh3, afloramiento de caliza coquina, Mpo. de Maxcanú.



Fotografía 112. Erosión hídrica laminar en grado bajo Eh1, Municipio de Celestún.

El Gobierno del Estado ha intensificado la prevención de los incendios forestales al regular el uso de la quema en la agricultura; estos problemas ocasionan que agricultores y ganaderos de la región tengan la necesidad de abrir nuevas áreas, aprovechando las zonas de agua acumulada cerca del mar; degradando la vegetación para cultivar milpas o pastos según sea el caso, lo que a su vez provoca una fuerte presión sobre los recursos y suelos.

Región II

La región II se ubica en la porción noroeste del Estado (Figura 223), está constituida por las cartas: F16-C52, F16-C32 y parte de las cartas F16-C41, F16-C42, F16-C51, F16-C53, F16-C61 y F16-C62. Esta región abarca básicamente planicies en donde se registran intersecciones con muy pocas ondulaciones comprendidas entre los 0°-0.5°. En la zona metropolitana, la altura máxima alcanza 20 m sobre el nivel del mar; en total en campo se verificaron 9 puntos en 9 localidades las cuales se distribuyen en 5 municipios y se describen en la Tabla 103.

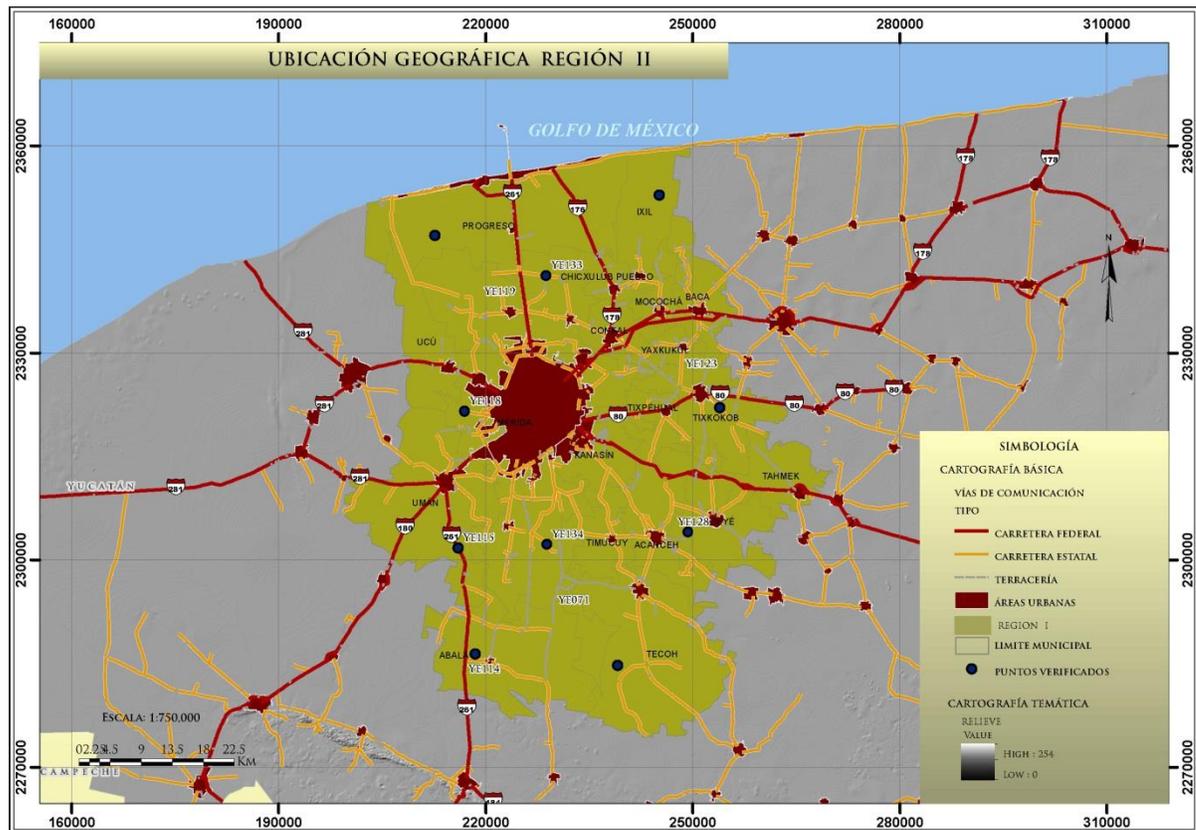


Figura 223. Ubicación geográfica y puntos de verificación en campo de la región II.

Tabla 103. Localización de puntos de campo con problemas de erosión.

PUNTO	LOCALIDAD	MUNICIPIO	EROSION	X	Y
*YE114	San Isidro Ochil	Abalá	Eh2	216807	2285696
*YE115	Hotzuc	Umán		216012	2301719
YE118	Chalmuch	Mérida	Eh1	216992	2321552
*YE119	Progreso	Progreso		219060	2337429
YE123	Nolo	Tixkokob		248301	2327505
YE124	Tixkokob	Tixkokob		253939	2322045
YE128	Yabuco	Seyé	Eh3	249379	2304018
*YE133	San Diego Texan	Mérida	Eh2	228806	2341194
YE134	Dzoyaxche			228893	2302226

*Puntos de verificación con mayor grado de afectación.

En una gran parte se reporta erosión hídrica laminar en grado moderado (Eh2) sin duda debido a las causas arriba mencionadas (Fotografía 114) y al sobrepastoreo que se observa en localidades como San Diego Texan (punto de verificación YE116). La erosión hídrica laminar en grado alto (Eh3) prevalece en el sector sur y hacia la porción este colindante con la región IV, los municipios más afectados por este tipo de erosión es la zona centro y este de Abalá (YE114) y noreste de Umán (YE115).



Fotografía 113. Erosión hídrica laminar en grado bajo Eh1, Municipio de progreso.



Fotografía 114. Campo ganadero, en la localidad de San Diego Texan, Municipio de Mérida, erosión hídrica laminar en grado medio Eh2.

Este tipo específico de degradación tiene serias consecuencias en las funciones del suelo: remueve los nutrimentos y la materia orgánica, reduce la profundidad de enraizamiento de las plantas y disminuye la tasa de infiltración y retención de agua. Cuando los sitios afectados por este tipo de erosión (Eh2 y Eh3) se destinan a fines agrícolas es necesaria la aplicación de fertilizantes, pesticidas o el uso de aguas tratadas para su productividad, pero en ocasiones esto promueve la eutrofización y la contaminación de los acuíferos o de otros cuerpos de agua donde llegan los escurrimientos.

Región III

La región centro está constituida por la carta: F16-C54 y segmentos de las cartas F16-C43, F16-C44, F16-C53, F16-C62, F16-C63 y F16-C64 (Figura 224). Los Leptosoles es el tipo de suelo que predomina con una superficie de 77% seguido de Phaeozems 15%, Cambisoles, Luvisoles y Chernozems que representan el 8%; la vegetación está constituida principalmente por selva mediana caducifolia ocupando una superficie del 53% y selva mediana subcaducifolia con el 47%. En total en campo se verificaron 9 puntos en 9 localidades y misma cantidad de municipios los cuales se describen en la Tabla 104.

Limita al norte con la región II, IV y V, al sureste con la VI y al suroeste con la región VII; la falta de protección hídrica ha permitido el arrastre no solo del suelo superficial, sino también de varios centímetros de subsuelo, dejando al descubierto las raíces de los árboles y de la roca. La erosión hídrica laminar en grado medio (Eh2) predomina al centro y noreste afectando el 71% de la superficie, 12 municipios presentan este grado de erosión, como Izamal punto de verificación YE036 y Tunkás punto de verificación YE037 (Fotografía 115) lo cual ha ocasionado que se reduzca la humedad y materia orgánica disponible en el suelo acentuando las condiciones de la aridez; la ampliación de las fronteras agrícolas y ganaderas son la causa principal (Fotografía 116). El microrelieve que es ligeramente ondulado favorece el arrastre de sedimentos, causando el desprendimiento y acarreo acelerado de las partículas del suelo (arcilla, limos y arenas), los cuales se depositan en las partes bajas para uso agrícola.

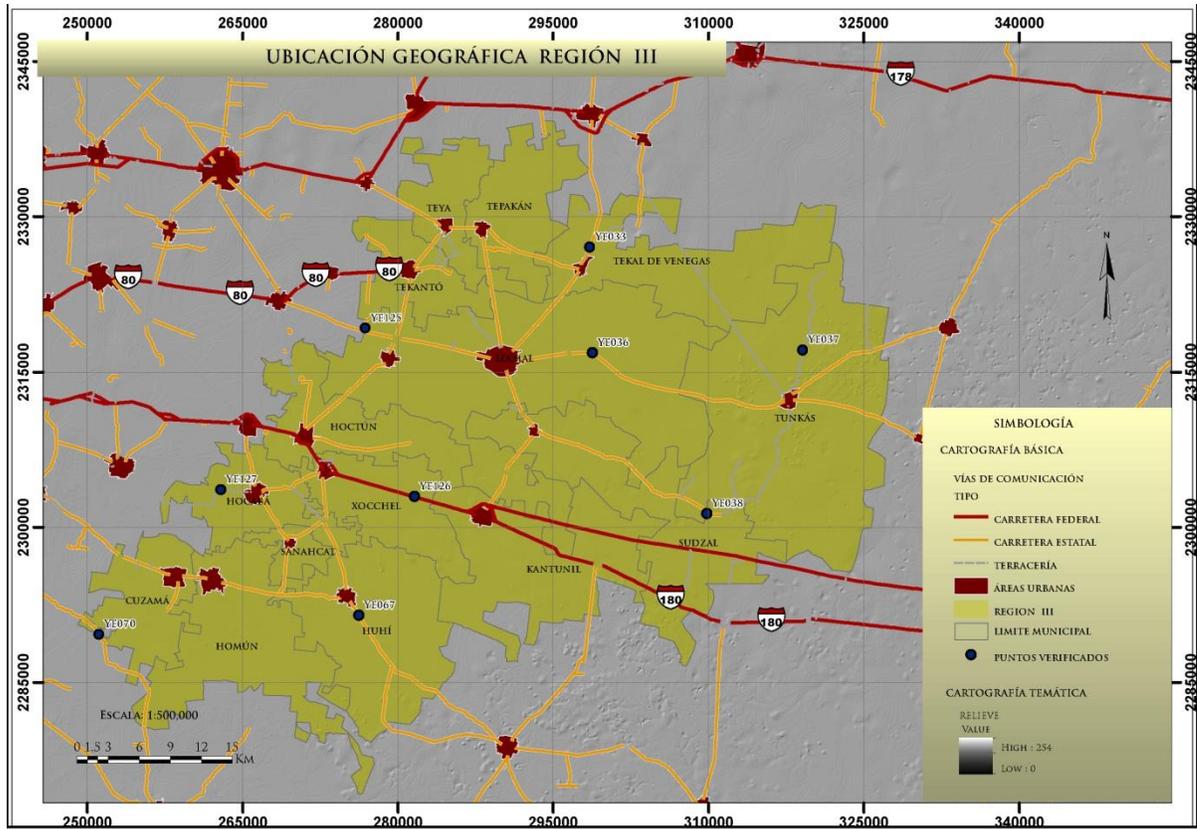


Figura 224. Ubicación geográfica y puntos de verificación en campo de la región III.

Tabla 104. Localización de puntos en campo con problemas de erosión.

PUNTO	LOCALIDAD	MUNICIPIO	EROSION	X	Y
YE125	Mucuyche	Bokobá	Eh2	276889	2319198
YE126	San Cristobal	Xocchel		281612	2302941
YE127	Popox	Hocabá	Eh3	262905	2303601
YE033	Thohoku	Tekal De	Eh1	298545	2327022
*YE036	Sitilpech	Izamal	Eh2	298791	2316835
*YE037	Xtohil	Tunkás		319138	2317107
*YE038	Chmbek	Sudzal	Eh1	309853	2301281
YE067	Huhí	Huhí	Eh2	276217	2291461
YE070	Chinkila	Cuzamá	Eh3	251132	2289617

*Puntos de verificación con mayor grado de afectación.



Fotografía 115. Erosión hídrica laminar en grado medio Eh2, Municipio de Izamal.



Fotografía 116. La vegetación secundaria ha ido desplazando a la primaria.

Hacia el sureste, la erosión hídrica laminar en grado alto (Eh3) afecta el 9% de la superficie, siendo la zona sureste del municipio de Sudzal la más degradada lo cual se pudo observar en el punto de verificación YE038; resultado de la deforestación e incendios forestales (Fotografía 117), con lo cual la lluvia golpea directamente la superficie del suelo en lugar de gotear gradualmente desde las ramas y caer con menor energía; cuando ha sido erosionada la capa superior del suelo es más difícil la regeneración vegetal por lo cual la complejidad de la presión que se ejerce sobre el suelo y sus consecuencias deriva de la intervención de múltiples factores (microrelieve, densidad poblacional, uso de suelo etc.); su combinación varía de una región a otra, lo que da lugar a condiciones que favorecen o agravan su degradación (Fotografía 118).



Fotografía 117. Erosión hídrica laminar en grado alto Eh3, fomentada por los incendios forestales, Municipio de Sudzal.



Fotografía 118. Erosión hídrica laminar en grado alto Eh3; se observa el suelo desnudo desprovisto de vegetación.

Región IV

La región está constituida por las cartas: F16-C25, F16-C33, y parte de las cartas F16-C32, F16-C34, F16-C25, F16-C35, F16-C42, F16-C43, F16-C44 y F16-C43 (Figura 225). El tipo de suelo que predomina es Leptosol con el 90%, seguido de Solonchaks 8%, Chernozems y Arenosol 1%. La Vegetación está constituida principalmente por selva mediana caducifolia con el 31% seguida de selva baja caducifolia con el 23%; el clima es cálido húmedo tropical Ax'(W0) y la precipitación media anual oscila entre los 600 y 800 milímetros. En total en campo se verificaron 9 puntos en 9 localidades y misma cantidad de municipios los cuales se describen en la Tabla 105.

Tabla 105. Localización de puntos verificados en campo con problemas de erosión.

PUNTO	LOCALIDAD	MUNICIPIO	EROSION	X	Y
YE122	Timul	Motul	Eh1	253324	2344013
*YE130	San Diego	Yobaín	Eh2	282856	2349872
*YE131	Espita	Espita		280811	2331107
YE132	San Antonio Chermal	Motul	Eh3	264604	2328941
*YE023	Tumbo	Tizimín	Eh1	342218	2357955
YE026	Holontun	Panabá	Eh2	332620	2365239
YE032	Bukax	Temax	Eh1	299174	2346758
*YE034	Dzilam	Dzilam Gonzales		302048	2358428
*YE035	Telchac Puerto	Telchac Puerto		321830	2360993

*Puntos de verificación con mayor grado de afectación.

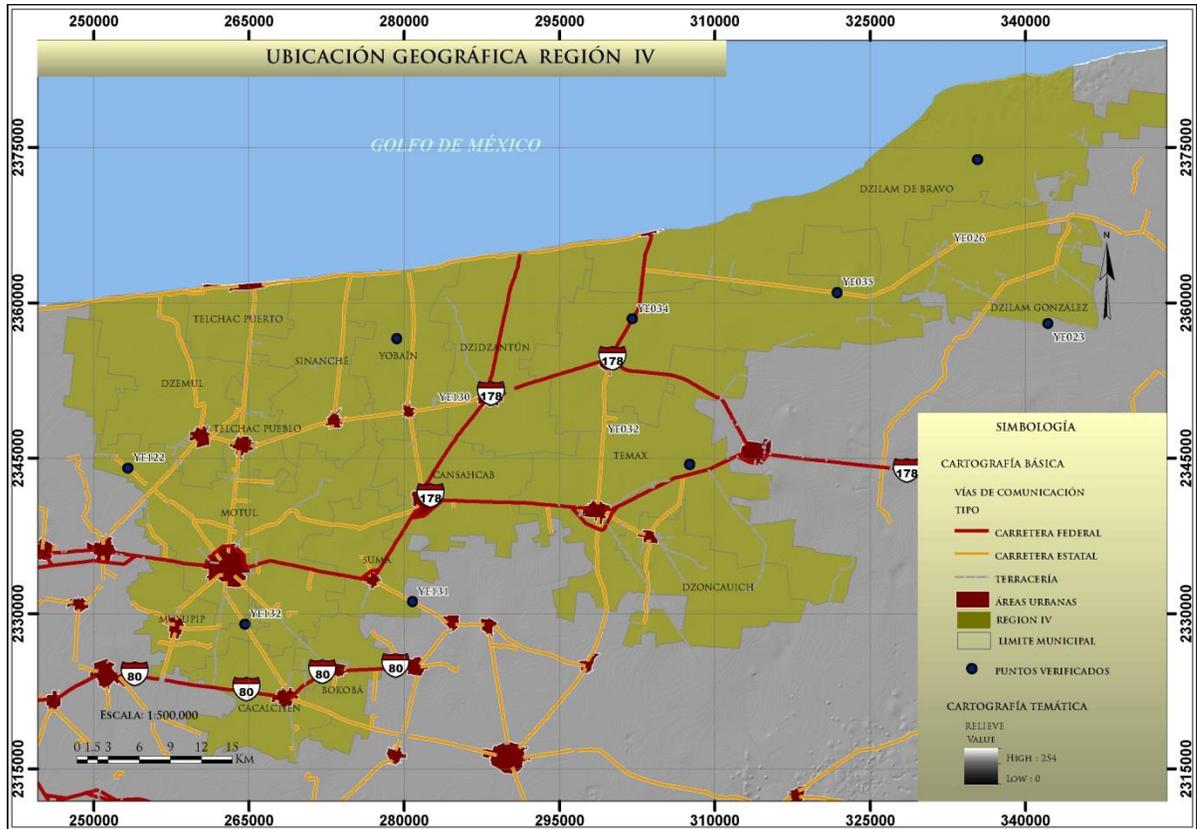


Figura 225. Ubicación geográfica y puntos de verificación en campo de la región IV.

La frecuencia de eventos erosivos (erosión eólica e hídrica) ha aumentado; el mayor problema se observa en tierras de labranza y las zonas cerca de la costa (Fotografía 119); como en Dzemul, Telchac Puerto y Motul, aumentando la susceptibilidad a la erosión hídrica laminar en grado medio (Eh2) lo cual afecta el 48% de superficie en la región y se observó en el punto de verificación YE034 (Fotografía 120).



Fotografía 119. Erosión hídrica laminar en grado medio Eh2, cerca de la línea de costa Municipio de Telchac Puerto.



Fotografía 120. Erosión hídrica laminar en grado medio Eh2, la deforestación es la causa principal, Municipio de Dzilam.

Este tipo de erosión (Eh2) está asociado principalmente a la deforestación de las selvas causando que el uso de suelo cambie a agrícola; no hay vegetación que impida el transporte de suelo por la acción pluvial, lo que da lugar a grandes extensiones de territorio con indicio de degradación, representadas por algunas grietas de desecación.

Al suroeste la erosión hídrica laminar en grado alto (Eh3) afecta el 5 % de la superficie causando una degradación y deterioro irreversible afectando la biodiversidad y sistemas agrícolas, siendo Espita y el sureste de Tizimín los municipios más afectados puntos de verificación YE131 y YE023 (Fotografía 121).

Al noreste y sureste la erosión hídrica laminar en grado bajo (Eh1) afecta el 47% de superficie, principalmente por la deforestación; la buena cubierta vegetal que existe en la región ha ayudado a mitigar los efectos erosivos (Fotografía 122), controlando los excesos de agua en el perfil del suelo, disminuyendo así, la velocidad de flujo de escurrimiento en el microrelieve e integrando el suelo como una masa unitaria entre otros beneficios; la cual se puede observar en el municipio de Yobaín punto de verificación YE130.



Fotografía 121. Erosión hídrica laminar en grado alto Eh3, el espesor de suelo es nulo, Municipio de Espitia.



Fotografía 122. Erosión hídrica laminar en grado bajo Eh1, la buena cubierta vegetal ayuda a mitigar los efectos erosivos Municipio de Yobain.

Región V

Está constituida por las cartas: F16-C26, F16-C27, F16-C36, F16-C37, F16-C38, F16-C45, F16-C46, F16-C47, F16-C48, y parte de las cartas F16, C25, F16-C34, F16-C35, F16-C44, F16-C55 y F16-C56. Se localiza al noreste del Estado (Figura 226), con una altura mínima de 1 metro y una máxima de 41 metros sobre el nivel medio del mar, limita al norte con el Golfo de México, al noroeste con la región IV y al sur con la región VI, presenta un microrelieve ligeramente ondulado, principalmente al zona centro y noreste, con precipitaciones aproximadas a los 800 milímetros al año; en total en campo se verificaron 29 puntos en 29 localidades pertenecientes a 6 municipios los cuales se describen en la Tabla 106.

Los suelos son negros de tipo Phaeozems abarcan una superficie del 22% y castaños de tipo Leptosol predominando en la región con el 49%, debido a la alta humedad y al tipo de clima que prevalece cálido subhúmedo Aw1 (x'), la descomposición de materia orgánica es muy lenta, lo que hace que se acumule una gruesa capa de suelo orgánico; el cual es retenido por una intrincada red de raíces principalmente de pastizales cultivados y selva mediana subcaducifolia, evitando el desplazamiento de sedimentos.

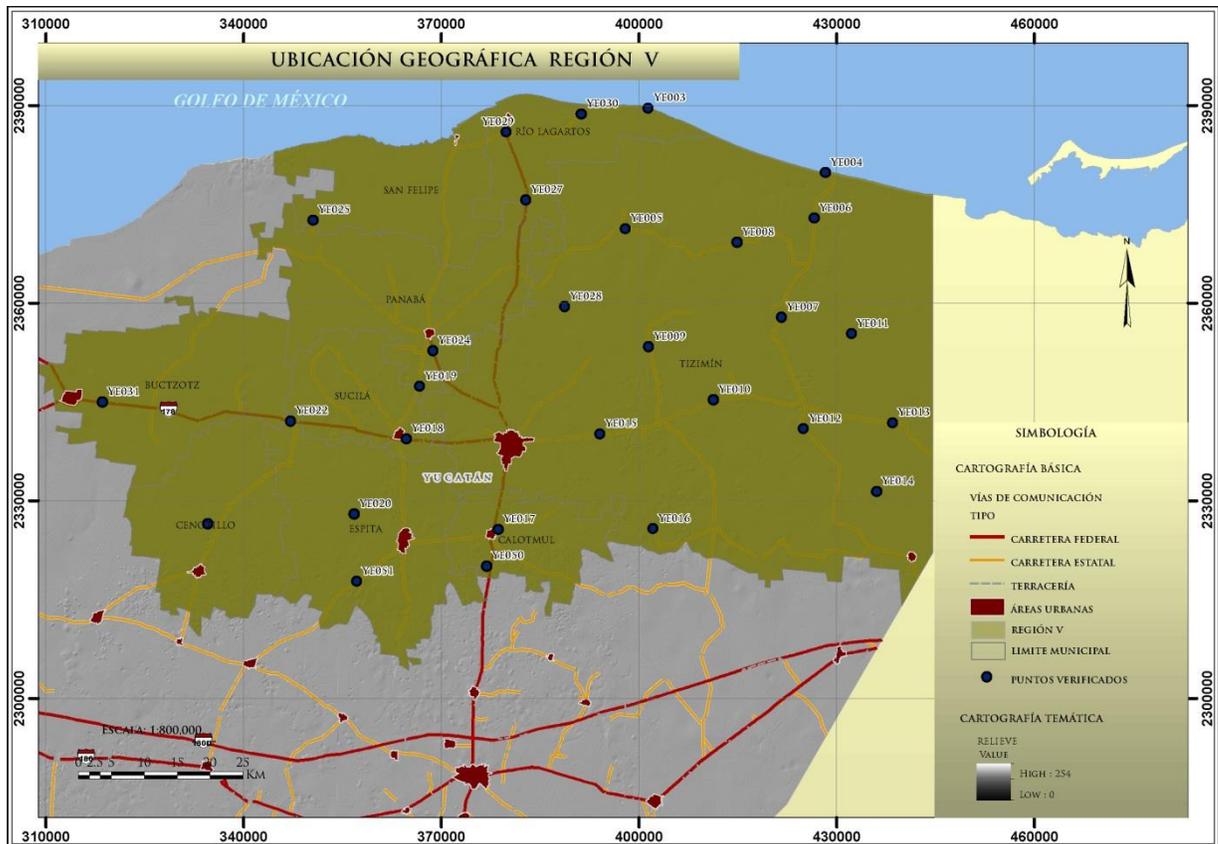


Figura 226. Ubicación geográfica y puntos de verificación en campo de la región V.

Tabla 106. Localización de puntos verificados en campo con problemas de erosión.

PUNTO	LOCALIDAD	MUNICIPIO	EROSION	X	Y
YE003	San Pablo	Tizimin	Eh2	401483	2389555
YE004	El Cuyo			428311	2379779
YE005	Sinal			398012	2371260
YE006	San Nicolás		Eh1	426660	2372836
YE007	Santa Rosa			421699	2357816
YE008	El Tumbo			414932	2369198
YE009	Emanuel		Eh2	401526	2353328
YE010	San Antonio Ponce		Eh1	411357	2345286
YE011	San Pedro			432320	2355286
YE012	San Felipe		Eh2	425056	2340889
YE013	San Ramón			438550	2341801
YE014	Benito Juárez			436156	2331363
YE015	San Javier			394137	2340093
YE016	Dzonot Meza			402164	2325687
YE017	Calotmul			378693	2325608

.....Continuación de Tabla 106.

PUNTO	LOCALIDAD	MUNICIPIO	EROSION	X	Y
*YE018	Sucilá	Tizimín	Eh1	364717	2339347
YE019	Xiat			366756	2347328
YE020	Yokdzonot		Eh2	356816	2327931
YE021	Chen Keten		Eh1	334579	2326487
YE022	San Antonio			347192	2342069
YE024	San Isidro			368825	2352735
YE025	Maracaibo			350600	2372545
YE027	San Pedro	Panabá	Eh2	382889	2375616
YE028	Dzibalku	Tizimín	Eh1	388781	2359445
*YE029	San Pedro	Río Lagartos	Eh2	379911	2385926
YE030	San Luis			391285	2388667
YE031	San Gregorio	Buctzotz	Eh1	318629	2344931
YE050	Calotmul	Calotmul	Eh2	376942	2320035
YE051	Mahicab	Espita		357186	2317690

*Puntos de verificación con mayor grado de afectación.

Se observa erosión hídrica laminar en grado bajo (Eh1) en la zona centro, noroeste y norte de la región, afectando a municipios de grandes extensiones como se observa en la localidad de Sucilá municipio de Tizimín punto de verificación YE018 (Fotografía 123), la ampliación de las fronteras agrícolas es el principal detonante.

La deforestación y el abandono de cultivos ha fomentado la degradación de los suelos principalmente la zona norte y sur de la región; donde existe más del 60% de superficie afectada por erosión hídrica laminar en grado medio (Eh2); la zona centro del municipio de Río Lagartos en la localidad de San Pedro punto de verificación YE029 es de las la más degradadas (Fotografía 124).

Los efectos de la destrucción de la capa arbórea constituye un problema grave con consecuencias múltiples; ya que se reduce la productividad de la zona, los suelos están más propensos a erosionarse sin una buena cubierta vegetal y un bajo índice de biomasa acumulada es insuficiente para amortiguar los efectos de escorrentía superficial y cortical. De igual forma se puede determinar que el grado de erosión en la región, difiere, dependiendo de la combinación en las características del suelo, ya que existen zonas con un microrelieve pronunciado mayor a los 2°; lo cual genera poca resistencia al desprendimiento de partículas de suelo, y una gran capacidad de infiltración y percolación depositándose así material edáfico en el subsuelo.



Fotografía 123. Erosión hídrica laminar en grado medio Eh2, la ampliación de las fronteras agrícolas han fomentado la degradación, Municipio de Tizimín.



Fotografía 124. Erosión hídrica laminar en grado Medio Eh2, la deforestación es la causa principal, Municipio de Río Lagartos.

Región VI

Se localiza al oriente del Estado, está constituida por las cartas: F16-C57, F16-C58, F16-C64, F16-C65, F16-C66, F16-C67, F16-C74, F16-C75, F16-C76, F16-C77, F16-C84, F16-C85, F16-A14 y parte de las cartas F16-C55, F16-C56, F16-C63, F16-C64, F16-C73, F16-C83 (Figura 227); presenta una altura mínima de 11 msnm y una máxima de 40 msnm; limita al norte con la región V, al noroeste con la región III y región VII; presenta un micro relieve ondulado principalmente al norte y noroeste, con precipitaciones máximas de 1000 milímetros al año; en total en campo se verificaron 37 puntos en 37 localidades ubicados en 20 municipios los cuales se describen en la Tabla 107.

Los suelos en esta región son de escaso espesor sobre macizo rocoso y suelos extremadamente gravilimosos y pedregosos; el escaso entendimiento de la heterogeneidad espacial, producto del microrelieve de las zonas cársticas, dificultan el establecimiento exitoso de prácticas agrícolas, forestales y pecuarias; principalmente en suelos de tipo Leptosol que ocupan una superficie del 55%, seguido de los Luvisoles con el 22% y los Cambisoles con el 13%.

El clima que prevalece es cálido subhúmedo Ax (W1); lo cual propicia el desarrollo de selva mediana subcaducifolia en un 88% de su superficie.

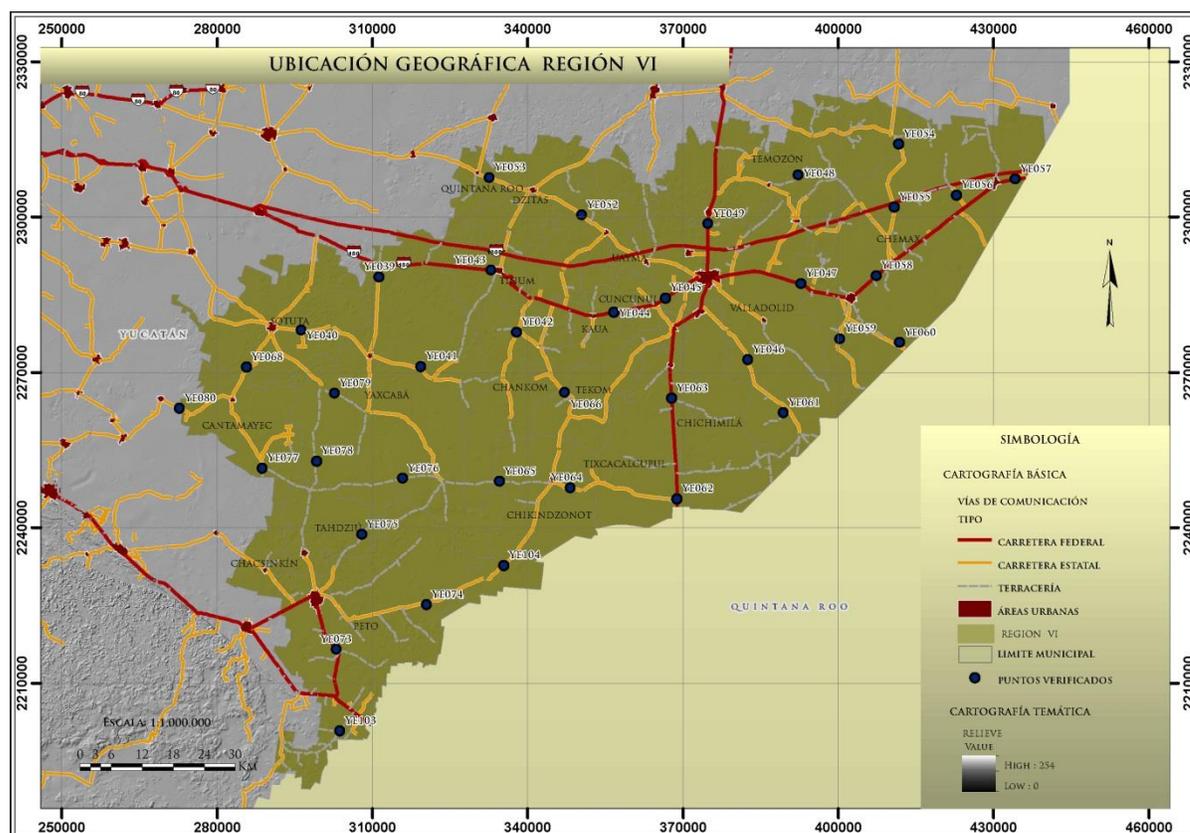


Figura 227. Ubicación geográfica y puntos de verificación en campo de la región VI.

La actividad humana ha degradado gran parte de la capa protectora de vegetación, produciendo una erosión más acelerada.

Tabla 107. Localización de puntos verificados en campo con problemas de erosión.

PUNTO	LOCALIDAD	MUNICIPIO	EROSION	X	Y
YE039	Libre Union	Yaxcabá	Eh2	311223	2288394
YE040	Sotuta	Sotuta		296268	2278117
YE041	Chimay	Yaxcabá		319422	2271111
YE042	Ticimul	Chankom	Eh3	337853	2277726
YE043	Piste	Tinum		332953	2289715
YE044	Kaua	Kunkunul	Eh2	356616	2281609
YE045	Valladolid	Valladolid		366615	2284341
YE046	Xocan		Eh3	382576	2272449
YE047	X-Alau	Chemax	Eh2	392770	2287115
YE048	Hunuku	Temozón		392282	2308087
YE049	Temozón			374814	2298696
YE052	Baluntun	Tinum		350486	2300367
YE053	Quintanaroo	Quintanaroo		332579	2307605
YE054	Yokdzonot Presentado	Temozón		411669	2314104
YE055	Chunjujub	Chemax		Eh3	410824
YE056	Santa Cruz		422900		2304228
YE057	X-Can		Eh2	434249	2307302
*YE058	Chemax			407336	2288640
YE059	Chulutan	400320	2276476		
YE060	Chan-Pistemax		Eh1	411845	2275732
*YE061	X-Balche	Valladolid	Eh2	389433	2262200
YE062	X-Thobil	Tixcacalcupul		368858	2245555
YE063	Santiago			367787	2264971
YE064	Ekpedz	Chikidzonot		348274	2247682
YE065	San Cristobal			334580	2248886
YE066	Muchucucah	Tekom		347205	2266123
YE068	Xuyumal	Camtamatec		285713	2271018
YE073	X-Pechil	Peto		303022	2216448
YE074	San Mateo			320473	2225120
YE075	Xbacain	Tahdziú		307981	2238646
YE076	San Martin	Yaxcabá		315869	2249480
YE077	Neneia	Camtamayec		288739	2251465
*YE078	San Eustaquio	Yaxcabá		299238	2252849
YE079	Tixcacalyub			302742	2265927
YE080	Cholul	Camtamayec	272718	2263041	
YE103	Roble	Peto	303717	2200718	
YE104	Sac Beh	Chikindzonot	335373	2232684	

*Puntos de verificación con mayor grado de afectación.

Los cambios de uso de suelo (como el paso de vegetación nativa a cultivos), así como la deforestación a gran escala (Fotografía 125); producen un aumento de la erosión hídrica laminar en grado medio (Eh2) lo cual afecta el 84 % de superficie y se observó en el punto de verificación YE061 en la localidad de X-Balche municipio de Valladolid.

La erosión hídrica laminar en grado medio (Eh2) se observa principalmente hacia el norte, centro y sur; provocando que el suelo pierda sus nutrientes lo cual hace que sea infértil y poco productivo; la escasa compactación de los suelos ha generado la formación de algunas cárcavas de pequeña magnitud en algunas zonas de la localidad de San Eustaquio municipio de Yaxcabá punto de verificación YE078 (Fotografía 126).



Fotografía 125. Erosión hídrica laminar en grado medio Eh2, fomentado por la deforestación y ampliación de las fronteras agrícolas, Municipio de Valladolid.



Fotografía 126. Erosión hídrica laminar en grado medio Eh2; se observan algunos manchones de vegetación natural.

El mayor riesgo de erosión hídrica laminar en grado alto (Eh3), se presenta al noreste y zona centro como se observa en los municipios de Chemax y Temonzon, el cambio del clima y el uso de pesticidas conllevan una disminución del contenido de materia orgánica y material edáfico por lo que los suelos son poco profundos menores a los 5 cm incapaces de sostener una buena cubierta vegetal lo cual se puede observar en el punto de verificación YE058 (Fotografía 127). El aumento de las tasas de evaporación, el uso de fertilizantes, así como el riego e incendios; favorece la concentración de sales, lo que aumenta la sensibilidad a erosionarse con lluvias poco intensas, ya que se ha generado una costra la cual evita la infiltración y generación de sedimentos (Fotografía 128).



Fotografía 127. Erosión hídrica laminar en grado medio Eh2, el espesor de suelo es casi nulo, Municipio de Yaxcabá.



Fotografía 128. Erosión hídrica laminar en grado alto Eh3, los incendios forestales aceleran el proceso, Municipio de Chemax.

Región VII

La región VII se encuentra ubicada en el Cono Sur del Estado, colinda con la región VI al este, con las regiones II y III al norte y con la región I hacia el oeste. Está constituida por las cartas: F16-C72, F16-C82, F16-C83, E16-A12, E16-A13, E16-A22, E16-A23 y parte de las cartas F16-C61, F16-C62, F16-C63, F16-C73, y E16-A14 (Figura 228); en total en campo se verificaron 24 puntos en 22 localidades y se ubican en 11 municipios, los cuales se describen en la Tabla 108.

Comprende varios tipos de suelos, entre los que predominan los Leptosoles (37%) y los Luvisoles (27%); los suelos de tipo Cambisol representan el 13%, seguido de Phaeozems 9%, Nitisoles 8% y finalmente los Vertisoles 6%. El tipo de vegetación que prevalece es la selva mediana subcaducifolia con el 75%, seguida de la selva mediana caducifolia con el 21% y en menor porcentaje se encuentran la selva baja caducifolia y la selva baja espinosa subperenifolia con el 2% respectivamente; donde la precipitación media anual es de 1000 mm.

Esta región se caracteriza por presentar una elevada variabilidad espacial de los horizontes superficiales de suelo por ejemplo; en la parte norte de la Sierra de Ticul se observa un perfil edáfico con los horizontes superficiales sumamente adelgazados y en algunas zonas los suelos parecen estar truncados y se han perdido totalmente los horizontes

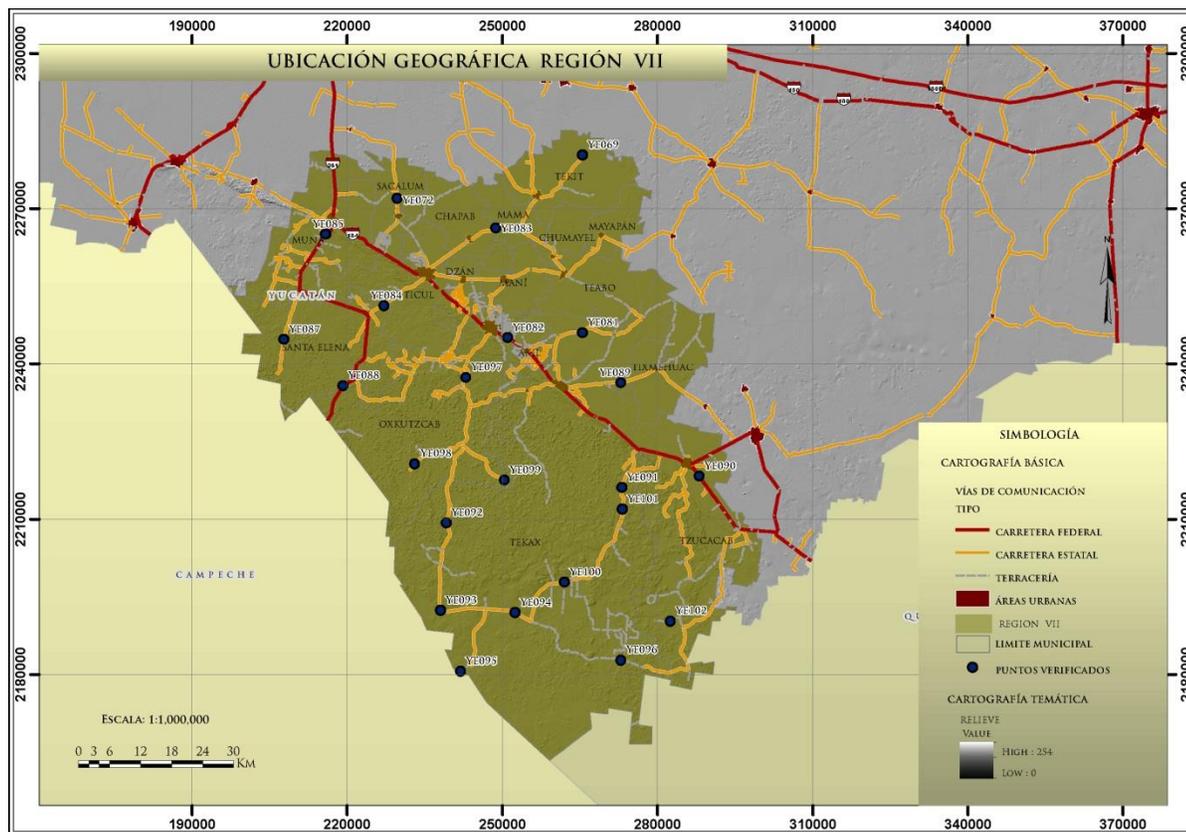


Figura 228. Ubicación geográfica y puntos de verificación en campo de la región VII.

Tabla 108. Localización de puntos verificados en campo con problemas de erosión.

PUNTO	LOCALIDAD	MUNICIPIO	EROSION	X	Y	
YE002	El Cuyo	Tizimín	Eh2	215854	2265054	
YE069	Jusula	Tekit	Eh3	265525	2280346	
YE072	San Antonio	Sacalum		229681	2271928	
YE081	San Lorenzo	Tekax	Eh2	265489	2245982	
YE082	Oxkutzcab	Akil		251046	2245011	
YE083	Chapab	Mama		248770	2266249	
*YE084	Santa Elena	Santa Elena		227146	2251226	
YE085	Muna	Muna		215819	2265025	
YE087	San Lorenzo	Santa Elena		207726	2244707	
*YE088	Santa Elena	Oxcutzcab		219187	2235747	
YE089	Jasil	Tixméhuac		272967	2236301	
YE090	San Miguel	Tuxcacab		Eh2	288080	2218251
*YE091	Ake	Tekax		Eh3	273148	2216084
YE092	San Agustín		Eh2	239129	2209261	
YE093	Huntochac			238028	2192373	
YE094	Santa Teresa			252484	2191935	
YE095	San Juan Tekax			241930	2180591	
YE096	San Pedro			Eh1	272972	2182742
YE097	Emiliano Zapata	Oxkutzcab	Eh2	243012	2237349	
YE098	Yaxhochen			233115	2220669	
YE099	Nohhcacab			250415	2217514	
YE100	San Diego	Tekax		262055	2197782	
YE101	Xcuil			273214	2211899	
YE102	El Escondido			Tzucacab	282561	2190265

*Puntos de verificación con mayor grado de afectación.

A diferencia de las otras zonas, en la parte sur de la sierra de Ticul, en los tramos inferiores el horizonte superficial A, se engrosa por acumulación de material procedente de las partes altas. Sin embargo este patrón de distribución espacial de los suelos degradados difícilmente es atribuible de forma predominante a la acción de los procesos de erosión hídrica que se presentan en la región, dado que tanto la longitud como el grado de pendiente de la ladera son los principales factores topográficos determinantes de la intensidad de arrastre de material edáfico; con lo cual se observaron 2 cosas: la primera, es que se pierden sedimentos por acción de la gravedad y por la escorrentía superficial y dos, es que el material edáfico arrastrado se acumula en las zonas planas donde el espesor de suelo sobrepasa los 80 cm de profundidad (Fotografía 129).

La región VII, se puede considerar como una zona de acumulación de suelo, pero de igual forma es una de las regiones más degradadas ya que el tipo de suelo que prevalece es de tipo Luvisol y Phaeozems los cuales son aptos para la agricultura, y gran parte de la cubierta vegetal ha sido removida y desplazada para dar paso a esta actividad, aumentando así, la erosión hídrica laminar en grado alto (Eh3) con tendencia a muy alto (Eh4), afectando los municipios de Oxkutzcab y Tekax principalmente lo cual se observó en los puntos de verificación YE088 y YE091.

El 60% de la superficie se clasificó dentro del tipo de erosión hídrica moderada (Eh2); donde se registran altos índices de deforestación (Fotografía 130), asimismo la agricultura mecanizada se encuentra ampliamente representada pues existen extensas llanuras con suelos profundos y poco pedregosos principalmente al sur del municipio de Santa Elena observado en el punto de verificación YE084. Las plantaciones de cítricos, las hortalizas y sobre todo la milpa son los tipos de cultivo dominante; de igual modo, las actividades ganaderas y el pastoreo afectan la productividad de los suelos ocasionando un fenómeno de compactación y deterioro en ocasiones extremo.



Fotografía 129. Zona de acumulación de material edáfico, debido al grado de pendiente y escurrimientos, lo cual fomenta la erosión hídrica laminar en grado alto Eh3, Municipio de Tekax.



Fotografía 130. El sobrepastoreo fomenta la erosión hídrica laminar en grado medio, Municipio de Tzucacab.

VIII.2.7. Susceptibilidad a la Erosión

Con base a la metodología empleada, se pudo determinar el grado de erosión actual y potencial de los suelos; este método constituye un instrumento de planeación para establecer prácticas y obras de conservación de suelos para que hagan que la erosión actual sea menor que la tasa máxima permisible. Además, acota los parámetros y factores que intervienen en los procesos erosivos; permite su extrapolación a nivel cualitativo a las regiones de estudio con base en un previo análisis y verificación en campo.

Tomando como base la prospección y análisis de la información de los datos tomados en campo, se pudo determinar que en el estado de Yucatán existen áreas extensas actualmente sometidas a procesos erosivos graves, debido a la deforestación, cultivo intensivo de áreas vulnerables, sobre pastoreo, mal manejo de suelo y mantos acuíferos, así como al microrelieve y relieve abrupto al sur de la entidad principalmente. Las pendientes mayores a los 3° fomentan la erosión hídrica laminar en grado alto (Eh3) la cual, predomina en las regiones II, VI y VII; siendo el municipio de Mérida de los más degradados por los tres tipos de erosión hídrica.

La erosión hídrica laminar en grado bajo (Eh1) se observa al norte de la entidad, la erosión hídrica laminar en grado medio (Eh2) en la zona centro y la erosión hídrica laminar en grado alto (Eh3) al sur; los municipios con mayor degradación de suelos son Calcalchén, Abalá, Tecoh, Tekit, Chapab, la zona este de Ticul, Oxkutzcab, Tekax, Chankom, la zona norte de Chichimilá, Chemax y el este de Temonzón; donde la superficie afectada es de 576,986 hectáreas aproximadamente. Generando así impactos significativos en la vida de los habitantes locales y en la capacidad productiva de los recursos naturales, contribuyendo a profundizar la marginación y la pobreza en amplios sectores de la población.

Ya que existen grandes zonas que están potencialmente sujetas a severos procesos de degradación de los suelos trayendo como consecuencia una degradación estructural de la capa superficial edáfica, contaminación salina, contaminación química, contaminación de los recursos hídricos subterráneos así como el agotamiento, degradación y modificación de la composición de la cubierta vegetal. Se observó que una gran cantidad de suelo se infiltra al subsuelo acumulándose en las oquedades de los karst (Fotografía 131), esta infiltración depende de varios factores en las que pueden estar directamente relacionadas las propiedades del terreno (pendiente y ondulación), textura, estructura, contenido de agua, continuidad de poros y cubierta vegetal; perdiéndose así, gran cantidad de material edáfico hacia el subsuelo y mantos acuíferos (Fotografía 132).



Fotografía 131. Corte de carretera de Oxkutzcab a Loltun; donde se puede observar la filtración de sedimentos al subsuelo acumulándose en las oquedades debido a la karsticidad de la roca.



Fotografía 132. Se observan la cementación de suelo infiltrado en grietas y oquedades de la roca.

De igual forma se determinó que la erosión hídrica laminar en grado medio con tendencia a alto (Eh2) predomina al centro y noreste afectando el 63% de la superficie, esto ha ocasionado que se reduzca la humedad y materia orgánica disponible en el suelo acentuando las condiciones de aridez; el mayor problema se encuentra en tierras de labranza y zonas cercanas a la costa; los cambios en el clima y el uso de pesticidas favorece la concentración de sales en la parte superior del suelo lo que aumenta la susceptibilidad a la erosión hídrica laminar en grado bajo con tendencia a medio (Eh1) afectando el 22% de la superficie principalmente la zona norte y noroeste del Estado; mientras que la erosión hídrica laminar en grado alto a severo (Eh3) afecta el 15% de superficie al sur y noreste de la Entidad (Figura 229).

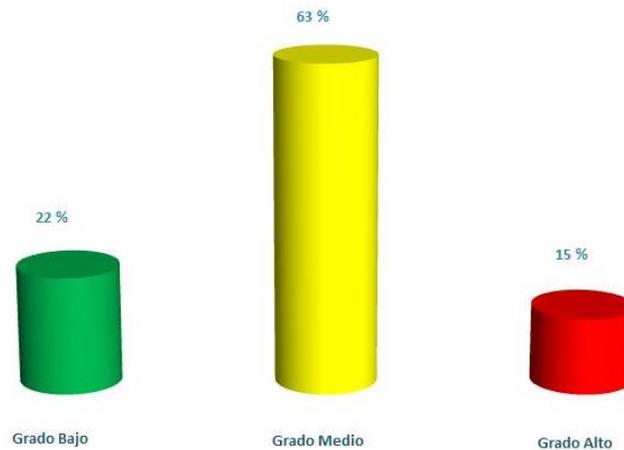


Figura 229. Porcentaje de grado de erosión hídrica en el estado de Yucatán.

El 95 por ciento del suelo presenta algún grado de erosión y el 78 por ciento tiene condición de erosión severa por lo que existen más de 576 mil hectáreas degradadas al centro y sur del Estado, la cual ha sido fuertemente afectada por este fenómeno aunado al crecimiento permanente de la población genera una presión en aumento sobre los recursos naturales que conduce a una sobre explotación de estos. El resultado es la degradación de los suelos con intensificación de la erosión hídrica y eólica, deterioro de la estructura, salinización y disminución de la fertilidad; por lo cual se consideran zonas en proceso de desertificación.

En general, los resultados fueron coincidentes con otros estudios; todos los niveles de información que se utilizaron en este trabajo tuvieron una relación directa con lo observado en campo y analizado en gabinete; Johnson y Blackbur (1989) trabajando sobre erosión de suelos en pastizales a nivel parcela con una metodología similar a la que se propuso en este trabajo, registraron una mayor pérdida de material edáfico en suelos poco profundos; coincidiendo con los resultados que se obtuvieron; ya que la mayor pérdida de material edáfico se da en suelos de tipo Leptosol los cuales tienen un espesor menor a los 15 cm de profundidad y ocupan el 55 % de superficie en la entidad (Figura 230).

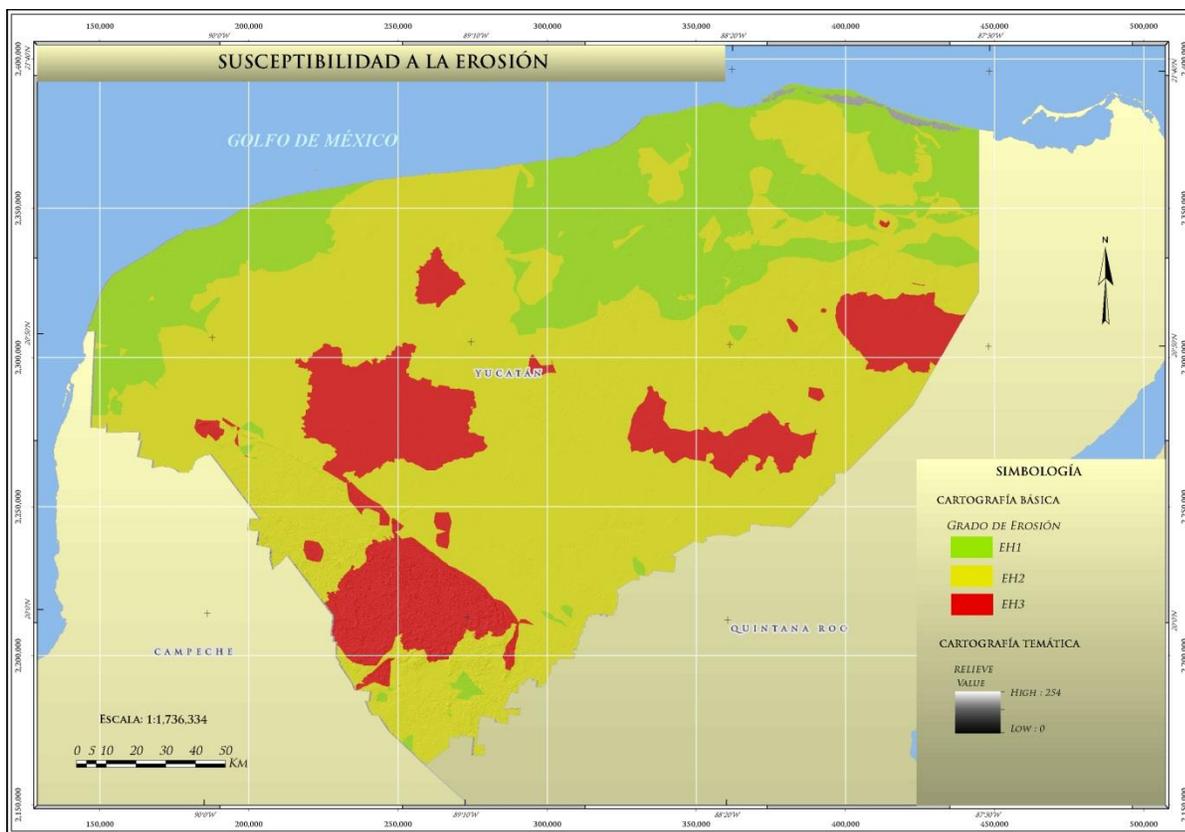


Figura 230. Grado de erosión actual en el estado de Yucatán.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) fueron de gran ayuda en este trabajo ya que es una herramienta eficaz que facilita el manejo y análisis de información espacial permitiendo realizar múltiples procesos similares bajo diferente escenarios de evolución de los factores implicados en las pérdidas de suelo, de una manera rápida y sencilla.

Estos resultados muestran que el uso sistemático y periódico de la información en la evaluación de los procesos erosivos será de extraordinaria utilidad en la gestión y evaluación ambiental de trabajos que permitan mitigar los efectos erosivos en la Entidad.

Análisis de Datos por Método Estadístico

Para determinar la relación directa y el grado de confiabilidad de los datos y de cada una de las variables con las cuales se obtuvo el mapa de susceptibilidad (clima, precipitación, grado de pendiente, espesor del horizonte O y espesor del suelo) se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson con el modelo estadístico SPSS (*Statistical Package for the Social*) el cual nos da un índice de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas, este método estadístico es independiente de la escala de medida de cada una de las variables, lo cual nos permite establecer patrones de variación de los resultados obtenidos.

En Tabla 109 se observa la correlación de las variables, los valores cercanos a cero indica ausencia de relación lineal entre las variables; el valor numérico del coeficiente independientemente del signo de la correlación indica la fuerza de la relación, y finalmente el signo indica la relación; es decir, el valor positivo más elevado es + 1, mientras que el negativo es -1.

Tabla 109. Correlaciones entre los componentes.

	CLIMAS	PRECIPITACIÓN	PENDIENTES	HORIZONTE O	PROFUNDIDAD
CLIMAS Correlación de Pearson	1	-.956	-.85	-.285	.334
Sig. (Bilateral)		.000	.000	.368	.289
N	12	12	12	12	12
PRECIPITACIÓN Correlación de Pearson	-.956	1	.925	.284	-.372
Sig. (Bilateral)	.000		0	.371	.233
N	12	12	12	12	12
PENDIENTES Correlación de Pearson	-.85	0.925	1	.508	-.112
Sig. (Bilateral)	.000	.000		.092	.729
N	12	12	12	12	12
HORIZONTE O Correlación de Pearson	-.285	.284	.508	1	.466
Sig. (Bilateral)	.368	.371	.092		.127
N	12	12	12	12	12
PROFUNDIDAD Correlación de Pearson	.334	-.372	-.112	.466	1
Sig. (Bilateral)	.286	.233	.729	.127	
N	12	12	12	12	12

- a. La distribución de contraste es la normal
b. Se han calculado a partir de los datos

En la Tabla 110 se puede comprobar el porcentaje de varianza explicada de cada componente; los climas y la precipitación acumulan el 91.543 % de correlación de las variables originales. En otras palabras, de las 5 variables que generan los procesos erosivos, el componente 1 (climas) explica en un 61.287 dicho fenómeno y el componente 2 (precipitación) lo explica en un 30.256 %; es decir la relación que se describe es lineal y cumple los supuestos del contraste paramétrico con un índice de asociación de más del 90%.

Tabla 110. Varianza Explicada.

COMPONENTE	AUTO VALORES			TOTAL	% DE LA VARIANZA	% ACUMULADO	TOTAL	% DE LA VARIANZA	% ACUMULADO
	TOTAL	% DE LA VARIANZA	% ACUMULADO						
1	3.064	61.287	61.287	3.064	61.287	61.287	3.06	61.204	61.204
2	1.513	30.256	91.543	1.513	30.256	91.543	1.517	30.34	91.543
3	0.297	5.94	97.483						
4	0.113	2.267	99.75						
5	0.012	0.25	100						

Método de extracción: Análisis de Componentes principales

En la Figura 231 se aprecia que la selección de dos componentes es la adecuada, ya que a partir del tercer componente no es muy acusada la pendiente de la representación gráfica de los autovalores ya que las otras tres variables presentan casi la misma tendencia.

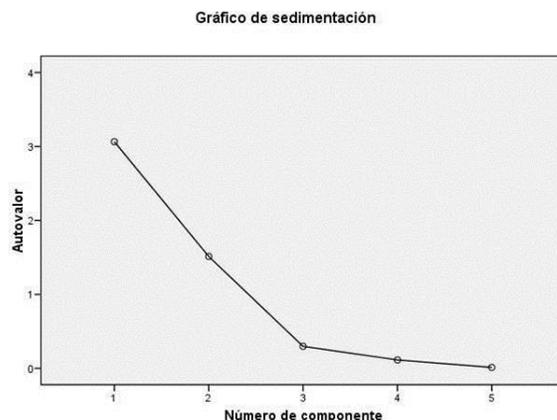


Figura 231. Distribución y tendencia de los 5 componentes.

Para comprobar si las variables presentan una distribución y tendencia normal con el método de Pearson; se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov; el cual es un procedimiento de “ajuste” que permite medir el grado de concordancia existente entre la distribución de las variables analizadas anteriormente (Tabla 111).

El resultado demuestra la carga de cada variable en cada factor, de modo que los factores con unos pesos factoriales más elevados en términos absolutos muestran una relación estrecha con las variables, el espesor del horizonte O, la precipitación y los climas tienen un índice de asociación elevado cercano a +1; lo cual nos indica que estas 3 variables son las condicionantes principales que aceleran los procesos erosivos en la entidad.

Tabla 111. Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

		CLIMAS	PRECIPITACIÓN	PENDIENTES	HORIZONTE O	PROFUNDIDAD
N		12	12	12	12	12
Parámetros normales	Media	2.17	898.25	0.433	2.1825	49.692
	Desviación típica	0.615	150.758	0.0985	0.52009	9.4621
Diferencias más extremas	Absoluta	0.194	0.174	0.417	0.15	0.421
	Positiva	0.194	0.154	0.249	0.117	0.237
	Negativa	-0.162	-0.174	-0.417	-0.15	-0.421
Z de Kolmogorov -Smirnov		0.672	0.604	1.446	0.52	1.46
Sig. asintót. (Bilateral)		0.757	0.031	0.31	0.95	0.028

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos

Los diagramas de dispersión muestran una relación positiva entre las tres variables (Climas, Espesor del horizonte O y la precipitación); el espesor de suelo y el grado de pendiente no muestran una correlación significativa; lo cual no quiere decir que sean menos importantes o no se deban de tomar en cuenta; simplemente que en el estado de Yucatán los suelos son escasos y poco someros y no existe una expresión topográfica donde el grado de pendiente influya sobre las demás variables como normalmente sucede en la mayor parte de la República Mexicana.

De acuerdo a la correlación de Pearson y a la prueba de Kolmogorov-Smirnov; las variables y los datos que se utilizaron para generar el mapa de susceptibilidad estadísticamente presentan coeficientes de correlación altos cercanos a 1, lo cual se puede observar en la Figura 232.

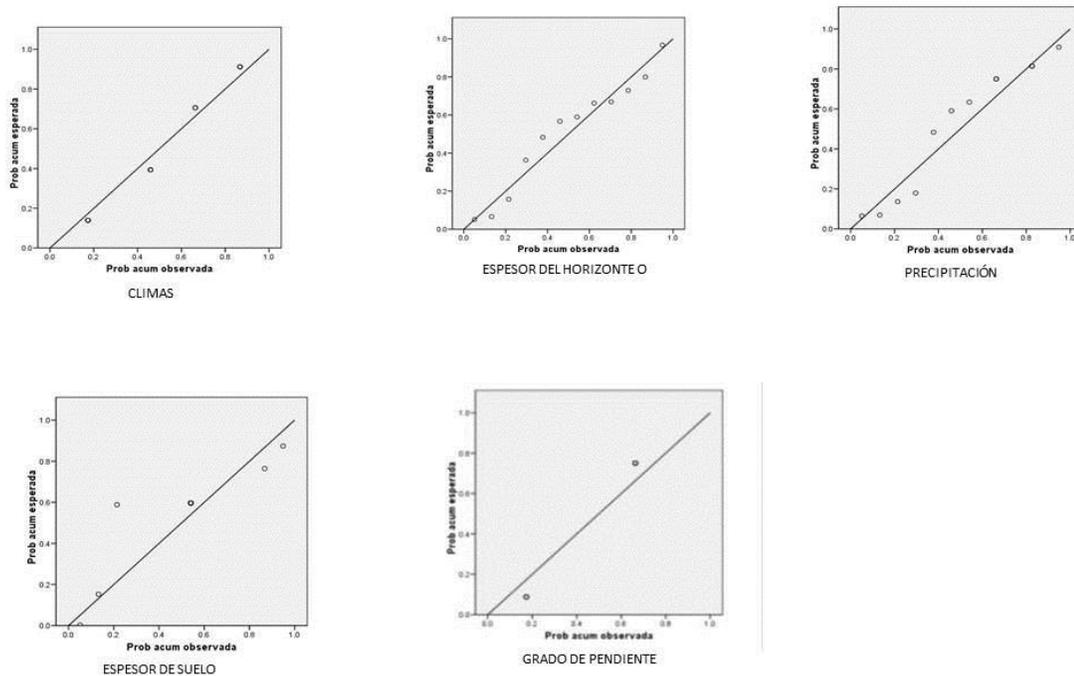


Figura 232. Dispersión de puntos de los 5 componentes.

VIII.2.8. Erodabilidad

Para poder realizar la evaluación del grado de erodabilidad, en el estado de Yucatán es necesario recurrir al análisis de los factores (naturales como edafología, vegetación y precipitación) expuestos a este tipo de erosión. La determinación de estos factores permite la clasificación y cuantificación del territorio, esta última es posible utilizando la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo (USLE).

Tomando en cuenta el índice de erodabilidad, se determina lo siguiente:

La erodabilidad está relacionada con las características inherentes de cada región, principalmente la tipología edáfica y otros agentes como la cobertura vegetal y el manejo de suelos.

Para estimar la erosión se ha utilizado la Ecuación Universal de Pérdida de suelo (USLE) propuesta por la FAO en 1980, un modelo que permite estimar, la erosión actual y potencial de los suelos. Esta ecuación constituye un instrumento de planeación para establecer las prácticas y obras de conservación de suelos para minimizar la erosión actual, logrando que esta sea menor que la tasa máxima permisible; siendo esta de 10 t/ha/año; mayor a 10 t/ha/año significan degradación.

Para estimar la erosión del suelo en las 7 regiones del estado de Yucatán se utilizó la siguiente ecuación:

$$A = (R) (K) (LS) (C) (P)$$

A= (R) (K) (LS) (C) (P)

Dónde:

- A=** Erosión del suelo t/ha año
- R=** Erosividad de la lluvia Mj/ha mm /hr
- K=** Erosionabilidad del suelo
- LS=** Longitud y Grado de pendiente
- C=** Factor de vegetación
- P=** Factor de prácticas mecánicas

Donde el resultado depende de acuerdo a las variables que presenten cada una de las regiones. Para explicar este modelo en forma práctica se utilizarán algunos resultados que se han obtenido de la investigación en México y que han permitido a nivel nacional hacer un uso adecuado de este modelo predictivo.

En este apartado se presentará una metodología simplificada y adecuada para utilizarse en el estado de Yucatán.

Se calculara la Erosividad R.- a través de datos correlacionados de precipitación media / anual con los valores estimados en el país; utilizando la información de intensidad de la lluvia disponible, por medio de la ecuación: **R= 3.7745p + 0.004540p²** (Tabla 112) donde:

- R=** Erosividad de la lluvia Mj/ha mm/hr
- P=** Precipitación media anual de la región

Tabla 112. Ecuaciones para estimar la Erosividad de la lluvia "Rh" en la República Mexicana.

REGIÓN	ECUACIÓN	R ²
I	R= 1.2078P + 0.002276P ²	0.92
II	R= 3.4555P + 0.006470P ²	0.93
III	R= 3.6752P - 0.001720P ²	0.94
IV	R= 2.8559P + 0.002983P ²	0.92
V	R= 3.4880P - 0.00088P ²	0.94
VI	R= 6.6847P + 0.001680P ²	0.9
VII	R= -0.0334P + 0.006661P ²	0.98
VIII	R= 1.9967P + 0.003270P ²	0.98
IX	R= 7.0458P + 0.002096P ²	0.97
X	R= 6.8938P + 0.000442P ²	0.95
XI	R= 3.7745P + 0.004540P²	0.98
XII	R= 2.4619P + 0.006067P ²	0.96
XIII	R= 10.7427P - 0.00108P ²	0.97
XIV	R= 1.5005P + 0.002640P ²	0.95

De acuerdo con este procedimiento se elaboraron modelos de regresión donde a partir de datos de precipitación anual (P) se puede estimar el valor de R de la USLE. Estos modelos de regresión son aplicados para las 14 regiones diferentes del país.

Para estimar el valor de Erodabilidad (K).- se tomó en cuenta la susceptibilidad de los suelos a erosionarse de acuerdo a la textura, al tamaño de las partículas del mismo, del contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad (Tabla 113).

Tabla 113. Textura de suelo de acuerdo al porcentaje de materia orgánica.

TEXTURA	% DE MATERIA ORGÁNICA		
	0.0 - 0.5	0.5 - 2.0	2.0 - 4.0
Arcillo arenosa	0.014	0.013	0.012
Arcillo limosa	0.025	0.023	0.019
Arena	0.005	0.003	0.002
Arena fina	0.016	0.014	0.01
Arena fina migajosa	0.024	0.02	0.016
Arena migajosa	0.012	0.01	0.008
Arena muy fina	0.042	0.036	0.028
Arena muy fina migajosa	0.044	0.038	0.03
Limo	0.06	0.052	0.042
Migajón	0.038	0.034	0.029
Migajón arcillo arenosa	0.027	0.025	0.021
Migajón arcillo limosa	0.037	0.032	0.026
Migajón arcillosa	0.028	0.025	0.021
Migajón arenosa	0.027	0.024	0.019
Migajón arenosa fina	0.035	0.03	0.024
Migajón arenosa muy fina	0.047	0.041	0.033
Migajón limoso	0.048	0.042	0.033
Arcilla	0.013 - 0.029		

Para estimar la longitud y grado de pendiente (LS); se considera: la pendiente media del terreno la cual se obtiene dividiendo la diferencia de elevación del punto más alto del terreno al más bajo entre la longitud del mismo esto es:

$$S = \frac{H_f - H_i}{L} \times 100$$

Dónde:

S= Pendiente media del terreno (%)

H_f = Altura más alta del terreno (m)

H_i = Altura más baja del terreno

L = Longitud del terreno (m)

Para calcular LS (el factor de grado y longitud de la pendiente); se sustituye la siguiente formula:

$$LS = (\lambda)^M (0.0138 + 0.00965 S + 0.00138 S^2)$$

Dónde:

LS = Factor de grado y longitud de la pendiente

λ = Longitud de la pendiente

S = Pendiente media del terreno

M = Parámetro cuyo valor es 0.5

Factor de protección de la vegetación (C).- Se estima dividiendo las pérdidas de suelo de un lote con un cultivo de interés y las pérdidas de suelo de un lote desnudo. Los valores de C son menores que la unidad y en promedio indican que a medida que aumenta la cubierta vegetal del suelo el valor de C se reduce y puede alcanzar valores similares a 0. Los valores de C que se reportan para diferentes partes del mundo y para México se presentan en la (Tabla 114). La fórmula que se utiliza es la multiplicación de: (R) (K) (SL) (C).

Tabla 114. Valores de C que se pueden utilizar para estimar pérdidas de suelo.

TIPO DE VEGETACIÓN	DENSIDAD DE COBERTURA		
	ALTO	BAJO	MEDIO
Maíz	0.54	0.62	0.8
Maíz labranza cero	0.05	0.1	0.15
Maíz rastrojo	0.1	0.15	0.2
Algodón	0.3	0.42	0.49
Pastizal	0.004	0.01	0.1
Alfalfa	0.02	0.05	0.1
Trébol	0.025	0.05	0.1
Sorgo grano	0.43	0.55	0.7
Sorgo grano rastrojo	0.11	0.18	0.25
Soya	0.48		
Soya después de maíz con rastrojo	0.18		
Trigo	0.15	0.38	0.53
Trigo rastrojo	0.1	0.18	0.25
Bosque natural	0.001	0.01	0.1
Sabana en buenas condiciones	0.01	0.54	
Sabana sobre pastoreada	0.1	0.22	
Mijo	0.4 a 0.9		
Tabaco	0.1 a 0.2		
Cacahuete	0.5 a 0.7		
Palma	0.4 a 0.8		
Café	0.1 a 0.3		
Cacao	0.1 a 0.3		
Piña	0.1 a 0.3		

Factor (P) de prácticas mecánicas.-Como última alternativa para reducir la erosión de los suelos se tiene el uso de las prácticas de conservación de suelos para no alcanzar las pérdidas de suelo máximas permisibles. Este factor P se estima comparando las pérdidas de suelo de un lote con prácticas de conservación y un lote desnudo y el valor que se obtiene varía de 0 a 1. Si el valor de P es cercano a 0, entonces hay una gran eficiencia en la obra o práctica seleccionada y si el valor es cercano a 1, entonces la eficiencia de la obra es muy baja para reducir la erosión.

Los valores de P que se utilizan para diferentes prácticas y obras como el surcado al contorno, terrazas de formación sucesiva, construidas en terrenos a diferentes pendientes y las terrazas de banco; se muestra en la (Tabla 115).

Tabla 115. Factor de P utilizado para diferentes prácticas y obras de conservación del suelo y agua.

PRACTICA	VALORES DE P
Surcado al Contorno	0.75-0.90
Surcos Rectos	0.80-0.95
Franjas al contorno	0.60-0.80
Terrazas (2°-7°) de pendiente	0.5
Terrazas (7°-13°) de pendiente	0.6
Terrazas (> de 13°) de pendiente	0.8
Terrazas de banco	0.1
Terrazas de banco en contrapendiente	0.05

Para la evaluación del grado de erodabilidad en el Estado, se llevaron a cabo dos tipos de análisis, con la finalidad de comparar resultados obtenidos de información bibliográfica con resultados de laboratorio obtenidos a través de datos recientes tomados en campo.

A partir de la ecuación $E = (R) (K) (LS) (C) (P)$ y de las características físicas e intrínsecas de los suelos en la entidad (textura, materia orgánica, granulometría y porosidad), se determinó que el número de toneladas de suelo perdidas al año en el estado de Yucatán por región, en cada uno de los análisis realizados, son las siguientes: (Figura 233).

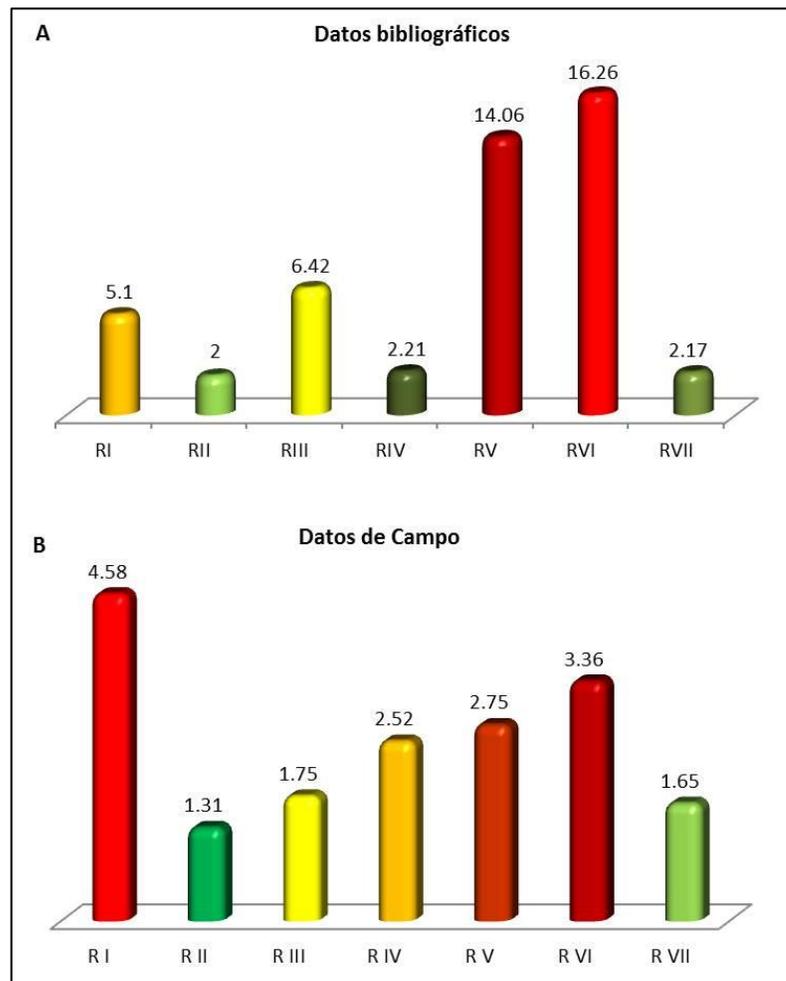


Figura 233. Numero de toneladas de suelo que se pierden anualmente por hectárea.

Como se observa en la figura 233a y de acuerdo a la base referencial mundial del recurso suelo en el Estado. Se encontró que los suelos limosos de las regiones V y VI son los más erodables, ya que pierden anualmente 14.06 y 16.26 t/ha de suelo respectivamente; mientras que las partículas grandes como arenas son más difíciles de arrastrar principalmente al norte de la región I que pierde 5.1 t/ha. En cambio las arcillas de las regiones II y VII al crear fuerzas cohesivas entre sí, dificultan su separación de los agregados por lo cual presentan una erodabilidad relativamente baja, con pérdidas de 2 y 2.17 t/ha respectivamente.

Por otra parte, con el análisis realizado con la información y los resultados de laboratorio proporcionados por la Facultad de Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma de Yucatán, obtenidos a partir de un estudio realizado en convenio con el SGM, para la caracterización de las propiedades relacionadas a la erosión de los suelos de Yucatán (Figura 24); se determinó lo siguiente: los valores de erosividad de la lluvia (C) oscilan entre 700 y 1000 mm anuales, el factor de

erodabilidad del suelo (K) tuvo una variación entre 0.10 y 0.17; el factor topográfico (LS) tuvo un rango de variación entre -4 y 213; los valores de (C) oscilaron entre 0.001 a 0.80 obteniéndose valores de pérdida de suelo (A) que oscilan entre 1.65 y 4.58 t/ha/año. Como se puede observar existen valores de erodabilidad relativamente bajos entre 1.6 y 4.58 encontrándose dentro del rango máximo permisible ya que arriba de 10 t/ha/año se considera como degradación.

La erodabilidad en grado medio afecta el 60% del territorio estatal debido a los altos porcentajes de arena, del orden del 40.6 al 85.3 %; contribuyendo a que el suelo se disgregue facialmente a pesar de que el contenido de arcilla varía entre 12 y 28.7 %, adicionalmente el contenido de materia orgánica no sobrepasa el 11.86 % por lo que el suelo no posee la suficiente cohesión. En general los valores del factor LS son relativamente bajos específicamente debido a que las longitudes de la escorrentía son limitadamente pequeñas existiendo variaciones significativas de la pendiente en tramos cortos, ocasionando depósitos de sedimentos intermedios.

Los valores más bajos de C corresponden a zonas conservadas y agrícolas, lo que hace notar que los cultivos reducen considerablemente los procesos erosivos, no siendo este el caso para la selva mediana subcaducifolia la cual predomina en la entidad, ya que presenta los valores más altos del coeficiente C debido a la deforestación y escasas prácticas de conservación.

Las zonas con valores de pérdida de suelos muy fuertes se encuentran predominantemente en los lugares donde el microrelieve es considerablemente fuerte principalmente en la región VI donde los suelos son moderadamente arcillosos entre 1 y 1.5 % perdiéndose 3.36 toneladas de material edáfico por hectárea anualmente; con el factor R se pudieron detectar zonas con alto grado de erodabilidad como el sur y centro de la región I debido a la baja porosidad con rangos entre 15 y 25 % y estabilidad de los agregados entre 18 y 20 %, aunque la zona es considerada como seca durante gran parte del año, en la época lluviosa se presentan tormentas de gran intensidad aumentando el grado hasta en un 4.8 t/ha anuales; donde se evidencia que los suelos más erosionables corresponden a las texturas intermedias (fracción de limos más abundante), ya que los suelos con un porcentaje de arcillas superior al 30% son poco erosionables y en este caso el 33.4 % corresponde a texturas arenosas. Sin embargo la región II es la que menos t/ha de suelo pierde debido a la buena estabilidad de las partículas sólidas y acumulación de materia orgánica hasta en un 57.67 %.

De acuerdo con las estimaciones realizadas, el grado de erodabilidad para el estado de Yucatán tiene una variación promedio de 24.30 t/ha/año; lo cual demuestra que se encuentra en un grado medio, sobrepasando el límite máximo permisible de 10 t/ha anuales. Como se puede observar en la figura 233 a y b, en las dos graficas se muestra una tendencia relativamente homogénea; siendo en ambos casos la región II la que menos t/ha pierde anualmente.

Si bien han sido mencionados algunos de los factores de primera importancia, es indudable el papel que cumplen algunas propiedades de los suelos como coactores en tal fenomenología. Debe destacarse entonces el efecto que tienen sobre el proceso de erodabilidad la textura, el contenido de materia orgánica, la estabilidad de los agregados, porosidad y estructura del suelo. De acuerdo al análisis realizado la textura y porcentaje de estabilidad de los agregados han sido consideradas las características físicas más relevantes, dado que es a su vez las que condicionan otras características del suelo inherentes a la erosión y erodabilidad.

Por otra parte, se encontró que la estabilidad de los agregados condiciona en gran medida la velocidad y el tipo de movimiento vertical del agua en el perfil edáfico, así, contenidos bajos propician movimientos de agua muy lentos, en tanto contenidos altos favorecen el rápido tránsito de ella aun cuando se tengan texturas arcillosas; sirviendo como agente amortiguador contra los fenómenos erosivos. La textura por su parte condiciona la infiltración y se determinó que los suelos con mayor erodabilidad corresponden a texturas intermedias, siendo considerados los suelos con contenidos de arcilla superiores al 45% poco susceptibles, basándose tal información en los efectos que tiene la fracción arcilla en el favorecimiento de la cohesión de partículas y la fracción arena en el mejoramiento de las condiciones de infiltración.

De los 12 tipos de suelo que existen los Leptosoles y Arenosoles principalmente en la zona norte son los más propensos a erosionarse; el 8 % presenta erodabilidad alta, el 60% media y el 32% bajo, debido a la poca estabilidad de las partículas sólidas y bajo contenido en materia orgánica. (Figura 234).

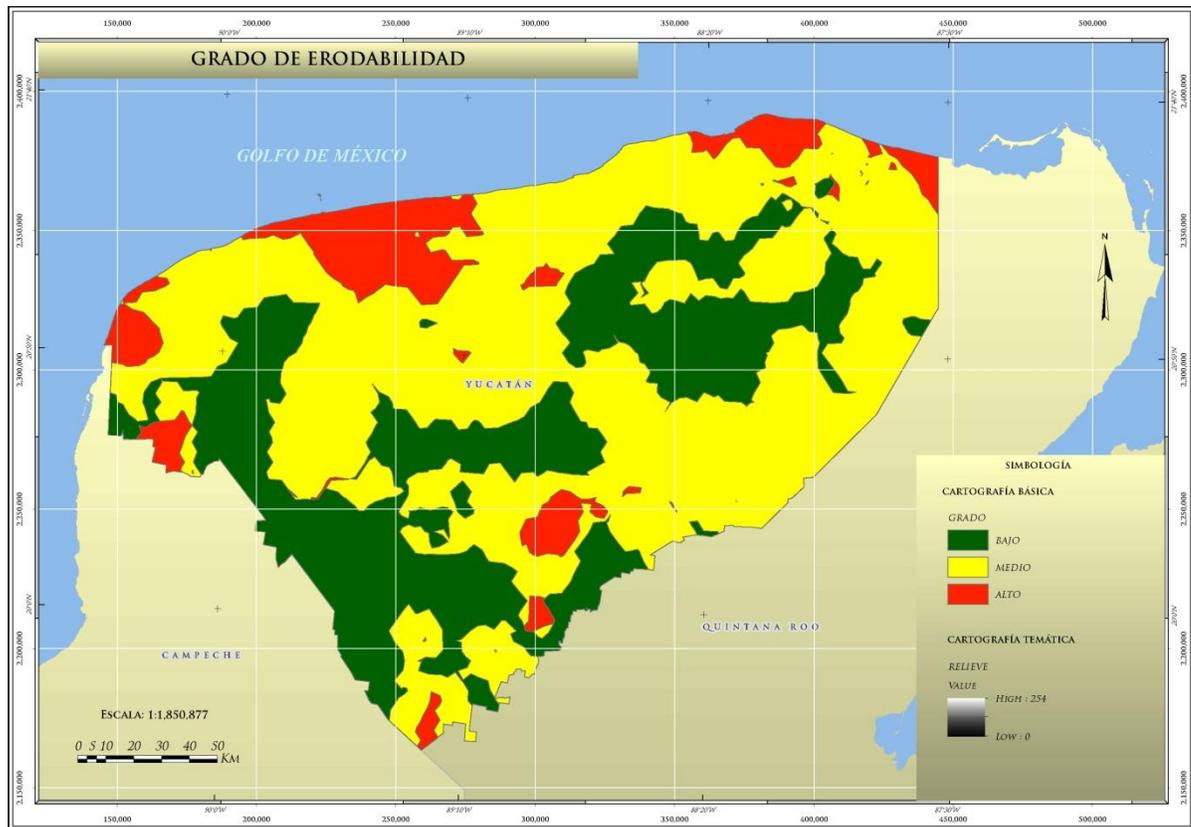


Figura 234. Erodabilidad de los suelos de acuerdo a sus propiedades físicas e intrínsecas.

La diferenciación de las unidades homogéneas, se ven influenciadas principalmente en suelos poco susceptibles como los Cambisoles y Nitisoles abarcando una superficie de más del 29 %; en gran medida por las diferencias texturales; ya que la degradación de este tipo de suelos se asocian a texturas moderadamente gruesas, con poco porcentaje de arcilla, a diferencia con los que concentran materia orgánica; ya que aportan estabilidad y a su vez regulan la infiltración de agua evitando saturaciones tempranas frente a eventos de precipitación significativos.

Por ejemplo: un suelo de textura arenosa fina en clima seco, es menos susceptible a la erosión eólica, mientras que en un clima tropical como lo es el estado de Yucatán, es más endeble a la degradación debido a la clase textural como los francos o francos arenosos (Leptosoles). Un suelo de textura arcillosa impermeable, en un clima húmedo, es más resistente a la escorrentía superficial (erosión hídrica); por el contrario, la presencia de un suelo con abundante materia orgánica favorece la retención de la humedad, restringiendo la escorrentía (Solonchak, Gleysoles e Histosoles) con textura fina. Por último, la presencia de sustancias cementantes entre las partículas, atenúan los efectos erosivos, como ocurre con la erosión eólica en zonas cerca de la línea de costa con presencia abundante de sales que compactan las arenas.

La magnitud de estos impactos está relacionada, en gran medida, con la erodabilidad a la degradación del sistema natural en que se han desarrollado los cambios en el uso y manejo de los suelos.

VIII.3. Erosión Costera

Entendemos que existe erosión costera cuando comparando dos estados de una playa en dos momentos distintos, la línea de orilla está corrida hacia tierra adentro en el estado más reciente.

La erosión se produce en las costas que están expuestas a las olas que han recorrido una gran distancia, o con vientos marinos que traen mucha energía, estas costas están dominadas por acantilados en cuya base se produce una plataforma erosionada por las olas, sin embargo cuando la dinámica de una zona de rompiente en una playa, cambia temporalmente hacia tipos en que predomina la acción erosiva, se puede observar en el paisaje microacantilados de playa. La erosión costera es producida a través de la acción hidráulica (la presión de las olas que rompen a los pies de los acantilados), y del proceso por el cual los sedimentos del agua son arrojados contra la superficie rocosa.

En primera instancia comenzaremos por precisar el ambiente costero, la *US Commission on Marine Sciences*, (1969) la cataloga como la parte de la tierra afectada por su proximidad al océano y aquella parte del océano perturbada por la tierra. De manera sencilla, podemos decir que la costa, es la zona intermedia entre los continentes y los océanos, siendo unos de los sistemas más dinámicos en nuestro planeta (Figura 235).

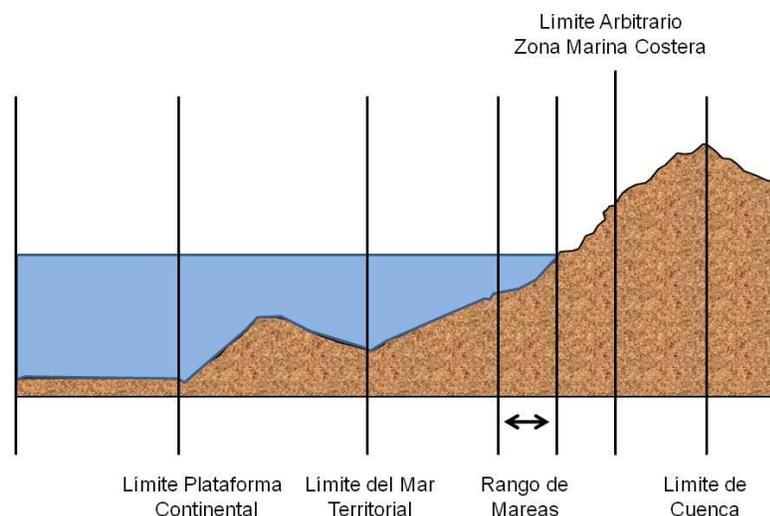


Figura 235. Diagrama de la zona marina costera y sus divisiones, (basado en Sorensen y McCreary, 1990).

Las principales causas antropogénicas que afectan el área costera son; el desarrollo de las actividades relacionadas con infraestructuras inmobiliarias, recreativas, portuarias e incluso mineras, así como el crecimiento acelerado de la población en esta zona.

En cuanto a los factores de carácter natural, actualmente el calentamiento global es uno de los más graves, ya que afecta a todas las costas del mundo, el aumento del nivel del mar se reconoce como uno de los resultados directos de este fenómeno, así como el incremento en la frecuencia e intensidad de tormentas tropicales y huracanes. El impacto de estos fenómenos, trae como consecuencia severos resultados como; inundación de tierras bajas y desplazamiento de humedales, erosión de la línea o franja costera, inundaciones severas causadas por mareas de tormentas, intrusión salina en estuarios y acuíferos, alteración del régimen de mareas en ríos, bahías y lagunas costeras, así como cambios en patrones de sedimentación.

De esta manera, las áreas costeras urbanas y semi-urbanas se construyen sobre un sistema frágil, es decir, la actividad descontrolada e indiscriminada del hombre en este ambiente, aunado a los

procesos naturales, que en los últimos años se han intensificado, trae como consecuencia importantes problemáticas, entre las que se encuentra el fenómeno de erosión costera, tema que se abordara de manera detallada en este apartado.

VIII.3.1. Conceptos Básicos

De acuerdo a definiciones de otros autores como Ojeda Zújar J., (2001), la erosión costera es un fenómeno que se origina por la interacción de los procesos climáticos, meteorológicos, hidrodinámicos, antropogénicos y sedimentarios con la morfología costera, lo que provoca un retroceso en la línea de costa, es decir, existe erosión cuando comparamos en dos tiempos distintos la línea de costa, esta se ve reducida hacia la parte más joven.

Desde este último punto de vista se puede considerar dos tipos de erosión: generalizada en todo el sistema litoral y parcial en un tramo de costa (Peña Olivás J.M., 2007).

Erosión Generalizada

Se produce cuando todo un tramo de costa, amplio y que ocupa todo o prácticamente todo el sistema litoral, se encuentra en erosión. Esa degradación puede ser debida fundamentalmente a tres causas:

- 1) Falta de sedimento que se incorpora al transporte sólido litoral.
- 2) A una alteración del medio eliminando la continuidad del transporte sólido litoral y mermándolo.
- 3) Produciéndose una alteración de los agentes climáticos marinos que actúan en la costa.

El sedimento que se incorpora a la costa formando las playas puede tener, básicamente, tres orígenes: arrastrados por los cauces fluviales que desembocan en el mar, provenientes de animales marinos como conchas, corales, etc., y de la erosión de la propia costa como playas cantiles, acantilados, etc. Cuando la fuente principal de sedimento que se incorpora a la costa se reduce o deja de facilitar material, el mar sigue transportando sedimento a lo largo de la costa que lo toma de la playa y se erosiona si no le llega material de reposición (Figura 236a). Cuando sobre una costa abierta con un transporte sólido litoral continuo se interpone una barrera, como un puerto, un espigón, etc., la dinámica litoral imperante en el tramo se interrumpe, provocando una descompensación sedimentaria (Figura 236b).

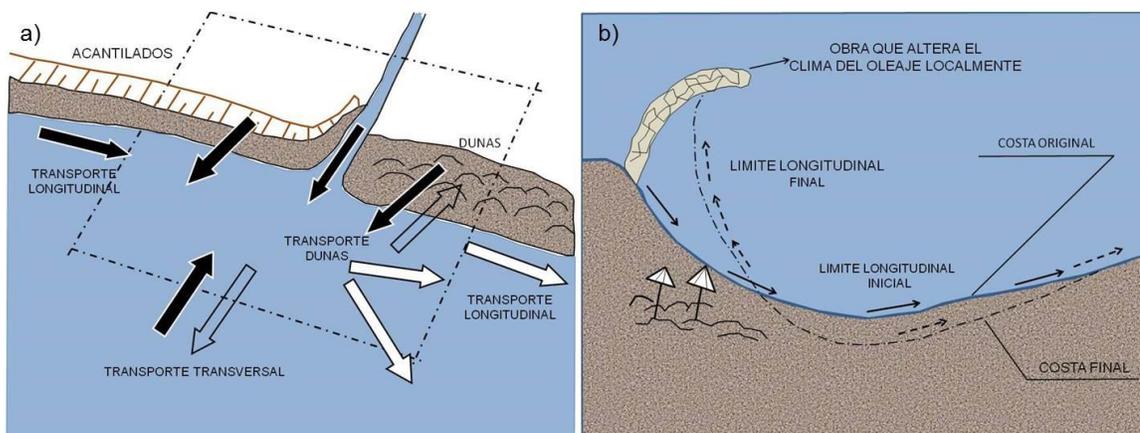


Figura 236. a) Esquema de las variables sedimentarias a considerar en un balance sedimentario de un tramo de costa (Peña, 2007). b) Ejemplo de obra que provoca un desequilibrio en la dinámica litoral, produciendo zonas erosivas (Peña, 2007).

Otra forma de reducir o aumentar la erosión es alterar artificialmente los agentes climáticos marinos que inciden en la costa, mediante obras que producen un desequilibrio en la dinámica litoral. Suele ser frecuente en diques curvos que provocan una difracción de oleaje, alterando toda la dinámica litoral en su zona de influencia; en ocasiones provocando erosión generalizada y en otra solo parcial.

Erosión Parcial

En ocasiones, la erosión que se produce solamente afecta a una zona de la playa, no transmitiéndose al resto, considerándose ello como una erosión parcial, aunque a veces, ésta indica el inicio de una erosión generalizada, no siendo más que una fase inicial de ella; por tanto, la erosión parcial puede ser de dos tipos:

- 1) Debida a un desequilibrio del sistema
- 2) Como inicio de una erosión generalizada

Se entiende por erosión debida a un desequilibrio en el sistema litoral, cuando en la evolución normal de la costa del régimen costero se introduce artificialmente o de forma natural un elemento distorsionador que altera tanto la evolución y forma de la playa, como el transporte sólido litoral. Estos desequilibrios del sistema pueden ser debidos a introducir en la costa obras de defensa como son los espigones o diques exentos, que sin ser barreras totales que afectan a todo el sistema litoral, provocan una defensa parcial al normal movimiento de sedimentos a lo largo de la costa.

También se producen desequilibrios que provocan erosión parcial o local cuando se altera o cambia de forma natural o artificial las características de los agentes climáticos. Un ejemplo particular que suele suceder en muchas partes de la costa, son los llamados basculamientos debido a la persistencia no habitual de una dirección de oleaje.

Se debe tener en cuenta que gran parte de la erosión generalizada en el sistema litoral comienzan por ser erosión local o parcial que afecta al tramo más sensible o al inicio de este (Peña, 2007).

VIII.3.2. Antecedentes

La costa representa la frontera entre la tierra y el mar, y se puede considerar que cumple dos funciones. Detiene el oleaje y funciona como un almacén de sedimentos (playas, dunas, acantilados, lagunas, etc.). Hay que recordar que estas formaciones costeras no son estructuras permanentes, son elementos transitorios que se erosionan o acumulan sedimentos, en función de las condiciones ambientales imperantes en el momento. Las costas y estuarios son ambientes sumamente dinámicos que de manera constante cambian en respuesta a las fuerzas naturales en una variedad de escalas de tiempo. Una manera objetiva de aproximarse al problema es considerar las áreas con sedimentos acumulados (dunas de arena, playas, marismas y manglares, acantilados) como almacenes de sedimento, un almacén que no es permanente sino que representa acumulaciones (superávit) que el mar requiere y que en algún momento será removido por olas y mareas y depositado en algún otro lugar. Un cambio en las condiciones puede darse de manera natural o ser provocado por las actividades del hombre.

Mientras mayor es la superficie de costa que se observa y se analiza, mayor información se obtiene de cómo funciona la zona costera y permite predecir con más certeza el resultado de una acción, ya que se identifica tanto su impacto local como el que tiene corriente arriba y corriente abajo, es decir en toda la celda costera. Pero también, al ampliar la escala de percepción, se obtiene información de mayor cantidad de lugares y tipos de costa y se empieza a ver el impacto de distintas actividades.

Ante el grado de erosión costera, en la Península de Yucatán se ha desencadenado una lucha para frenar la erosión de las playas construyendo toda clase de obras de protección, como espigones elaborados a base de roca y madera con diversos diseños, longitudes, sin ninguna clase de planeación en su diseño, colocación y distribución. Sin embargo, estas acciones no han sido suficientes para detener este fenómeno, si no que por lo contrario a lo que se esperaba, han contribuido a que aumente la socavación de las playas de manera crítica. Esto ha provocado sería preocupación por el efecto de la erosión en dicha costa, ya que en algunas zonas se pierden cada mes hasta dos metros de playa por lo que se requiere encontrar alternativas de protección costera adecuadas para la mitigación del problema.

La costa históricamente ha sido uno de los principales elementos registrados por la Cartografía, debido al límite que la línea de costa ha representado para el desarrollo de las actividades humanas. En esta zona limítrofe entre mar y tierra es donde las mareas, vientos y olas atacan la tierra: es aquí donde la costa responde a estas acometidas, cambiando su forma y configuración con el fin de disipar la energía del mar.

En la costa de Yucatán, se ha modificado el transporte de sedimentos debido tanto a causas naturales, como por la realización de obras para impulsar el comercio, la industria, la pesca y el turismo. Interrupciones al transporte como los accesos a los puertos de San Felipe y Río Lagartos.

Entre el año 2003 y 2005 se empezó a atender el problema de la erosión en la costa yucateca, rellenando con arena proveniente de las escolleras que existen en el Estado, 15 kilómetros de la costa al noreste de la capital yucateca, cubriendo los puertos de Chelém y Chuburná, los cuales son los que presentan serios problemas de erosión.

Primeramente se comenzó rellenando apenas 5 kilómetros de la playa, para luego paulatinamente terminar la meta de los 15 kilómetros. El esfuerzo fue importante porque se carecía de la arena suficiente para rellenar los puntos erosionados, ya que solo se tienen 11 escolleras de donde se podrían extraer unos 400 mil metros cúbicos de arena y eso resultaba insuficiente, para lo cual se tuvo que substraer el material en otros bancos. Sin embargo todo este avance que se tuvo mediante este programa de recuperación de playas yucatecas en los años 2002 al 2005 se abandonó por lo que el mar nuevamente erosionó las dunas recuperadas en ese momento. Quedando el problema más avanzado. En la zona crítica, que va de Chelém a Chuburná, se quitaron las escolleras por la SEMARNAT, para colocar geotubos, lo que aceleró el proceso de erosión en esa parte de la costa.

Organismos ambientalistas de Yucatán advierten que en 100 años el mar podría subir alrededor de seis metros, lo que implicaría entre 5 y 10 kilómetros en las zonas bajas, con los consiguientes daños ecológicos, económicos y sociales.

VIII.3.3. Metodología

Como se ha venido mencionando, la erosión costera es un fenómeno natural que se origina por la interacción de los procesos climáticos, meteorológicos, hidrodinámicos y sedimentarios con la morfología costera y con la batimetría del fondo de la zona cercana al litoral, lo que ocasiona un retroceso a la línea de costa. El cambio climático es un factor que cada día toma mayor importancia dada la sobrelevación del nivel del mar y el incremento en la frecuencia e intensidad de las tormentas tropicales, entre otros. La problemática de erosión de playas que se está presentando actualmente en la zona de Yucatán obedece a la combinación de estos complejos fenómenos naturales, así como también a las acciones antropogénicas.

De acuerdo a lo anterior, surge la necesidad de conocer, estudiar y analizar más a detalle el fenómeno de erosión costera para entender su compleja dinámica, de tal forma que se pueda hacer un diagnóstico de la situación actual en el estado de Yucatán y así poder plantear alternativas de prevención, mitigación y solución en el corto y largo plazo.

En México, aun no se cuenta con una metodología para poder realizar estudios específicos de erosión costera, por lo que para la realización del presente trabajo, el SGM después de analizar las metodologías aplicadas por otros países, y de acuerdo a los objetivos para el nivel de erosión costera, propone una técnica representada en la Figura 237, tomando como base una metodología propuesta por José Ojeda Zújar, (2001), del Departamento de Geografía Física de la Universidad de Sevilla, España, el cual realiza una revisión crítica de las técnicas utilizadas para el cálculo de los riesgos de erosión costera, tanto de la peligrosidad (tasa de erosión) como de algunos aspectos de vulnerabilidad. Se analiza la adecuación de las fuentes de información clásicas a estos análisis (cartografía y fotografía aérea) y el impacto de nuevas tecnologías (GPS, fotogrametría digital y altimetría láser aerotransportada), así como su precisión geométrica. Se evalúa el interés de nuevas expresiones para las tasas de erosión (tasas superficiales y volumétricas), dicha metodología se divide en las siguientes etapas:

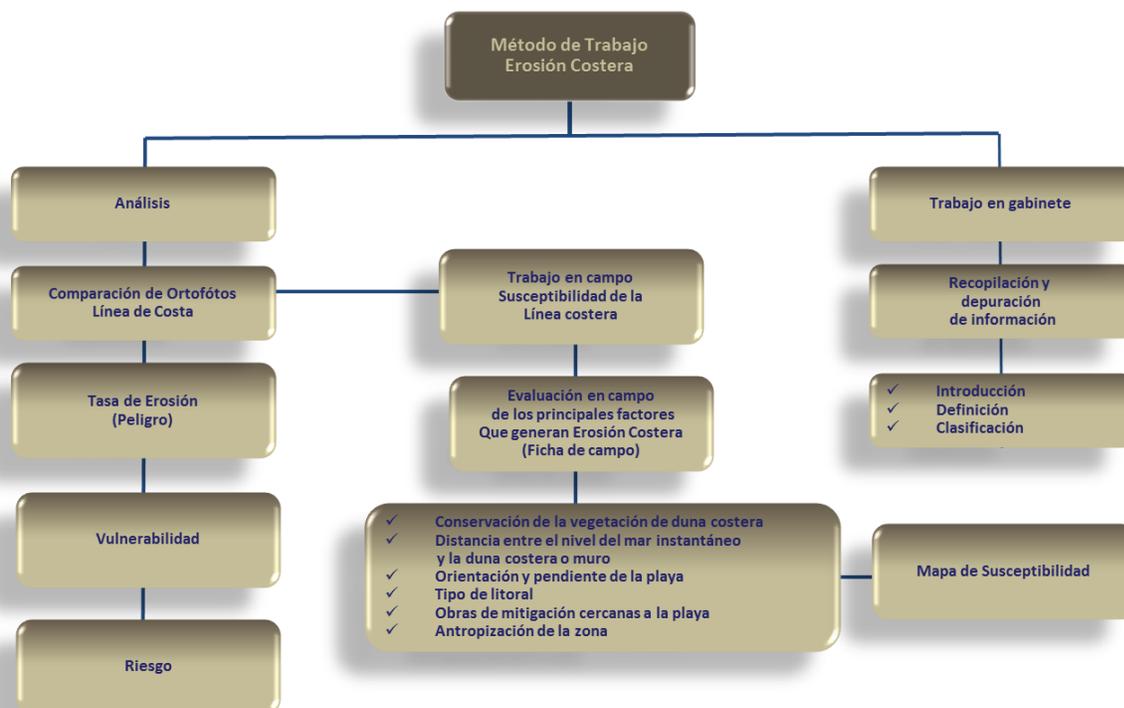


Figura 237. Método de trabajo para erosión costera.

El método de trabajo está dividido en dos etapas, trabajo de gabinete y trabajo en campo, sin embargo, se hace mención a un análisis para el cálculo de erosión basada en una propuesta del geógrafo español José Ojeda Zujar de la Universidad de Sevilla, el cual propone realizar dicho análisis comparando ortofotos antiguas de la línea de costa con otras más recientes en un Sistema de Información Geográfica (S.I.G.), con el propósito de identificar zonas en las que el ancho de playa se ha reducido, esta deflación puede ser medida de manera lineal en un SIG llevando por unidades metros de retroceso por año a lo que se le conoce como tasa de erosión (Peligro), una vez obtenida la tasa de erosión se pueden hacer predicciones de riesgo y vulnerabilidad, debido a los objetivos del presente análisis no se llevó a cabo, no obstante se recomienda hacer un estudio más detallado del fenómeno que implique el cálculo de la tasa de erosión para poder determinar el grado de vulnerabilidad y riesgo de la línea costera, retomando la primer etapa, trabajo en gabinete, consistió en la recopilación y depuración de información con el objetivo de estructurar los conceptos básicos del tema, posteriormente el trabajo en campo radicó en hacer recorridos a lo largo del litoral Yucateco en el que se evaluaron los principales factores ambientales que hacen que se genere o acelere el proceso de erosión costera, estos factores se evaluaron mediante una ficha de campo propuesta por el SGM (Figura 238). Los factores evaluados son; conservación de la vegetación de duna costera, pendiente y ancho de la playa, tipo de litoral y antropización de la playa.

ATLAS DE PELIGROS POR FENOMENOS NATURALES DEL ESTADO DE YUCATÁN

EROSIÓN COSTERA

UBICACIÓN

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

PUNTO DE CONTROL YEC009

FECHA 16/04/2012

ESTADO YUCATAN **MUNICIPIO** PROGRESO

LOCALIDAD CHELEM

CARTA TOPOGRÁFICA HUNUCMA

CLAVE DE LA CARTA F16-C41

COORDENADAS UTM WGS84

LATITUD X 216402

LONGITUD Y 2354907

ELEVACIÓN Z 1 **REGION** II NOROESTE



CARACTERÍSTICAS

1. CONSERVACIÓN DE VEGETACIÓN EN LA DUNA COSTERA	DEGRADADA
2. DISTANCIA ENTRE EL NIVEL DEL MAR INSTANTÁNEO Y LA DUNA COSTERA Ó MURO (ESPESOR DE PLAYA EN METROS). HORA DE LA MEDICIÓN.	0 METROS
3. ORIENTACIÓN Y PENDIENTE DE LA PLAYA	INEXISTENTE INEXISTENTE
4. TIPO DE LITORAL	ARENOSO
5. OBRAS DE MITIGACIÓN CERCANAS A LA PLAYA	ESPOLONES, DIQUES Y GEOTUBOS
6. ANTROPIZACIÓN DE LA ZONA Y DUNA COSTERA	ALTA

OBSERVACIONES

EN ESTA LOC. HACE 40 AÑOS LA PLAYA TENIA UN ANCHO DE 100 MTS, EL PROBLEMA SE PRESENTO CUANDO CONSTRUYERON EL PUERTO DE ALTURA Y EL PUERTO DE ABRIGO DE YUCALPETEN ,LA ARENA DE LAS PLAYAS DESAPARECIO QUEDANDO LAS CASAS DENTRO DEL MAR.

VISITADO POR ALBERTO HERNÁNDEZ-JOSÉ A. RAFAEL



Figura 238. Ficha de campo propuesta por el SGM para levantar puntos de verificación para el nivel de Erosión Costera.

Descripción de Variables

A cada una de las variables se les asignó un valor por criterio por peso, es decir, mediante prospecciones de campo y revisión bibliográfica se les dio un valor que va de 1 a 4 donde 1 es igual a una rango bajo, 2 es igual a un rango medio, 3 a alto y 4 a muy alto para posteriormente realizar interpolaciones en ARC MAP Versión 10.1 y así poder generar un mapa de susceptibilidad del cordón litoral.

Degradación de la cubierta vegetal

La degradación de los sistemas naturales causada por las actividades humanas, ha sido uno de los principales problemas ambientales en México. La degradación es originada por diversos factores, indirectos y directos, que han traído como consecuencia la disminución de la biodiversidad, el deterioro de los servicios ambientales y la reducción del bienestar humano (CONABIO, 2006 en Duran et. al., 2010). Ver Tabla 116.

Tabla 116. Estado de la vegetación de duna costera (zona de Pioneras).

ESTADO DE LA VEGETACIÓN (EV)			
CONSERVACIÓN DE LA VEGETACIÓN	CLAVE	DESCRIPCIÓN	VALOR
Vegetación bien conservada	VBC	Cuando la vegetación de la duna costera no ha sufrido ningún tipo de perturbación antropogénica.	1
Vegetación parcialmente conservada	VPC	Cuando la vegetación de duna costera ha sido perturbada por la construcción de algunas viviendas y/o caminos.	2
Vegetación degradada	VDG	Cuando la vegetación esta perturbada en un 80% por la construcción de infraestructura hotelera, recreativa, portuaria, vías de comunicación, etc. El proceso de degradación de la vegetación se produce cuando se altera la cubierta vegetal original sin llegar a su total remoción, permaneciendo sólo ciertas especies o comunidades vegetales. Este proceso, si bien no tiene un impacto tan alto como la pérdida total, produce cambios que alteran la estructura de los ecosistemas y con ella los bienes y servicios que la vegetación ofrece ² .	3
Vegetación ausente	VAS	Cuando la vegetación de duna costera ha sido perturbada en más del 80% por la construcción de infraestructura hotelera, recreativa, portuaria, vías de comunicación, etc. (Zonas de deforestación, pérdida del hábitad por asentamientos humanos, áreas naturalmente sin presencia de vegetación, zona de salinas y blanquizales)	4

Fuente: INEGI¹, 2012 Procesos de cambio de uso de suelo y degradación de la vegetación natural, Cuencas hidrográficas.

Ancho de Playa

De acuerdo a la descripción del Programa de Ordenamiento Territorial Costero de Yucatán (POETCY), la línea que representa el litoral arenoso, la clasificaron con tres anchos de playa, tomando como referencia a partir de la construcción más cercana. De acuerdo a esta clasificación, el 20% del litoral que corresponde a 58 Km, posee playas con menos del 10 m de ancho, lo que indica un proceso de pérdida de playas por la erosión. El 27% (81 Km) del litoral presenta playas con una anchura entre 10 y 20 m. El restante 50% (154 Km) presenta playas con anchos mayores a los 20 m (CINVESTAV, 2007). Con base en estas definiciones en el POETCY sumada con las mediciones obtenidas durante el trabajo de campo, se clasificaron tipos de anchuras de playa con rangos de 10 metros cada uno (Tabla 117).

Tabla 117. Clasificación de Ancho de Playas del litoral Yucateco.

CLASIFICACIÓN DE ANCHO DE PLAYA			
ANCHO DE PLAYA (POETCY, 2007)	DESCRIPCIÓN	ANCHO DE PLAYA (SGM, 2012)	VALOR
< 20 m	El restante 50% (154 Km) presenta playas con anchos mayores a los 20 m.	30 a 40 m	1
		20 a 30 m	2
10 a 20 m	El 27% (81 Km) del litoral presenta playas con una anchura entre 10 m y 20 m.	10 a 20 m	3
> 10 m	El 20% del litoral corresponde a 58 Km, posee playas con menos del 10 m de ancho. Las playas que presentan este ancho indican un proceso de pérdida de playas por la erosión.	> 10 m	4

Fuente: Clasificación en POETCY de CINVESTAV (2007).

Pendientes

La pendiente se relaciona con la morfología y dinámica de todas las formas del relieve; prácticamente todas ellas tienen un umbral límite que las clasifica o jerarquiza de acuerdo a su geometría, es decir, la pendiente constituye un factor que favorece la delimitación de los procesos y los tipos de formas que se encuentran en el terreno, además generalmente está asociada con la composición litológica y condiciones ambientales, como densidad de vegetación y grado de saturación. En la literatura geomorfológica existe una gran variedad de clasificaciones de pendientes, que están asociadas con su aplicación práctica o composición de los materiales. Por ejemplo la Unión Geomorfológica Internacional recomienda los intervalos de Demek, 1972, (Tabla 118):

Tabla 118. Clasificación de Pendientes Geomorfológicas.

CLASIFICACIÓN DEL ÁNGULO DE PENDEIENE PARA MAPAS GEOMORFOLÓGICOS			
CATEGORÍA	ANCHO DE CLASE	TERMINO DE PENDIENTE	GRADIENTE EN %
0 – 2°	2°	Plano (planicie)	3.5
> 2° - 5°	3°	Ligeramente inclinado	3.6 – 8.7
> 5° - 15°	10°	Fuertemente inclinado	8.7 – 26.8
> 15° - 35°	20°	Muy inclinado	26.8 - 70
> 35° - 55°	20°	Empinado	70 - 143
> 55° - 90°	35°	Vertical	143 - ∞

Fuente: Demek, 1972.

Los análisis de la pendiente se aplican con diversos objetivos; por ejemplo, para determinar la capacidad agrologica de los suelos, en obras ingenieriles (aeropuertos, carreteras, urbanizaciones, sistemas de alcantarillado) o en geomorfología (en relación con fenómenos de erosión e inestabilidad de laderas). En lo que a las pendientes se refiere, la planicie septentrional prácticamente tiene un relieve plano, el cual cubre más del 90% de la superficie estatal, o sea aproximadamente unos 40,000 Km². Esta apreciación es relativa, porque cuando se observa en campo, la planicie es ligeramente ondulada con altillos y hondonadas. El resto de los valores de pendiente se distribuyen en forma aleatoria; así, existen planicies onduladas con pendientes ligeramente inclinadas (CINVESTAV, 2007).

En este caso, aunque existen clasificaciones e intervalos ya establecidos, para este trabajo se eligieron categorías más convenientes para la zona de estudio que es predominantemente plana. Para el análisis de este apartado, se utilizaron valores que corresponden a rangos de las pendientes medidos sobre el cordón litoral, iniciando de la parte más alta de la duna arenosa a partir de la presencia de vegetación hacia la línea de pleamar, obteniendo rangos de inclinaciones que varían entre 0°-10° (Tabla 119 y Figura 239).

Tabla 119. Rango de pendientes medidas en campo.

RANGOS DE PENDIENTES DE LA PLAYA	
PENDIENTE DE PLAYA	VALOR
0° a 4°	1
4° a 6°	2
6° a 8°	3
8° a 10°	4

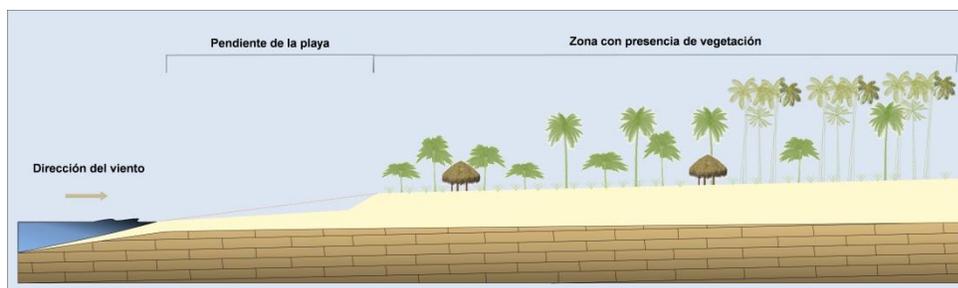


Figura 239. Referencia espacial de la zona en la cual fueron medidas las pendientes en campo (inicio de la vegetación de duna costera hasta el nivel del mar instantáneo).

Tipo de Litoral

El cordón litoral es una angosta franja de terrenos planos con ligeras ondulaciones no mayor de 3 Km en sus partes más anchas y de 325 Km de longitud, contados desde Celestún en su extremo occidental, hasta el límite que separa el estado de Yucatán con el de Quintana Roo. Estos terrenos son arenosos, constituidos por sedimentos conchíferos no consolidados de naturaleza calcárea y origen marino (CINVESTAV, 2007).

Desde el punto de vista geomorfológico se trata de una estructura unitaria que se despliega formando la costa del Golfo de México, esta unidad estructural se ve interrumpida por pasos naturales, llamados localmente “bocas”, a través de los cuales se mantiene activa la comunicación de los esteros con el mar. Su configuración general de planicie ondulada está determinada por la presencia de pequeñas dunas (CINVESTAV, 2007).

La tipificación del litoral del estado de Yucatán está basada en la clasificación de cuatro tipos de litorales propuestos en la clasificación de Mitsch y Gosselink (1993),: Litoral: arenoso, vegetado, lodoso y artificial. Esta tipificación para litorales no consolidados considera para cada tipo las siguientes características (CINVESTAV, 2007), (Tabla 120).

Tabla 120. Tipos de litoral en la costa de Yucatán.

TIPIFICACIÓN DE LITORAL				
TIPO DE LITORAL	CLAVE	CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN	VALOR
Artificial	LAF	Cuando la acción del hombre se estabiliza o limita el litoral con material de construcción como muros o rellenos de contención.	Es aquel que ha sido estabilizado por medio de muros de contención o escolleras con fines de brindar protección a poblaciones costeras y construcciones para la estabilidad de canales de navegación en los puertos de abrigo pesqueros y para confinar cuerpos de agua de producción salinera.	1
Litoral Vegetado	LVG	Cuando el litoral está expuesto por suficiente tiempo a la colonización de especies vegetales anuales o perennes.	Es dominante en los bordes de los cuerpos lagunares y su extensión alcanza los 356 Km.	2
Litoral Lodoso	LLD	Cuando es dominado por limo y arcilla con al menos 25%.	Es encontrado sólo en segmentos del margen interior de cuerpos lagunares.	3
Litoral Arenoso	LAR	Cuando es dominado por arena con al menos un 25% de arena.	El litoral arenoso es dominante en el ambiente marino, se desarrolla sobre islas de barrera y el cual define la zona de playa. Su extensión estimada mide 295 Km y representa el 36.5% del total del litoral y el 85.4% del litoral marino.	4

Fuente: Clasificación de Mitsch y Gosselink (1993), en POETCY de CINVESTAV (2007).

Antropización de la Zona

El factor antrópico es importante ya que es aquel que provoca en gran medida el desequilibrio ecológico en la franja costera, es decir, mientras más antropización exista en el cordón litoral la perturbación de la vegetación costera se verá más afectada propiciando que esta sea más susceptible a erosionarse, actualmente no existe una clasificación que indique el grado de antropización de un área por lo que el SGM propone la siguiente Tabla:

Tabla 121. Clasificación del grado de Antropización en el litoral yucateco.

ANTROPIZACIÓN DE LA ZONA (AZ)			
CONSERVACIÓN DE VEGETACIÓN	CLAVE	DESCRIPCIÓN	VALOR
Nula	AZN	Se considera antropización nula cuando no hay evidencia de construcciones de ningún tipo en el punto de verificación y sus alrededores	1
Baja	AZB	Se considera antropización baja cuando existen algunas casas o caminos construidos en el punto verificado y sus alrededores	2
Media	AZM	Se considera antropización media cuando hay construcción de varias casas y caminos, comercios, vías de comunicación en el punto de verificación y/o a sus alrededores	3
Alta	AZA	Se considera antropización alta cuando se observan en el punto de verificación y en sus alrededores construcción de infraestructura portuaria, recreativa, hotelera, restaurantera, carretera, etc. (Zonas urbanas)	4

Fuente: Propuesta por el SGM, 2013

Para elaborar el mapa de susceptibilidad se realizó un plano de cada uno de los factores o atributos ambientales antes descritos, sumando los valores que le fueron asignados, utilizando el método de criterio por peso, una vez homologados los valores, se hizo un análisis espacial en un Sistema de Información Geográfica (S.I.G.) Arc Map Versión 10.1. Utilizando el *Geostatistical Analyst* el cual contiene un módulo llamado *Geostatistical Wizard* que se usa para realizar interpolación de datos, para este caso se utilizó el método de *Inverse Distance Weighting* obteniendo la delimitación de áreas con características similares.

Análisis y Evaluación de la Peligrosidad Natural

El análisis de la peligrosidad natural se aborda como el cálculo de “tasas de erosión” expresadas en metros de retroceso/año. Por lo tanto, se considera desde la perspectiva geográfico/espacial como un problema bidimensional, es decir, medir la variación espacial en la posición (x, y) de dos líneas de costa para fechas diferentes. Estos métodos exigen dos fases bien diferenciadas:

- 1) La obtención de datos o fuentes de información que permita “reconstruir” la posición de la línea de costa en fechas pasadas.
- 2) La utilización de técnicas adecuadas para medir geoméricamente los cambios, así como procedimientos analíticos para calcular las tasas de erosión.

Ambas fases son esenciales, si bien la primera es crucial ya que proporciona los datos para la segunda (Ojeda Zújar J, 2001).

Con el término “reconstrucción” de la línea de costa, se hace alusión a la posibilidad de localizar con una determinada precisión métrica, antiguas líneas de costa, y en este sentido, es esencial la calidad geométrica de las fuentes de información y su disponibilidad temporal. Entre las fuentes de información disponibles es necesario diferenciar dos bloques. La cartografía, la fotografía aérea y la teledetección espacial (debido a su largo periodo de registros) por una parte, y las nuevas técnicas de posicionamiento global (GPS) y la altimetría láser aerotransportada (sólo disponibles para los últimos años en el mejor de los casos, pero de gran proyección para el seguimiento de la línea de costa en el futuro) por otra. De cualquier forma, antes de extraer datos de estas fuentes es necesario subrayar la especial importancia de:

- 1) Definir la línea de costa a utilizar; y
- 2) Evaluar la precisión geométrica de las fuentes de información ya que, en parte, condicionan las escalas espaciales a las que podemos trabajar (Ojeda Zújar, 2001).

Datos y Fuentes de Información

Para interpretar la erosión costera, es necesario realizar un análisis de imágenes en un Sistema de Información Geográfica, estas pueden ser ortofotos, imágenes satelitales, cartas náuticas o topográficas, sin embargo, no todas cuentan con la misma precisión en cuanto a la posición de la línea o franja costera. En algunos países se adopta la situación de la pleamar en mareas vivas (las hojas “NOS” en Estados Unidos, uno de los documentos más usados para este fin –*National Research Council*, 1990,123-), lo cierto es que en muchos casos (sobre todo en escalas detalladas), se encuentran líneas que responden a criterios imprecisos (línea de agua instantánea, límite de la playa seca, etc.). El seleccionar una costa u otra puede llevar a grandes errores de cálculo final cuando se trabaja con documentos que utilizan criterios diferentes, y estos errores pueden ser potencialmente mayores en la medida en la que aumenta la escala y el rango mareal (Ojeda Zújar 2001).

La fotografía aérea constituye el documento más utilizado para el cálculo de tasa de erosión (Ojeda, J. y Vallejo, I. 1995, Viciara, A. 1998), si bien su recorrido temporal comienza en los años 30 y 40's. En estos documentos, la definición de la línea de costa es un criterio que no viene establecido, sino que es "interpretado". Quizá el elemento más utilizado, es la línea de contacto entre la duna costera (*Foredune*) y la playa alta (*backshore*). Este criterio tiene la ventaja de evitar los problemas derivados de la utilización de otros que se ven influidos por la variabilidad estacional de las playas (límite de playa seca, marea alta, etc.) y se considera como un buen indicador de los cambios a largo plazo (Ojeda Zújar 2001).

La teledetección espacial ofrece un elevado volumen de datos sobre las zonas costeras desde sus inicios (años 50 y 60's) con una elevada periodicidad, si bien su utilización para los cálculos de tasa de erosión está limitada por su resolución espacial. En este sentido, aunque con el lanzamiento del sensor MSS-Landsat (resolución 80 m) empiezan a aparecer las primeras aplicaciones para el cálculo de tasas de erosión, no es hasta el lanzamiento de los sensores Landsat-TM (30 m) y Spot-XS (20 m) y Spot-P (10 m), cuando su aplicación en estas medidas es realmente operativa (Ojeda Zújar J., 1988).

Este tipo de imágenes sólo son aplicables a tramos costeros donde los cambios sean significativos, y su utilidad se centra en cubrir los huecos que dejan las fotografías aéreas. Con la aparición de sensores de mayor resolución como el satélite IRS (5 m) y los nuevos sensores ya operativos (Orbview, Ikonos, etc.) de escala métrica, su utilidad se acerca cada día más a la que ofrece la fotografía aérea (Ojeda Zújar, 2001).

Medición de los Cambios y el Cálculo de las Tasas de Erosión

Una vez identificada la línea de costa, la medición de los cambios exige el establecimiento de un procedimiento metodológico que permita su comparación y medición geométrica. Esta simple forma de comparación no es un tema banal cuando la línea de costa se ha extraído de documentos o con instrumental técnico que poseen su propia geometría, derivada de un sistema de proyección para la cartografía, de la perspectiva cónica para la fotografía, del sistema de adquisición para las imágenes de satélite y el sistema LIDAR, y del sistema de referencia geométrico para los levantamientos topográficos y GPS (Ojeda Zújar, 2001).

La incorporación de la electrónica y la informática en las técnicas cartográficas, la restitución fotogramétrica, el tratamiento digital de imágenes y los SIG's, ha puesto en nuestras manos un conjunto de herramientas informáticas que permiten de forma bastante precisa, pasar cualquiera de estos documentos a un sistema de referencia común (Ojeda Zújar, 2001).

Una vez que todas las líneas de costa comparten un mismo sistema de referencia geométrica (por ejemplo proyección UTM, con coordenadas para el mismo huso), solo es necesario un instrumental para medir la distancia lineal entre cada par de líneas de costa sucesivas. Hoy en día esta medición es realmente fácil de hacer con cualquiera de los programas informáticos de diseño gráfico (CAD), cartografía automática, tratamiento digital de imágenes o SIG's. Sin embargo, el hecho que tradicionalmente estas tasas de erosión se expresen en metros/año, exige que estas medidas sean puntuales, por lo que se selecciona un número de puntos, su distribución geográfica y la diferencia cronológica entre dos líneas sucesivas. Respecto al número de puntos, parece obvio que cuanto más numerosos sean mejor, pero la distancia entre ellos es también muy importante para recoger la variabilidad espacial de los procesos erosivos en la costa (Ojeda Zújar 2001).

Otro método que se utiliza, es dividir la costa en tramos longitudinales con características morfodinámicas parecidas y seleccionar varios puntos representativos para cada uno de ellos. Este método es paradójicamente bastante efectivo cuando la diferencia entre fechas es de varios años o décadas, ya que este periodo temporal filtra gran parte de la variabilidad espacial de la erosión (Ojeda Zújar, 2001).

Una vez realizadas las mediciones es necesario extraer una tasa de erosión media (*National Research Council*, 1990). Una técnica simple es utilizar exclusivamente la primera y última fecha para calcular la tasa con estos dos únicos puntos de referencia mediante la división de la distancia entre las dos fechas por el número de años. Tendría a su favor el mayor recorrido temporal y expresaría la información de los cambios a largo plazo. Es una técnica útil y simple, siempre y cuando en este tramo costero no se hayan introducido cambios sustanciales, sobre todo de carácter antrópico, que hayan modificado su comportamiento dinámico (por ejemplo la construcción de diques o puertos que interrumpen el tránsito sedimentario longitudinal). Si esto ha ocurrido, es aconsejable dividir en dos periodos las tasas (antes y después), siempre que exista información disponible. El inconveniente es que se despreja la información de la línea de costa intermedia, en el caso que se tengan varias (Ojeda Zújar 2001).

Un método más sofisticado es, utilizar para cada punto todas las mediciones entre las fechas disponibles y ajustar a ellas una recta, mediante un análisis de regresión lineal. Este método tiene la ventaja de utilizar toda la información disponible, y permite revelar la existencia de una tendencia frente a la aceptación de que el comportamiento de la erosión es homogéneo a lo largo de todo el periodo. Por otra parte, la técnica de análisis es fácil de usar y susceptible de ser evaluada por numerosos test estadísticos. Si en el tramo analizado encontramos una alteración antrópica como la comentada anteriormente, se suele realizar el análisis de regresión con dos grupos de datos (los anteriores y los posteriores a la fecha de la alteración antrópica) (Ojeda Zújar 2001).

Junto a esta forma de expresar las tasas de erosión (medidas puntuales expresadas en metros/año), la posibilidad de disponer de nuevas fuentes de información y el abatimiento de los programas para su manipulación informática ha conducido a la expresión de las tasas de erosión en unidades diferentes. Básicamente como cambios superficiales ($m^2/año/metro$ de costa) y como cambios volumétricos ($m^3/año/metro$ de costa), (Ojeda Zújar, 2001).

En el primer caso (cambios superficiales), la metodología exige una fuente de información que permita reconstruir las líneas de costa y tratarlas como una línea (no como medidas puntuales), y para ello, las fuentes de información más usados son la cartografía, la fotografía aérea, la teledetección y de forma menor, los levantamientos topográficos. Los más utilizados, sin duda, son los dos primeros ya que tienen un mayor recorrido temporal retrospectivo. Como hemos indicado con anterioridad, la posibilidad de adaptar las fuentes originales, tras su digitalización, a un sistema de referencia geométrico común son utilidades que ofrecen la mayor parte de los programas informáticos para cartografía automática y fotogrametría digital y pueden ser soportados por cualquier procesador moderno en un PC (Ojeda Zújar, 2001).

Tras la comparación de dos líneas de costa es fácil convertir el espacio erosionado o acumulado en un polígono y extraer su superficie para la elaboración de las tasas. Las ventajas de este enfoque metodológico son varias (Ojeda *et al.*, 2001). La primera es que forma casi automática se pueden interceptar con líneas transversales a la costa y extraer las medidas puntuales para aplicar el método anterior. La segunda es la mayor precisión de las mediciones, la no pérdida de continuidad espacial y el valor implícito en los datos de superficie. Por último, esta técnica permite delimitar con mayor precisión dónde empiezan y terminan los tramos erosivos (Ojeda Zújar, 2001).

Pero sin duda, dado que la erosión costera es en definitiva un proceso tridimensional (pérdida de sedimento donde el retroceso lineal no es más que una de sus expresiones), la evaluación más precisa de sus efectos morfométricos sería el cuantificar el volumen erosionado y expresarlo en una tasa volumétrica ($m^3/año/metro$ de costa). Obviamente el problema de esta metodología reside en ser capaz de extraer la información altimétrica con la suficiente precisión. Para ello, la inmensa mayoría de la información cartográfica disponible en la mayor parte de las zonas costeras no es adecuada (equidistancia de curvas y densidad de cotas altimétricas insuficientes). Por lo tanto, si se quiere hacer realizar un análisis con un periodo temporal extenso, la única información posible es la fotografía aérea, ya que a través de su restitución digital es hoy en día relativamente fácil extraer información altimétrica incluso para vuelos fotogramétricos antiguos (Baltasavias, E.P. 1996; Brown, D.G., *et al.*, 1999).

Para ello, la edición manual posterior de la información altimétrica es esencial antes de crear el modelo digital de elevaciones (MDE) con el que se calcularán los volúmenes. Por otra parte, la precisión en la “z” está controlada básicamente por la escala del vuelo, aunque con vuelos en torno a 1:20,000 se consiguen precisiones alrededor del 1-2 metros. Una vez obtenidos los MDE´s para varias fechas, la utilización de técnicas de álgebra de mapas (en un entorno SIG) permite obtener el balance sedimentario para cada punto de la malla altimétrica y, por lo tanto, las tasas de erosión volumétricas expresadas en m³/año/metro lineal de playa (Ojeda Zújar, 2001).

Existe otra técnica de mayor proyección en el futuro, ya en fase operativa en algunos países (Huisig, J. y Vesezen, 1997), es el uso del anteriormente comentado sistema de altimetría láser aerotransportado (Lidar). En este caso, la información proporcionada es directamente un MDE de bastante precisión (desenas de centímetros) y, dado el control geométrico del sistema de adquisición, se suele proporcionar en el sistema de referencia que elija el cliente. La obtención de datos para varias fechas permite realizar igualmente el balance sedimentario y el cálculo de las tasas volumétricas. Este sistema tiene a su favor la posibilidad de filtrar la vegetación (el barrido lateral es tan detallado que siempre existen algunos puntos que proporcionan la información del suelo entre una formación vegetal), la precisión altimétrica y la fácil manipulación de los datos proporcionados en formato *raster* (MDE´s). Sin embargo, es una técnica sin posibilidad retrospectiva por falta de datos antiguos (Ojeda Zújar 2001).

El interés adicional de estas metodologías (fotogrametría digital y LIDAR) reside en que el “dato” de trabajo es finalmente un MDE, con lo cual no solo es interesante desde la perspectiva de la elaboración de tasas de erosión, sino que además proporciona la información esencial para la evaluación de otro riesgo que suele presentarse asociado a la erosión costera: la inundación (Ojeda Zújar, 2001).

Calculadas las tasas de erosión (en cualquiera de sus expresiones) la evaluación completa del riesgo implica la cartografía de esta peligrosidad natural tanto actual como futura, así como la utilización de esta cartografía para identificar los daños que pueden ser causados por este fenómeno (pérdidas de playas, propiedades, daños a infraestructuras, etc.), (Ojeda Zújar, 2001).

VIII.3.4. Análisis de Información y Generación de Mapas Base

Para realizar un análisis de erosión costera, previamente se describirán las características de los paisajes costeros del estado de Yucatán, así como la delimitación de dicha zona, ya que es de suma importancia conocer el área de estudio para lograr identificar cuál de ellas presenta mayor vulnerabilidad a este fenómeno.

El Programa de Ordenamiento Ecológico del Estado de Yucatán (POETCY, 2007), define el territorio costero como el espacio comprendido en una franja que llega hasta 20 Km tierra dentro a partir de la línea litoral. Este territorio está integrado por trece municipios costeros y diez municipios colindantes que, sin tener salida al mar, se ubican dentro de la franja de 20 Km.

Los municipios integrantes de la franja costera se reagrupan en cuatro subregiones: La occidental (Celestún y Hunucmá); la de Progreso, que incluye la parte norte del municipio de Mérida; La central (Ixil, Dzempl, Telchac Puerto, Sinanché, Yobaín, Dzidzantún y zonas colindantes); y la oriental que incluye a Dzilam de Bravo, San Felipe, Ría Lagartos, zonas colindantes y la parte norte de Tizimín (CONABIO, 2011); (Figura 240).

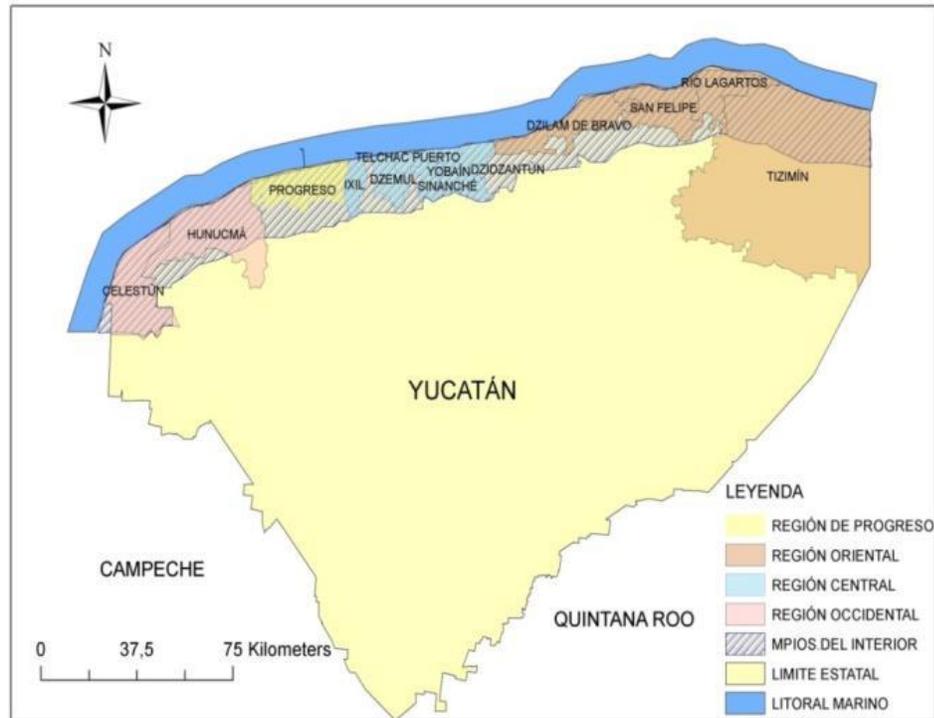


Figura 240. Franja de 20 Km con división política delimitando los municipios costeros (CONABIO, 2011).

La costa está integrada por paisajes naturales desarrollados en forma de bandas que corren paralelas al litoral, empezando con una plataforma sumergida de poca pendiente a la que le sigue un conjunto de islas de barrera. Al interior de la barra arenosa, se extiende una banda de lagunas rodeadas por manglares y petenes intercalados. A continuación se encuentra una franja de sabana formada por pastizales y selvas inundables. En su interior encontramos selva baja caducifolia y hacia el occidente, una pequeña porción de selva mediana subperennifolia (CONABIO, 2011); (Figura 241).

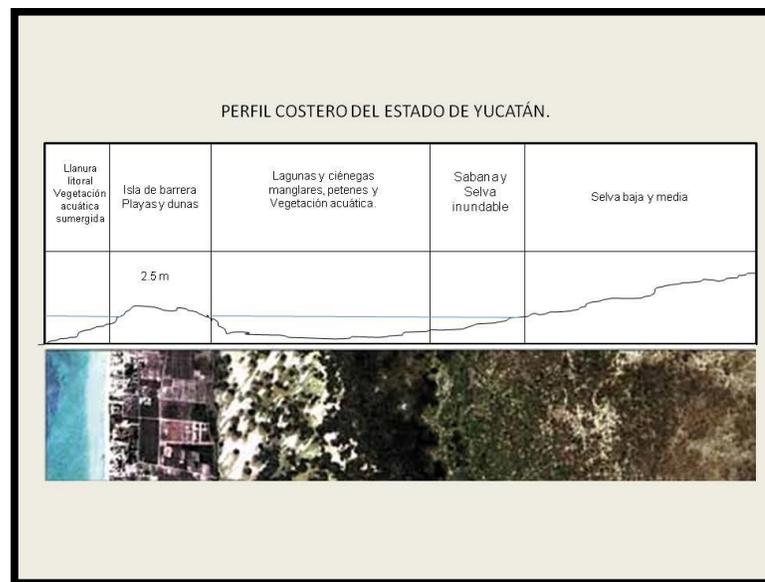


Figura 241. Perfil costero del estado de Yucatán en el que se observan los distintos paisajes litorales, (tomado de CONABIO, 2011).

Como se mencionó antes, un sistema puede perder su estabilidad fácilmente, propiciando su deterioro, este daño resulta difícil de medir, sin embargo, según la CONABIO (2011), se conocen

algunas de las alteraciones que afectan los paisajes costeros del Estado. En la llanura litoral, aquellas que afectan la estabilidad del paisaje son provocadas por turbiedad excesiva en la columna de agua (dragados, descargas de actividades urbanas y fenómenos naturales), que bloquea la entrada de luz, impone condiciones de estrés a la vegetación y aumenta las concentraciones de nutrientes. Esto, a su vez, puede propiciar el crecimiento excesivo de algas, que producen disminución del oxígeno y finalmente mortalidad de otros organismos.

Sobre las islas de barrera, playas y dunas del estado de Yucatán, los nortes y huracanes producen rompimientos y pérdida de arena en lapsos muy cortos, así como la destrucción o afectación de la vegetación. Producto de las actividades humanas son las construcciones mal planeadas, que modifican el transporte de sedimentos a lo largo de la costa, y la remoción excesiva de la vegetación de dunas, lo que propicia la erosión de las playas. En las lagunas y ciénagas, incluidos los petenes, las afectaciones son similares a las de la llanura litoral y se vinculan con la calidad del agua. También hay afectaciones a la vegetación de manglar, por su destrucción física o por la interrupción de los flujos de agua, producto de azolvamientos y construcción de carreteras.

En la Sabana, los incendios provocados por el manejo de los pastizales y la modificación de la vegetación arbórea incrementan la evaporación y los niveles de salinidad del manto freático; la pérdida de vegetación también contribuye a una disminución del hábitat y de la diversidad. En las selvas, los fuertes vientos de los huracanes y los incendios, naturales o inducidos, así como las prácticas actuales de conversión del suelo a la ganadería y la agricultura, ponen en serio riesgo la supervivencia de la vegetación y contribuyen al empobrecimiento de la biodiversidad y al cambio climático.

Es importante conocer la delimitación de la costa del Estado, así como sus características ya que cualquier cambio que afecte a algún paisaje costero repercute en los demás, en este capítulo nos enfocaremos a la descripción de la erosión costera que afecta principalmente a la zona de playas, dunas e islas barrera. A continuación comenzaremos por definir este fenómeno.

En el estado de Yucatán, la población aumento considerablemente en la década de los 70's principalmente en los alrededores del municipio de Progreso, la mayoría de estas personas se establecieron sobre la isla de barrera y en las zonas de manglar y ciénegas, lo cual fue acompañado por una intensa urbanización debido a la demanda de espacios recreativos para el turismo. Con ello, los procesos que han impactado los ecosistemas costeros se fueron acrecentando con lo que ha sido evidente la pérdida de hábitats y la contaminación orgánica. Esta densidad poblacional así como la obras de infraestructura que se han venido realizando debido a este aumento de habitantes en la costa, ha provocado cambios e impactos en los flujos de agua y arena provocando daños ambientales como erosión costera, que se ha ido intensificado debido a fenómenos naturales como el Huracán Gilberto (1988) y a la construcción de diques como el que se encuentra en el Puerto de Altura de Progreso, de casi 5 Km (Herrera-Silveira 2002).

Las zonas de manglar y dunas costeras están siendo destruidas a lo largo de 25 Km a ambos lados de Progreso por el alargamiento de las zonas urbanas de los pueblos costeros, la construcción de carreteras, las áreas de contenedores de carga y la urbanización para el turismo semintensivo, la calidad del agua de lagunas costeras y de la zona marina adyacente, se han reducido a consecuencia de las descargas de aguas residuales urbanas e industriales, (Herrera-Silveira *et al.*, 2002); (Figura 242).

Yucatán cuenta con una longitud de 342.47 Km de línea costera (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada Baja California, CICESE, s/a), en los que se desarrolla actividad turística, obras de infraestructura hotelera y de recreación, dichas actividades han provocado importantes problemas medioambientales como la pérdida de áreas de manglar, dunas costeras y playas, así como cambios en la línea de costa poniendo en riesgo las posibilidades de desarrollo económico sustentable en la zona, es por ello que es de vital importancia realizar este tipo de análisis para evitar o mitigar esta problemática.

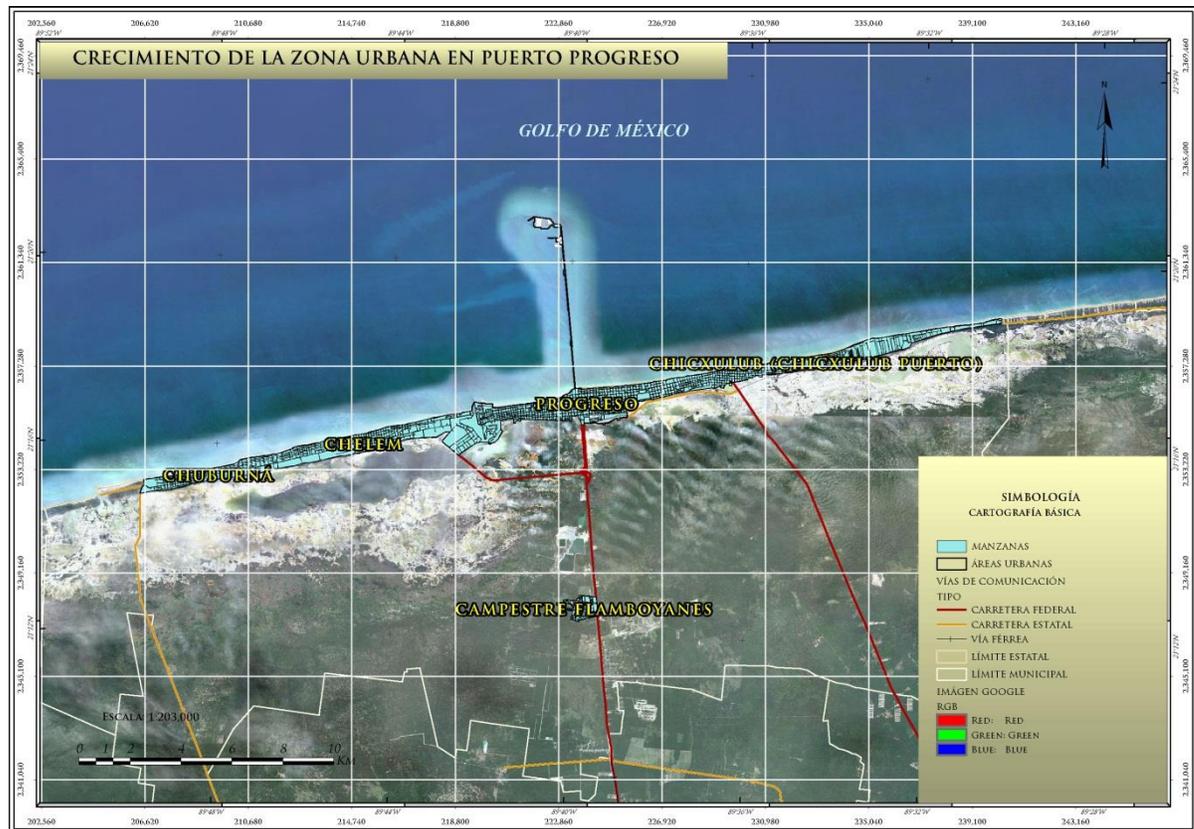


Figura 242. La zona urbana crece en el municipio de Progreso extendiéndose lateralmente hacia las localidades de Chuburná y Chicxulub destruyendo dunas costeras y zonas de manglar.

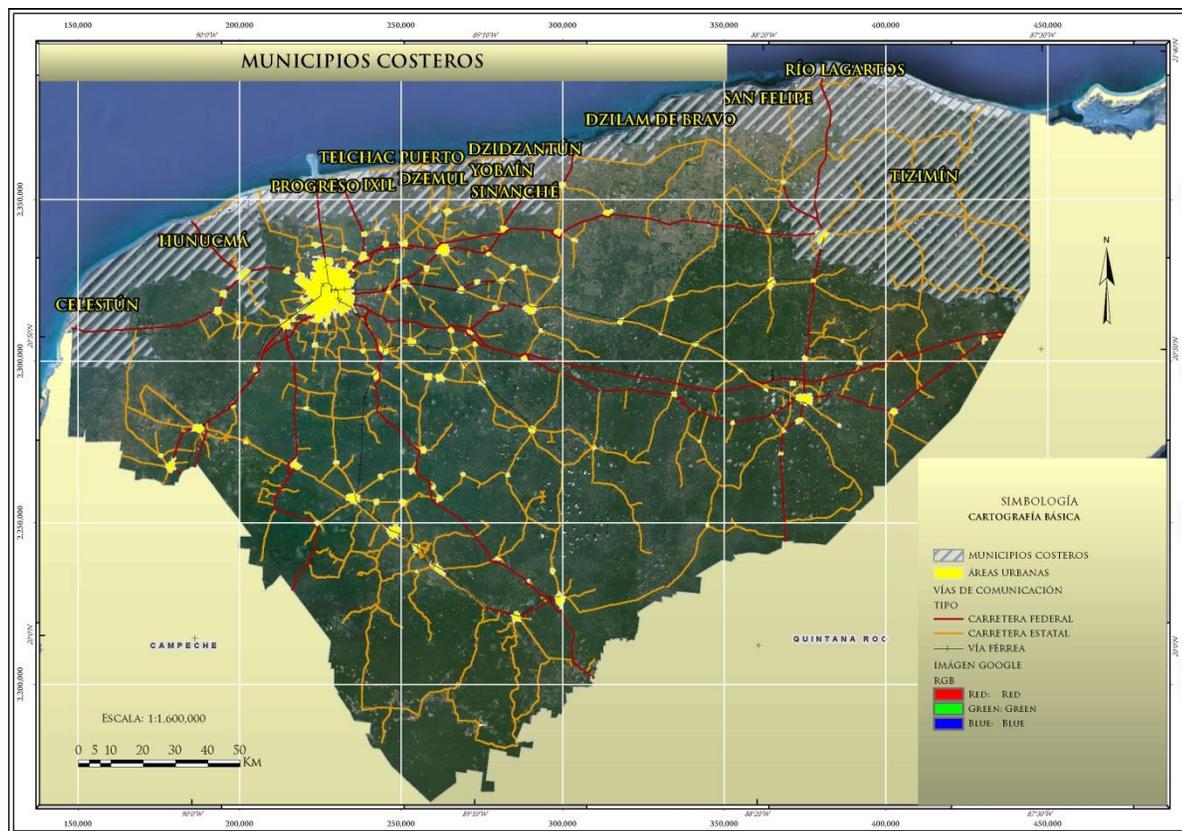
La franja costera está integrada por trece municipios; Celestún, Hunucmá, Progreso, Ixil, Telchac Puerto, Dzemul, Sinanché, Yobaín, Dzidzantún, Dzilam, San Felipe, Río Lagartos y Tizimín (Figura 243). Las características principales de dichos municipios son las siguientes: en Celestún se distinguen dos zonas, la región costera, cuyo territorio presenta una leve pendiente que se convierte en lecho marino; y la región del interior, formada por una llanura de barrera con piso rocoso los vientos dominantes provienen en dirección noroeste. (Enciclopedia de los municipios de Yucatán, 2002).

La Orografía del municipio de Progreso se caracteriza por ser plana, cuenta con playa o barra de laderas tendidas, inundables y salinas con lomerío, los vientos dominantes soplan en dirección suroeste.

Toda la superficie del territorio municipal de Ixil es plana, considerada como llanura de barrera en su mayor extensión, debido a que en el extremo norte existen playas.

El municipio de Telchac es plano, con playas o barras de laderas tendidas, inundables y salino, lomeríos en las partes norte y centro; existiendo porciones clasificadas como llanura de barrera y piso rocoso o cementado, complejo en la parte sur, los vientos dominantes provienen en dirección noroeste y este.

En el norte del municipio de Yobaín, el terreno presenta una suave pendiente en dirección hacia el mar. El territorio restante es prácticamente plano y está constituido por una llanura de barrera con piso rocoso, los vientos predominantes son en dirección sureste y noroeste, en la costa se presenta la vegetación característica de los litorales yucatecos: cocoteros, manglar y chit (palma-Thrinax radiata). En el interior se encuentra la vegetación propia de la selva baja caducifolia, matorrales y arbustos espinosos, la principal actividad económica es la industria, agricultura, ganadería, comercio y turismo.



La parte Sur del municipio de Dzidzantún, está constituida por una llanura de barrera con piso rocoso. La parte Norte posee una suave pendiente que al final se convierte en lecho marino, los vientos dominantes son en dirección Sureste y Noroeste. En toda la región del municipio de Dzilam, predominan los vientos procedentes del Sureste. La superficie del territorio municipal se clasifica como llanura de barrera con piso rocoso o cementado, alto y escarpado, caracterizándose el extremo Norte por ser playas de laderas tendidas.

En el municipio de San Felipe, predominan los vientos Sureste a Noroeste y Noroeste a Suroeste. El período de lluvias abarca de mayo a julio, En la parte oeste, de Norte a Sur del territorio municipal hay manglares. En el centro, norte y sur se encuentra selva baja caducifolia.

Río lagartos cuenta en su litoral con playa o barra de laderas tendidas, inundables y salinas con lomeríos. En la parte sur, la superficie del municipio es plana, predominan los vientos procedentes del noroeste, en Las Coloradas existe vegetación de dunas costeras y en las costas del municipio crecen los manglares, hay grandes porciones de pastizal cultivado en casi todo el territorio, pequeñas porciones de selva baja caducifolia en la parte centro y pequeñísimas porciones de selva mediana sub-caducifolia, con vegetación secundaria distribuida en el Sur.

En el municipio de Tizimín los vientos predominantes provienen del Sur y del Oeste, de acuerdo con los datos de las estaciones termopluviométricas, se indica que la precipitación anual durante 8 años, tuvo como promedio 1084 milímetros cúbicos.

VIII.3.5. Descripción e Interpretación de Datos Tomados en Campo

Para poder llevar a cabo los trabajos de verificación en campo primero fue necesario hacer una prospección área con apoyo del helicóptero EUROCOPTER, AS350-B3 propiedad del SGM, con el objetivo de obtener una perspectiva general de la problemática por erosión costera en el litoral yucateco y así posteriormente poder programar los puntos de verificación terrestre a lo largo del litoral. El vuelo se realizó a partir de la zona oriente del litoral al poniente del mismo, identificándose 20 puntos (EC01 al EC020) que presentan erosión (Figura 244).

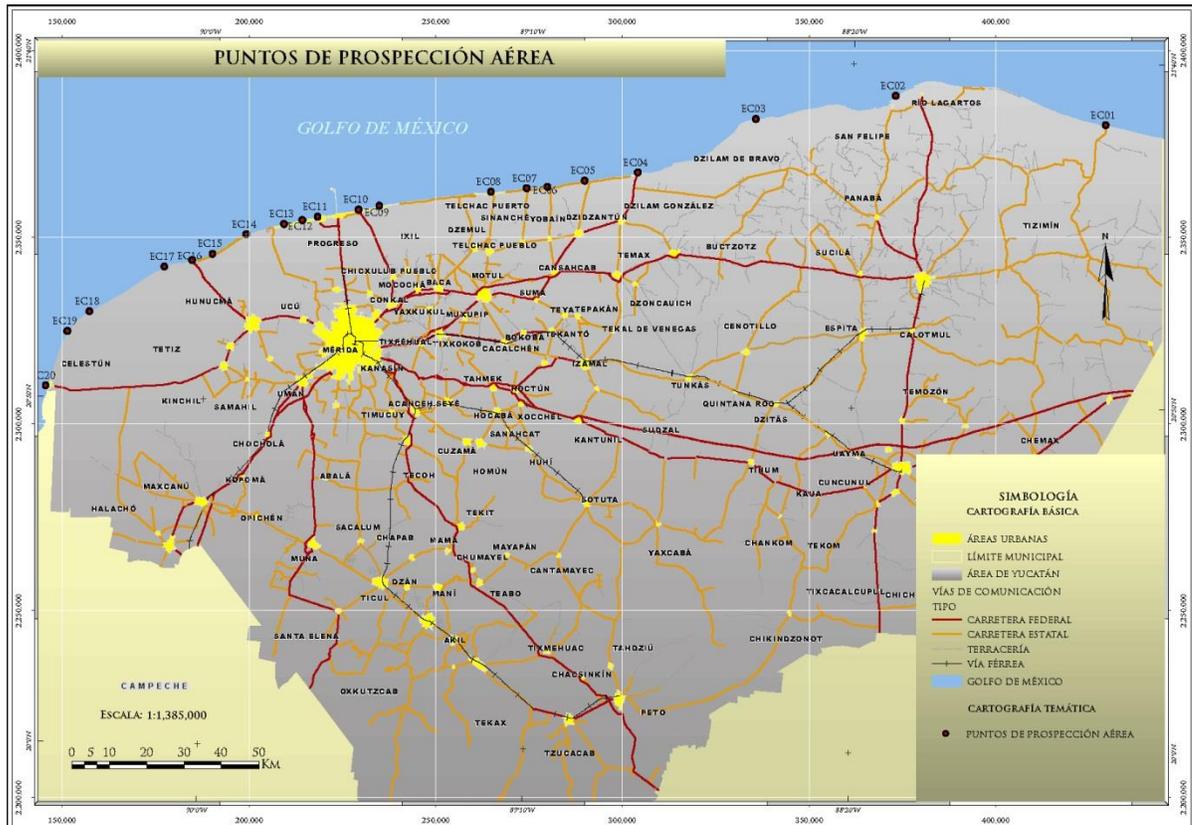


Figura 244. Ruta de prospección aérea a lo largo del litoral del estado de Yucatán.

El primer punto de control (EC01) se encuentra ubicado en la localidad de El Cuyo, municipio de Tizimín, en donde se observa que la dinámica normal de la corriente del mar es obstruida por la construcción de un dique, provocando acreción en el lado izquierdo (vista frontal a la fotografía) y a su vez erosión del lado opuesto, ya que la corriente principal denota una dirección predominante hacia el Noroeste (NW); (Fotografía 133). Características semejantes se presentan en la costa del municipio de San Felipe en el que se construyeron diques para la entrada a la ciudad así como al embarcadero, esta obra provoca acreción y erosión como se ilustra en la Fotografía 134.

Esta interrupción del transporte normal de los sedimentos propicia que en el lado contiguo al dique, el ancho de la playa disminuya, ya que el material no se transporta ni se deposita de manera homogénea a lo largo de la costa, provocando erosión. En algunas partes del litoral como Chisascab, Yalkubul y El Remate, ubicados en la zona costera del municipio de, la erosión actúa de manera natural, los vientos predominantes vienen del Sureste, por lo que la corriente se marca en esta dirección, sin embargo, desde una perspectiva aérea no se observa sedimento en el agua, motivo por el cual posiblemente la franja costera se encuentra con poco espesor, (Fotografía 135). En el municipio de Dzilam de Bravo se construyeron diques de contención principalmente para prevenir inundaciones, así como para proteger las casas que se encuentran en la orilla del mar, eliminando a cambio las playas, ya que este muro no permite el depósito de sedimentos (Figura 245 y Fotografía 136).



Fotografía 133. En la localidad El Cuyo, la construcción de un dique impide la deposición normal de sedimentos a lo largo de la costa.



Fotografía 134. En la localidad de San Felipe, se aprecia que la corriente lleva una dirección preferente al Noroeste (NW), por lo que los sedimentos se acumulan en la parte izquierda del dique.



Fotografía 135. En la localidad de Chisascab, la corriente de agua se observa con poco sedimento para ser depositado en la costa, razón por la cual posiblemente esta se encuentra con menor espesor.



Fotografía 136. En la localidad de Dzilam de Bravo, el dique de contención, impide el depósito de sedimentos.



Figura 245. Vista panorámica de las funciones que realiza el dique de contención como obra de mitigación para la erosión.

Por otra parte, a lo largo del municipio Dzilam de Bravo, hacia la localidad de Santa Clara, la costa se ve reducida, por lo que la gente de los poblados que se encuentran viviendo en esta tramo litoral sigue construyendo diques para ganar territorio al mar ensanchando la playa de manera artificial, como lo muestra la Fotografía 137.



Fotografía 137. Construcción de diques para ganar y conservar la playa frente a las casas de los habitantes del lugar.



Fotografía 138. En la localidad de Chabihau, municipio de Yobain, los diques que acumulan y a la vez erosionan la costa formando estructuras en "Z".

Las obras de defensa costera son un elemento que puede llegar a alterar fuertemente la dinámica litoral, especialmente cuando son clasificadas como dunas, estructuras que interrumpen o modifican el transporte sólido litoral (Fotografía 138). Los diques longitudinales se construyen en la propia línea de costa o en la parte posterior de la playa suelen tener el doble objetivo de proteger del oleaje y actuar como muro soporte de los terrenos detrás de ellos. Estas obras interfieren sobretodo el transporte transversal, ya que no permiten que el material de la trasplaya se incorpore a la dinámica propia del perfil de la playa. El oleaje incidente se refleja en el dique, cosa que impide la acumulación de sedimento y provoca un aumento en el nivel de agitación delante de la obra, que se va erosionando en la base. Esta forma artificial de acumular los sedimentos acelera la erosión de las playas en lado contrario formando a lo largo del litoral estructuras que vistas desde el aire tienen forma de "Z" (Figura 246).



Figura 246. Vista panorámica de la problemática ocasionada por la erosión que causa en la zona costera los diques instalados de manera particular por los vecinos de Chabihau, produciendo daño al vecino inmediato, ya que el primero recupera playa y el segundo la pierde.

Dicha interrupción en la evolución natural de la costa trae como consecuencia erosión en las áreas subsecuentes a esta localidad como es el caso de San Crisanto, municipio de Sinanché (Fotografía 139). Esta problemática se ve reflejada también en la cabecera municipal de Telchac Puerto (Fotografía 140 y Figura 247).



Fotografía 139. En el Municipio de Sinanché, los diques construidos en el tramo anterior a esta población, erosionan de manera severa la playa, dejando varias construcciones expuestas frente al mar.



Fotografía 140. En la Cabecera municipal de Telchac Puerto, debido a la intensa erosión, diversas casas han quedado expuestas frente al mar.

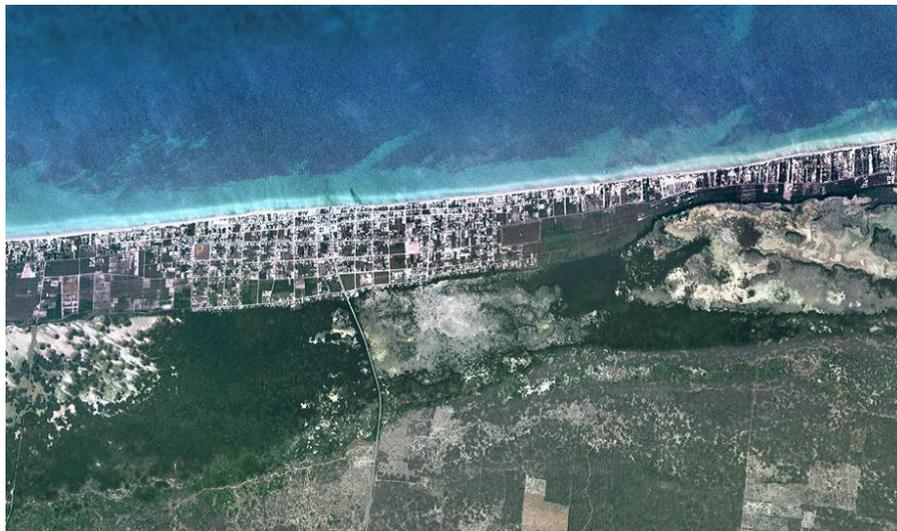
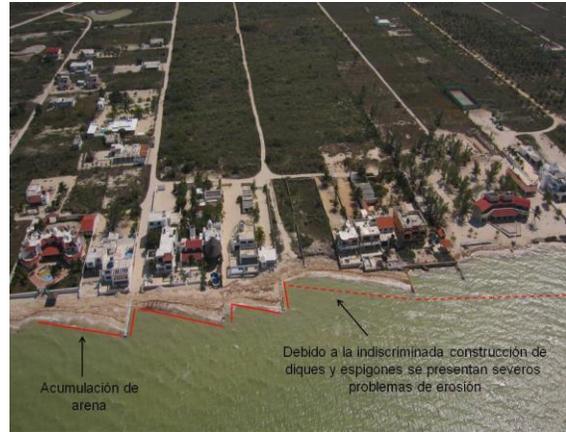


Figura 247. Vista panorámica de la invasión de la zona urbana hacia las zonas de playa, en la que se observan viviendas inundadas por el mar debido a una mala planeación.

Debido a que la erosión es intensa en esta parte de la costa yucateca, los pobladores han tomado medidas para mitigar esta problemática tales como la instalación de geotubos, esto ha colaborado en gran medida a retener los sedimentos ensanchando la playa, (Fotografía 141), el uso de materiales geosintéticos en obras de protección de playas, ha probado ser un aditamento excepcionalmente valioso para proteger litorales de la erosión, particularmente durante huracanes y tormentas tropicales, el proceso es sencillo, se instala un tubo largo hecho de un textil con una tecnología especial que es llenado con arena y enterrado debajo de la playa; cuando hay amenaza de mal tiempo, el tubo mantiene la arena y la tierra en su lugar, previniendo la erosión y daño a las propiedades, (Fotografía 142).



Fotografía 141. Implementación de geotubos como obras de mitigación contra la erosión costera en la localidad de Huaytum, municipio de Ixil.



Fotografía 142. En la localidad de Chicxulub Puerto, la construcción de diques que descompensan la deposición normal de la arena en la costa.

Sin duda estas obras de mitigación han ayudado a controlar esta problemática conservando el espesor de la playa, sin embargo, al igual que los espigones y diques aunque en menor medida, los geotubos también provocan erosión en las zonas adyacentes. La problemática se intensifica nuevamente y de manera alarmante en las zonas de Chicxulub Puerto, Yucalpetén, Chelem y Chuburná, como se ilustra en la Figura 248.



Figura 248. Vista panorámica de la recuperación de playas instalando geotubo como obras de mitigación para la erosión costera.

Este tipo de obras se llevaron a cabo de manera desmedida, provocando que la erosión actuara de manera severa en algunas zonas de la costa, aunado a la mala planificación de viviendas este fenómeno se ha convertido en una problemática importante para los pobladores de esta región.

Esta descompensación sedimentaria ha provocado que hacia el Oeste con respecto al dique ilustrado en la Fotografía 143, se presente erosión severa ya que gran parte de las viviendas construidas en esta zona han sido desprovistas de playa, quedando expuestas al mar (Fotografía 144).

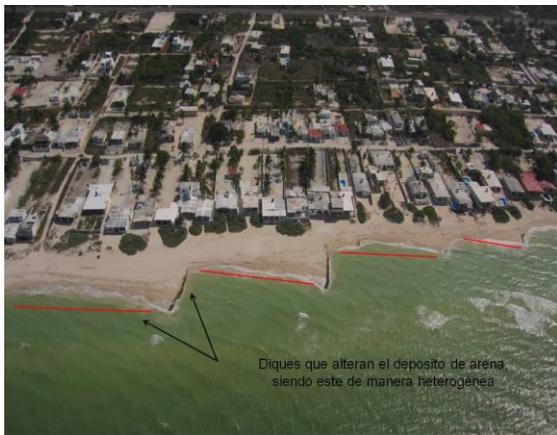
Caso similar se presenta en la localidad de Chelem, municipio de Progreso (Fotografía 145) donde se identificaron zonas en las que se encuentran casas en partes de la playa con erosión severa, quedando expuestas dentro del mar, como se ilustra en la (Fotografía 146).



Fotografía 143. En la localidad de Yucalpetén, claro ejemplo de acreción-erosión debido a la construcción del dique.



Fotografía 144. En la localidad de Yucalpetén, existen construcciones que se encuentran prácticamente dentro del mar debido al desequilibrio sedimentario que existe cuando se construyen diques o espigones.



Fotografía 145. Construcción desmedida de diques provocando acreción-erosión de la costa, en la localidad de Chelem.



Fotografía 146. Zonas erosionadas en las que algunas viviendas quedan dentro de los dominios del mar.

Hacia la parte de Chuburná, la problemática se asocia a construcciones como las mencionadas anteriormente pero ya en menor medida, motivo por el cual la playa se vuelve a estabilizar, hasta llegar al punto donde se encuentra el acceso al embarcadero, sitio en el que se aprecia claramente la gran acumulación de arena en la parte izquierda del dique y erosión en la parte contraria al mismo, (vista frontal a la Fotografía 147).

En las localidades de San Antonio Copte, Tres Piedras, Sisal Puerto y Punta Piedra, todos pertenecientes al municipio de Hunucmá, se observa que la construcción de diques, espigones disminuye notablemente, haciendo que la deposición de los sedimentos sea de manera homogénea, sin embargo, en algunos tramos de este sector del litoral, el espesor de la playa se ve reducido, debido posiblemente al poco aporte de arena que hay en algunos sectores, como se ilustra en la Fotografía 148. Mismo caso se encuentra en las localidades de San Carlos, La Victoria y Celestún, pertenecientes al municipio de Celestún.

De acuerdo a la prospección aérea realizada en el litoral yucateco, se observa que las zonas más afectadas por erosión costera se concentran en el municipio de Progreso, principalmente en las localidades de Chicxulub Puerto, Puerto Progreso, Yucalpetén, Chelem y Chuburná, debido esencialmente a la indiscriminada construcción de diques, espigones e implementación de geotubos, cabe señalar que estas obras ayudan a mitigar este problema, pero solo en partes específicas y dependiendo además de la corriente principal de deposición de sedimentos, la playa si conserva su espesor y en algunos casos se ve incrementado, pero también es cierto que al impedir la dinámica normal de la costa por imposición de estas construcciones el lado adyacente se erosiona de manera severa, aunado a que hay una mala planeación y distribución de construcciones principalmente de

viviendas a lo largo de la costa, la problemática se torna preocupante ya que muchas de ellas se encuentran prácticamente dentro de los límites del mar.



Fotografía 147. En Chuburná municipio de Progreso, la acumulación de arena debido a la construcción del dique, provoca también erosión en el lado opuesto.



Fotografía 148. En la localidad Tres Piedras, municipio de Hunucmá, la reducción del espesor de la playa, se asocia posiblemente al poco aporte de material en esta parte de la costa.

Posteriormente de acuerdo al análisis realizado vía aérea se programaron las visitas de prospección terrestre donde se evaluaron cada uno de los parámetros ambientales antes descritos mediante el llenado de la ficha de campo propuesta para este nivel de información (Figura 249).

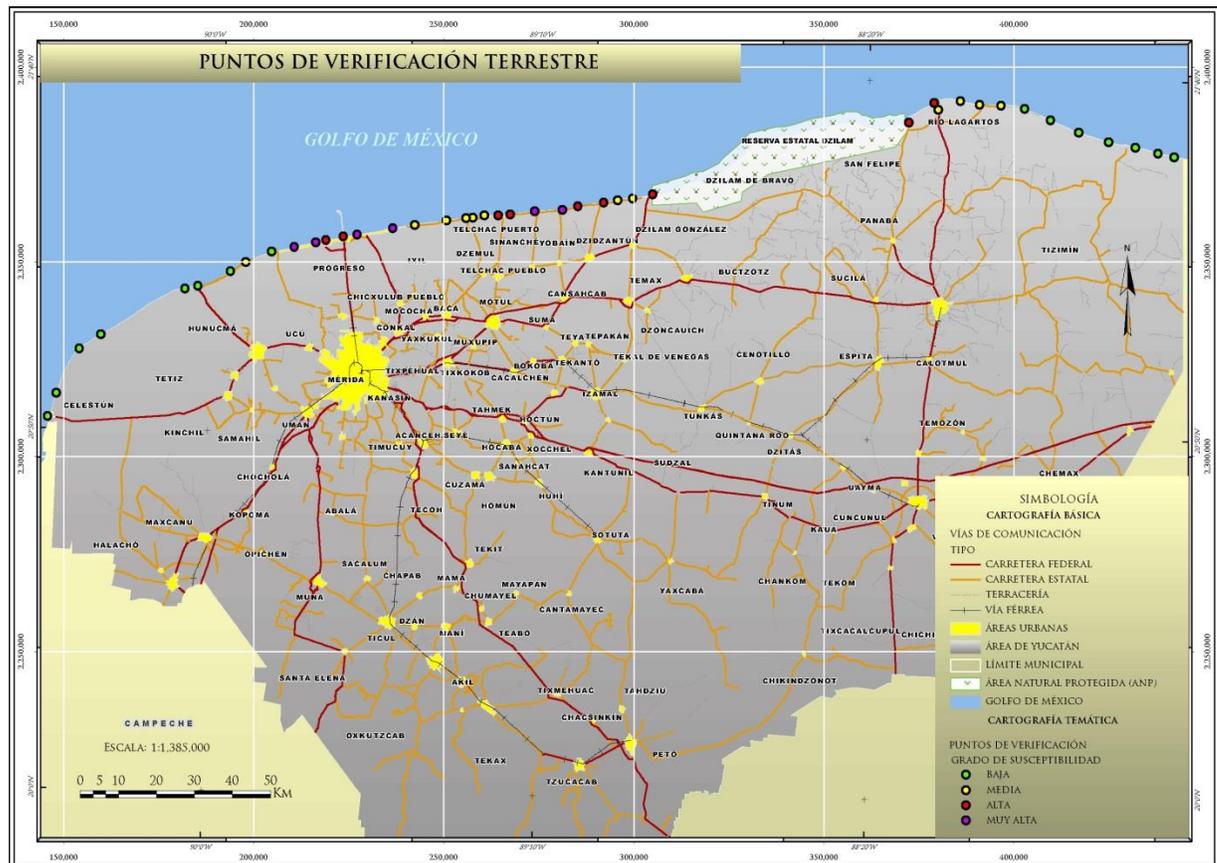


Figura 249. Puntos de verificación vía terrestre.

A lo largo de los aproximadamente 342 kilómetros que comprenden el litoral yucateco, se levantaron 42 puntos de verificación (YEC001 al YEC042) en los que se analizaron los principales factores que aceleran y generan el proceso de erosión costera, en la reserva estatal de Dzilam considerada Área Natural Protegida hay ausencia de puntos de verificación ya que no existen vías de comunicación que den acceso a este lugar, sin embargo, para efectos del análisis correspondiente de susceptibilidad si se tomó en cuenta ya que esta zona se considera como un litoral de tipo vegetado según la clasificación de Mitsch y Gosseling , 1993, citada en POETCY, 2007.

Para poder realizar una mejor descripción de los puntos tomados en campo se optó por tomar la regionalización geográfica del estado de Yucatán realizada por la dirección de Protección Civil Estatal, donde el litoral está constituido por trece municipios costeros y cuatro regiones, las cuales se describen a continuación.

Región I Poniente

En el municipio de Celestún se levantaron cuatro puntos de verificación (YEC012, YEC013, YEC014 y YEC015), el tipo de litoral es de tipo arenoso (Figura 250).

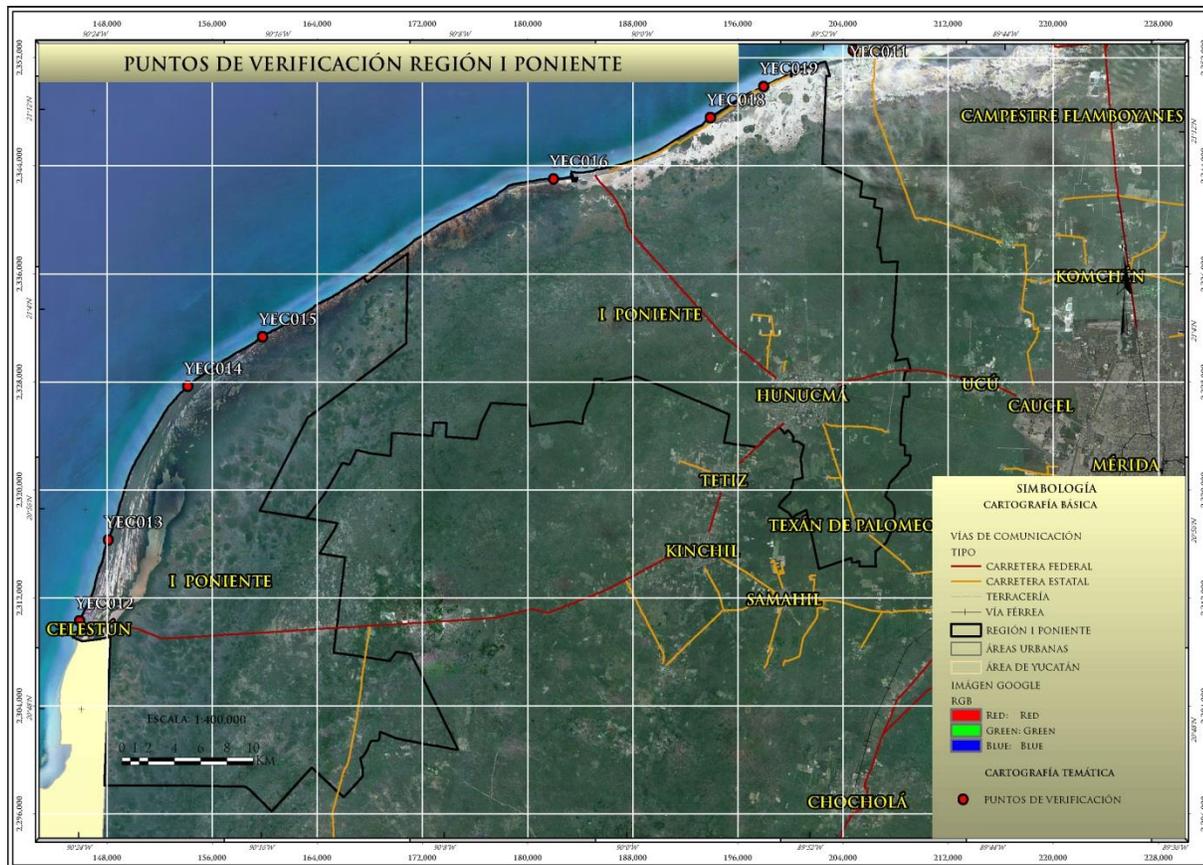


Figura 250. Distribución de los puntos de verificación en la región I Poniente.

La vegetación de duna costera en esta región se encuentra en general bien conservada, el desarrollo en cuanto a infraestructura hotelera, portuaria y recreativa es bajo, lo que contribuye en buena medida a proteger las playas contra la erosión conservando su espesor (Fotografía 149).

El espesor promedio de las playas en este municipio es de 23 metros con una orientación de N34°E-4°NW, sin embargo, en la zona del puerto de Celestún, la construcción de hoteles, restaurantes y casas de descanso ha degradado la vegetación de la duna sin llegar aun a una antropización alta, (Fotografía 150).



Fotografía 149. En Cholul Municipio de Celestún, no existe antropización ni degradación de la vegetación de la duna costera, lo cual ayuda a mantener homogéneo el espesor de la playa.



Fotografía 150. Puerto de Celestún, se construyen casas, hoteles y restaurantes sobre la playa, degradando la vegetación de la duna costera, acelerando el proceso de la erosión.

En cuanto a estructuras que interfieren la evolución normal en la dinámica de la costa se encuentra el puerto de Celestún, que acumula la arena en la parte Este (E) del mismo, donde el espesor de la playa llega a medir hasta 35 metros y en el lado opuesto se reduce a 23 metros, Fotografía 151. Del lado opuesto al puerto en la zona Oeste (W) el espesor de la playa se reduce a 23 metros ya que la barrera no deja transportar la arena de manera normal, (Fotografía 152).



Fotografía 151. Puerto de Celestún, impide que pase la arena de manera natural, acumulándola en la parte Este (E) de la estructura llegando a medir hasta 35 metros.



Fotografía 152. Lado Oeste (W) de la estructura, el espesor de la playa se reduce a 23 metros debido a la construcción del puerto.

También se levantaron puntos de verificación en las localidades de San Ramón y El Palmar, donde la antropización de la duna costera es prácticamente nula, solo se ha alterado para construir algunos caminos que dan acceso a las playas, esto ha contribuido a contrarrestar los efectos de la erosión, en promedio el espesor de la playa es de 23 metros con dirección N45°E y una inclinación de 5° al NW, (Fotografía 153). El municipio de Hunucmá cuenta con una franja de playa aproximada de 39 Km que equivale al 11.4% del total del litoral Yucateco, se levantaron cuatro puntos de verificación (YEC016, YEC017, YEC018 y YEC019).

El primero de ellos se verificó en la localidad de Punta Piedra, donde a pesar de que no existe antropización de la zona y de que la vegetación de la duna costera se encuentra bien conservada, el espesor de la playa es de 12 metros posiblemente debido a que el Puerto de Abrigo de Sisal se interpone en la dinámica normal de sedimentación, la playa tiene una dirección N75°E con una ligera pendiente de 5° al NW (Fotografía 154).



Fotografía 153. En San Ramón, Municipio de Celestún, las playas presentan un espesor homogéneo, ya que no hay antropización ni degradación de la vegetación costera.

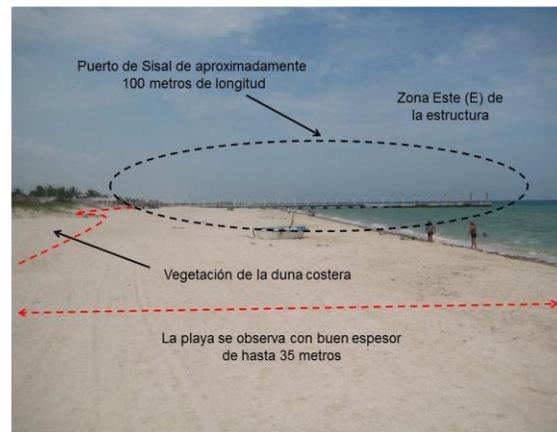


Fotografía 154. En Punta Piedra, Municipio de Hunucmá, la construcción del Puerto de Abrigo de Sisal contribuye a intensificar el fenómeno de la erosión.

El punto de verificación (YEC017) se comprobó que en el Puerto de Sisal, debido a la construcción de casas de descanso, restaurantes y algunos hoteles, se ha degradado la vegetación costera, (Fotografía 155). A pesar de ello las playas muestran un buen espesor de hasta 30 metros, debido posiblemente a la existencia de algún banco de arena que este suministrando material sedimentario a esta zona, la playa tiene una dirección al N 75° E con una pendiente de 6° buzando al NW. La construcción de los puertos como se ha mencionado anteriormente, son barreras que limitan e impiden la deposición normal de la arena a lo largo del litoral y el puerto de Sisal no es la excepción (Fotografía 156).

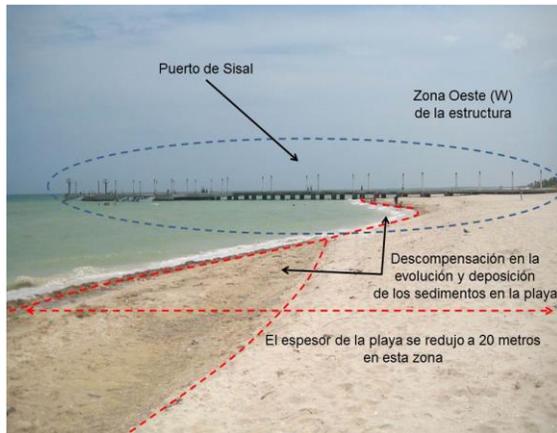


Fotografía 155. En Sisal Puerto, Municipio de Hunucmá, la construcción de casas y algunos hoteles están afectando la vegetación de duna costera, proceso que acelera la erosión en las playas.



Fotografía 156. En la parte Este (E) de la estructura en Sisal Puerto, se acumula arena conservando el espesor de la playa que llega a medir hasta 35 metros.

Al verificar la parte contraria del puerto, el espesor en la playa se ve notablemente disminuido hasta 20 metros como se observa en la Fotografía 157. En la localidad de El Carmen, la playa y la vegetación se encuentran bien conservadas, ya que no existe urbanización en la zona, solo algunas construcciones de caminos a través de la duna para dar acceso a la playa, esta cuenta con espesor de 25 metros en este punto, con una dirección N 50° E con una pendiente de 6° hacia el NW, (Fotografía 158). Entre las localidades de El Carmen y San Antonio Copte, se tomó un punto de verificación (YEC019), en este sitio aunque no hay urbanización y la vegetación de la duna costera no está degradada, existe una drástica reducción en el espesor de la playa debido posiblemente a la influencia del Puerto de Altura de Progreso y al Puerto de Abrigo de Yucalpetén que se encuentran aproximadamente a 30 Km de distancia y que son una de las principales causas de erosión de la costa Oeste (W) de Yucatán, (Fotografía 159).



Fotografía 157. Localidad Sisal Puerto, Municipio de Hunucmá, existe una descompensación en la playa debido a la construcción del Puerto.



Fotografía 158. En el Carmen, Municipio de Hunucmá, la playa se conserva en buen estado, ya que no hay alteración del medio.



Fotografía 159. Tramo entre las localidades de El Carmen y San Antonio Copte, el espesor de playa se reduce hasta 7 metros, debido posiblemente a la construcción del puerto de Altura en Progreso y al Puerto de Abrigo en Yucalpetén.

La región I Poniente, presenta playas con espesores entre 7 y 35 metros, la vegetación de duna costera se encuentra bien conservada a excepción de las zonas donde se construyeron los puertos de Celestún y Sisal, ya que el aumento de infraestructura hotelera y construcción de casas de verano la están degradando, aún sin convertirse en un problema irreversible.

Los puertos antes mencionados también están actuando como una barrera que no permite pasar el sedimento, acumulándolos en la parte Este (E) de ambas estructuras y reduciendo o erosionando la parte Poniente de las mismas, la pendiente promedio de las playas en esta región es de 6° buzando al NW con una dirección al N 47° E.

En los puntos verificados, la antropización es baja, ya que solo existe la construcción de algunos caminos que dan acceso a la playa, lo que ayuda a mantenerla en equilibrio conservando la vegetación de la duna costera que ayuda a proteger y retener la arena contra los efectos del viento y el oleaje disminuyendo el impacto de la erosión.

Región II Noroeste

Esta región comprende los municipios de Progreso e Ixil, donde se levantaron 8 puntos de verificación (YEC004 al YEC011), (Figura 251).

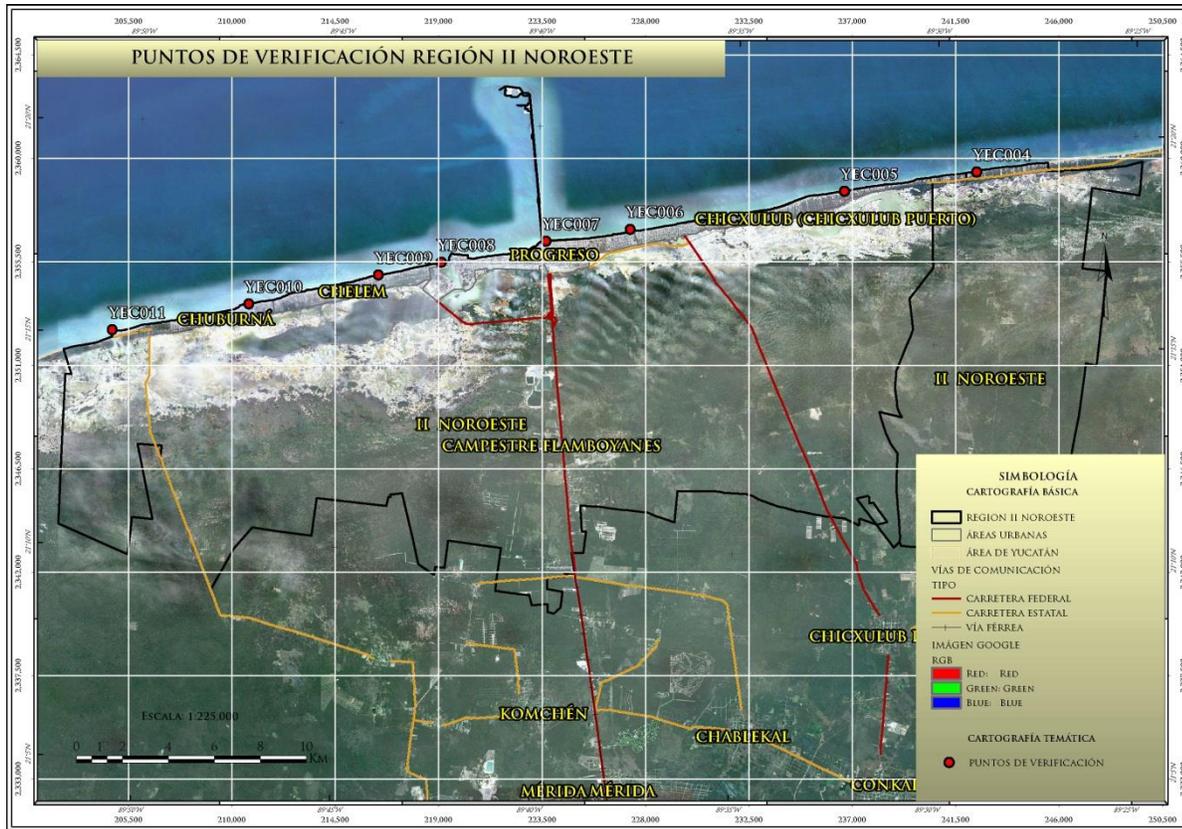


Figura 251. Distribución de los puntos de verificación en la región II Noroeste.

El punto YEC004 se encuentra en la localidad de Ha-Huay, municipio de Ixil, en este punto la creciente urbanización ha alterado la vegetación de duna costera, ya que la construcción de casas y hoteles ha favorecido a la degradación de la zona, el espesor promedio de la playa es de 12 metros, se encuentra orientada al NE 72° SW con buzamiento de 4°NW, (Fotografía 160).

Hacia el Poniente del litoral en las localidades de Huaymitun, Los Flamencos, Las Brisas, Tropical Riviera y Costa Dorada ubicadas dentro del municipio de Progreso, la problemática de erosión en las playas se hace evidente debido a que se ha perdido la capa vegetativa que retiene y protege la arena contra los efectos del viento y el oleaje, debido al aumento en la construcción de hoteles, restaurantes y casas de descanso sobre la playa, es por ello que los habitantes de la zona, han intentado controlar dicha problemática instalando geotubos, espigones y costales de arena frente a sus propiedades tratando de conservar el frente de playa, esto ha originado un desequilibrio importante en la dinámica costera, ya que no permite que la arena se deposite homogéneamente a lo largo del litoral, provocando erosión a lo largo de la misma, (Fotografía 161). La desmedida construcción de este tipo de obras de mitigación, ha generado un desequilibrio en las playas de las localidades de Diana Milán, Chicxulub Puerto y Puerto Progreso.

La problemática se acentúa de manera considerable a partir de Chicxulub Puerto debido a la creciente urbanización proveniente del Puerto de Progreso, aunado a construcciones como el puerto de dicha localidad han ocasionado que el proceso de erosión se intensifique, evidencia clara de ello es la discrepancia que existe en los espesores de playa en ambos costados del puerto de Chicxulub, que actúa como una barrera artificial obstruyendo el aporte longitudinal de arena a lo largo de la costa, haciendo que se acumule en el lado Oriente de la estructura y provocando a su vez erosión en lado adjunto de la misma, (Fotografía 162).



Fotografía 160. En Ha-Huay municipio de Ixil, la construcción de casas de verano va en aumento alterando el equilibrio costero.



Fotografía 161. En Tropical Riviera, municipio de Progreso, debido a la evidente pérdida de playa, los habitantes han implementado medidas de mitigación contra la erosión.

La zona afectada comprende aproximadamente 15 Km de longitud a partir del puerto de Abrigo de Yucalpetén hasta la localidad de Chuburná, debido principalmente a factores tales como la construcción del puerto de altura de Progreso, el cual tiene una longitud de 5 Km y al puerto de abrigo en Yucalpetén obras de infraestructura portuaria que actúan como barreras que impiden el transporte y el paso de sedimento hacia la zona poniente de la costa, aunado a ello la degradación de vegetación en la duna y la construcción desmedida de espolones y/o espigones, han originado una fuerte erosión en la costa, estas medidas de mitigación, más allá de funcionar han tenido un efecto negativo ya que la poca arena que llega a esta zona se acumula solo en una parte erosionando el lado contiguo, generando así un desequilibrio mayor en la playa, (Figura 252).



Fotografía 162. En Chicxulub Puerto, municipio de Progreso, evidente problema de erosión debido principalmente a la construcción del muelle ya que no permite el paso al lado poniente de la estructura.



Figura 252. El Puerto de Altura y el Puerto de Abrigo de Yucalpetén, son los principales factores que han generado erosión severa en las localidades de Yucalpetén, Chelem y Chuburná, ya que impiden el paso de arena al poniente de la costa.

Según versiones de los habitantes de la zona, antes de que fueran construidas estas obras de infraestructura portuaria en el año de 1968, el espesor de playa llegó a tener hasta 100 metros, actualmente no llega a tener 3 metros de espesor (Fotografía 163). Como se mencionó anteriormente, debido a esta problemática, los habitantes de la zona construyeron obras de mitigación como espolones y/o espigones para tratar de conservar la arena, estas obras se implementaron de manera desmedida contribuyendo al desequilibrio en la costa (Fotografía 164).



Fotografía 163. En Chelem, municipio de Progreso, el espesor de playa ha sido totalmente erosionado, dejando a las viviendas en el límite con el mar.



Fotografía 164. En Chuburná, municipio de Progreso, existe una indiscriminada construcción de espigones y/o espolones, que contribuyen al desequilibrio en la dinámica de la costa.

El espesor de la playa se recupera en la zona del puerto de Chuburná, ya que la vegetación contribuye a conservar la arena de la playa, esta no se encuentra degradada debido a que no existe urbanización hacia este punto, además de ello el dique del puerto está reteniendo buena parte de arena llegando a formar espesores de hasta 40 metros, (Fotografía 165).



Fotografía 165. En el Puerto de Chuburná, municipio de Progreso, la zona urbana aun no llega a este punto, por lo que la vegetación costera se encuentra conservada, factores que ayudan a mantener el buen estado de las playas.

La principal problemática por erosión costera a nivel estatal, se encuentra concentrada en esta región, en las localidades de Yucalpetén, Chelem y Chuburná, es de vital importancia poner atención en estas localidades ya que las casas que fueron construidas a lo largo de esta parte del litoral, se encuentran prácticamente en el límite con el mar ya que la playa se ha perdido en su mayor parte.

Región IV Litoral Centro

Esta se ubica en la zona central del Estado, comprende los municipios de Telchac Puerto, Yobaín, Dzemul, Dzidzantún, Dzilam de Bravo y Sinanché, (Figura 253).

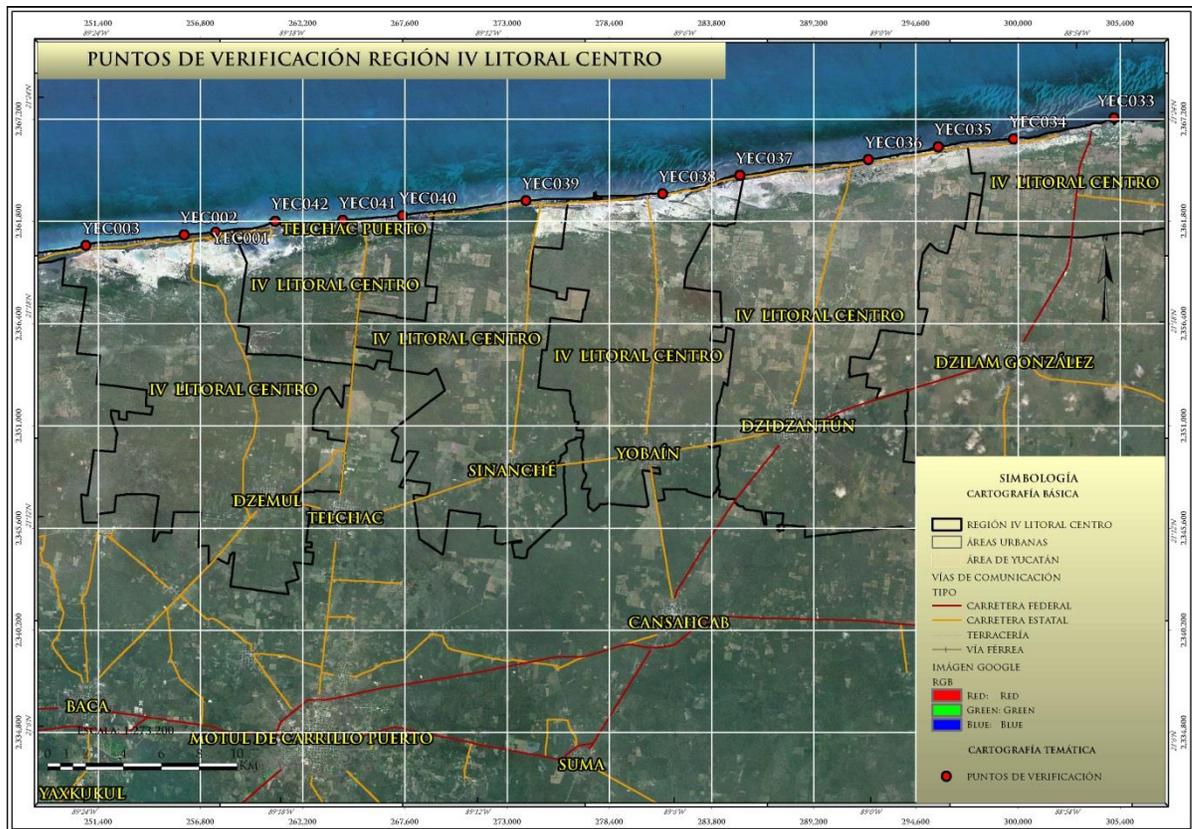


Figura 253. Ubicación y distribución de los puntos de verificación (puntos en color rojo) en la región IV Litoral Centro.

Se levantaron trece puntos de verificación desde el municipio de Telchac Puerto hasta la parte donde inicia la Reserva de la Biosfera Dzilam de Bravo, esta longitud se considera como litoral arenoso que presenta las siguientes características:

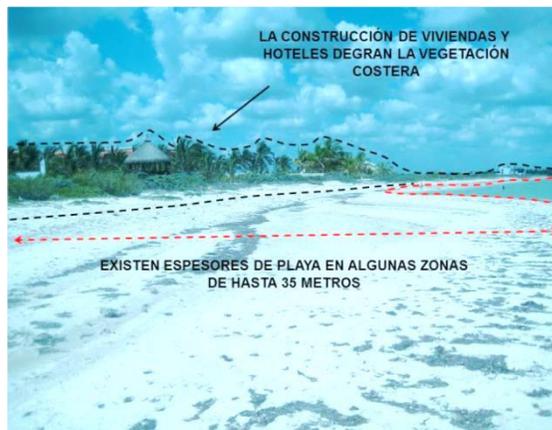
En el municipio de Dzemul se levantaron tres puntos de verificación (YEC001, YEC002 y YEC003), el primer punto se ubica en la localidad de Miramar, aquí la vegetación costera se encuentra parcialmente conservada debido a que la construcción de viviendas en la zona la ha degradado, la orientación de la playa es al NE78°SW con una pendiente inclinada de 7° hacia el Noroeste (NW), la antropización de la zona se considera baja, ya que la densidad de viviendas aún no es alta, (Fotografía 166).

El punto con clave YEC002, se verificó en la localidad de Playa San Bruno, en esta área se observa acreción en el espesor de la playa, superficialmente no se observan obras de conservación de arena, sin embargo, este aumento en el espesor puede deberse a la instalación de geotubos los cuales son utilizados para proteger la costa contra los efectos de erosión, este aumento en el espesor de playa se observa de manera local, es decir, solo se aprecia en algunas partes y en otras, este se ve reducido significativamente, el espesor máximo medido en este lugar fue de 35 metros, la playa tiene orientación al NE 75° SW con 3° de inclinación al NW, la antropización de la zona se considera media ya que la vegetación en la duna costera se encuentra alterada por construcción de viviendas, (Fotografía 167).

El punto con clave YEC003 está ubicado en la localidad de San Bruno, el crecimiento urbano se hace evidente ya que se encuentran asentadas sobre la vegetación costera un número mayor de viviendas, el espesor promedio de la playa es de 18 metros, tiene una orientación al NE 70° SW y una inclinación de 4° al Noroeste (NW), la antropización de la zona se considera media por el aumento en las construcciones de viviendas, lo que ha provocado degradación en la vegetación costera encontrándose parcialmente conservada, (Fotografía 168).



Fotografía 166. En Miramar, municipio de Dzemul, la mancha urbana se expande hacia esta zona, evidencia de ello es la construcción de algunas viviendas sobre la vegetación costera.



Fotografía 167. En Playa San Bruno, municipio de Dzemul, existen espesores de playa de hasta 35 metros, reduciendo drásticamente metros adelante en la misma zona.

En el municipio de Telchac Puerto, se levantaron tres puntos de verificación con las siguientes claves (YEC040, YEC041 y YEC042), los cuales se describen a continuación.

En la localidad de Playa Bonita (YEC040), el espesor de costa es solo de 9.80 metros, lo que sugiere que en esta zona existe un problema de erosión, aunado a ello se encuentra la degradación vegetativa principal reten y protector de arena, además se encuentra un número elevado de construcciones a lo largo de esta parte del litoral, como dato adicional la playa tiene una orientación al NE 72° SW y una inclinación de 8° al NW, (Fotografía 169).



Fotografía 168. En San Bruno, municipio de Dzemul, la degradación de la vegetación se debe al aumento en la construcción de viviendas en la zona.



Fotografía 169. En Playa Bonita, debido a las construcciones, se está degradando la vegetación de duna costera principal protector y reten de playas.

En la localidad de Telchac Puerto (YEC041) se encuentra la misma tendencia, es decir, la playa tiene un espesor de hasta 10 metros con una orientación al NE 75° SW con 8° de inclinación al Noroeste (NW), la vegetación esta degradada por obras realizadas por el hombre, (Fotografía 170).

En el punto YEC042 ubicado en la localidad de Laguna Rosada, existe un dique que funciona como entrada al puerto de abrigo de dicha localidad, esta rompeolas concibe acumulación de arena en la parte oriente de dicha estructura, lo que ha generado que la playa en este punto llegue a tener un espesor de hasta 30 metros, pasando este dique, la playa retoma una condición homogénea reduciendo su dimensión, las condiciones evaluadas son las siguientes, en cuanto a la preservación vegetal en el área de la duna costera, se encuentra bien conservada ya que no existe ningún tipo de construcción que perturbe esta condición, el espesor promedio es de 15 metros, la cara de la playa tiene una orientación al NE 80° SW con 8° de inclinación hacia el Noroeste (NW), (Fotografía 171).



Fotografía 170. En Telchac Pueblo, el incremento en la construcción de viviendas cerca del Puerto, representa un factor que acelera el proceso de erosión en la costa.



Fotografía 171. En Laguna Rosada, municipio de Telchac Puerto, la construcción del dique genera acumulación de arena al lado oriente de dicha estructura creando erosión al lado contiguo de la misma.

En la localidad de San Crisanto del municipio de Sinanché se tomó el punto de verificación con clave YEC039, en el que se encontró construcción de viviendas sobre la vegetación costera, además de la edificación de un fraccionamiento que como toda aquella infraestructura que se construya sobre esta zona afectara el medio ambiente, hace que se pierda el equilibrio ecológico de la línea costera, por lo que se ha considerado con una antropización media, aunado a ello se tiene un espesor de 11 metros, presenta una orientación de NE 80° SW con una pendiente de 8° buzando al Noroeste (NW) (Fotografía 172).

En las localidades de Palmar y Chabihau del municipio de Yobaín se levantaron dos puntos de verificación con clave YEC037 y YEC038, los cuales presentan características similares a las descritas anteriormente, es decir, en esta zona se da el caso de que las casas se encuentran construidas delante de la vegetación costera, derivado de esta mala planeación han quedado expuestas a los embates del oleaje, además de acelerar el proceso erosivo de la playa, en las zonas donde aún se conserva arena el espesor promedio es de 13.90 metros, (Fotografía 173).

En las localidades de Mina de Oro y Santa Clara del municipio de Dzidzantún, se realizaron dos puntos de verificación con clave YEC035 y YEC036, en la zona es notable la implementación de espigones, estructuras que son utilizadas por los habitantes de las viviendas para tratar de conservar el espesor de la playa que se encuentra frente a sus propiedades, el espesor promedio en esta área es de 12 metros lo que sugiere que se tiene un problema de erosión, la cara de la playa tiene una orientación NE 75° SW con 8° de inclinación al Noroeste (NW), (Fotografía 174). La cabecera municipal de Dzilam de Bravo, su territorio se considera como litoral artificial, ya que se construyó un muro de contención que mitiga el efecto del oleaje en temporadas de huracanes o tormentas tropicales evitando inundaciones en la población, (Fotografía 175).

Hacia las orillas del área urbana se levantó el punto de verificación en la localidad de Bucu, en este sitio el espesor de la playa es en promedio de 12 metros, tiene orientación al NE 75° SW con 4° de inclinación al Noroeste.

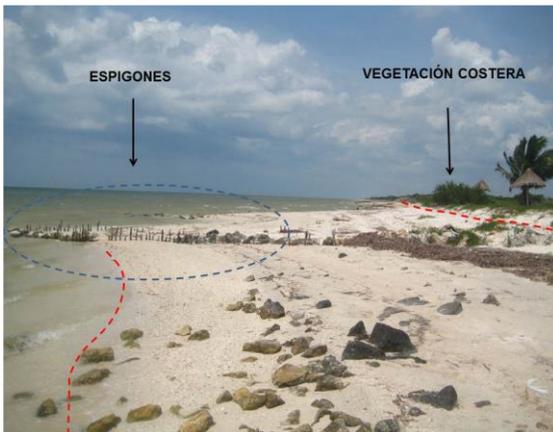
Es de vital importancia tener monitoreado el tramo oriente de la región principalmente las localidades San Crisanto, Las Gaviotas, Chabihau, El Porvenir y Santa Clara, ya que de acuerdo a la prospección realizada en campo es la zona que presenta un alto porcentaje de susceptibilidad a la erosión costera.



Fotografía 172. En San Crisanto, Municipio de Sinanché, la invasión de viviendas sobre la vegetación costera, representa un factor importante que acelera el proceso de erosión costera.



Fotografía 173. En Chabihau municipio de Yobaín, existen casas construidas delante de la línea de vegetación costera quedando expuestas al mar.



Fotografía 174. En Santa Clara, municipio de Dzidzantún, la construcción de espigones para tratar de conservar el frente de playa de las viviendas, requiere de una mejor planeación de obras para el control de la erosión, ya que su funcionamiento no es el adecuado.



Fotografía 175. En la Cabecera Municipal de Dzilam de Bravo, se construyó un muro de contención sobre la línea de costa, con el objetivo de mitigar inundaciones cuando aumenta el nivel del mar principalmente en época de huracanes o tormentas tropicales.

Región V Noreste

Comprende los municipios costeros de San Felipe, Río Lagartos y Tizimín en los que se verificaron trece puntos de control como se ilustra en la Figura 254. En el municipio de Tizimín se realizaron cinco puntos de verificación los cuales se describen a continuación.

Las playas que se encuentran en la zona noreste del Estado (puntos YEC020, YEC021 y YEC022), se encuentran en total conservación con amplio espesor de hasta 30 metros, presentan una orientación al NW 85° SE una pendiente ligeramente inclinada de 4° al Noreste (NE), las localidades que se encuentran en esa área son Boca Chipepte, Laguna Flamíngos y El Cuyo, aunado a ello la vegetación en la duna costera se encuentra perfectamente conservada, no hay alteración, debido a ello se considera esta zona con un nivel bajo de susceptibilidad a perder arena ya que todos estos factores son esenciales para conservación de la misma, (Fotografías 176 y 177).



Figura 254. Distribución de puntos (color rojo), verificados en campo sobre la Región V Noreste.



Fotografía 176. En Boca Chipepte, municipio de Tizimin, la vegetación costera y playas se encuentran bien conservados.



Fotografía 177. La vegetación de duna costera de playas se encuentra bien conservada con amplios espesores.

Hacia la parte poniente, en las localidades de Playa Cocal y Punta Meco (punto de verificación YEC023 y YEC024), se presentan características similares a las antes descritas, es decir, la vegetación se encuentra bien conservada, factor importante para mantener y proteger el litoral, preservando y aumentando el espesor de las playas que son en promedio de 20 metros, en cuanto a la orientación se mantiene al NW 80° SE con una inclinación de 6° hacia el Noreste (NE), la antropización se considera baja, ya que las localidades establecidas son pequeñas y no alteran de manera significativa la dinámica en la línea de costa, (Fotografías 178 y 179).



Fotografía 178. En Playa Cocal, municipio de Tizimín, la vegetación costera y playas se encuentran bien conservados.



Fotografía 179. En Playa Cocal, la cobertura de vegetación se mantiene en buen Estado, ya que no existe alteración en ella.

En el municipio de Río Lagartos, específicamente en las localidades de San Fernando, Punta Chel, Las Coloradas y Playa Cancuncito, el litoral tiene un espesor promedio de 15 metros, presenta una orientación general al NW 86° SE y una inclinación de 6° al Noreste (NE), no existe antropización en la zona o duna costera, lo que la ha mantenido en buen estado, factores que propician un buen equilibrio en la playa.

Hacia al poniente de las localidades antes mencionadas en la cabecera municipal de San Felipe, se verificaron dos puntos de control (YEC032 y YEC033), lugar que se caracterizó como un litoral de tipo artificial, ya que se construyó un muro de contención para tratar de evitar inundaciones cuando sube el nivel del mar principalmente en época de huracanes o cuando se presentan tormentas intensas que provocan un aumento en el nivel del mar.

De manera general y de acuerdo a la prospección de campo realizada en la zona Noreste del litoral yucateco, se identificó que las playas se encuentran en buen estado, con espesores amplios, con bajo grado de antropización y una excelente cobertura vegetal en la duna costera factores primordiales que ayudan a mantener la dinámica y evolución de la franja costera.

VIII.3.6. Susceptibilidad a la Erosión Costera

En este nivel de información se llegara a determinar el grado de susceptibilidad a la erosión de la línea de costa, ya que actualmente en México no existe la disponibilidad de ortofotos del litoral yucateco en diferentes épocas de tiempo, ni a la misma escala de vuelo, motivo por el cual no es posible hacer un análisis de la reducción en el ancho de las playas, sin estos datos de tasa de erosión, no se puede realizar un análisis de degradación, sin embargo, con los datos recopilados en campo si es posible determinar el grado de susceptibilidad que tiene el litoral de acuerdo a la interacción de los principales factores que aceleran y generan el proceso de erosión costera.

En el litoral del estado de Yucatán, actúan diversos factores que hacen que esta sea susceptible a erosionarse en mayor o en menor medida, en función de la combinación de elementos como el grado de conservación de la vegetación en la duna costera, tipo de litoral, grado de antropización costera, así como la orientación y pendiente de la playa, estas características se tomaron como referencia para realizar una zonificación de susceptibilidad por erosión a lo largo de la costa y que a continuación se describen.

Vegetación de duna costera

La vegetación de la duna costera es importante, ya que una de sus principales funciones es actuar como barrera de protección ante la acción nociva del viento y las mareas, sino se destruye, esta comunidad vegetal permite que la línea de costa tenga una menor dinámica, ya que intercepta el

movimiento del viento y la arena, fijando la duna y permitiendo la acumulación de materia orgánica, por consiguiente la formación de suelo, de esta manera se evita la erosión de la costa.

El tipo de vegetación que se evaluó en las prospección de campo y que se tomó en consideración para elaborar el mapa de degradación vegetativa corresponde a la zona de pioneras, zona en la cual crece vegetación cercana a la playa, en ella se desarrollan básicamente plantas herbáceas y arbustivas, tolerantes a medios de extrema salinidad, a vientos fuertes y a la acción de mareas altas (Espejel, 1984; Campos y Duran, 1991). En la Figura 255 se observa la distribución de la degradación de este tipo de vegetación en clases que van desde bien conservada hasta la desaparición de la misma.

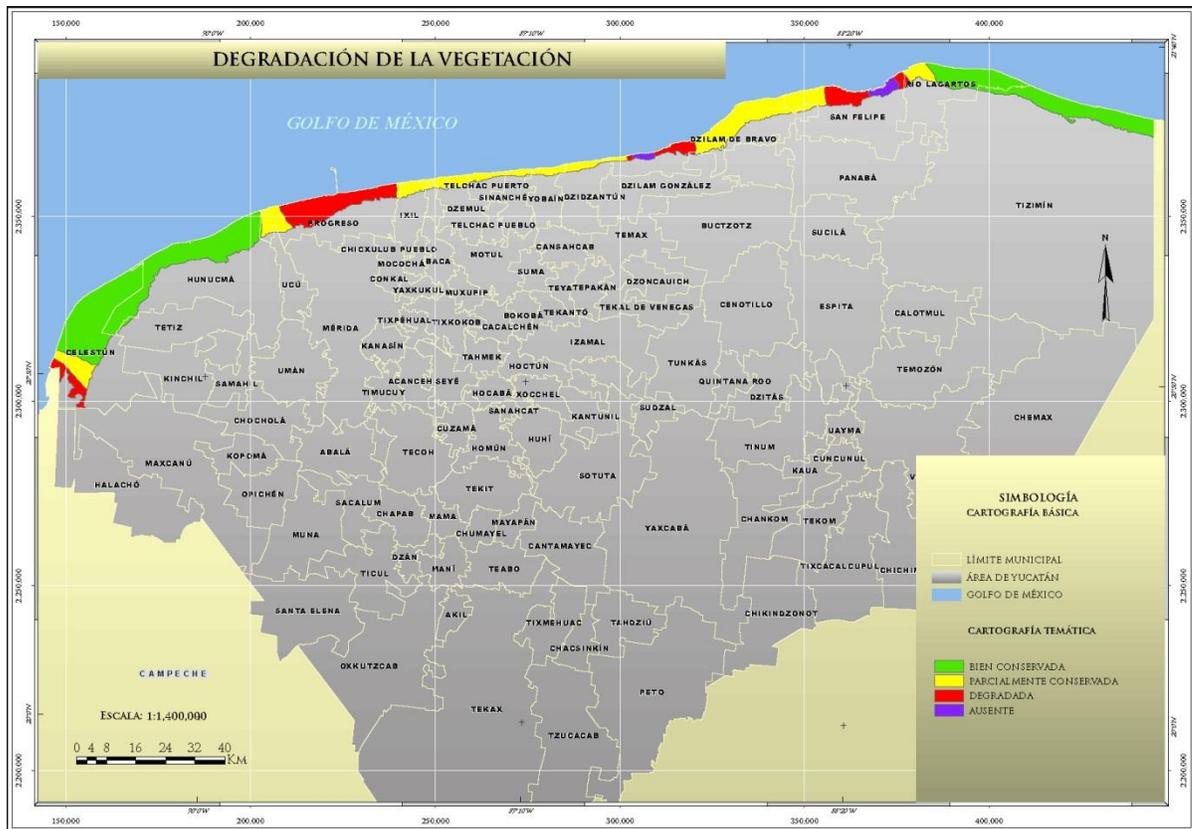


Figura 255. Degradación de la vegetación de duna costera en el litoral Yucateco.

En el Noreste (NE) y Noroeste (NW) del litoral, el estado de la vegetación de duna costera se encuentra bien conservado, debido a que aún no se ha extendido la zona urbana a estas áreas lo que ayuda en gran medida a conservarla, sin embargo, en la zona centro donde existe una mayor urbanización, por ejemplo en el municipio de Progreso este tipo de vegetación se encuentra en un rango alto de degradación, lo que ha contribuido en gran medida a erosionar las playas de este municipio.

Tipo de litoral

En cuanto al tipo de litoral según el Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio Costero del Estado de Yucatán (POETCY), 2007; señala que se divide en cuatro prototipos de acuerdo a la clasificación de Mitsch y Gosseling, 1993: Litoral arenoso, vegetado, lodoso y artificial.

Se dice que es litoral arenoso, cuando es dominado por arena por al menos un 25%; lodoso cuando es dominado por limo y arcilla en un 25%; vegetado cuando está expuesto por suficiente tiempo a la colonización de especies vegetales anuales o perennes y artificial cuando por acción del

hombre se estabiliza o limita el litoral con material de construcción como muros o rellenos de contención (Mitsch y Gosseling, 1993:)

El litoral arenoso de acuerdo a sus características, es el que tiene mayor susceptibilidad a ser erosionado, cubre la mayor extensión de la costa, es importante por su potencial económico y turístico ya que allí se desarrolla una considerable concentración urbana y un rápido crecimiento en infraestructura portuaria, hotelera y recreativa, la distribución de estos tipos de litoral se representan en la Figura 256.

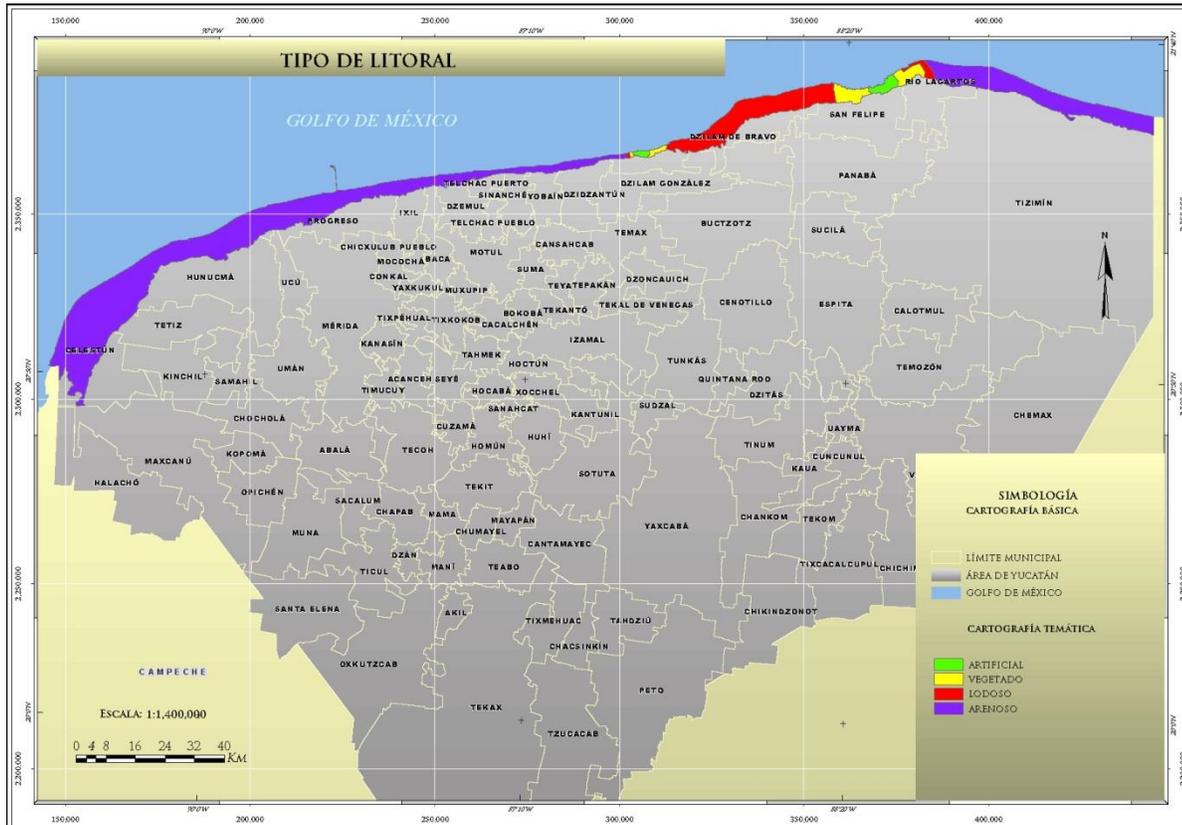


Figura 256. El tipo de litoral que sufre mayor afectación por erosión costera es el de tipo arenoso representado en color morado.

El litoral arenoso representado en color morado, es el que cubre la mayor parte de superficie en el cordón litoral de 293 Km, el cual es más susceptible a ser erosionado por sus características físicas y texturales.

Antropización

Actualmente según R.Durán del Centro de Investigación Científica del Estado de Yucatán (CICY, s/a), la costa yucateca ha perdido más de la mitad de la extensión territorial de la vegetación de duna costera que originalmente tuvo, debido básicamente a la forma de cómo se han llevado a cabo las obras de urbanización, ya que el crecimiento de los poblados está basado en la construcción de casas veraniegas frente al mar a lo largo de casi toda la costa, aunado al desarrollo de la infraestructura portuaria, la construcción de carreteras y caminos que afectan los procesos litorales más importantes, como es el flujo de aguas costeras, este desarrollo urbano ha acelerado la erosión costera al cual se le ha denominado antropización de la zona, Figura 257.

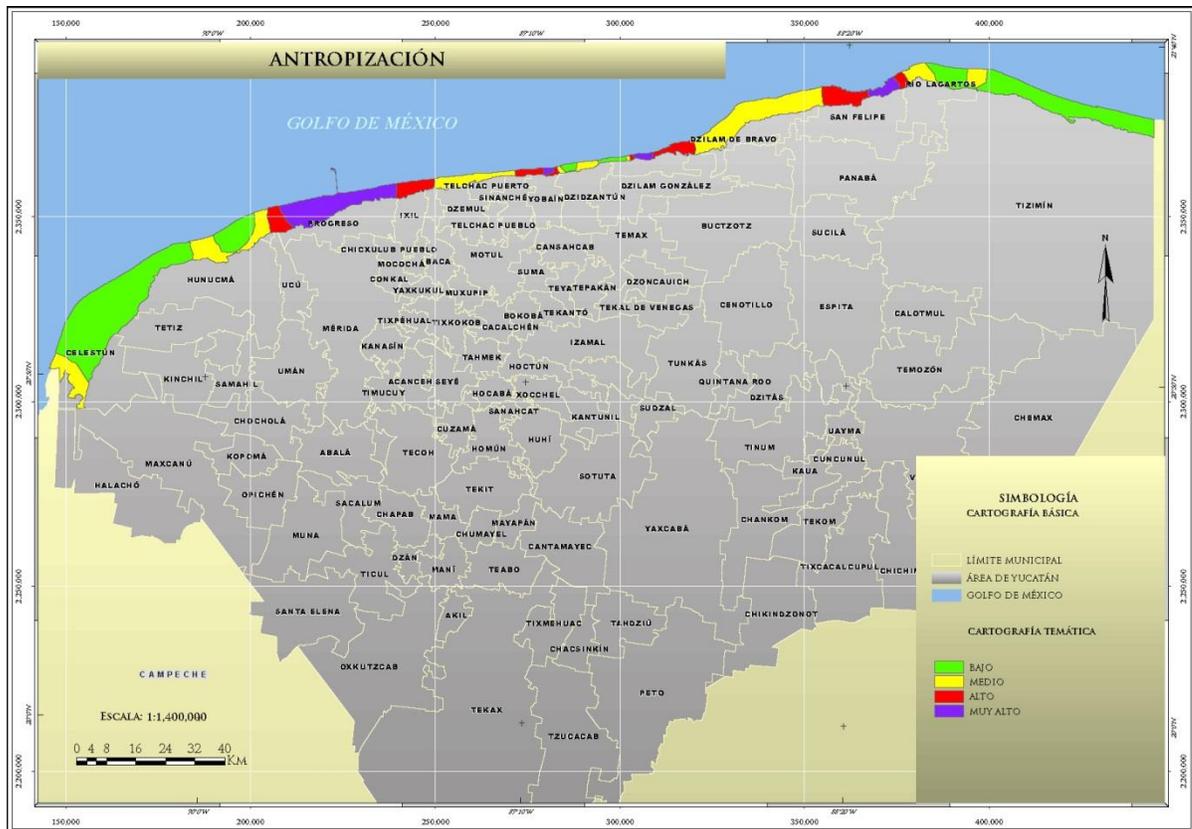


Figura 257. Antropización del litoral yucateco, mostrando rangos muy altos en el municipio de Puerto Progreso.

Las zonas que muestran una mayor urbanización y/o antropización son las localidades de Chicxulub Puerto, Puerto Progreso, Yucalpetén, Chelem y Chuburná, debido al alto desarrollo de infraestructura turística, como la construcción de restaurantes, hoteles, balnearios, construcción de vías de comunicación, infraestructura portuaria, etc.

Ancho de playa

Según el POETCY, 2007, playas con espesores menores a 10 metros, han sufrido un grado de erosión alto, de acuerdo a los levantamientos realizados en campo, se midieron anchos de playa que van de entre los 0 metros a los 40 metros, se agruparon en extensiones entre 0-10 m, 10-20 m, 30-40 m y más de 40 metros, el mapa resultante de la interpolación de estos valores se muestra a continuación Figura 258.

En el mapa se observan zonas en las que el ancho de playa se ve reducido como en Río Lagartos, Chabihau, Chicxulub Puerto y Puerto Progreso, existen también localidades donde el ancho de playa es casi nulo con espesores que van de 1 a 4 metros como Yucalpetén, Chelem y Chuburná.

Pendiente de playa

Otro de los factores que se tomaron en cuenta para poder realizar el mapa de susceptibilidad por erosión costera, fue la pendiente de playa, como bien sabemos mientras más pronunciada sea esta, el arrastre de arena por efecto del oleaje será mayor, esta medición se tomó a partir del inicio de la vegetación de duna costera (Zona de Pioneras), hasta la pleamar máxima en el instante de la medición, se le asignaron valores por criterio de peso para posteriormente evaluarlos por rangos que van desde 0° hasta 10° (Figura 259). Las zonas con mayor inclinación en frente de playa se encuentran en Río Lagartos, Telchac Puerto y Puerto Progreso.

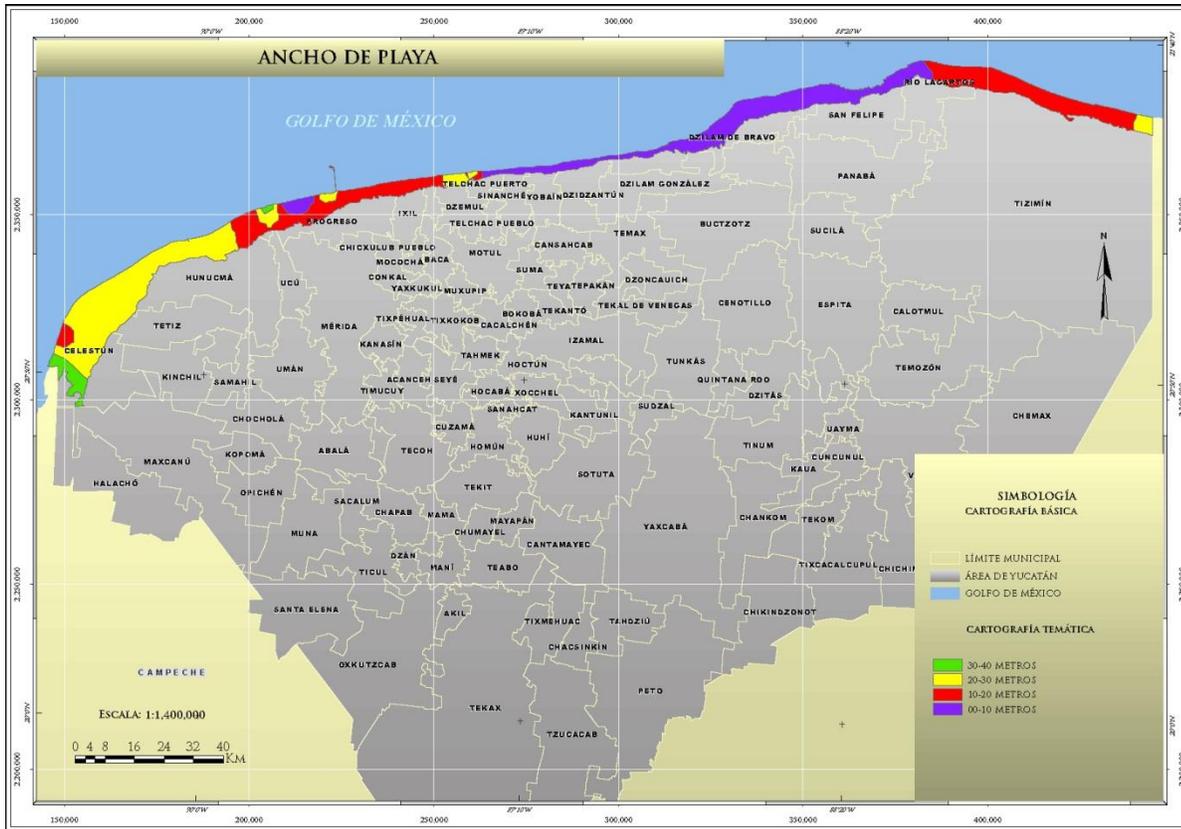


Figura 258. Yucalpetén, Chelem y Chuburná son localidades con anchos de playa entre 0 y 10 metros.

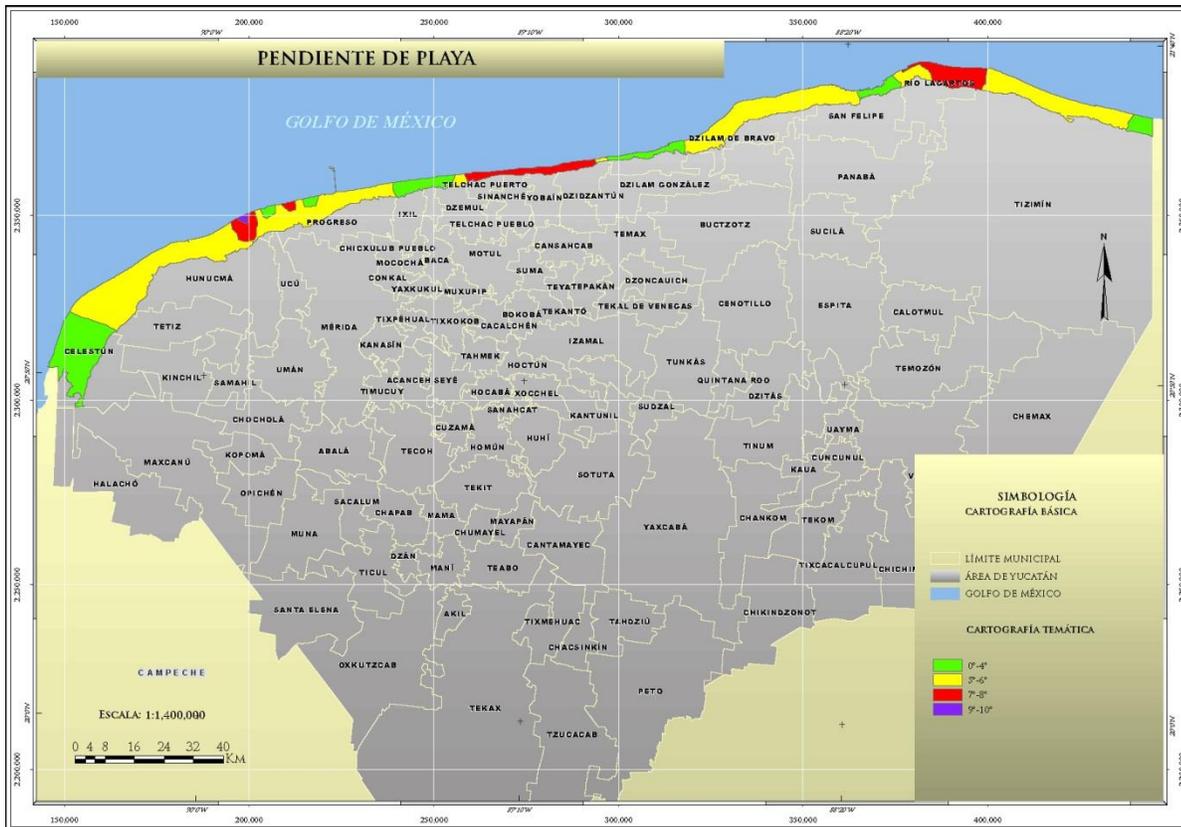


Figura 259. Rango de pendientes medidas a lo largo del litoral a partir del inicio de vegetación costera (zona de Pioneras) a la pleamar máxima.

Mapa de susceptibilidad por erosión costera

La combinación de los factores ambientales antes descritos nos generan zonas de susceptibilidad por erosión costera la cual se clasifico en baja, media, alta y muy alta, como se muestra en la Figura 260, este mapa se elaboró mediante la Interpolación de los valores de las proyecciones de cada una de las variables ambientales antes descritas en Arc Map Versión 10.1. Con la herramienta *Geostatistical Wizard*, utilizando el método de interpolación *Inverse Distance Weighting*, mismo que se ajustó para el análisis de interposición en este trabajo.

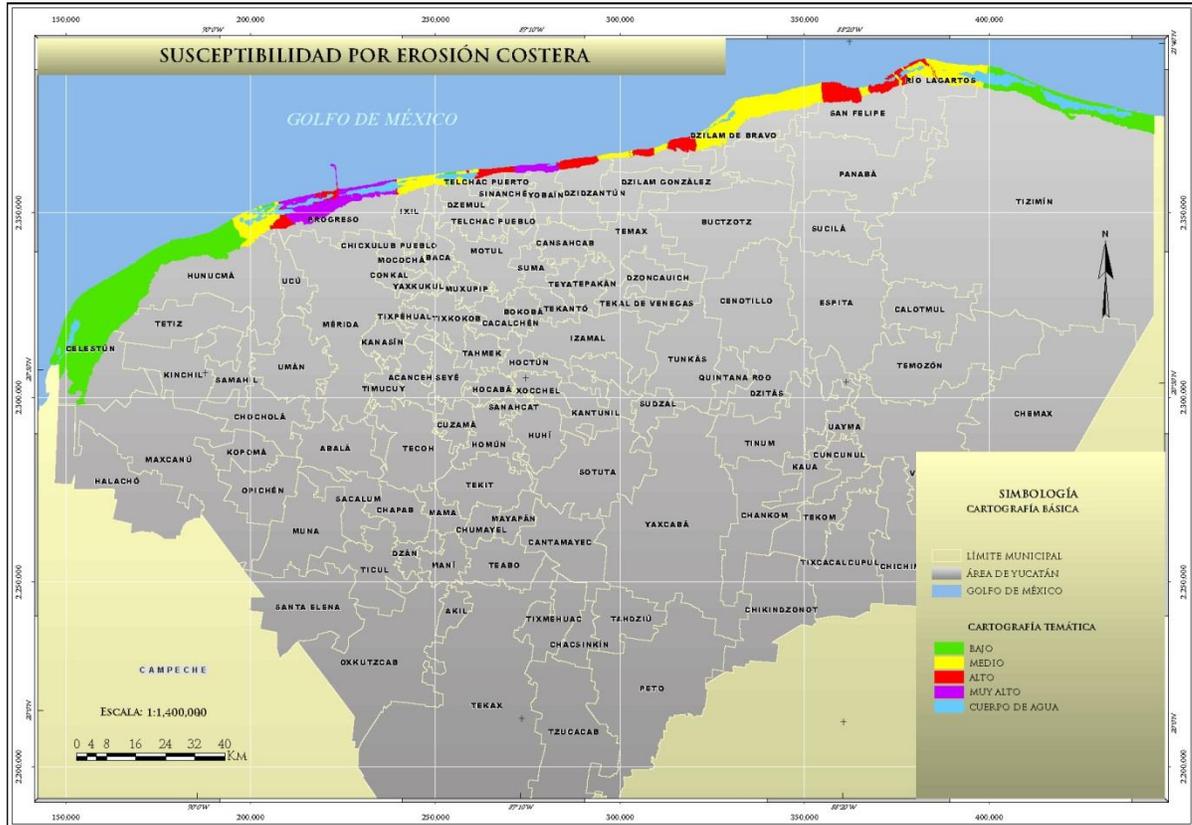
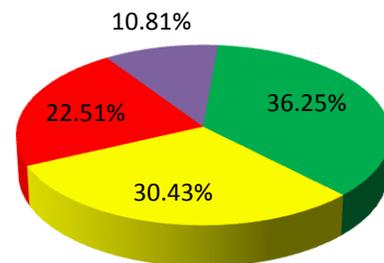


Figura 260. Susceptibilidad del litoral Yucateco a la erosión costera.

SUSCEPTIBILIDAD POR EROSIÓN COSTERA EN EL LITORAL YUCATECO

De los 342 Km que tiene el litoral yucateco (CICESE, 2004), 124 Km lineales presentan susceptibilidad baja (color verde) que representa el 36.25% de la línea total de costa, 104 Km con susceptibilidad media (color amarillo) 30.43%, 77 Km presenta susceptibilidad alta principalmente al oriente de la costa equivalente al 22.51% de la misma, susceptibilidad muy alta se presenta en la parte centro y poniente con 37 Km afectados que representan el 10.81 % del litoral, (Figura 261).



■ BAJA ■ MEDIA ■ ALTA ■ MUY ALTA

Figura 261. El 33.32% del total de la línea de costa presenta susceptibilidad alta a muy alta.

Es importante recalcar que aunque no se tomaron puntos de verificación en campo en la reserva estatal Dzilam considerada como Área Natural Protegida motivo por el cual no se tuvo acceso, sí se tomó en cuenta para llevar a cabo el análisis de susceptibilidad, ya que uno de los factores evaluados en campo fue el tipo de litoral y ya que esta área se considera como litoral vegetado, el análisis realizado dio como resultado susceptibilidad media en esta zona del litoral.

Para poder realizar una mejor descripción y representación geográfica espacial de la línea costera, se describirá de manera particular cada una de las regiones que integran la misma, esta zonificación regional fue proporcionada por las autoridades de Protección Civil Estatal, en la cual se abordaran las características o factores ambientales de la playa de cada uno de los municipios costeros agrupados por región.

Es importante recalcar que el área de estudio que se tomó en cuenta para poder generar los mapas de susceptibilidad a la erosión, comprende hasta el primer cambio de vegetación que se da a partir del inicio de duna costera a la vegetación de manglares, ciénegas, lagunas costeras y petenes, esto con la finalidad de hacer una mejor representación gráfica. La descripción que se hará de los mapas subsecuentes, sólo se enfocan a describir las características del litoral, es decir, de la playa, de las localidades y áreas urbanas que se encuentran en ella, así como la descripción de vegetación específicamente de duna costera (zona de pioneras).

Región I poniente

Esta región comprende los municipios de Celestún y Hunucmá, los principales accesos a ellos se hace por la carretera federal 281, partiendo de la ciudad de Mérida, pasando por los poblados de Cuzco, Ucú y Hunucmá para posteriormente dirigirse al Norponiente y llegar a Sisal, para llegar a Celestún se toma la misma carretera Federal pasando por Hunucmá, Tetiz y Kinchil.

La línea de costa de esta región tiene una longitud aproximada de 77 kilómetros, que representa el 22.5% del total del litoral, se encuentra ubicado hacia el poniente del Estado, la vegetación de la duna costera se encuentra bien conservada, lo que ayuda en gran medida a preservar las playas, aunado a ello existe antropización baja, es decir, no hay construcción excesiva de infraestructura sobre la playa, lo que contribuye a que estas se conserven en buen estado.

A continuación se presenta una gráfica en la que se ilustra el porcentaje del área susceptible a ser erosionada, (Figura 262). De los 77 kilómetros que comprende esta región, el 87% presenta susceptibilidad a la erosión baja dentro de la cual se encuentran la zona urbana de Celestún, a pesar de que es un puerto de atracción turística, hay pocas construcciones como restaurantes y hoteles sobre la playa, los que existen se encuentran contruidos detrás de la línea de vegetación de duna, Celestún cuenta con una población total de 6,810 habitantes y 2294 viviendas, estas casas tienen tipología 2 con un índice de vulnerabilidad medio a alto según el Censo de Población y Vivienda de I.N.E.G.I. realizado en el año 2010.

SUSCEPTIBILIDAD POR EROSIÓN COSTERA EN LA REGIÓN I PONIENTE

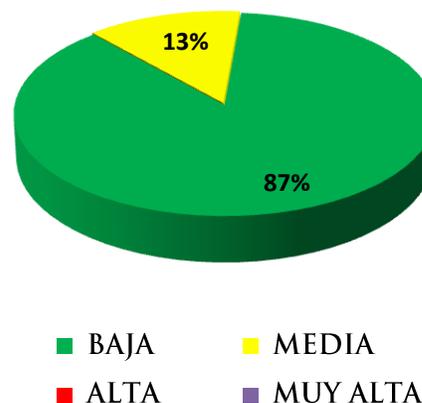


Figura 262. Gran parte del área costera de la región I presenta bajo grado de susceptibilidad a erosionarse.

Siguiendo la línea de costa hacia el oriente, existen seis localidades construidas frente a la playa, estas son: Casita de Piedra, Perlita Tampico, Playa Gaviota, La Victoria, San Carlos y Chichitos, para llegar a estas localidades es necesario transitar por caminos de terracería o caminos que han hecho los habitantes sobre la playa.

Casita de Piedra tiene una población total de tres habitantes, existen dos viviendas de tipo 1 con un índice de vulnerabilidad alto; en la localidad de Perlita Tampico los habitantes ascienden a cuatro personas con una vivienda de tipo 1 con un índice de vulnerabilidad alto; en Playa Gaviota solo se encuentra habitada por un habitante, existe una vivienda de tipo 1 con un índice de vulnerabilidad alto, aproximadamente a trece kilómetros de la localidad de Playa Gaviota hacia el oriente se encuentra la localidad de la Victoria igualmente cuenta con un habitante y una vivienda de tipo 1, ocho kilómetros más adelante sobre la playa se ubica la localidad de San Carlos y Chichitos con un total de tres habitantes con dos viviendas con un índice de vulnerabilidad alta ya que son de tipología 1, todas estas localidades pertenecen al municipio de Celestún, (Figura 263).

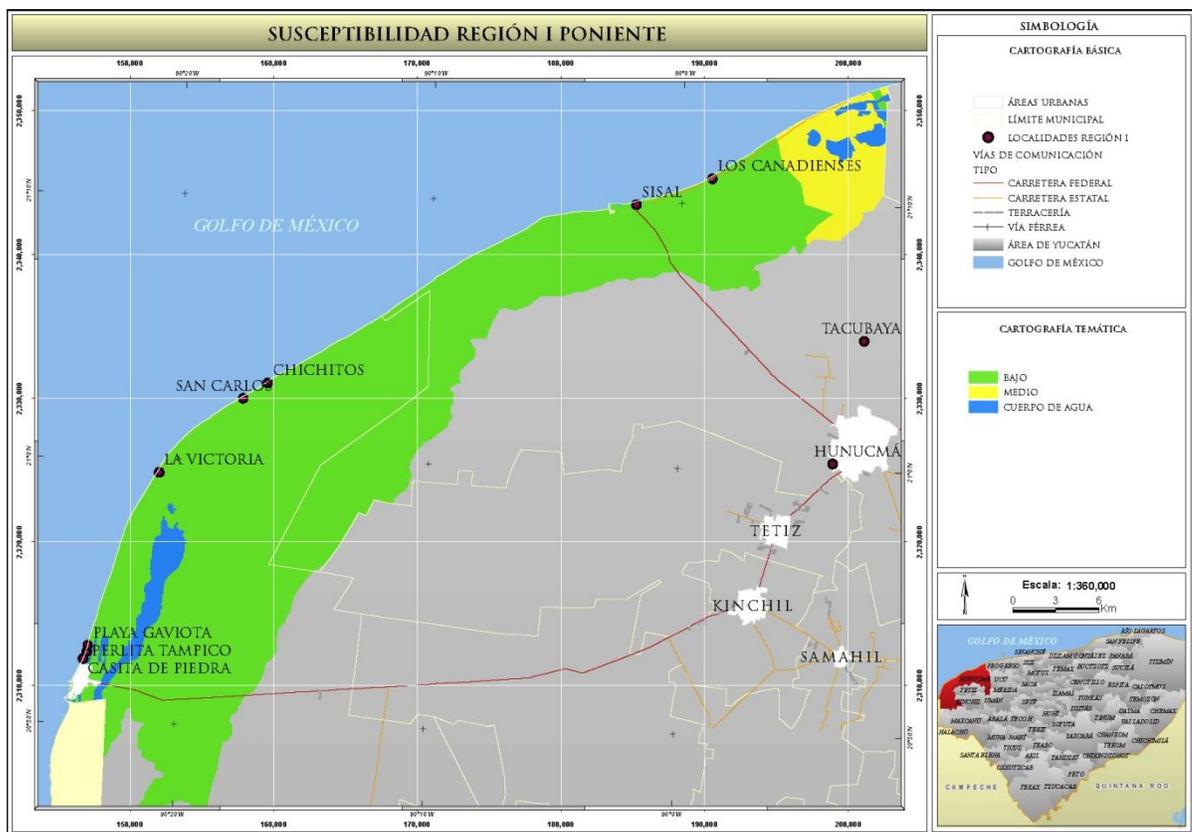


Figura 263. Susceptibilidad por erosión costera de la región I poniente.

A 28 kilómetros al oriente ya sobre el municipio de Hunucmá, se ubica la zona urbana de Sisal, esta franja tiene una población de 1837 habitantes, el número de viviendas en este puerto asciende a 1174, siendo estas de tipo 2 con índice de vulnerabilidad que va de medio a alto, posteriormente a seis kilómetros de Sisal siguiendo la franja costera se encuentra la localidad de Los Canadienses con tres habitantes y seis viviendas de tipo 1, las localidades y zonas urbanas antes mencionadas se encuentran en un área de susceptibilidad baja, la mayoría de ellas como se ha visto son localidades muy pequeñas con pocos habitantes, sin embargo, no por ello dejan de ser importantes.

El restante 13% del litoral de esta región, presenta susceptibilidad media a pesar de que no existe ningún tipo de infraestructura construida en esta área, las playas reducen su anchura debido probablemente al poco aporte de sedimento que existe debido a la influencia del puerto de altura de Puerto Progreso que impiden el paso del mismo a esta zona.

Región II Noroeste

Comprende los municipios de Progreso e Ixil, para poder llegar a esta zona, existen dos vía de comunicación, partiendo de la ciudad de Mérida por la carretera federal número 261 que conduce directamente al Puerto de Progreso, para poder acceder al municipio de Ixil, es necesario incorporarse por la carretera federal número 178 pasando por los poblados de Cholul y Jonkal para posteriormente dirigirse al Norte hacia el poblado de Chicxulub Pueblo hasta llegar a la zona costera en Chicxulub Puerto.

Esta parte de la costa cuenta con aproximadamente 45 kilómetros lineales de los cuales el 8.8% presenta susceptibilidad a la erosión baja, el 15.5% tiene susceptibilidad media, el 17.7% presenta susceptibilidad alta y el 60% tiene susceptibilidad muy alta, (Figura 264).

Las localidades de El Faro y El Salvador ubicadas en el municipio de Ixil, así como la localidad de Ha-Uay localizada en el municipio de Progreso, se encuentran dentro de una zona con susceptibilidad a la erosión media (color amarillo), en estas localidades se ha llevado a cabo la construcción indiscriminada de espigones y espolones, estas estructuras son básicamente diques que se construyen a base de palos de madera entre los cuales se meten costales de arena perpendiculares a la playa, esto se hace con el objetivo de retener el sedimento que es arrastrado por las corrientes de manera paralela a la costa para acumular arena en el frente de las viviendas, esta construcción desmedida y caótica sin ningún tipo de regularización por parte de las autoridades, ha generado un desequilibrio en la evolución y dinámica de esta parte del litoral provocando que la erosión costera se acelere en esta región.

SUSCEPTIBILIDAD POR EROSIÓN COSTERA EN LA REGIÓN II NOROESTE

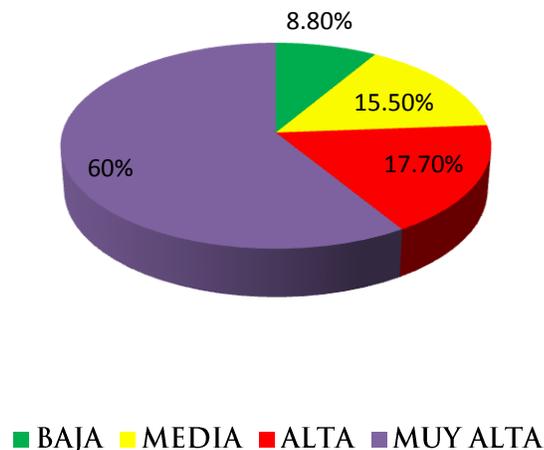


Figura 264. De los 45 kilómetros de costa pertenecientes a esta región, 25 kilómetros presentan susceptibilidad muy alta a la erosión costera.

Según el censo de población y vivienda realizado en el año 2010 por el I.N.E.G.I., la localidad de El Faro tiene una población total de 39 habitantes, existen 52 viviendas de las cuales solo 12 se encuentran habitadas, estas casas son tipología 1, es decir, son hogares humildes cuyo índice de vulnerabilidad es alto, la localidad de El Salvador tiene 10 habitantes con un total de 2 viviendas construidas y habitadas, estas tienen un índice de vulnerabilidad alto, para el caso de la localidad de Ha-Uay perteneciente al municipio de Progreso, tiene 38 viviendas de las cuales solo 5 se encuentran habitadas, existe una población total de 12 habitantes con respecto al índice de vulnerabilidad de estas viviendas se cataloga como alto ya que igualmente se trata de hogares en condiciones precarias.

Dentro del área de susceptibilidad a la erosión alta a muy alta, se encuentran las localidades de Chuburná, Chelém, Yucalpetén, Progreso y Chicxulub Puerto. Son aproximadamente 15 Km de

línea de costa los que se encuentran devastados, ya que las playas tienen entre uno y tres metros de ancho, a continuación se describe el número de habitantes y viviendas que se encuentran en estas localidades.

En Chicxulub Puerto existe una población de 6010 habitantes, además de la construcción de 3903 viviendas de las cuales solo 1585 se encuentran habitadas, la mayoría de estas casas tienen una tipología 2, es decir, cuentan con un índice de vulnerabilidad medio a alto, en esta parte del litoral se encuentra la misma problemática descrita anteriormente, en la que los habitantes de la primer línea de casas que se encuentran delante al mar, han construido de manera caótica espigones y espolones para tratar de conservar el frente de playa que se encuentra la fachada de sus casas, (Figura 265).

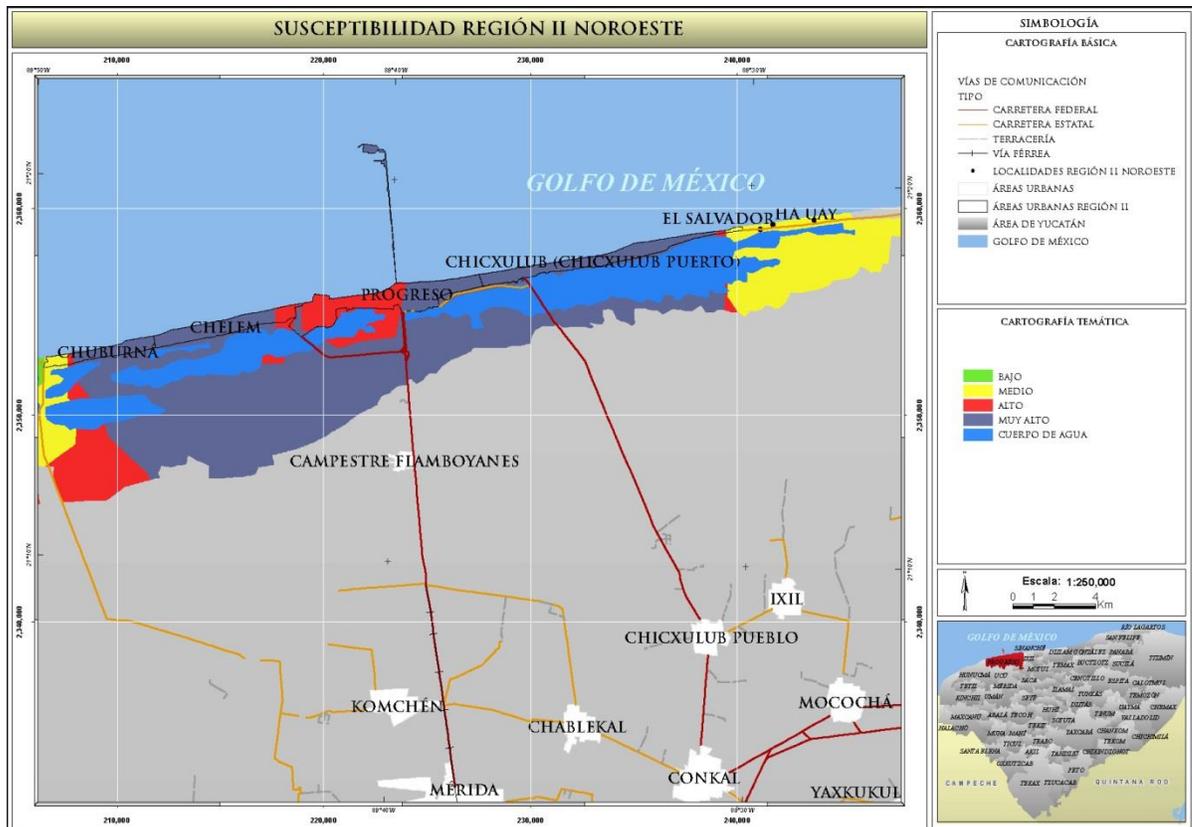


Figura 265. Susceptibilidad por erosión costera de la región II Noroeste.

Al poniente de Chicxulub Puerto se encuentra Puerto Progreso, cuenta con la construcción total de 13834 viviendas de las cuales 10198 se encuentran habitadas, son de tipología 2 con un índice de vulnerabilidad a la erosión es de alto a medio, existe una Población de 37369 habitantes, esta zona por ser importante turísticamente han tratado de conservar sus playas, reforestando el área de vegetación de duna costera, sin embargo la construcción del Puerto de Altura de casi 5 kilómetros de longitud está generando una grave problemática de erosión del lado poniente de la estructura, ya que está actuando como una barrera que impide el flujo de los sedimentos.

Siguiendo la misma dirección al poniente se encuentra la localidad de Yucalpetén perteneciente al municipio de Progreso, está siendo afectada directamente ya que no recibe aporte de sedimentos que conserve y mantenga el ancho de sus playas, esta interrupción al aporte de arena se debe principalmente a que el Puerto de Altura no deja pasar sedimentos, aunado a ello la problemática se agrava debido a la construcción del Puerto de Abrigo en dicha localidad propiciando aún más que la arena no siga su flujo normal impidiendo que se deposite en estas zonas.

En las localidades de Chelem y Chuburná, ocurre exactamente la misma problemática que se describió anteriormente, ambas localidades pertenecen al municipio de Progreso, en Chelem las playas tienen un ancho promedio de dos metros, en algunas zonas las casas se encuentran dentro del

mar expuestas al embate directo del oleaje, aquí están construidas 3188 viviendas de las cuales 833 se encuentran habitadas, estas casas son de tipología 1 con un índice de vulnerabilidad alto, viven 3509 habitantes, cabe señalar que en esta franja de aproximadamente 15 kilómetros que comprende las localidades de Yucalpetén, Chelem y Chuburná, se han implementado medidas de mitigación como la construcción de geotubos, estas obras han sido llevadas a cabo por parte de diversas dependencias gubernamentales, sin embargo, no han tenido éxito.

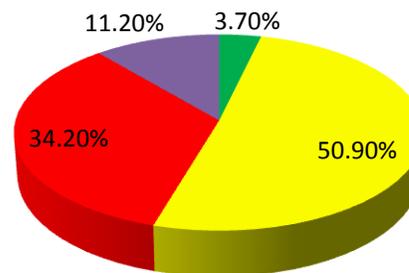
La localidad de Chuburná se ubica al poniente de Chelem, se encuentra habitado por 1929 personas, hay 1470 viviendas de las cuales solo se encuentran habitadas 473, esta cifra de viviendas ocupadas obedece a que la mayoría de los habitantes han desalojado sus casas ya que muchas de ellas se encuentran dentro del mar o fueron destruidas y/o dañadas por el huracán Gilberto quien ha sido el evento más devastador en la región, las casas son clasificadas como de tipología 1 por lo que se consideran con un índice de vulnerabilidad a la erosión alto.

Región IV Litoral Centro

Comprende los municipios de Dzemul, Telchac Puerto, Sinanché, Yobaín, Dzidzantún y Dzilam de Bravo, para poder acceder a las principales áreas urbanas se toma la carretera federal 178, partiendo del noreste de la ciudad de Mérida pasando por los poblados de Cholul, Conkal, Mocochá, Baca al llegar al poblado de Motul de Carrillo Puerto, en dirección al norte se incorpora la carretera estatal que se dirige a Telchac Pueblo para posteriormente llegar a Telchac Puerto, para llegar a Dzilam de Bravo es necesario seguir al oriente partiendo de la localidad de Telchac pasando por las localidades de Sinanché, Yobaín, Dzidzantún, Dzilam González y dirigirse al norte hasta llegar a Dzilam de Bravo.

Esta región tiene una longitud aproximada de 108 kilómetros de costa de los cuales 4 kilómetros que representan el 3.7% de esta área presenta susceptibilidad a la erosión baja, 55 kilómetros equivalentes al 50.9% tiene susceptibilidad media a erosionarse, el 34.2% (37 kilómetros) presenta susceptibilidad alta y el 11.2% (12 kilómetros) presenta susceptibilidad muy alta (Figura 266), debido a los factores antes descritos en los apartados anteriores, es importante señalar que del área urbana de Dzilam de Bravo hasta San Felipe con aproximadamente 74 kilómetros lineales de costa, no hay existencia de playa, ya que esta franja pertenece a la Reserva de la Biosfera de Dzilam-San Felipe, esta reserva alberga una diversidad significativa de flora y fauna, así como por poseer asociaciones vegetales que son hábitat, proveen refugio y alimento a un gran número de especies.

SUSCEPTIBILIDAD POR EROSIÓN COSTERA EN LA REGIÓN IV LITORAL CENTRO



■ BAJA ■ MEDIA ■ ALTA ■ MUY ALTA

Figura 266. En esta región 12 kilómetros de la costa presenta susceptibilidad muy alta a erosionarse.

La riqueza faunística refiere alrededor de 290 especies, asociadas a más de 300 especies de flora pertenecientes a cinco tipos de vegetación: duna costera, manglares, petenes, selva baja inundable y selva baja caducifolia, además de la flora acuática correspondiente a las lagunas costeras, sin embargo, de acuerdo a las características de la zona y valores arrojados por el modelo predictivo realizado en el sistema de información geográfica arrojo resultados de susceptibilidad media, (Figura 267).

En el municipio de Dzemul existen tres localidades en una zona de susceptibilidad media a sufrir erosión costera (color amarillo en el mapa), estas localidades son: San Benito, San Bruno y Xtampú, todas las viviendas de estas tres localidades tienen tipología uno con un índice de vulnerabilidad alto, las cuales se describen a continuación.

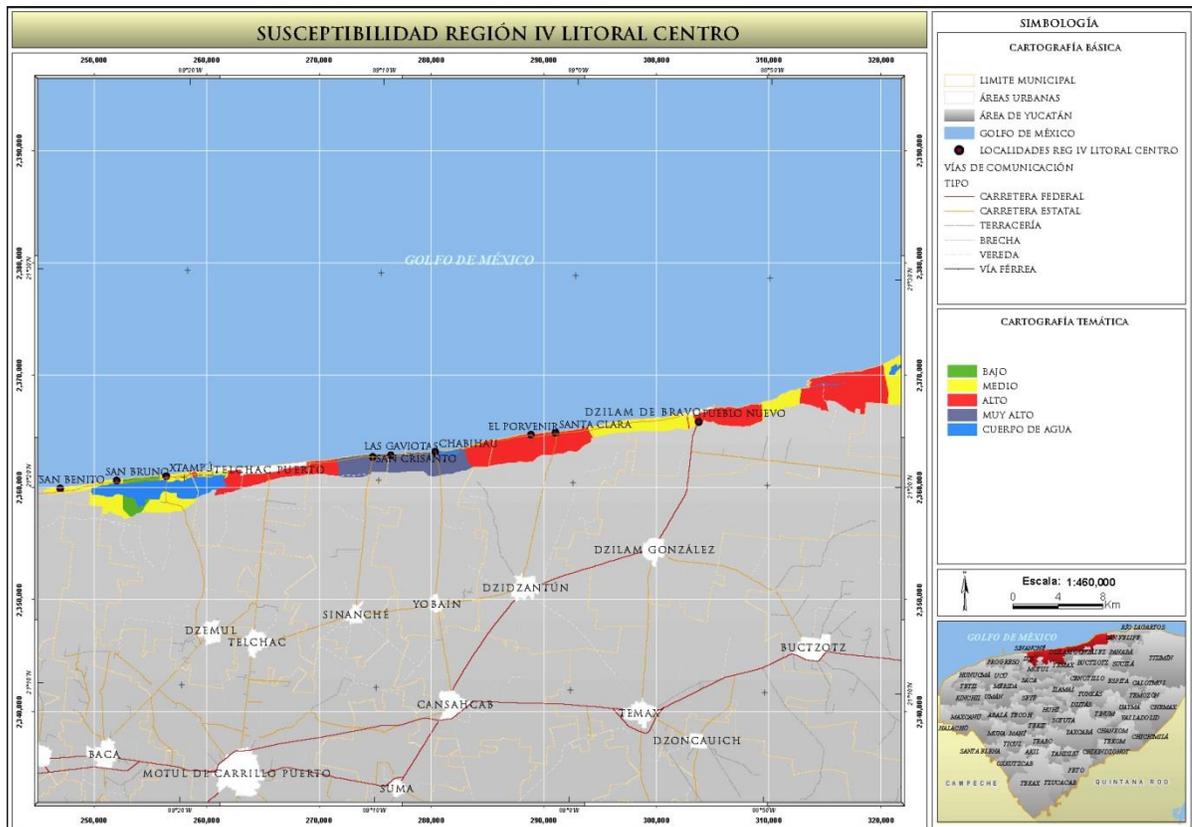


Figura 267. Susceptibilidad por erosión costera en la región IV Litoral Centro.

La localidad de San Benito según el censo realizado por el I.N.E.G.I. en el año 2010, tiene una población total de 61 habitantes, en esta zona existen 221 viviendas, sin embargo, solo 20 están habitadas, para el caso de San Bruno se cuenta con el registro de 45 habitantes así como la construcción de 75 casas de las cuales 16 están habitadas, la localidad de Xtampú es más pequeña, registra un total de 4 habitantes en el que existen construidas 21 viviendas de las cuales solo una se encuentra habitada, el motivo por el cual un alto porcentaje de viviendas se encuentran deshabitadas se debe a que en el año de 1988, el huracán Gilberto devastó gran cantidad de ellas dejando la mayoría en malas condiciones y por lo tanto se encuentran deshabitadas.

La zona urbana de Telchac Puerto, se encuentra en un área con un alto grado de susceptibilidad a erosionarse, ya que la mala planeación en la edificación de viviendas delante de la vegetación de duna costera, así como la construcción de espolones y la degradación de la vegetación han provocado esta problemática, Telchac Puerto cuenta con un área de 3.74 Km², tiene 1722 habitantes con 1779 viviendas, de las cuales 495 se encuentran habitadas, debido a lo antes mencionado, estas casas tienen un índice de vulnerabilidad alto ya que son tipología uno.

Siguiendo la zona de alta susceptibilidad por este fenómeno, se encuentran las localidades de El Porvenir y Santa Clara ambas pertenecen al municipio de Dzidzantún, con respecto a la primera se tiene registrado 4 habitantes, la construcción de 26 viviendas de las cuales solo una se encuentra habitada, se sabe también que el número de casas deshabitadas se debe a que la mayor parte de ellas son veraniegas, es decir, que solo se ocupan en temporada de vacaciones o de descanso, la localidad de Santa Clara tiene construidas 223 casas de las cuales 18 están habitadas, cuenta con una población de 45 personas, la mayor parte de las viviendas construidas en ambas localidades tienen un índice de vulnerabilidad a la erosión, alto ya que son de tipología uno.

La zona urbana de Dzilam de Bravo perteneciente al municipio del mismo nombre, se encuentra dentro de la zona con alta susceptibilidad a erosionarse, cuenta con un área de 741,507 m², tiene 2374 habitantes y un total de 1779 viviendas de las cuales 662 se encuentran habitadas, la mayoría de ellas están catalogadas con un índice de vulnerabilidad medio a alto ya que son de tipología categoría dos.

Con respecto al área de muy alta susceptibilidad a sufrir erosión se encuentran las localidades de San Crisanto perteneciente al municipio de Sinanché, así como Las Gaviotas y Chabihau ambas del municipio de Yobaín, en esta zona la erosión costera es muy evidente, ya que un gran número de casas se encuentran bajo el embate directo de las olas del mar, esto se debe a que muchas viviendas han sido construidas delante de la vegetación costera, aunado a ello se han construido de manera desmedida diques y espolones que provocan un desequilibrio en la deposición normal del sedimento, además la degradación de dicha vegetación a ocasionado que la arena de las playas se vaya perdiendo de manera más rápida, ya que no cuenta con un retén o protector natural contra los efectos del viento y del oleaje.

San Crisanto es una localidad con 551 habitantes, se encuentran construidas un total de 428 viviendas de las cuales 144 están habitadas, tienen un índice de vulnerabilidad alto ya que su tipología es de grado uno, Las Gaviotas es una localidad pequeña, en ella solo viven 4 habitantes, se registran 2 viviendas de las cuales una se encuentra habitada, en Chabihau existen construidas 326 viviendas de las cuales 79 están habitadas, tiene una población de 292 personas, las casas poseen un índice de susceptibilidad alto ya que la mayoría son de tipología uno.

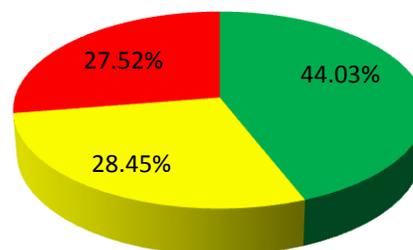
Región V Noreste

Comprende los municipios de San Felipe, Río Lagartos y Tizimin ubicados al Noreste del Estado, tiene una longitud aproximada de 109 kilómetros, de los cuales a partir del límite municipal de Dzilam de Bravo hasta el área urbana de Río Lagartos, a lo largo de aproximadamente 40 kilómetros no hay acumulación de arena, ya que en esta zona se encuentra la Reserva de la Biosfera de Ría Lagartos, donde se encuentra vegetación de duna costera, vegetación sumergida, manglares, etc, sin embargo, el modelo predictivo arrojo resultados con susceptibilidad media en esta zona del litoral.

Para acceder a esta parte de la costa partiendo de la ciudad de Mérida, es necesario incorporarse por la carretera federal 176 Mérida-Tizimín; si se viene de Cancún, se llega por la carretera federal 180; estas vías son transitables todo el año. Además hay carreteras pavimentadas que comunican a San Felipe, Ría Lagartos y El Cuyo, existen también caminos de terracería transitables todo el año que entroncan con los poblados de Las Coloradas y El Cuyo.

De acuerdo al análisis realizado, 48 kilómetros de esta región equivalentes al 44.03% presentan susceptibilidad a la erosión baja, 28.45% (31 kilómetros) tiene susceptibilidad media y el 27.52% (30 kilómetros) presenta susceptibilidad alta, (Figura 268).

SUSCEPTIBILIDAD POR EROSIÓN COSTERA EN LA REGIÓN V NORESTE



■ BAJA ■ MEDIA ■ ALTA ■ MUY ALTA

Figura 268. Más del 50% de la línea de costa de esta región presenta susceptibilidad media a alta a sufrir erosión.

Las áreas urbanas que se encuentran en zona de susceptibilidad a la erosión alta son San Felipe y Río Lagartos, el caso de estas zonas urbanas es peculiar ya que ambas cuentan con un muro de protección construido a lo largo del frente de su costa según la clasificación de Mitchs y Gosseling, 1993, se consideran como litoral de tipo artificial, hacia el oriente se encuentra ubicada sobre una zona de susceptibilidad media la localidad de Las Coloradas, siguiendo la misma dirección sobre la línea de costa aproximadamente a 34 kilómetros se encuentra la localidad de El Cuyo sobre una zona de susceptibilidad baja a la erosión, ya que en esta parte de litoral, la vegetación de duna costera está bien conservada ayudando a mantener la arena de las playas, además de ello no existe gran antropización ayudando a mantener el equilibrio de las playas, (Figura 184).

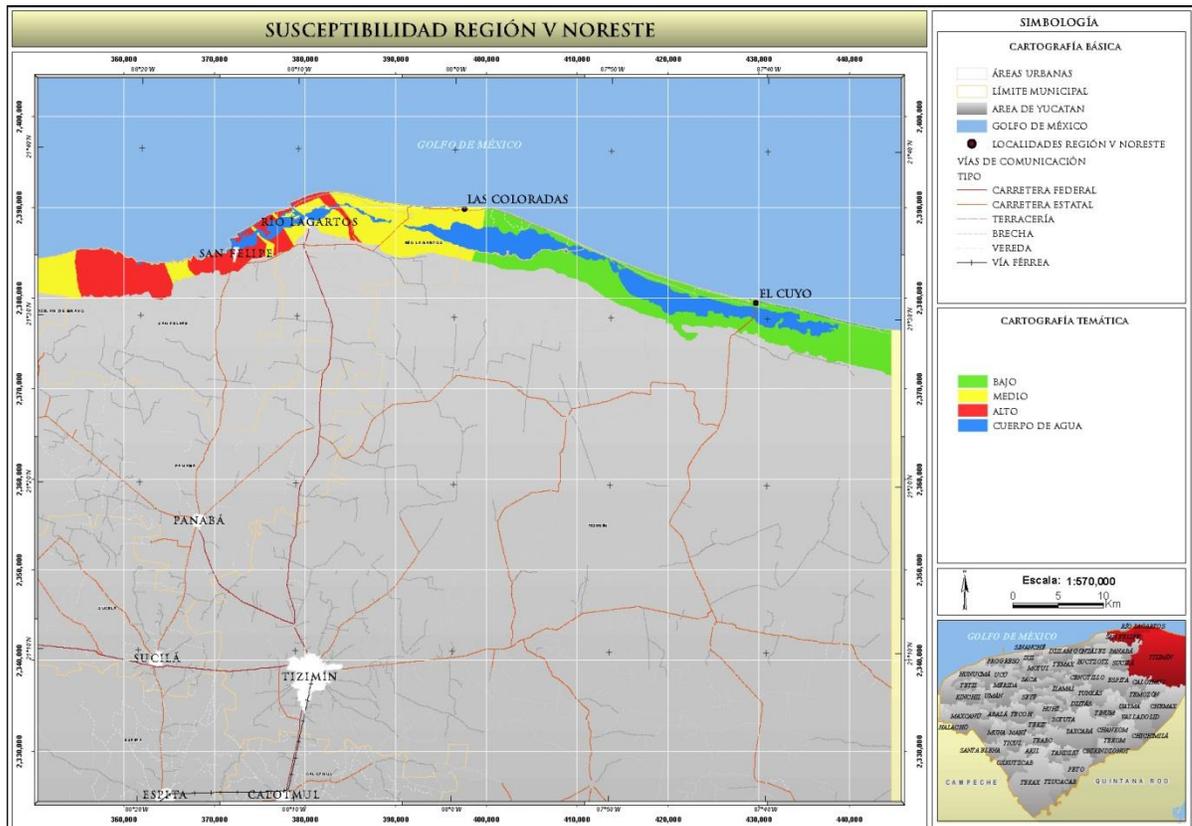


Figura 269. La zona Noreste existen playas bien conservadas con un ancho promedio de más de 25 metros.

San Felipe tiene una población de 1789 habitantes, existen 668 viviendas de tipología 3 con un índice de vulnerabilidad medio, en cuanto a Río Lagartos cuenta con un número mayor de habitantes, 2218, las casas en esta zona urbana suman 720 de las cuales 576 se encuentran habitadas, están catalogadas con un índice de vulnerabilidad medio a alto, la localidad de Las Coloradas pertenece al municipio de Río Lagartos, se encuentra en una zona de susceptibilidad media en ella tienen construidas 354 viviendas con un índice de vulnerabilidad medio ya que tienen tipología tres, la localidad de El Cuyo pertenece al municipio de Tizimín, tiene una población aproximada de 1567 habitantes, la construcción de viviendas asciende a 733 con un índice de vulnerabilidad medio a alto.

Es importante señalar cada una de las zonas urbanas así como las localidades que se encuentran ubicadas en las diferentes zonas franjas de susceptibilidad de la línea de costa, así como el número de viviendas y habitantes que pudieran ser afectados por este fenómeno, para que las autoridades correspondientes tomen las medidas necesarias tanto de mitigación, remediación y/o prevención según sea el caso.

Cabe destacar que las áreas urbanas así como las localidades ubicadas en cada una de las diferentes zonas de susceptibilidad a la erosión en la línea de costa, están expuestas en distinto grado ante este fenómeno, siendo las más afectadas las que se encuentran construidas en la primer fila

frente a la playa, sin embargo, debido a que no se cuenta con datos de pérdida de playa en un determinado tiempo (tasa de erosión), se tomó en cuenta a todas las viviendas que se encuentran construidas en las áreas urbanas y localidades de manera homogénea. A continuación en la Tabla 122 se enlistan cada una de las localidades y áreas urbanas que se encuentran construidas a lo largo del litoral yucateco indicando en qué grado de susceptibilidad por erosión costera se encuentran.

Tabla 122. Áreas urbanas y localidades que se encuentran en las diferentes zonas y grados de susceptibilidad por erosión costera a lo largo del litoral yucateco.

ÁREA URBANA Y/O LOCALIDAD	MPO.	S	HAB.	VIVIENDAS TOTALES	T	ÍNDICE DE VULNERABILIDAD	COSTO POR VIVIENDA (M.N)	COSTO POR LOCALIDAD (M.N)	
Celestún	Celestún	Baja	6,810	2,294	2	Medio-Alto	\$50,000.00	\$114,700,000.00	
Casita de Piedra			3	2	1	Alto	\$12,500	\$25,000	
Perlita Tampico			4	1	1		\$12,500	\$12,500	
Playa Gaviota			1	1	1		\$12,500	\$12,500	
La Victoria			1	1	1		\$12,500	\$12,500	
San Carlos			2	1	1		\$12,500	\$12,500	
Chichitos			1	1	1		\$12,500	\$12,500	
Sisal			Hunucmá	Baja	1,837	1,174	2	Medio-Alto	\$50,000
Los Canadienses	3	6			1	Alto	\$12,500	\$75,000	
El Cuyo	Tizimin	Baja	1,567	733	2	Medio-Alto	\$50,000	\$36,650,000	
El Salvador	Ixil	Media	10	1	1	Alto	\$12,500	\$12,500	
Ha Uay	Progreso		12	38	1		\$12,500	\$475,000	
El Faro	Ixil		39	52	1		\$12,500	\$650,000	
San Benito	Dzemul		61	221	1		\$12,500	\$2,762,500	
San Bruno			45	75	1		\$12,500	\$937,500	
Xtampú			4	21	1		\$12,500	\$262,500	
Río Lagartos	Río		2,218	720	2	Medio-Alto	\$50,000	\$36,000,000	
Las Coloradas	lagartos		1,151	354	3	Medio	\$150,500	\$53,277,000	
Progreso	Progreso	Alta	37,369	13,834	2	Medio-Alto	\$50,000	\$691,700,000	
Telchac Puerto	Telchac Prto		1,722	1,779	1	Alto	\$12,500	\$22,237,500	
El Porvenir	Dzidzantún		4	26	1		\$12,500	\$325,000	
Santa Clara			45	223	1		\$12,500	\$2,787,500	
Dzilam de Bravo	Dzilam Bra.		2,374	790	2	Medio-Alto	\$50,000	\$39,500,000	
San Felipe	San Felipe		1789	688	3	Medio	\$150,500	\$100,534,000	
Chuburná	Progreso		Muy	1,929	1,470	1	Alto	\$12,500	\$8,375,000
Chelem				3,509	3,188	1		\$12,500	\$39,850,000
Chicxulub		6,010		3,903	2	Medio-Alto	\$50,000	\$195,150,000	
San Crisanto	Sinanché	Alta	551	428	1	Alto	\$12,500	\$25,000	
Las Gaviotas	Yobaín		4	2	1		\$12,500	\$25,000	
Chabihau			292	326	1		\$12,500	\$4,075,000	

*MPO= Municipio, S= Susceptibilidad, HAB= Habitantes, T= Tipología.

Las zonas con mayor susceptibilidad a sufrir erosión costera y que actualmente ya presentan esta grave problemática debido a la interacción de los factores ambientales descritos en apartados anteriores son los municipios de: Progreso, principalmente en las localidades de Chicxulub Puerto, Puerto Progreso, se agrava en Yucalpetén, Chelém y Chuburná; hacia el oriente en Telchac Puerto y las localidades de El Porvenir y Santa Clara pertenecientes al municipio de Dzidzantún, así como en Dzilam de Bravo, San Felipe, la localidad de San Crisanto en el municipio de Sinanché, así como en Las Gaviotas y Chabihau pertenecientes al municipio de Yobaín.

VIII.4. Inundación

Sabemos que el agua es fuente de vida, es un recurso necesario para muchas de las actividades que realiza el ser humano en su vida diaria, sin embargo, también su escasez o su exceso como son el caso de sequías e inundación, puede causar problemas a los habitantes de cierto lugar. Las personas por lo general y a través de la historia, han buscado establecerse cerca de lugares donde haya cierta cantidad de este líquido para realizar sus actividades, desde básicas (alimentación y limpieza) hasta de producción de artículos o incluso como medio de transporte. En muchos casos, esta cercanía ha ocasionado serios problemas a la población, puesto que el agua continúa con su ciclo natural y durante este proceso en ocasiones causa beneficios sociales y hasta económicos, sin embargo, en ocasiones también algunos inconvenientes tales como las inundaciones.

Analizando los efectos causados, se tiene que, a nivel mundial las inundaciones ocupan los primeros lugares en cuanto a pérdidas humanas y económicas, así como por el número de eventos ocurridos. Según publicó CENAPRED en 2001, las inundaciones han sido el tercer fenómeno que más se ha repetido y que más decesos ha provocado, con el 27% de 234 de eventos y el 7% de 1.4 millones de muertes, asimismo, ocupa el segundo lugar con relación a pérdidas económicas con el 30%.

Debido a su ubicación geográfica y sus condiciones físicas, la República Mexicana, se ve constantemente expuesta a diversos fenómenos, principalmente de carácter hidrometeorológico. Históricamente un 60% del territorio nacional ha sido alcanzado por desastres meteorológicos que se caracterizan por afectar una área geográfica más extensa que los de tipo geológico (Bitrán, 2001).

En épocas relativamente recientes, se han presentado fenómenos meteorológicos aunque con una inusual intensidad, por mencionar algunos casos están: los huracanes Gilberto y Pauline, que afectaron, la porción Noreste del país (principalmente en Nuevo León) y los estados de Guerrero y Oaxaca, respectivamente; o las inundaciones en Tabasco en el 2007. Cabe mencionar que para la mayor parte del país las inundaciones son derivadas de desborde de cuerpos de agua.

En el estado de Yucatán, de manera peculiar no se tienen escorrentías superficiales, aun así se presenta la problemática de inundación aunque, debido a otras causas, como son las lluvias extremas o el impacto de marea de tormenta, ocasionadas por la presencia de algún meteoro (ciclón tropical).

El impacto de ciclones, los fuertes vientos que a su vez generan olas de gran tamaño y la escasa elevación del terreno sobre el nivel medio del mar, provocan las inundaciones en la zona costera de la entidad. Hacia el interior del territorio, éstas se dan por acumulación o encharcamientos en zonas bajas localizadas a lo largo y ancho del Estado, donde la gravedad de sus efectos depende de la capacidad de dren del agua producto de precipitaciones pluviales.

De lo anterior, la importancia de abordar el apartado de Inundación dentro del presente Atlas, con el fin de brindar a las autoridades una herramienta útil para la toma de decisiones pertinentes, según sea el caso y con ello reducir o minimizar los efectos de desastres que se pudieran ocasionar a partir de este tipo de fenómeno.

VIII.4.1. Conceptos Básicos

Lo primero es conocer el concepto de Inundación por lo que revisando diversas fuentes de información se obtuvieron varios, uno de ellos, obtenido del glosario internacional de hidrología donde la definición oficial es: “aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce” (OMM/UNESCO, 1974), otro un poco más completo es: “evento que debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, o falla de algunas estructura hidráulica provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay y, generalmente, daños a la población, agricultura, ganadería e infraestructura” (Salas y Jiménez, 2007).

Una inundación puede definirse como la ocupación por el agua de zonas o áreas que en condiciones normales se encuentran secas. Se producen debido al efecto del ascenso temporal del nivel de agua de un río, lago, mar u otro. En cierta medida, las inundaciones pueden ser eventos controlables por el hombre, dependiendo del uso de la tierra cercana a los ríos (ECHO *et al*, 2003).

Las inundaciones ocurren principalmente por lluvias intensas prolongadas, como sucede durante las tormentas tropicales y el paso de huracanes, unido a dificultades locales en el drenaje provocado por diferentes causas (ECHO *op. cit.*).

Una Inundación es por lo tanto, el evento en que el nivel de la superficie libre del agua aumenta, generando invasión de agua donde no la hay normalmente, ocasionando daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta y/o que alguna estructura hidráulica falle. Sin embargo, en estas definiciones se hace mención a Cauces, así que, debido a las condiciones fisiográficas del Estado, dichos conceptos no aplican en el sentido estricto de la palabra para Yucatán, pudiendo omitir la relación a éstos.

Tipos de inundación

Existen diversas clasificaciones de las inundaciones, una de ellas es de acuerdo a su origen, se catalogan en: pluviales, fluviales, costeras y/o por falla en los sistemas de desagüe. Otra clasificación es por el tiempo que tardan en presentarse sus efectos.

Inundaciones por su origen.

a) Inundaciones pluviales. Este tipo de inundaciones se originan, como su nombre lo indica, a consecuencia de las precipitaciones que se producen cuando la humedad contenida en los mares, océanos y otros grandes cuerpos de agua, es transportada hacia la tierra por el viento; al ascender el vapor de agua y disminuir su temperatura, esta se presenta en cualquiera de las siguientes formas; lluvia, nieve o granizo. El proceso puede originarse debido a la existencia de: ciclones tropicales, vientos normales, masas polares y procesos convectivos.

El fenómeno de inundación denominada “encharcamiento” se hace presente en zonas urbanas donde la ineficiencia y/o inexistencia de sistema de alcantarillado o de drenaje pluvial, provoca que se incremente el nivel del agua producto por la precipitación en una zona. Del mismo modo, este fenómeno se produce como consecuencia de la precipitación, cuando el terreno se ha saturado y el agua de lluvia excedente comienza a acumularse por un periodo de tiempo.

La inundación por acumulación se da cuando el agua en los cuerpos de almacenamiento, como presas, lagunas, etc., aumenta su nivel y podría afectar a zonas rurales, urbanas e infraestructura vial. El aumento del nivel de agua se da en forma gradual y por lo general es en zonas donde la topografía es muy plana y el agua no tiene a donde escurrir, depende casi totalmente de procesos mecánicos para poder “sacar” el agua de esas zonas o depende de la evapotranspiración. En el caso de Yucatán, al no haber cuerpos de agua, ésta se presenta por acumulación de agua en zonas bajas o depresiones del terreno.

b) Inundaciones fluviales. El origen de este tipo de inundaciones se da por el desborde de ríos, puede ser de escurrimientos de ríos tributarios y no de lluvia sobre el sitio afectado. El agua que se desborda queda en terrenos cercanos a los ríos. En el caso de Yucatán donde no se tienen estos tipos de cuerpos de agua, éste tipo de inundación no aplica.

c) Inundaciones costeras. Además de las inundaciones pluviales (causadas directamente por la lluvia) y fluviales (desbordamiento de los ríos), las zonas costeras pueden ser afectadas por las mareas de tormenta, particularmente en el Golfo de México, donde el nivel medio del mar presenta un ascenso que provoca que éste penetre tierra adentro, afectando en algunas

ocasiones zonas muy amplias. A este fenómeno se suma el del oleaje a causa de los vientos y, juntos, causan daños muy importantes, como la socavación de los cimientos en los edificios costeros, el naufragio de las embarcaciones, la demolición y destrucción de instalaciones portuarias, la rotura de las obras de defensa costera y la erosión de las playas y riscos. El efecto del agua no sólo es destructivo al avanzar tierra dentro, sino también su retirada hacia el mar.

d) Inundaciones por falla o mala operación de obras hidráulicas. Éstas pueden ser aún más graves que las antes mencionadas. Si la capacidad de las obras destinadas a protección es insuficiente, la inundación provocada por la falla de dicha infraestructura será mayor que si no existiera (Salas y Jiménez, 2007).

Inundaciones por el tiempo de respuesta de la cuenca.

Las inundaciones también pueden clasificarse de acuerdo con el tiempo de respuesta de la cuenca, éstas pueden ser lentas o rápidas (súbitas). El tiempo de respuesta dependerá de las características fisiográficas particulares de cada cuenca, las cuales definirán cuánto tardará en presentarse la inundación después de ocurrida la precipitación “tiempo de concentración”. Salas y Jiménez (2007), definen un límite del orden de 2 horas para diferenciar las inundaciones lentas de las rápidas.

Inundaciones lentas. Cuando ocurre una precipitación y el terreno sobre el que cae se satura, ya no puede absorber más agua y el nivel de ésta va aumentando paulatinamente hasta cubrir la superficie, que por lo regular, presenta poca pendiente o es una depresión en el relieve.

Inundaciones súbitas. Este es el caso de lluvias intensas y repentinas que caen en ciertos lugares con cierta pendiente donde fluyen y pueden causar grandes daños. En zonas urbanas donde se tiene recubrimiento del suelo con asfalto o concreto, este tipo de inundaciones son muy comunes.

VIII.4.2. Antecedentes

Las inundaciones provocadas por copiosas precipitaciones pluviales, durante el paso de un fenómeno meteorológico y también las condiciones geohidrológicas del subsuelo que están determinadas por las condiciones naturales del medio, como la topografía, profundidad del manto acuífero, y conductividad hidráulica del medio hidrogeológico y de la zona insaturada, relacionada con la estratificación de las capas de roca, precipitación pluvial, origen de la recarga y dimensión más corta del acuífero (CONAGUA, 2011-a).

En general la problemática causada por las inundaciones que se han suscitado se deben, en su mayoría a la mala planeación de los asentamientos humanos, pues no se consideran los efectos de un fenómeno hidrometeorológico.

Realizando una búsqueda de información histórica de eventos ocurridos en Yucatán, se tiene que en el transcurso de los años, se han presentado inundaciones, la mayoría de ellas causadas por la interacción de fenómenos hidrometeorológicos extremos, aun cuando las características fisiográficas indicarían lo contrario, el terreno relativamente plano y sin escurrimientos superficiales.

Se identifican en general tres zonas en el Estado con recurrencia de inundación, una es hacia la zona costera y otra hacia la porción sur (Cono Sur). La tercera que podría considerarse de menor magnitud, por presentarse como encharcamientos en áreas urbanas donde se tienen depresiones por las estructuras kársticas (dolinas) o al modificar con infraestructura el terreno (calles asfaltadas y/o con cemento).

En el Estado, uno de los ciclones tropicales que más daño han causado es el huracán Isidoro, en septiembre del 2002, esto incluso siendo de menor categoría que Gilberto, hecho que resalta la importancia de la precipitación acumulada, ya que la precipitación registrada durante Isidoro fue por

un lapso de cinco días consecutivos, mientras que Gilberto sólo uno, por lo que se puede interpretar que si ocurren precipitaciones con grandes láminas durante varios días consecutivos, llegará el momento que los suelos estén totalmente saturados ocasionando estancamiento del agua. Quedando de manifiesto que no se puede asegurar que los picos de series de lámina de lluvia diaria sean los únicos que deban ser analizados. Para cuencas relativamente grandes los picos de las series de acumulados en dos, tres o más días pueden resultar los críticos para definir los caudales máximos anuales (CONAGUA, 2011-b). En la Tabla 123, se resumen los huracanes para los cuales se analizó la distribución de precipitación acumulada que causó las inundaciones.

Tabla 123. Volumen de precipitación registrada durante el paso de ciclones tropicales.

HURACÁN	PRECIPITACIÓN ACUMULADA (DATO DE LA ESTACIÓN QUE REGISTRÓ LA LÁMINA MÁXIMA)	FECHA (S)	NO. DE ESTACIONES
Hilda	202 mm	12 al 19 de Septiembre 1955	14
Debbie	40 mm	25 y 26 de Septiembre 1965	15
Beulah	61 mm	17 y 18 de Septiembre 1967	13
Laurie	114 mm	18 y 19 de Octubre de 1969	23
Ella	84 mm	9 al 11 de Septiembre de 1970	35
Greta	139 mm	1 y 2 de Octubre 1970	33
Edith	60 mm	11 y 12 de Septiembre de 1971	31
Agnes	198 mm	14 y 15 de Junio de 1972	27
Brenda	218 mm	20 de Agosto de 1973	33
Eloise	99 mm	21 de Septiembre de 1975	23
Gilberto	350 mm	14 de Septiembre de 1988	50
Opalo	169 mm	29, 30 Septiembre y 1 Octubre de 1995	44
Roxanne	190 mm	11 de Octubre de 1995	32
Mitch	120 mm	3 y 4 de Noviembre de 1998	45
Katrina	123 mm	31 de Octubre de 1999	38
Gordon	143 mm	14 y 15 de Septiembre de 2000	40
Isidore	1107 mm	21 al 25 de Septiembre 2002	58
Claudette	71 mm	11 de Julio de 2003	33
Stan	278 mm	2 y 3 de Octubre de 2005	49
Wilma	412 mm	21 al 23 de Octubre de 2005	46
Emily	146 mm	16 y 17 de Julio de 2005	42

En la Tabla 124, se hace una recopilación de eventos que ocasionaron algún grado de daño, estos fueron obtenidos de noticias periodísticas, libros, revistas, entre otras fuentes de información. Es importante resaltar que en dicha base de datos se manejan volúmenes de precipitación en intervalos de 24 horas y que, algunos de estos volúmenes son de periodos de tiempo menores a un día, siendo los que provocan generalmente inundaciones, sin embargo, se refiere la precipitación total reportada del día como espesor de lámina de agua que debe presentarse para ocasionar inundación.

Entre el material histórico recopilado, se consiguieron diversos mapas: el de Zonas Sujetas a Inundación en el Proyecto SIDEN (INEGI 2007); los desarrollados por la Comisión Nacional del Agua en 2010; y el del Atlas Nacional de Riesgos publicado por CENAPRED en 2012.

Ahora, con el fin de saber qué análisis se han realizado sobre este apartado, se recopilaron diversos estudios previos a la realización del presente Atlas. Uno de los trabajos en los que se menciona que a causa de inundaciones el Estado resultó afectado es el de Salas y Jiménez (2007), que en el Fascículo de Inundaciones publicado por CENAPRED enumeran los eventos que han generado los mayores daños por inundación en México para el periodo de 1943 a 2003 y entre los estados mencionados está Yucatán, con inundaciones provocadas por ciclones tropicales, tales como Hilda, Janet, Beulah, Gilberto e Isidoro.

Tabla 124. Eventos meteorológicos que causaron afectaciones en el estado de Yucatán.

FENÓMENO	FECHA	CANTIDAD DE PRECIPITACION	DETALLE	ZONAS FECTADAS	FUENTE	PERIODO DE RETORNO
Huracán Isidoro	Afectó Yucatán los días 22 y 23 de Septiembre de 2002	300 mm en las estaciones cercanas.	San Diego Buenavista día 22 con 300 mm y día 23 con 214 mm	Cono Sur, entre los límites de Yucatán, Quintana Roo y Campeche, el nivel del agua alcanzó 3 m de altura. Zona totalmente devastada en el municipio de Tekax	CD TIJUANA INFO, http://www.ciudadtijuana.com/zonaactiva/2007/septiembre/4conaciyucatan.html	5000 Años
			Tzucacab registraron, día 22 con 250 mm y día 23 con 220 mm			500 Años
			La estación Acanceh registró 260 mm			1000 Años
Tormenta Tropical	Del 30 de mayo al 1 de junio de 2005	Precipitaciones de hasta 28 mm	En algunas Estaciones Meteorológicas cercanas a la zona se registraron hasta 37 mm (Acanceh)	Daños en: Sinanché, Tecoh, Puerto Progreso, Telchac Puerto, Chicxulub Pueblo, Conkal, Motul, Baca, Cuzamá, Seyé, Xocchel, Acanceh, Umán y Hunucmá, y algunas zonas de Mérida	http://www.jornada.unam.mx/2005/06/01/index.php?section=estados&article=041n1est	2 Años
Tormenta Tropical Stan	días 2 y 3 de Octubre, 2005 (noticia día 5)	máxima precipitación 173 mm.	Desde 166.5 mm en Tzucacab, 173 mm en Sotuta, días 2 y 3, respectivamente; en Peto se reportaron 143 mm.	Península de Yucatán	ES MAS, http://www.esmas.com/noticierostelevisa/mexico/479226.html otra nota en: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=87%3Atemporada-2005&catid=8&Itemid=46	25 y 50 Años respectivamente
Huracán Wilma	Del 21 al 23 de Octubre, 2005 (nota del día 25)	Mayor precipitación registrada fue de 70 mm	Durante 3 días (21, 22, y 23 de Octubre) huracán afectó Yucatán, Tizimín registró 296 mm en un día	Zona Oriente de Yucatán	QUIMINET.COM, http://www.quiminet.com/noticias/alerta-roja-en-yucatan-por-inundaciones-y-epidemias-2104557.htm	Menos de 1000 Años
Frente Frío Num. 37	17 de Febrero de 2007	En las cercanías fue de 37.19 mm	En Peto la precipitación registrada para el mes de febrero es de 56 mm	En las comunidades: Tixxilá y Uitziná, municipio de Peto, inundaciones de hasta 1 m de altura.	LA JORNADA, http://www.jornada.unam.mx/2007/02/17/index.php?section=estados&article=032n1est	2 Años
Tormenta Tropical Num. 8	17 de Junio de 2008	La mayor precipitación fue de 16.7 mm	Precipitación registrada para los municipios: 9.8 mm en Dzán, Ticul de 16.7 mm y Tixkokob de 11 mm	La porción sur de Mérida quedó anegada, comunidades dañadas: Dzan, Ticul, Tixkokob y Motul, aguacero de más de 14hr.	LA JORNADA, http://www.jornada.unam.mx/2008/06/27/index.php?section=estados&article=040n2est	2 Años
Frente Frío Num 9 y Depresión Tropical Ida	5 de Noviembre de 2009	Alrededor de los 50 mm	Del reporte de CONAGUA se registró una precipitación desde los 2 mm hasta aproximadamente 50 mm.	El Cuyo, Río Lagartos, Celestún, Las Coloradas, Mérida, Progreso, Kanasin, Valladolid, Tekax. Por Frente Frío casas cercanas a la ciénega en Sisal y Celestún.	http://sipse.com/noticia.php?ID_NOTICIA=18587	2 Años
Tormenta	16 de Agosto de 2010	La precipitación acumulada fue de 116 mm	Observatorio de CONAGUA registró acumulados máximos de 92 mm en Las Brisas, 90.5 mm en Observatorio, 88 mm en Santa Gertrudis Copó, 80.6 mm en Cinvestav, 78.2 mm en el Centro, 57 mm en Nora Quintana y 53.7 mm en Unidad Morelos.	Inundaciones y caos vial en la ciudad de Mérida	http://www.revistayucatan.com/v1/2010/08/16/historico-aguacero/	10 Años
Huracán Paula	11 al 14 de Octubre de 2010	132.4 mm en Tizimín, Yucatán	Precipitación reportada por SMN en la reseña del Huracán Paula	Varias zonas de Tizimín y Río Lagartos	http://www.poresto.net/ver_notia.php?zona=yucatan&idSeccion=2&idTitulo=48312 http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=37%3Atemporada-2010&catid=8&Itemid=46	10 Años
Onda Tropical Num. 4	27 de Junio de 2011	Más de 50 mm	El SMN marca precipitaciones de lluvias asociadas de más de 50 mm para el área de Yucatán	Centro histórico y mercados San Benito y Lucas de Galvez, vialidades, casas, plaza Las Américas 1.5 m, Kanasin 1 m de altura en la Col. Pablo Moreno	http://www.sinembargo.mx/27-06-2011/6375	2 Años

.....Continuación de Tabla 124.

Tormenta Tropical Nate	7 de Septiembre 2011	Un rango de 50 a 150 mm	este rango de precipitación se obtiene de esta reseña de tormenta de SMN	Encharcamientos en Mérida: Fracc. Pensiones, Plaza Américas, Yucalpetén, la Bojórquez.	http://sipse.com/noticias/120522-ahoga-merida-lluvia-intensa-2011.html	20 Años
Tormenta Tropical Debby	25 de Junio de 2012	60.2 mm	N/D	Progreso, calles inundadas y algunos negocios, así como el malecón.	http://laverdadyucatan.com/debido-a-la-tormenta-debby-se-inunda-progreso/14303/ otra noticia relacionada, Periódico Progreso Hoy: http://www.progreso.com/noticias/amanece-seco-malecon-progreso-pero-ahora-inunda-con-las-criticas-ciudadanas-3771/	2 Años
Tormenta Tropical Helene	A partir del 9 de Agosto de 2012	Entre 20 y 30 mm	Este rango de precipitación se obtiene de la reseña de esta tormenta de SMN	En Peto, varias comisarías resultaron afectadas	http://72.29.68.249/ver_noticia.php?zona=yucatan&idSeccion=2&idTitulo=185932	2 Años
Frente Frio Num. 21	16 y 17 de Enero de 2013	Como máxima en el área, se tienen 64 mm	Mérida, EM (CICY) 64 mm, Emiliano Zapata Oriente 55.6 mm, Observ. Met. Mérida 37 mm, Fuerza Aérea 32 mm, OCPY(CONAGUA) 29.2 mm	Encharcamientos en Mérida, estacionamiento del mercado San Benito. Zona Poniente	http://yucatan.com.mx/merida/estrageo-s-por-la-lluvia	2 Años
	17 de Enero de 2013			Ixil	http://yucatanahora.com/noticias/atien-de-gobierno-inundaciones-ixil-28028/	2 Años
HURACANES DIVERSOS	Fecha Nota: 22/08/2010	N/A	Nota periodística describe características principales del Cono Sur	Cono Sur	http://sipse.com/archivo/el-cono-sur-de-yucatan-indefenso-ante-lluvias-62069.html	Cada año
Dean	18 al 21 de Agosto de 2007	42 mm	N/D	Inundación en Zona Sur de Yucatán, Municipios de Tzucacab, Peto, Tekax, Oxkutzcab.	http://www.terra.com.mx/noticias/articulo/382982/Anega+Dean+zona+sur+de+Yucatan.htm Otra fuente de datos: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=85%3Atemporada-2007&catid=8&Itemid=46	2 Años
Huracán Ivan, Onda Tropical Num 14	22 Septiembre de 2004	66 mm, áreas declaradas, máxima 53 mm	Tekax, Tizimin 8.5 mm, Espita 39 mm, Panabá y Calotmul 41 mm, Chemax 53 mm	Tixméhuac 38 mm	CLICLOM y Declaratorias de Desastre del D.O.F.	2 Años

Dadas las características 'especiales' del Estado, tales como un terreno kárstico y una topografía relativamente plana, se han tenido que adecuar las metodologías ocupadas para analizar el tema de Inundaciones, de ahí que varios autores han realizado estudios sobre el tema, algunos de ellos se mencionan adelante.

Uno de los estudios sobre el tema, es el realizado por Batista y Sánchez (1999) donde describen que, para el estudio de riesgo por inundaciones pluviales en Cuba los factores más importantes son: precipitación, edafología, geología, uso de suelo, entre otros, sin embargo el estado de Yucatán consta de características físicas muy específicas, razón por la cual en este trabajo se adaptó una metodología específica de acuerdo a la información disponible y en relación a las particularidades de la Entidad. En el estudio de Palacio-Aponte y colaboradores (2005), "Diagnostico de Riesgo por Inundación para la Ciudad de Campeche" se expone un caso que se asemeja en algunas condiciones físicas de la zona sur del Estado, en el cual se realiza un análisis de infiltración-escorrimento.

Ribera (2004) en la metodología propuesta, considera la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad como factores imprescindibles para el cálculo del riesgo, tal como lo propone CENAPRED. Indica que los mapas de riesgo por inundación se pueden agrupar en cinco tipologías: de áreas inundables, de peligrosidad, de exposición, de vulnerabilidad a la inundación y de riesgo de daños por inundación. Para ello sugiere el uso de los sistemas de información geográfica (SIG), puesto que permiten adquirir, almacenar, analizar y editar información espacial. Concluye que los mapas de riesgo por daños por inundación son verdaderos mapas de riesgo.

Frausto y colaboradores (2006), publicaron en la revista Teoría y Praxis, el artículo denominado “Áreas susceptibles de riesgo en localidades de pobreza extrema en el sur de Yucatán” en el cual mencionan que en particular, la península de Yucatán ha sido estudiada desde dos perspectivas. Una se orienta a la descripción de los fenómenos hidrometeorológicos (lluvias, tormentas, inundaciones, sequías, erosión y depositación costera), en otra, se sintetiza la relación entre los fenómenos naturales y la población, principalmente en mapas de peligros geomorfológicos y geológicos. Dentro del mismo, se hace énfasis en que la región sur de Yucatán se tiene el 16.3% del territorio inundable con un total aproximado de 73,900 hectáreas, por lo cual su vulnerabilidad es catalogada como alta.

Sánchez 2007-2008, explica detalladamente los métodos que se pueden emplear para realizar un estudio de precipitación areal, en estudios de inundaciones mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), indicando la importancia de tener datos de precipitación en toda la cuenca. Desarrolla ejemplos para calcular la precipitación areal utilizando los métodos de: Media aritmética, método sencillo que no necesariamente utiliza sistemas de información geográfica pero sí algunas funciones de Arc Gis; Polígonos de Thiessen, método más empleado en la obtención de precipitaciones medias sobre una cuenca, en la que se ponderan las precipitaciones de cada estación en función del área de influencia; Isoyetas, método que utiliza la triangulación de la red de puntos del sistema, su posterior graduación y unión, el cálculo manual se realiza a partir del sistema de representación de planos acotados; por último, está el método de Thiessen modificado.

En 2010, Vales propone el uso de Teledetección por medio de tecnología Radar para definir el alcance de la lámina de agua producida por el desborde y las crecidas, a raíz de intensas precipitaciones que provocan inundaciones en diferentes ámbitos de cierta región, tal como llanuras de inundación.

Existen además otros trabajos, como son: “Caracterización y Diagnósticos Sectoriales del Estado de Yucatán” realizado por el Instituto de Geografía de la UNAM, o el de “Recomendaciones para control y alivio de inundaciones en la región denominada Cono Sur en el Estado de Yucatán”, publicado por Espinosa Graham (2004) en la revista Ingeniería de la UADY.

El Organismo de Cuenca Península de Yucatán perteneciente a la CONAGUA, en el área de Atención a Emergencias, ha desarrollado un “Plan Operativo” donde se tienen identificadas localidades con problemática de inundaciones recurrentes (Tabla 125) para las cuales se tienen ya acciones a realizar en caso de suscitarse algún evento hidrometeorológico extraordinario.

Tabla 125. Localidades con problemática de inundación por eventos extraordinarios.

LOCALIDAD				
Alfonso Caso	El Escondido	Nuevo Tesoco	San Diego Buenavista	Sisal
Benito Juárez	El Limonar	Polhuacxil	San Felipe	Sudzal Chico
Celestún	Kantemó	Progreso	San Felipe II	Tekit
Chabihau	Las Coloradas	Río Lagartos	San Isidro Mackian	Telchac Puerto
Chan Dzinup	Manuel Cepeda Peraza	Sabacche	San Isidro Yaxche	Tigre Grande
Chelem	Moctezuma	Sacbecan	San Juan del Río	Tixcacaltuyub
Chicxulub Puerto	Nohalal	Sacbé	San Pedro Dzúlá	Tobxila
Chuburná	Nohbec	Salvador Alvarado	Santa Clara	X'cobiakal
Dzilam De Bravo	Nuevo León	San Arturo	Santa Pilar	X'quinientos
El Cuyo	Nuevo Tekat	San Crisanto	Santa Rosa	

En la Figura 270, se presenta el análisis de precipitación acumulada para el Estado, del Huracán Isidoro, para la realización del mapa se depuró la base de datos de precipitaciones (del apartado de Climatología de este Atlas y se incluyeron los datos de estaciones no consideradas en ese apartado), cabe mencionar que el cálculo se realizó durante el lapso de tiempo que el fenómeno cruzó por territorio yucateco.

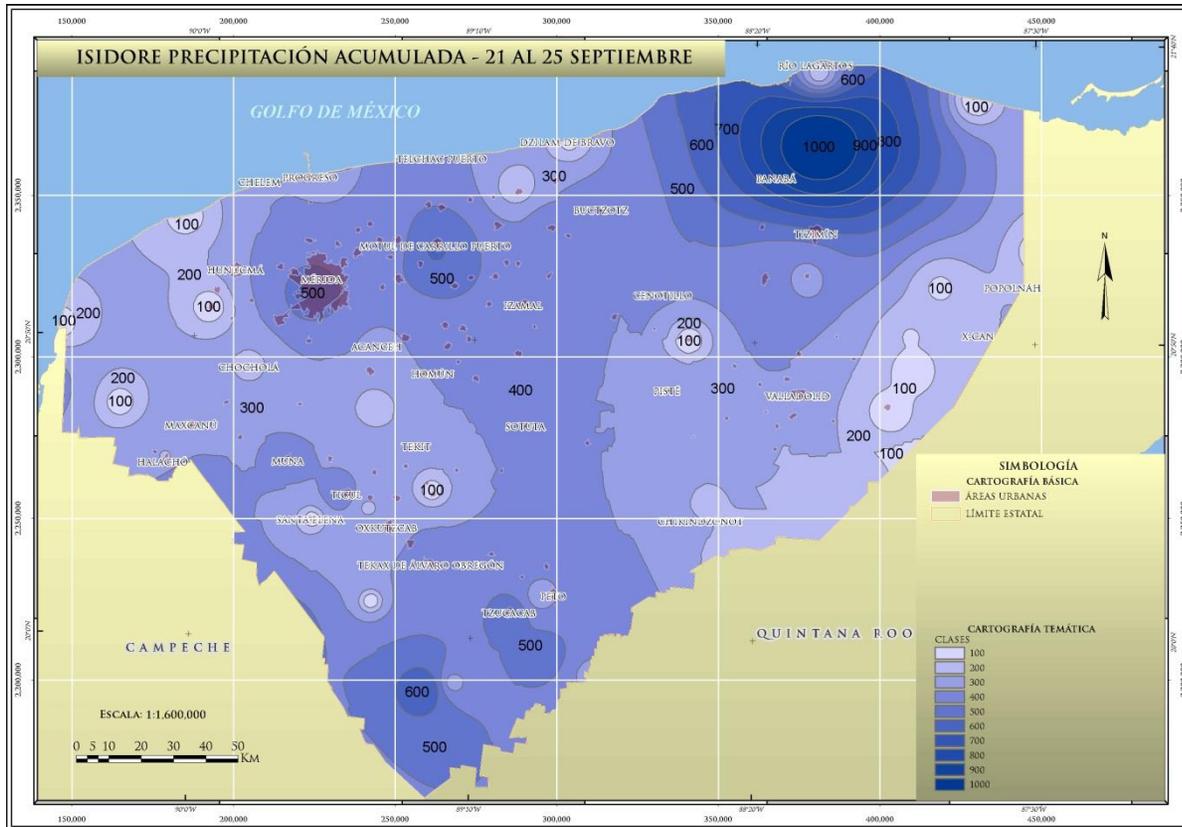


Figura 270. Mapa de precipitaciones acumuladas para el huracán Isidoro.

Las precipitaciones máximas que descargó este ciclón fueron de hasta 1000 mm, donde las afectaciones se dieron en los municipios de Tizimín, Panabá, San Felipe y Río Lagartos, que se encuentran en la parte Nororiental del Estado. Para la zona de Mérida se registró una precipitación de 500 mm, misma que llegó a afectar algunas colonias.

VIII.4.3. Método de Trabajo

Para desarrollar el capítulo de inundación, se analizaron diferentes trabajos como los manuales de CENAPRED, metodología de SEDESOL-SGM, manual para el control de inundaciones de CONAGUA, y otros estudios, sin embargo las características particulares del estado de Yucatán amerita adecuar dichos trabajos, como es el caso de inundaciones provocadas por avenidas súbitas en los ríos, ya que en la entidad se considera la inexistencia de ríos (Graniel 2010). Por lo tanto se realiza una propuesta metodológica para el análisis de inundaciones pluviales.

El estudio se divide en trabajos de gabinete y de campo; los trabajos de gabinete constan en una etapa de recopilación y depuración de información, en la cual se hace una investigación bibliográfica, hemerográfica, consulta de mapas y otras fuentes que puedan proporcionar información útil para desarrollar el tema de inundaciones, como son trayectorias y ocurrencia de huracanes, reportes de inundaciones de Protección Civil, de CONAGUA, noticias, declaratorias de desastres naturales en el Diario Oficial de la Federación (DOF), ver figura 271.

También a partir de una base de datos generada por el Servicio Meteorológico Nacional y CONAGUA, se analiza e interpreta, para obtener datos estadísticos como medias, y eventos extraordinarios máximos, los cuales sirven como base para interpolar y generar mapas temáticos de precipitaciones.

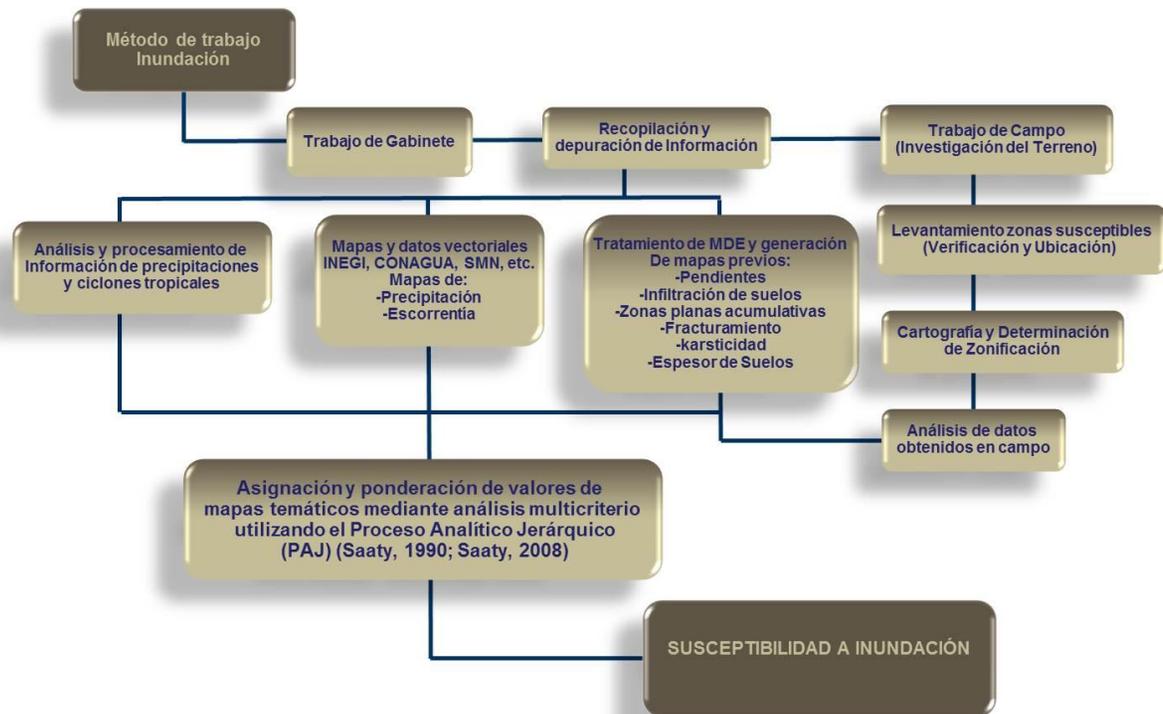


Figura 271. Diagrama de flujo de método general de trabajo.

A partir del “Continuo de Elevaciones Mexicano” (CEM) desarrollado por INEGI (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/Descarga.aspx>), que representa las elevaciones del territorio Mexicano, se extrajo en particular un Modelo Digital de Elevación (MDE) del Estado. También se calculó un modelo de pendientes el cual fue dividido en dos clases que van desde 0 a 7 y más de 7%, dichos valores están en porcentaje. Se empleó la fórmula “Seleccionar = [(Pendientes < 10%) & (MDE ≤ X & MDE > Y)]” que se aplica en la calculadora *raster* para deducir zonas planas con capacidad de acumular agua, con fin de hacer una inspección visual y corroborar el buen funcionamiento de la fórmula se elaboró un modelo tipo “*Hillshade*” (crea un trama de relieve sombreado), posterior, se sobrepone el MDE con un 50 por ciento de transparencia al *Hillshade*, una vez con estos niveles de información es posible realizar una interpretación visual de zonas bajas, planas y con una relativa depresión topográfica,. Por otra parte se realiza una investigación cartográfica, geolocalizando y digitalizando mapas temáticos afines como, zonas inundables, coeficiente de escurrimiento, precipitaciones, se retomaron mapas que fueron desarrollados en este proyecto en otros niveles de información, así como el tratado de datos de campo y elaboración de mapas a través de interpolación, como son el mapa de espesor de suelos e infiltración.

En cuanto a trabajo de campo, se llevó a cabo una investigación de terreno, a partir de zonas identificadas previamente a partir de un análisis de antecedentes históricos e interpretación de modelos de elevaciones, pendientes, relieve, mapas previos y fotografías aéreas. En el sitio se llena una ficha de campo en la cual se ubica el punto, delimita una zona inundable, se genera un archivo fotográfico, y obtienen características del terreno las cuales serán utilizadas para un análisis posterior, en la Figura 272 podemos observar la estructura de la ficha de campo.

Los parámetros que se recopilan en la ficha de campo son datos que sirven para realizar un análisis mediante el cual puede generar noción de frecuencia y duración de inundaciones, entre dichos parámetros se encuentran características del sitio como son:

Litología, se debe de determinar el grado de permeabilidad según el tipo de roca, agrupando y clasificándolas para el análisis, de esta forma se evalúan territorios de mayor o menor retención de agua.

Geomorfología, a partir de este criterio se canaliza la pendiente del terreno de una forma generalizada criterio que facilita ubicar zonas bajas o altas. Lo cual nos lleva a discriminar si las acumulaciones se darán de manera lenta o rápida, así como la extensión de ésta. En forma particular con la pendiente del terreno se puede extraer zonas planas y depresiones del terreno, donde es más factible encharcamientos, debido al poco escurrimiento.

Precipitaciones, de este factor se debe de extraer zonas con mayor disponibilidad de agua, asumiendo mayor probabilidad de inundación en estas y por lo contrario, menor probabilidad en donde la precipitación sea menor, sin embargo también es prudente considerar precipitaciones extraordinarias.

Nivel freático, a partir de éste se analiza la capa de roca y o suelo a ser saturada.

Edafología. En este punto se considera el contenido de componentes finos, como es el caso de la arcilla, así como el espesor del suelo para poder determinar la permeabilidad de este.

Vegetación, en el análisis de este factor se extraen zonas con cubierta vegetal que puede ser un índice de zonas saturadas o inundables, además de que la vegetación es un factor determinante en el sistema de evapotranspiración.

Uso del suelo, donde se ha modificado la capacidad de infiltración del terreno (zonas urbanas), y esta queda a expensas de saturación.

En un posterior análisis de gabinete, estos factores son clasificados y ponderados según el grado de factibilidad de cada uno de ellos para que ocurra inundación del terreno, utilizando el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) (Saaty, 1990; Saaty, 2008). Este método consiste en la elaboración de una matriz de comparación por pares, en la que se especifica la importancia relativa de cada indicador respecto a los demás, con plataforma Arc Gis versión 10.1, se genera la matriz para evaluar de forma espacial, cualitativa y cuantitativa dichos parámetros, obteniendo polígonos que representan áreas con diferente susceptibilidad a inundación.

ATLAS DE PELIGROS POR FENOMENOS NATURALES DEL DE YUCATÁN

INUNDACIÓN

UBICACIÓN	
LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	
PUNTO DE CONTROL	YIB1001
FECHA	14/08/2012
ESTADO	YUCATAN MUNICIPIO OXKUTZCAB
LOCALIDAD	HUNTOCHAC
CALLE	CALLE 1 CON CALLE 4
CARTA TOPOGRÁFICA	BENITO JUAREZ E16-A12
COORDENADAS UTM WGS84	
LATITUD X	238170 LONGITUD Y 2192142
ELEVACIÓN Z	102

CARACTERÍSTICAS			
TIPO DE INUNDACIÓN	ACUMULACION	NATURAL	DURACIÓN DE LA INUNDACIÓN 60 DIAS
TIPO DE CUERPO DE AGUA	ACUMULACION	AREA DE CAPTACIÓN (M) 3000000	AREA INUNDABLE (M) 3000000
ALTURA DEL TIRANTE DE AGUA EN CONDICIONES NORMALES (M)	0.3	NIVEL MÁXIMO QUE ALCANZA EL AGUA (M) 2	
LITOLOGIA	CALIZA - MARGA	GRADO DE INTEMPERISMO MEDIO	
PERMEABILIDAD SECUNDARIA: GRADO DE FACTURAMIENTO		MEDIO	KÁRSTICIDAD BAJO
GEOMORFOLOGÍA	ONDULADO		
TIPO DE SUELO	LUVISOL	ESPESOR (M) 60	USO DEL SUELO AGRICOLA
PRUEBA DE DILATANCIA	SI	PRUEBA DE "CONSISTENCIA CERCA DEL LÍMITE PLÁSTICO" SI	
TIPO DE VEGETACIÓN	AGRICULTURA	DENSIDAD DE LA VEGETACION MEDIA	
ANTECEDENTES	INUNDACION EN EL HURACAN ISIDORO EN EL 2002.		
CALLES Y COLONIAS AFECTADAS	HUNTOCHAC		
TIPO DE VIVIENDAS AFECTADAS	I		

OBSERVACIONES

8 VIVIENDAS FUERON LAS AFECTADAS.

REALIZO JUAN JOSE HERNANDEZ- ARLET CARDOSO

Figura 272. Formato de ficha de campo para recolectar información sobre inundaciones.

VIII.4.4. Análisis de Información y Generación de Mapas Base

Los factores que generan las inundaciones son un conjunto de análisis de influyen en la intensidad con que se manifiesta el fenómeno en cierta región y los efectos que tendrán en la sociedad. A continuación se describirán cada uno de los factores que se analizaron para llegar a la susceptibilidad.

Infiltración.

La infiltración es definida como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia dentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares (Aparicio Mijares F. J., 1989). Este parámetro se mide según la cantidad de agua que penetra en el suelo por unidad de tiempo y bajo condiciones de campo, disminuye conforme la cantidad de agua que haya entrado saturé el medio. Ésta es máxima al comenzar la aplicación del agua en el suelo (Martínez, 1981, en Jiménez, 2008) Figura 273.

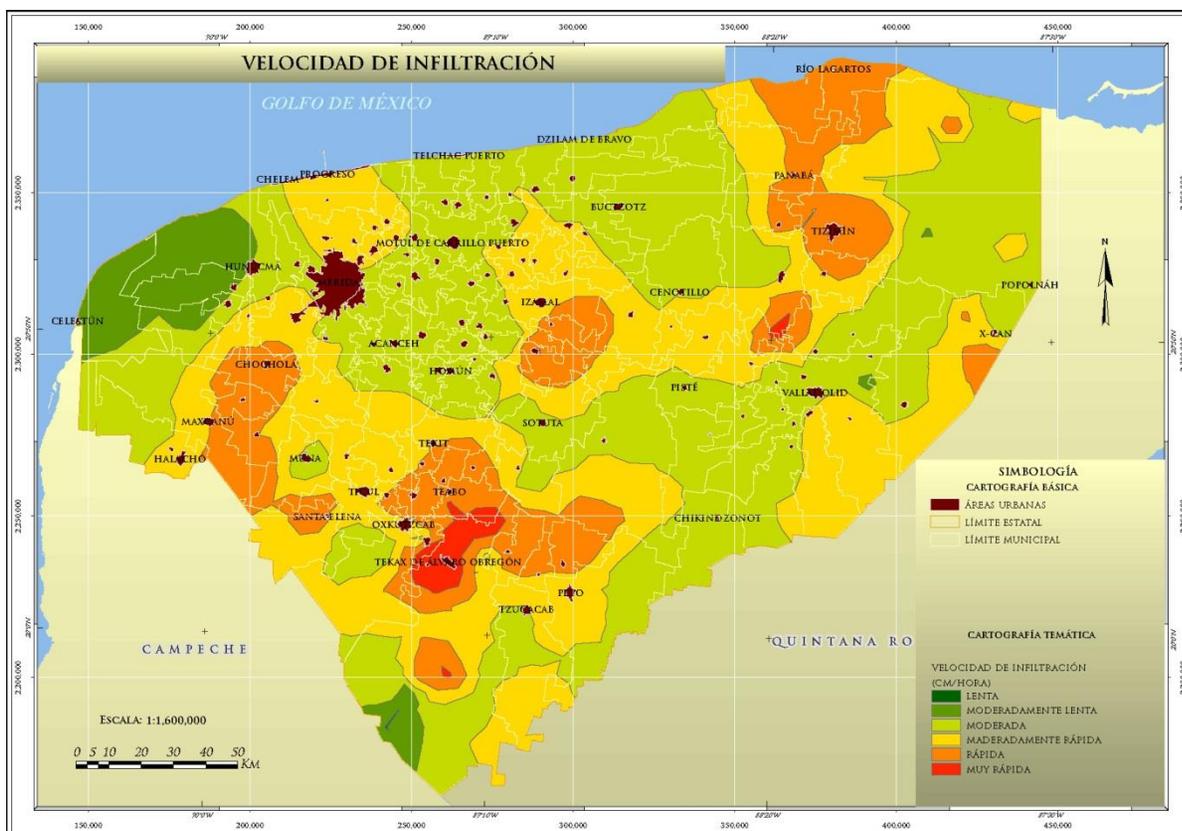


Figura 273. Mapa de infiltración

La capacidad de infiltración depende básicamente de la textura y la estructura del suelo. Otros factores, como la composición del agua, la vegetación o las labores agrícolas (arado) influyen también en esta variable. Básicamente se usan cuatro métodos para la determinación de la capacidad de infiltración:

- Infiltrómetros de cilindros
- Permeámetros de aire
- Balsas de inundación
- Infiltrómetros de simulación de lluvia.

Para este estudio se utilizó el método de infiltrómetros de cilindros, en el que fue necesario clavar en el suelo hasta 10 cm, un cilindro de 5 pulgadas de diámetro, y 50 centímetros de altura, se llena de agua hasta un nivel de 30 cm, mediante un sistema de medida (regla graduada) se calcula la velocidad, en el cilindro el descenso del agua con respecto a el tiempo (Moreno-Merino 2003). Su interpretación se realizó según la Tabla 126.

Tabla 126. Clasificación de la velocidad de infiltración

INFILTRACIÓN (cm/Hora)	INTERPRETACIÓN
< 0.1	Muy lenta
0.1 – 0.5	Lenta
0.5 – 2.0	Moderadamente lenta
2.00 – 6.3	Moderada
6.3 – 12.7	Moderadamente rápida
12.7 – 25.4	Rápida
>25.4	Muy rápida

Fuente: Física de suelos. IGAC. 1990 en Jiménez 2008.

Espesor del Suelo.

El espesor del suelo es un parámetro de suma importancia que determina el tamaño de la capa o estratos a saturar con lo que la infiltración del agua dependerá primordialmente de las rocas y sus condiciones de permeabilidad. Durante el paso de algún frente frío, huracán u otro fenómeno que genere lluvias continuas por algún periodo de tiempo determinado, la precipitación acumulada puede ser suficiente para saturar la capa de suelo y generar condiciones de inundación. En la Figura 274, se muestra mapa de espesor del suelo que fue elaborado a partir de 301 puntos de muestreos.

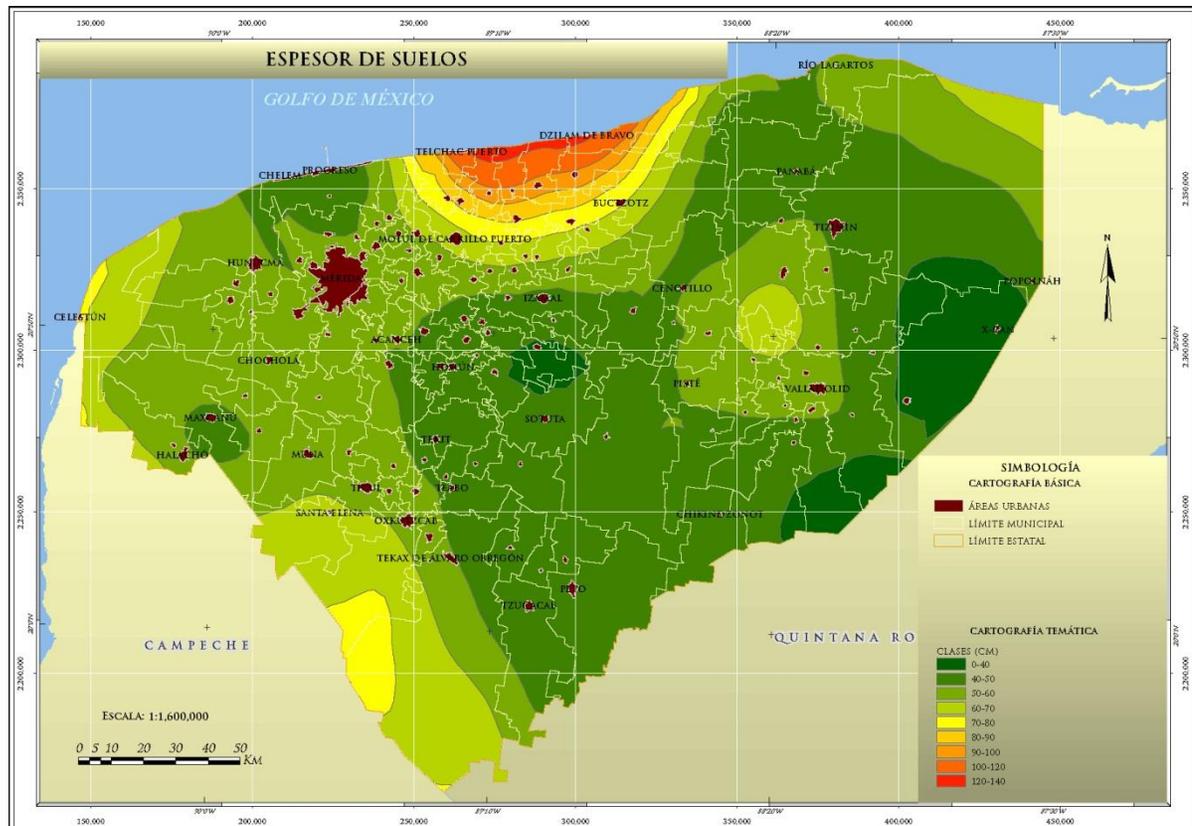


Figura 274. Mapa de espesor de la capa de suelo.

Zonas Planas en el Estado.

Las zonas planas de acumulación fueron calculadas principalmente para detectar zonas bajas en diferentes elevaciones con respecto a la configuración topográfica de su entorno, de tal manera que en el mapa se discriminan las planicies que se encuentran en zonas altas y con poca capacidad de acumulación de agua como son mesetas en contraste a las planicies que se encuentren en zonas bajas y con mayor capacidad de recibir agua de zonas vecinas. A. G. Palacio Aponte, 2005, denomina a estas zonas como planicies bajas acumulativas y explica que este factor es sumamente relevante en cuanto a inhibición de las escorrentías, por lo que la susceptibilidad de las inundaciones es correlacionable a dichas planicies, sobre todo ante la ocurrencia de lluvias intensas que se concentran en periodos de tiempo cortos y en cuencas donde el balance natural entre la escorrentía y la infiltración se han alterado (Figura 275).

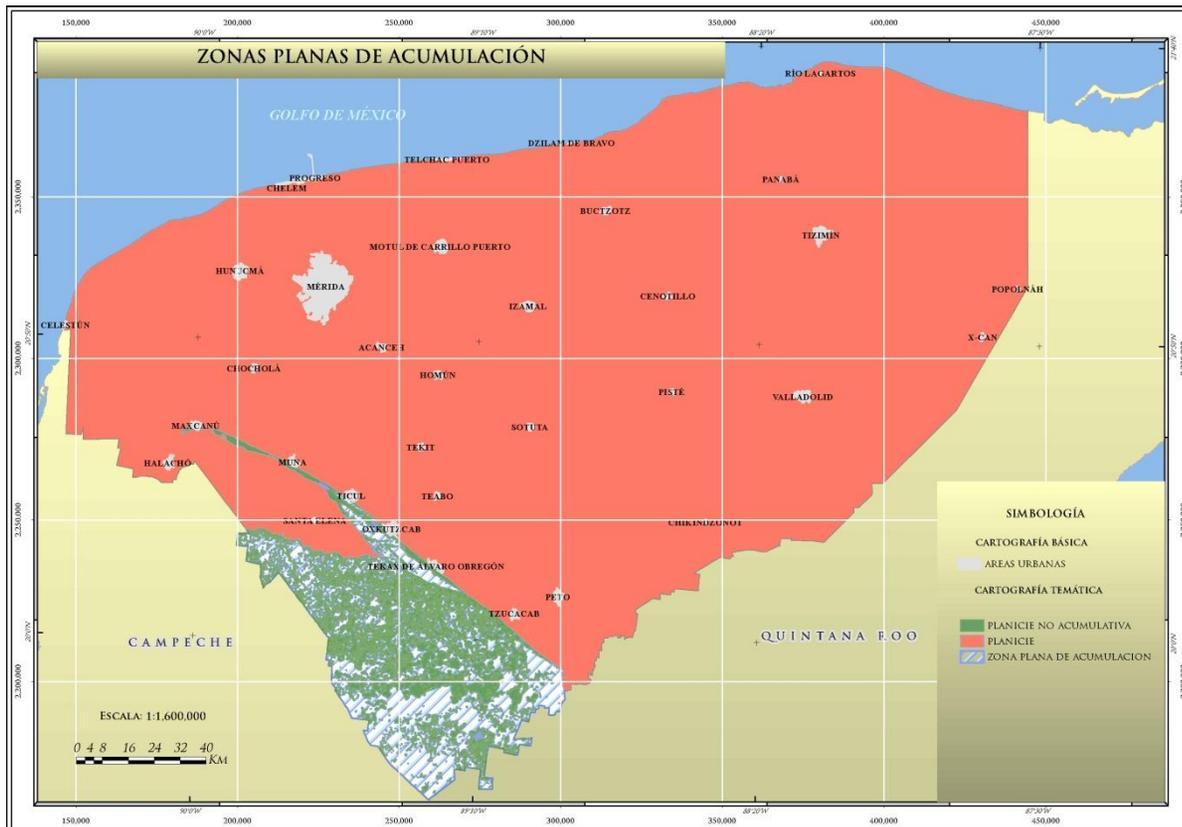


Figura 275. Mapa de zonas planas del Estado.

En la zona sur del Estado, donde se tienen las máximas elevaciones, se realizó la configuración del mapa de zonas planas, se utilizó el MDE en el cual se tomó el valor de las altitudes de mayor elevación de la Sierrita de Ticul, la altura máxima es de 215 metros sobre el nivel medio del mar (msnm), mientras que para la zona plana corresponden a altitudes de 15 msnm, por lo que mediante la calculadora *raster* se utilizó la fórmula "Seleccionar = (Pendientes < 10%) & (MDE <= X & MDE > Y)" se dividió en 20 partes de 10 metros cada clase, donde X es el valor de mayor altura y Y el dato de menor altitud del rango a analizar, cada selección se exportó y se depuró planicies que quedan en las cimas de estructuras elevadas como lomeríos, cerros barrancas, etc. De los polígonos obtenidos, se genera uno solo, que se denominó "Zonas planas de acumulación". En la Figura 276, se observa el detalle del análisis.

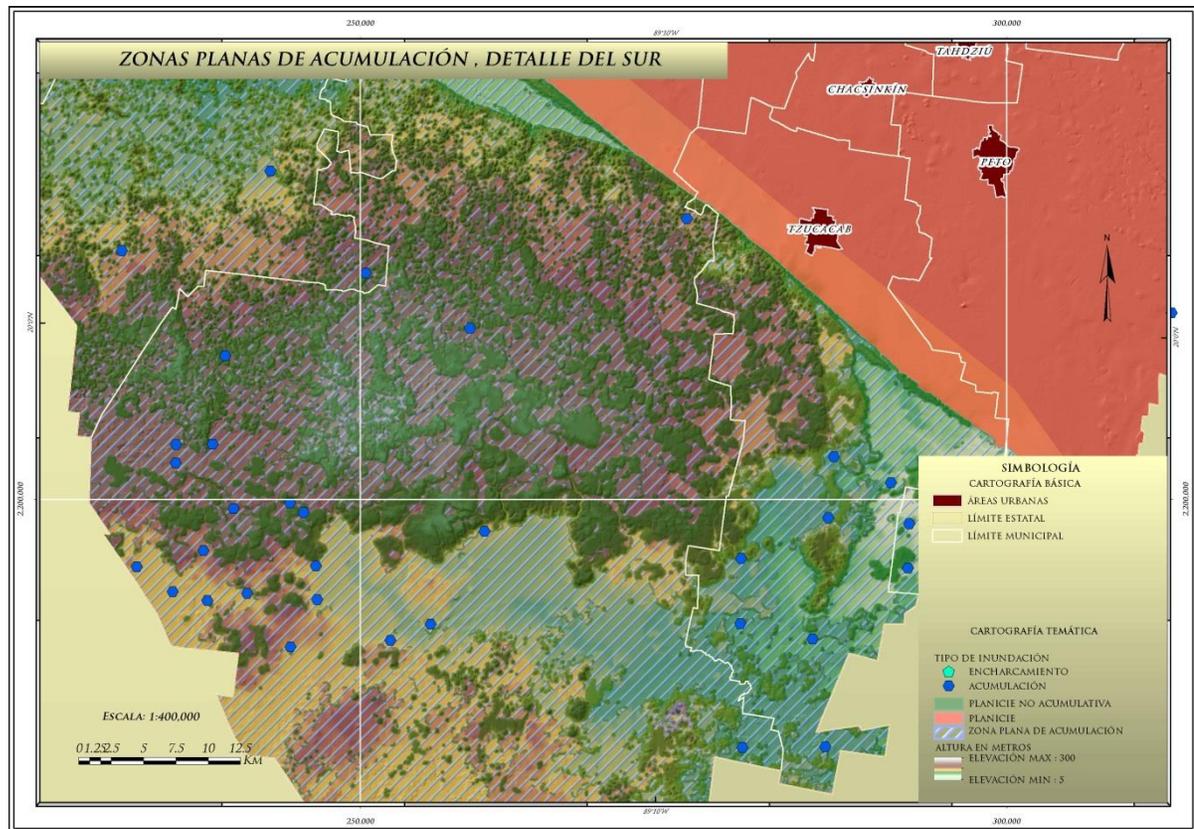


Figura 276. Detalle de las zonas planas del Estado, mostrando los municipios de Tekax y Tzucacab.

Densidad de dolinas y grado de Fracturamiento

Para el caso de permeabilidad secundaria de la roca en el presente estudio se ponderó a partir de los mapas de “Grado de fracturamiento” y “Densidad de dolinas”, dichos mapas fueron desarrollados y se pueden consultar en los niveles de información correspondientes a “Fallas y fracturas” y “Hundimientos” respectivamente.

Se toman estos parámetros debido a que en cuanto se satura de agua el suelo, dependerá principalmente del macizo rocoso la infiltración o estancamiento. En cuanto a geología se refiere, la mayor parte del Estado se compone principalmente de calizas del periodo terciario, sin embargo, la falta de arcillas y margas del Terciario superior sobre la caliza provoca que en periodos de lluvias se infiltre rápidamente el agua (García y Graniel, 2010). Estos autores también explican que en los primeros 220 m de espesor se encuentra una unidad de roca de buena permeabilidad, secuencia que es seguida por una serie de capas impermeables de espesores considerables, y que en resultado la estratigrafía favorece la ausencia de cursos de aguas superficiales, ésto debido a que las lluvias saturan el terreno, colman el bajo relieve y se infiltran al subsuelo, dando origen a las aguas subterráneas en estructuras kársticas (García Gil *op. cit.*, 2010.).

Por otro lado las fallas y fracturas son conductos de agua lo cual genera disolución de la roca caliza y en su conjunto aumentan la permeabilidad como se explica en el trabajo de Bautista, F. et. al. (2005). Este punto de vista es compartido por Kauffer Michel, (2011), que explica que en terrenos calcáreos, generalmente de origen marino, se forman oquedades a partir de fisuras, grietas o fracturas. El agua filtra las rocas que son especialmente vulnerables a la disolución. Con el paso del tiempo las oquedades son ensanchadas, con lo cual se facilita cada vez más la circulación del agua.

Pendientes.

Para el mapa de pendientes, A. G. Palacio Aponte et. Al. (2005), menciona que las pendientes menores a 6% son clasificadas como planas, sin embargo para el presente estudio, se necesitó ampliar el rango a 7% ya que es en este rango donde se rompe con la inclinación de las geoformas características del Cono Sur, por otro lado, este límite de clase facilita la configuración de polígonos que a la escala base 1:250,000 sean representativos, según el trabajo de Priego et. Al. (2010). De esta clasificación resulta la ponderación correspondiente a zonas de pendiente escasa que permitan la acumulación de cuerpos de agua. El cálculo se realizó en porcentaje a partir del MDE del Estado y considerando dos clases: pendientes de cero a 7% y mayores a 7% (Figura 277).

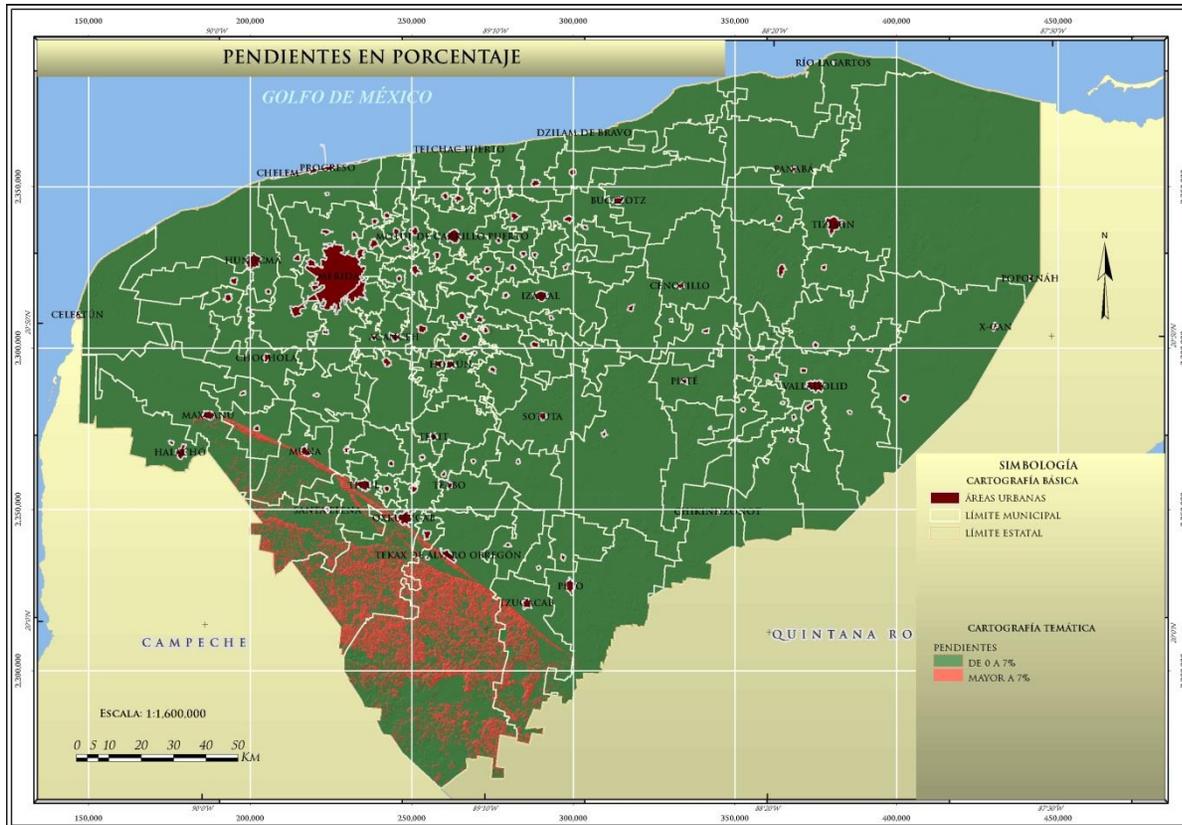


Figura 277. Mapa de pendientes.

Coeficiente de Escurrimiento

También se analizó el mapa de coeficiente de escurrimiento del Estado elaborado por INEGI. En la NOM-011-CNA-2000 referente a la conservación del agua publicada en el Diario Oficial de la Federación el miércoles 17 de abril de 2002, se establece que el coeficiente de escurrimiento puede ser calculado en función del tipo y uso de suelo, y del volumen de precipitación anual, de la cuenca en estudio, además de poder utilizar como apoyo los servicios del INEGI. Los valores del coeficiente de escurrimiento de dicho mapa son tomados en cuenta como un indicativo del estancamiento de agua (Figura 278).

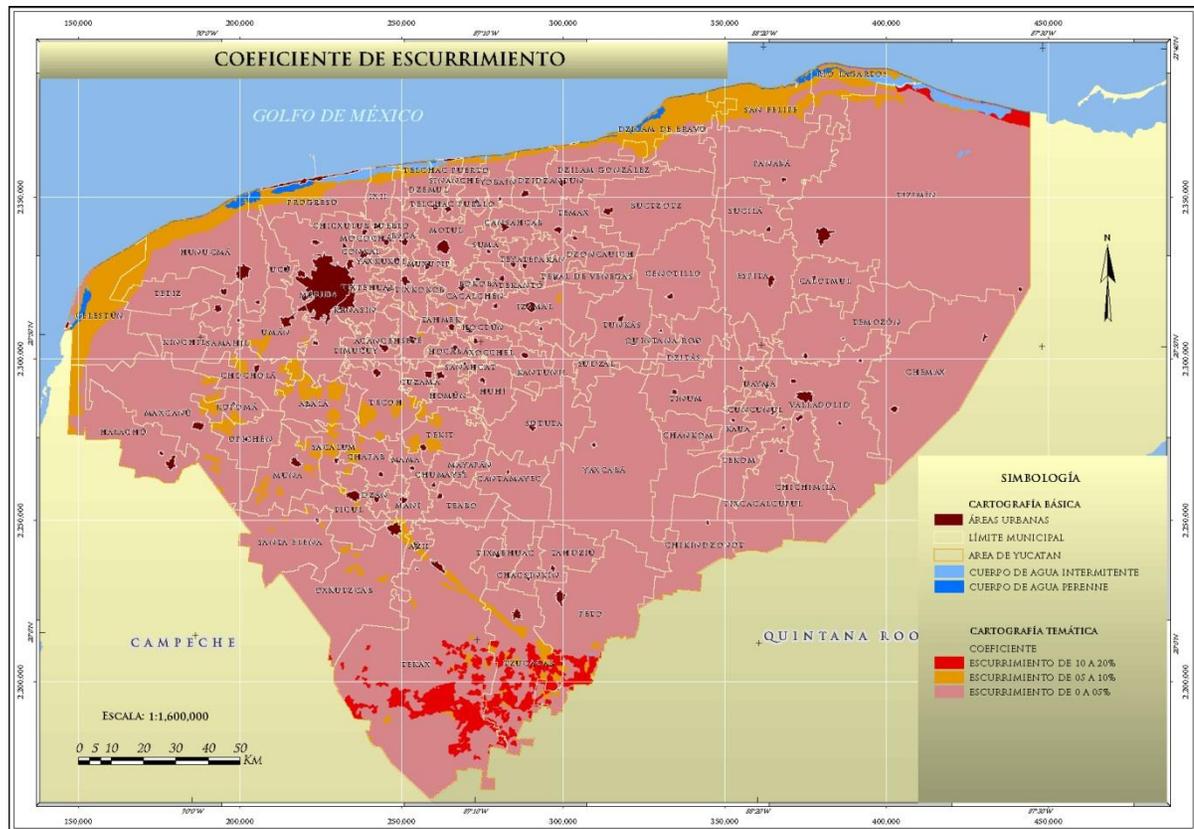


Figura 278. Mapa de Coeficiente de Escurrimiento de INEGI.

PERIODOS DE RETORNO.

En general las lluvias de alta intensidad se presentan frecuentemente en periodos de tiempo cortos; consecuentemente, desarrollan una mayor capacidad para inundar los suelos. La combinación entre alta intensidad y larga duración ocurre con poca frecuencia, pero cuando sucede, resulta una tormenta de gran magnitud con alto riesgo de inundación. (Palacio *et al.*, 2005) El objetivo de estos mapas es mostrar cada cuando pueden ocurrir precipitaciones extraordinarias que puedan ser asociadas con inundaciones. Como se muestra en la tabla número 2 “Eventos meteorológicos que causaron afectaciones en el estado de Yucatán” localizada en el apartado de antecedentes.

Los mapas que se tomaron como referencia, fueron los elaborados por CENAPRED y que se encuentran disponibles en: <http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/12122006/Capitulo/anexoss.pdf> según la metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas. Contienen las intensidades que puede alcanzar un evento de lluvia, en distintos intervalos de tiempo y también en periodos de retorno, en cualquier punto del Estado, conforme el periodo de retorno sea mayor, la probabilidad de ocurrencia es menor. En éstos se observan periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1 000, 2 000, 5 000 y 10 000 años, con duraciones de una y de 24 horas (Figuras de 279 a 284).

En la Figura 279 se muestran las isoyetas de intensidad máxima de eventos de lluvias de 1 hora de duración con periodos de retorno de 2, 5, 10 y 20 años, con un rango de lluvias de 30 a 45 mm, de 45 a 65 mm, 60 a 100 mm y de 110 a 160 mm, respectivamente; es decir, cuando se habla de una frecuencia o periodo de cinco años, se espera que la magnitud de precipitación sea igualada o superada una vez cada cinco años. En los mapas, las configuraciones muestran los rangos de valores en varias tonalidades de color azul, donde las zonas claras indican los valores bajos y las zonas oscuras los valores altos.

Como se puede observar la tendencia general de los diferentes periodos de retorno indican que en la zona de costa los valores son menores, en la zona central intermedios, mientras que en las zonas limítrofes con los estados de Campeche y Quintana Roo se tienen los valores máximos. De manera más local, las zonas con mayor intensidad de lluvia y que podrían tener mayor afectación corresponderían a los municipios de Celestún, Peto, Valladolid y Temozón (Figura 279 a y b), Tekax, Tzucacab (Figura 279 c) y Halacho (Figura 279 d). Los de menor intensidad son Hunucmá, Dzempl, Telchac Puerto, Sinanché, Yobaín, dzindzantún, Dzilam de Bravo, San Felipe y Río Lagartos.

Con lo que respecta a la Figura 280, las isoyetas de intensidad máxima de eventos de lluvias de 1 hora de duración con periodos de retorno de 50, 100, 200 y 500 años, con un rango de lluvias de 70 a 120 mm, de 80 a 140 mm, 80 a 160 mm y de 100 a 180 mm, respectivamente; es decir, cuando se habla de una frecuencia o periodo de cincuenta años, se espera que la magnitud de precipitación sea igualada o superada una vez cada cincuenta años.

Para este caso, la tendencia general de los diferentes periodos de retorno es similar a los de la figura 279. Sin embargo, ahora de manera más local, las zonas con mayor intensidad de lluvia y que podrían tener mayor afectación corresponderían a los municipios de Halachó, Chemax y Tizimín (Figura 280 a y b), Celestún, Maxcanú, Santa Elena, Valladolid, Chichimilá, Tixcacalpulul, Chikindzonot, Peto y Tzucacab (Figuras 280 c y d). Los de menor intensidad son Hunucmá, Progreso, Ixil, Dzempl, Telchac Puerto, Sinanché, Yobaín, Dzidzantún, Dzilam de Bravo, Dzilam González, San Felipe y Río Lagartos.

Finalmente, la Figura 281 muestra las isoyetas de intensidad máxima de eventos de lluvias de 1 hora de duración con periodos de retorno de 1,000, 2,000, 5,000 y 10,000 años, con un rango de lluvias de 100 a 200 mm, de 240 a 480 mm, 120 a 260 mm y de 120 a 260 mm, respectivamente; es decir, cuando se habla de una frecuencia o periodo de mil años, se espera que la magnitud de precipitación sea igualada o superada una vez cada mil años.

Al igual que en las configuraciones la tendencia general de los diferentes periodos de retorno indica que en la zona de costa los valores son menores, en la zona central intermedios, y en las zonas limítrofes con los estados de Campeche y Quintana Roo se tienen los valores máximos. De manera más local en este caso, las zonas con mayor intensidad de lluvia y que podrían tener mayor afectación corresponderían a los municipios de Halachó, Maxcanú, Celestún, Tizimín, Chemax y Peto (Figura 281 a y b), Tekax, Tzucacab, Chikindzonot, Tixcacalpulul, Chichimilá, Valladolid (Figuras 281 c y d). Los de menor intensidad son Hunucmá, zona norte de Tizimín y San Felipe.

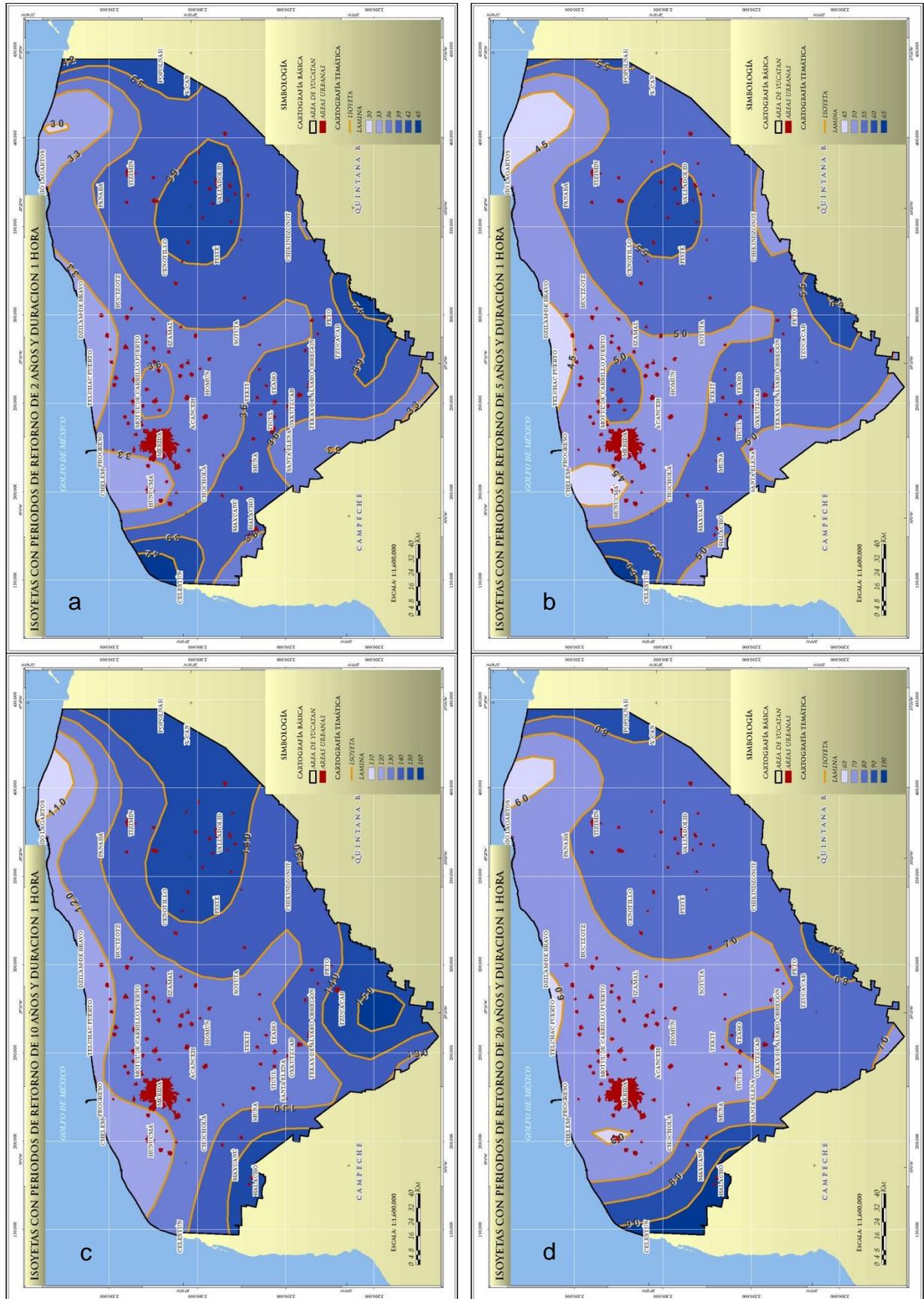


Figura 279. Periodos de retorno de 2, 5, 10 y 20 años con duración de una hora.

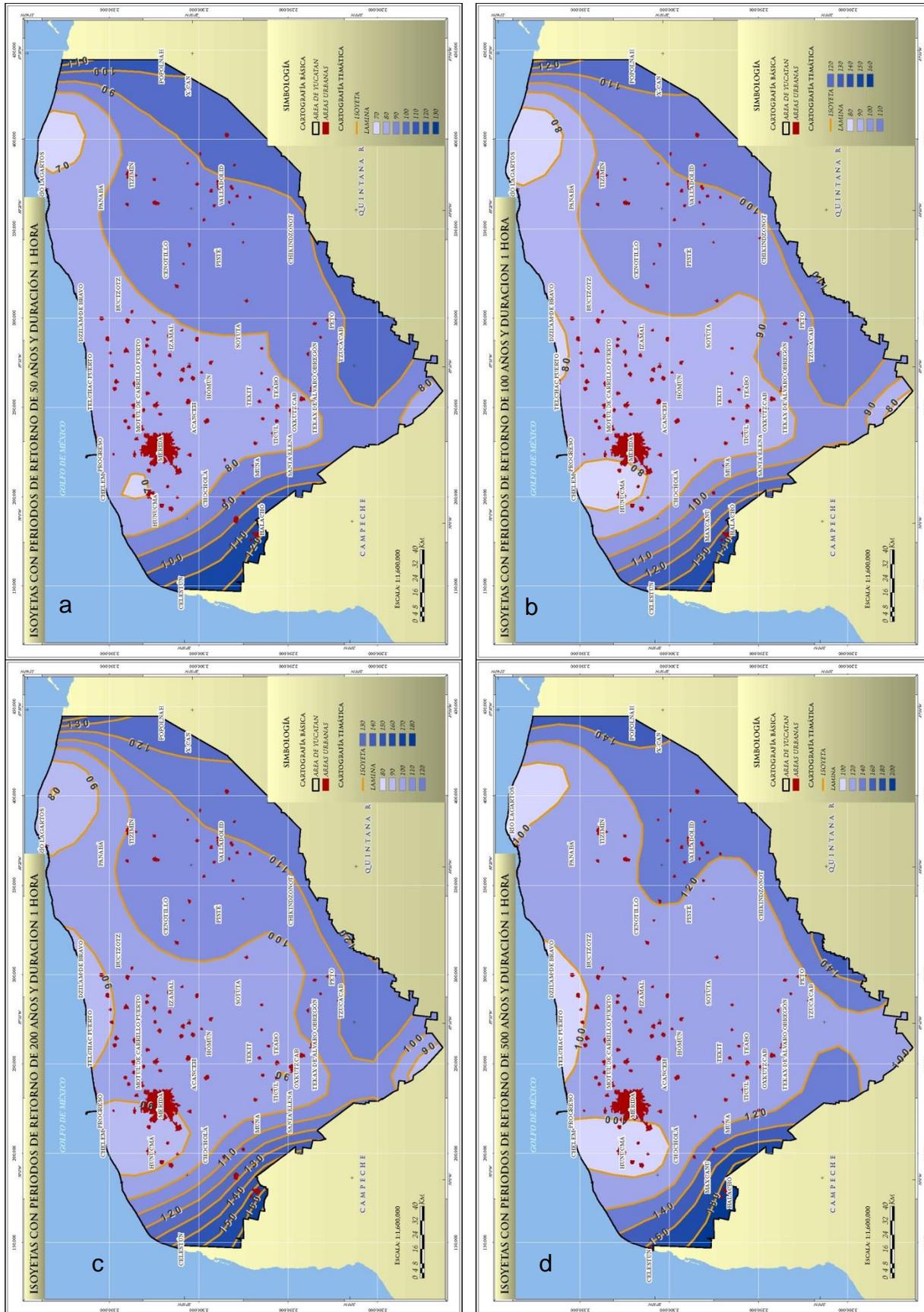


Figura 280. Periodos de retorno de 50, 100, 200 y 500 años con duración de una hora.

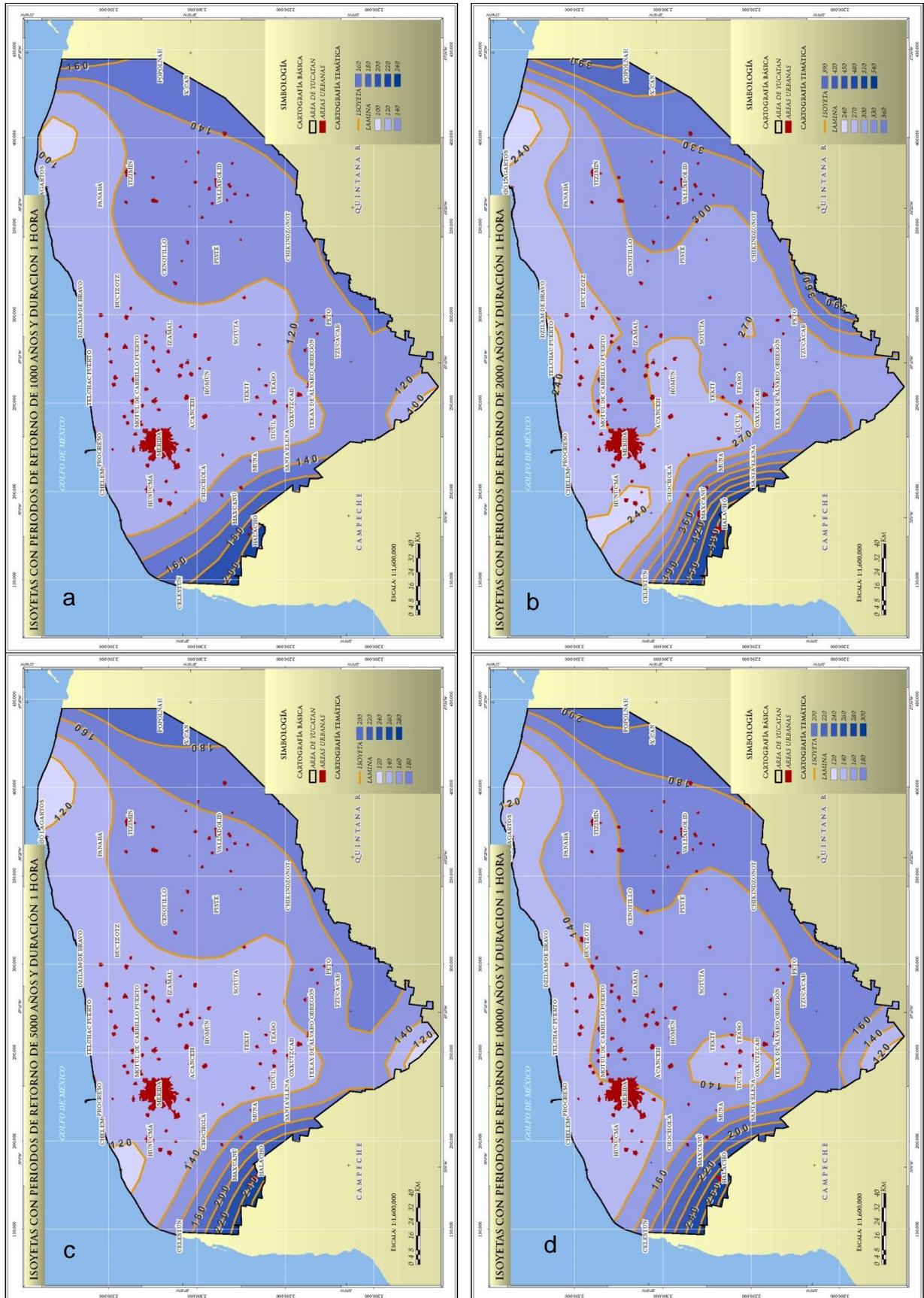


Figura 281. Periodos de retorno de 1000, 2000, 5000 y 10 000 años con duración de una hora.

Con lo que respecta a los eventos de lluvias de 24 horas de duración, en la Figura 282. Se muestran las isoyetas de intensidad máxima con periodos de retorno de 2, 5, 10 y 20 años, con un rango de lluvias de 65 a 90 mm, de 90 a 120 mm, 110 a 150 mm y de 120 a 160 mm, respectivamente; es decir, cuando se habla de una frecuencia o periodo de cinco años, se espera que la magnitud de precipitación sea igualada o superada una vez cada cinco años. Siguiendo la misma tendencia de los mapas de una hora, las zonas con polígonos de color azul claro indican los valores más pequeños y los colores azules oscuros valores más grandes.

La tendencia general de los diferentes periodos de retorno indica que en la zona de costa los valores son menores, en la zona central en forma gradual se alcanzan los valores intermedios, mientras que en las zonas limítrofes con los estados de Campeche y Quintana Roo se tienen los valores máximos.

Como puede observarse en las figuras, para el periodo de retorno de dos años se observan tres sitios en los que se esperan mayores precipitaciones, los cuales corresponden a: el área delimitada por las localidades de Maxcanú y Muna, al sur del municipio de Tzucacab se encuentra otro sitio mas y la tercero abarca las localidades de Cenotillo, Pisté, Valladolid, X-can y Popolnáh. Para el periodo de retorno de cinco años, también se observan tres sitios en los que se esperan mayores precipitaciones, a diferencia del periodo de dos años, la primer zona es de mayor extensión abarcando las poblaciones de Muna, Maxcanú y el Oriente de Halachó, la segunda también crece en extensión, llegando hasta Tzucacab y por último en las inmediaciones de Cenotillo, Pisté y Valladolid se extiende el tercer sitio excluyendo a X-can y Popolnáh.

Con lo que respecta a los periodos de retorno de 10 y 20 años, se mantiene la tendencia de presentarse las precipitaciones menores a lo largo de la zona costera, valores medios en el centro del Estado y presentar tres sitios de valores mayores los cuales se ubican en zonas limítrofes, el primer sitio se extiende desde Halachó y Maxcanú hacia los límites de Campeche, el segundo se encuentra al Sur de los municipios de Peto y Tzucacab y por último el tercer sitio que comprende las localidades de Cenotillo, Pisté, Valladolid, X-can y Popolnáh

En la Figura 283 se muestran las isoyetas de intensidad máxima de eventos de lluvias de 24 horas de duración con periodos de retorno de 50, 100, 200 y 500 años, con un rango de lluvias de 140 a 260 mm, de 160 a 320 mm, 175 a 350 mm y de 200 a 425 mm, respectivamente; es decir, cuando se habla de una frecuencia o periodo de cincuenta años, se espera que la magnitud de precipitación sea igualada o superada una vez cada cinco años.

Al igual que en los mapas anteriores, las configuraciones muestran tonalidades claras en zonas donde los valores son bajos y tonalidades oscuras en zonas donde los valores son altos. Como se puede observar la tendencia general para estos periodos de retorno indican que en la zona de costa los valores son menores, en la zona central en forma gradual aumentan los valores, sin embargo, en las zonas limítrofes con los estados de Campeche y Quintana Roo se tienen valores que van de intermedios a los máximos.

En la Figura de periodo de retorno de cincuenta años, se observa que en la parte norte se presentan los valores menores, mientras que los mayores se ubican al Poniente y Oriente del Estado, la parte Poniente comprende desde la población de Maxcanú y se extiende hacia el estado de Campeche, por otra parte desde la porción limítrofe con Quintana Roo hasta las inmediaciones de Valladolid se presenta otra zona de valores máximos. En el mapa de periodos de retorno de 100, se observa una distribución similar sin embargo hacia el sur de del municipio de Peto se aprecian valores mayores donde las isoyetas marcan valores de hasta 260 mm.

En los periodos de retorno de 200 y 500 años, se presenta una franja a lo largo de la costa en las que se presentan las precipitaciones menores, el centro del Estado solo se diferencia de esta franja por aumentar hasta dos clases, que representan en total 50 mm más que en la costa. En la figura c se presenta una zona de valores mayores en los alrededores de Popolnáh y los máximos en la localidad limítrofe de Halachó donde los valores corresponden a 325 mm.

Por último, en la Figura 284. se pueden observar isoyetas de intensidad máxima de eventos de lluvias de 24 horas de duración con periodos de retorno de 1000, 2000, 5000 y 10000 años, con un rango de lluvias de 210 a 450 mm, de 240 a 510 mm, 270 a 570 mm y de 280 a 600 mm, respectivamente.

En la Figura de periodo de retorno de 1000 años, se observa que a lo largo de la costa se distribuye una franja donde se esperan los menores rangos de precipitación, en el interior del Estado se esperan precipitaciones que van de los 240 mm a los 300 mm quedando comprendido la mayor parte de Yucatán, mientras que en zonas limítrofes del Oriente se esperan los valores máximos que equivalen a rangos de 360 mm en los alrededores de Popolnáh y X-can, por último en la zona Poniente a la altura de Halachó se esperan precipitaciones de 450 mm.

En la configuración del periodo de retorno de años, también se observa que al Norte del Estado se presenta una franja donde corresponden los valores menores, sin embargo a diferencia del mapa de 1000 años, en esta se aprecian tres zonas de valores menores, la primera ubicada desde el sur de Hunucmá hasta la costa, la segunda que abarca Telchac Puerto y Dzilam de Bravo, y la tercera zona que está ubicada al Este de Río Lagartos. En estas áreas se espera que la precipitación sea aproximadamente de 240 mm.

Para los periodos de retorno de 5000 y 10000 años, al igual que en las configuraciones de las figuras anteriores, se observan tres zonas a lo largo de la costa en las que se presentan las precipitaciones menores, el centro del Estado solo se diferencia de estas por aumentar tres clases. También en estas figuras se presenta una zona de valores mayores en los alrededores de Popolnáh de 420 y 440 mm para las figuras c y d respectivamente y mientras que los máximos en la localidad limítrofe de Halachó donde los valores corresponden a 510 y 560 mm.

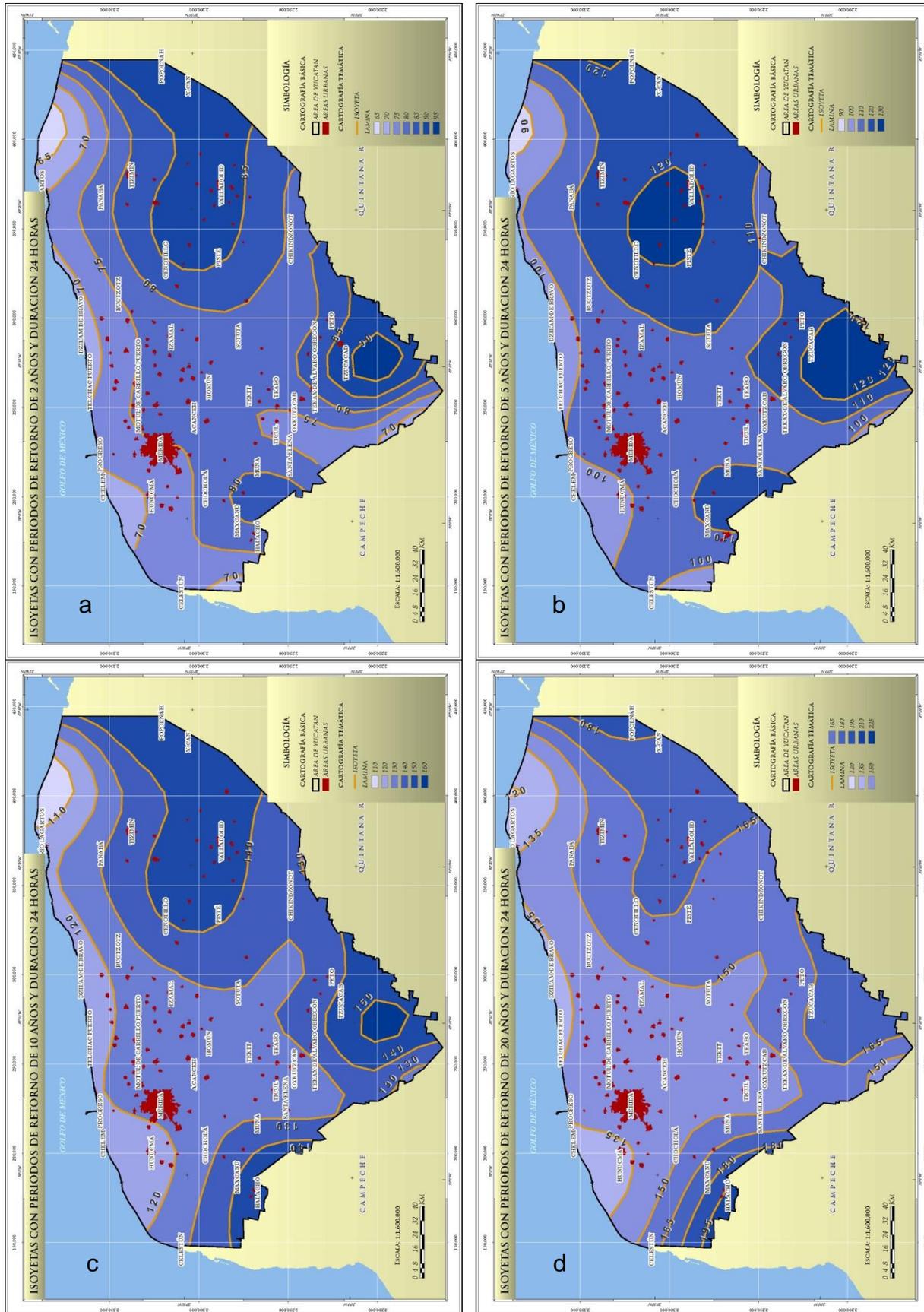


Figura 282. Periodos de retorno de 2, 5, 10 y 20 años con duración de 24 horas.

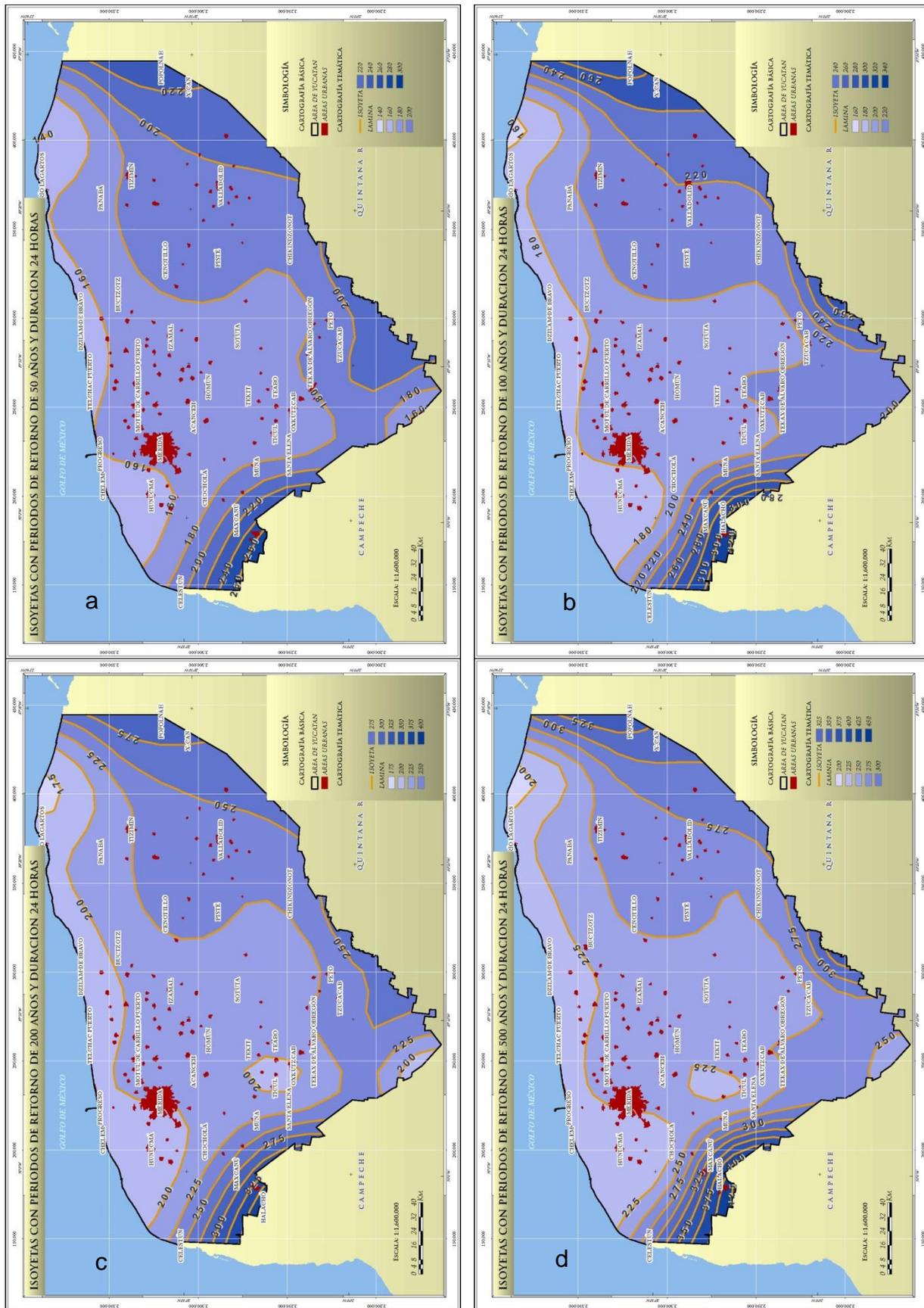


Figura 283. Periodos de retorno de 50, 100, 200 y 500 años con duración de 24 horas.

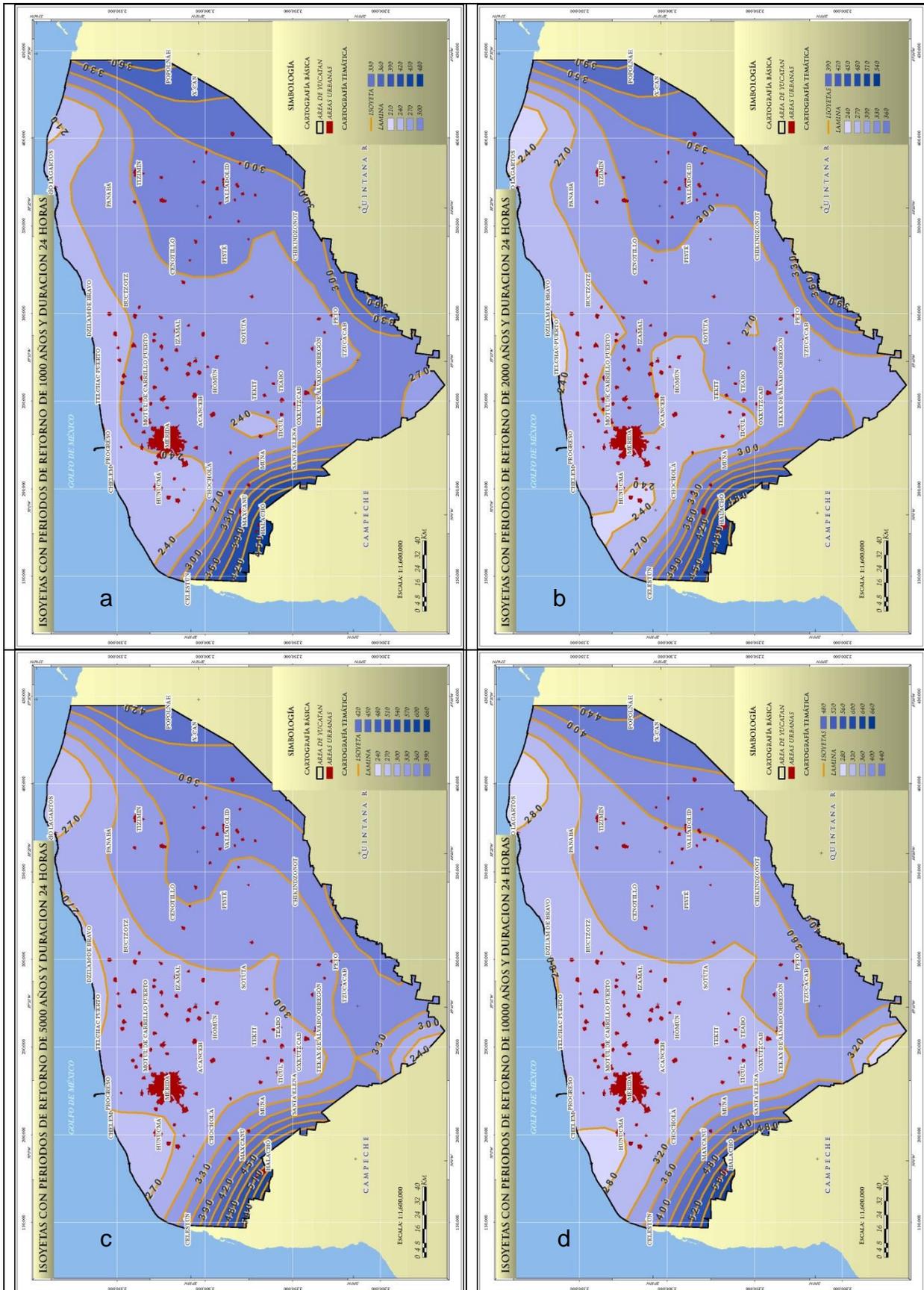


Figura 284. Periodos de retorno de 1000, 2000, 5000 y 10,000 años con duración de 24 horas.

VIII.4.5. Descripción e interpretación de datos tomados en campo

Se hizo un recorrido general del Estado, a partir del cual se identificaron y cartografiaron las zonas urbanas que han sido afectadas por inundaciones, dicho levantamiento se llevó a cabo a partir de la visita de campo y la zonificación cartografiada por las instituciones de Protección Civil y CONAGUA, quienes tienen ya detectadas algunas áreas donde se han presentado inundaciones ocasionadas por fenómenos extraordinarios, también se verificó sitios referidos en antecedentes bibliográficos, finalmente, se obtuvieron en total 287 sitios, de estos puntos 181 corresponden a acumulación, 90 para encharcamientos y 16 para marea de tormenta. Todos estos puntos verificados se distribuyen en 48 cartas topografías 1:50,000.

Regionalización

Para este análisis se clasificó al territorio en tres zonas según la distribución de los diferentes tipos de inundaciones que se presentan en la Entidad, dichas clasificaciones corresponden a la “Zona Costera” que comprende áreas afectadas por inundaciones costeras; “Zona Plana” en la que se presentan principalmente encharcamientos asociados a zonas urbanas; y “Zona Sierra de Ticul” la cual se presentan inundaciones por acumulación en zonas bajas Figura 285.

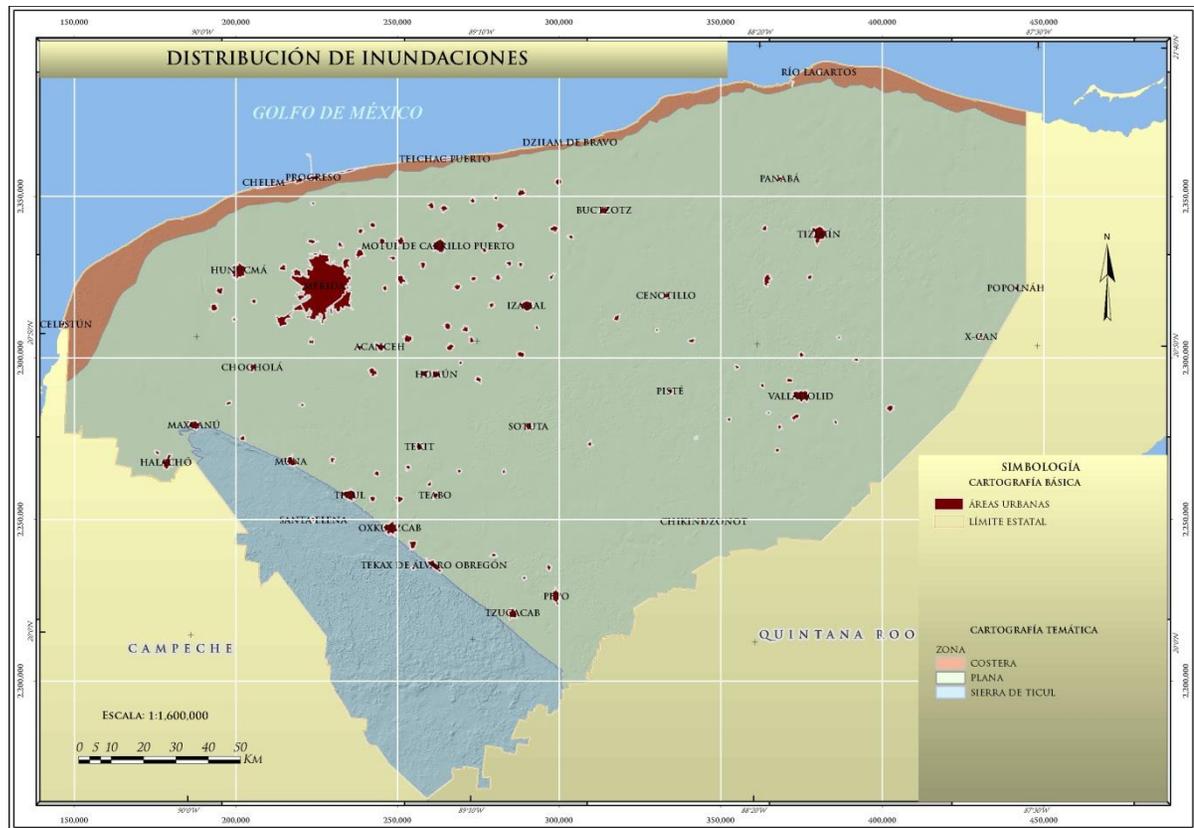


Figura 285. Zonificación del Estado según el tipo de inundaciones que ocurren.

Zona Costera

Una de las características que predominan en el Estado es, el carecer de un relieve muy abrupto, al contrario, al ser en su mayoría plano, puede presentar inundaciones importantes. En la zona costera las inundaciones a causa de los efectos de fenómenos hidrometeorológicos extremos, son favorecidas debido a que se conjuntan varios factores tales como, una pendiente reducida en playas, la ausencia de barreras artificiales, el poco sedimento de la costa, la fuerza de los vientos, la cantidad de lluvia, la fuerza del oleaje y por último, su ubicación respecto al paso de ciclones.

Lo anterior, marca que la zona ofrece poca o ninguna resistencia a que el agua marina invada gran parte de la línea de costa cuando alguno de esos eventos ocurre. En algunas zonas costeras se tiene una franja angosta de Estero, entre éste y el mar abierto, hay una porción de arenas que sirve de barrera natural para protección al avance del mar.

Los asentamientos humanos se han establecido en la franja de tierra comprendida entre el mar abierto y las dunas, pantanos y/o humedales. En algunos sitios incluso se han invadido, por medio de relleno, las zonas de las ciénegas o humedales para tener mayor superficie para viviendas.

De la regionalización o clasificación realizada para la descripción de los trabajos de campo, se tiene que, el área que comprende la zona costera corresponde a 1,427 Km², distribuida en trece municipios listados en la Tabla 127. En cuanto a extensión territorial con respecto a la zona costera, podemos observar que el municipio con mayor superficie es Celestún con un 27% del territorio, le siguen, Hunucmá y Progreso con 16 y 12%, respectivamente, Tizimín y Río Lagartos con un 11% el 22% restante corresponde a nueve municipios con superficies menores al 10% de la superficie costera (Figura 286).

Tabla 127. Distribución de los municipios por el área que ocupan.

MUNICIPIO	ÁREA (Km ²)	MUNICIPIO	ÁREA (Km ²)	MUNICIPIO	ÁREA (Km ²)
Celestún	413.04	Dzilam De Bravo	148.96	Telchac Puerto	21.62
Hunucmá	246.11	San Felipe	92.25	Dzidzantún	18.80
Progreso	182.46	Dzemul	29.63	Yobain	16.53
Tizimín	177.35	Ixil	28.89	Sinanché	9.77
Río Lagartos	167.12				
TOTAL					1552.53

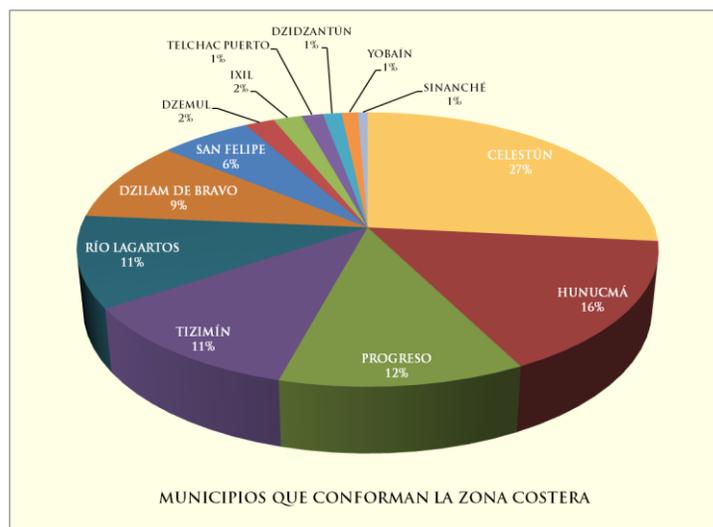


Figura 286. Porcentaje de superficie municipal de la zona costera

Durante las verificaciones de campo se pudieron obtener referencias variadas tanto de la población entrevistada, de autoridades locales y de personal de Protección Civil de cada sitio, mismas que se referirán más adelante, dentro de este apartado.

En la zona costera del Estado, se identifica que los principales tipos de inundación son a causa de la marea de tormenta y por fenómenos hidrometeorológicos extremos (lluvias extremas). Para poder determinar las áreas con mayor probabilidad de ser afectadas por inundaciones, se realizó una reclasificación del relieve, identificando zonas relativamente altas y zonas bajas, así como depresiones en el terreno, con la ayuda de imágenes y la verificación de campo.

El total de puntos verificados en campo para esta zona es de 28 puntos distribuidos a lo largo de la línea costera (Tabla 128). Con la finalidad de mostrar con un poco más detalle la problemática en esta zona, la descripción de los sitios relevantes se divide en tres porciones, la primera comprendida por los municipios de Celestún, Hunucmá y Progreso (Costa Oeste); la segunda por Telchac Puerto, Sinanché, Yobaín, Dzidzantún y Dzilam de Bravo (Costa Centro); por último la tercera constituida por los municipios de San Felipe, Río Lagartos y Tizimín (Costa Este).

Tabla 128. Sitios verificados en campo con problemas de inundación en la zona costera.

DIVISION PARA DESCRIPCIÓN	MUNICIPIO	LOCALIDAD	PUNTO	TIPO DE INUNDACIÓN	NIVEL MÁXIMO QUE ALCANZA EL AGUA (METROS)	
Costa Oeste	Celestún	Col. Centro	YIB7011	Acumulación	0.90	
		Felipe Carrillo	YIB7012		1.00	
		Los Pescadores	YIB7014		1.00	
		Puerto de Abrigo	YIB7013		1.00	
		Chichitos	YIB7015	Marea de Tormenta	0.25	
	Hunucmá	Los Gatos	YIB7016		1.50	
		Progreso	Chuburná	YIB7019	0.30	
			YIB7020	Acumulación	0.40	
	Chelem		YIB7021	Marea de Tormenta	0.50	
	Progreso		YIB7022	Acumulación	0.60	
	Nuevo Yucalpeten		YIB7018	Marea de Tormenta	0.40	
	Vicente Guerrero		YIB7017	Acumulación	0.40	
	Costa Centro	Telchac Puerto	Telchac Puerto	YIB4010	Marea de Tormenta	1.20
			YIB4011	Acumulación	1.00	
Sinanché		Sancri santo	YIB4012	Marea de Tormenta	1.20	
Yobaín		Chabihau	YIB4013		1.20	
Dzidzantún		Santa Clara	YIB4008		2.30	
Dzilam de Bravo		Dzilam de Bravo		YIB4004	Encharcamiento	0.20
				YIB4005	Marea de Tormenta	1.00
				YIB4006		0.30
			Pueblo Nuevo	YIB4007	Acumulación	0.50
Costa Este	San Felipe	San Felipe	YIB7010	Marea de Tormenta	0.80	
	Río Lagartos	Río Lagartos	YIB7009		0.30	
		Las Coloradas	YIB7008		0.20	
	Tizimín	El Cuyo			YIB7001	0.80
					YIB7002	Acumulación

De manera general, la zona costera desde Celestún hasta el Cuyo, abarcando 15 Km desde el inicio del litoral y tierra adentro, se encuentra en peligro por avance del mar y suelen quedar incomunicados pues el fuerte oleaje erosiona las vías de comunicación e interrumpe todos los servicios (CONAGUA, 2006).

Referido a las costas, los Puertos de Chelem, Chicxulub, Chuburná, Celestún, así como Progreso han sufrido el embate de las olas y el avance del mar provocando que el área cercana a la playa quede dañada, así como la mala planeación urbana y la construcción de obras que alteran el estado natural de estos sitios.

Costa Oeste. Como se ha venido mencionando a lo largo del apartado de inundación, la zona costera se caracteriza por tener una pendiente de playa reducida, que entre el mar abierto y el litoral no hay barrera que impida el impacto del oleaje cuando se presenta un evento extremo.

En la verificación realizada en campo se obtuvieron para esta zona 14 puntos de los cuales se hará referencia a aquellos que, por sus efectos o el nivel del agua que alcanzaron son de relevancia. En la Figura 287 se puede apreciar que tipo de inundación se ha presentado, el nivel de agua que ha alcanzado y el sitio de la inundación.

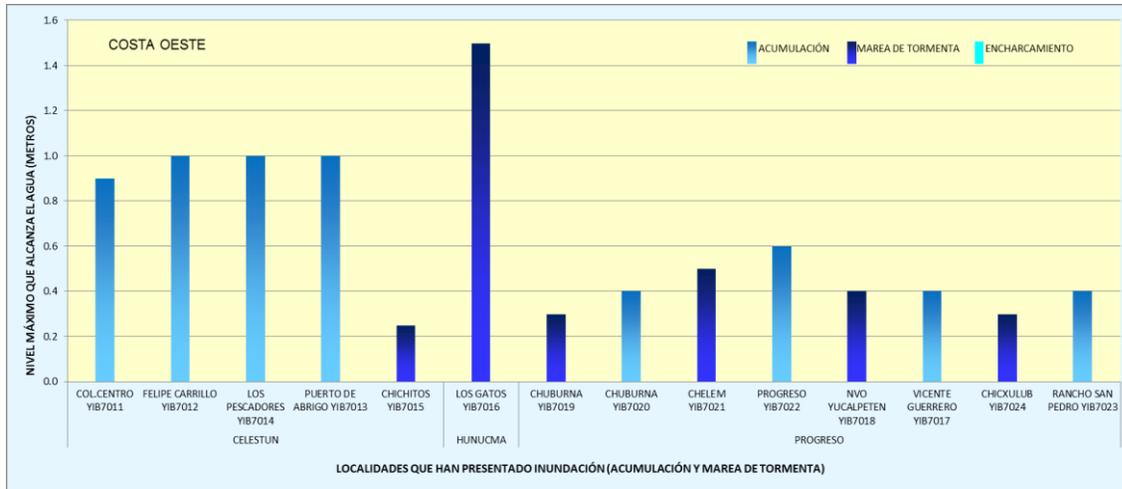


Figura 287. Altura de agua durante inundación en la zona costera de Celestún, Hunucmá y Progreso.

De los 3 municipios que abarcan esta zona (Figura 288), Celestún es el único que está orientado hacia la parte de la Sonda de Campeche hacia el Oeste del Estado, lo que lo convierte en el menos vulnerable a los fenómenos hidrometeorológicos que se introducen por el Mar Caribe y el Golfo de México, aunque no por los que se forman en la Sonda Campeche.

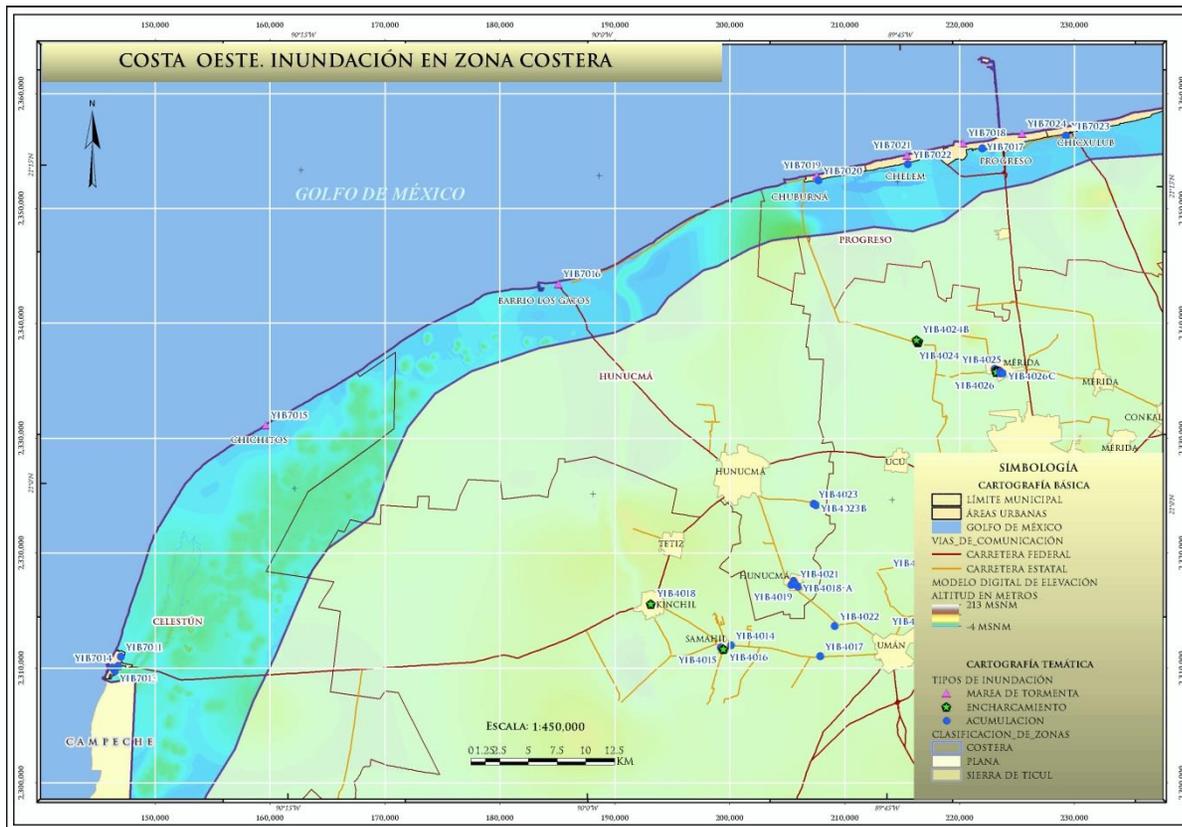


Figura 288. Distribución de puntos de por inundación en los municipios del Celestún, Hunucmá y Progreso.

En Celestún las crecientes de la marea, la creciente del Estero y la pendiente topográfica irregular, crean las condiciones para que cualquier lluvia superior a 100 mm o una suma de precipitaciones continuas puedan presentar un panorama de inundación en cinco colonias distribuidas a lo largo del asentamiento urbano (CONAGUA, 2009).

De esta porción de la costa, se ubica en la colonia Felipe Carrillo Puerto que fue edificada en un sitio donde confluyen corrientes subterráneas de las crecientes del mar y el agua del Estero y que además presenta un terreno irregular, un ejemplo es el punto verificado en campo con clave YIBR7012, en la Calle 2 entre la 13 y la 15, con coordenadas X: 771158 y Y: 2308651, esta colonia se ve afectada por el desborde de la Ciénega que se encuentra cercana al Puerto de Abrigo de Celestún, en esta colonia alrededor de 600 casas resultan afectadas si el impacto de la marea es significativo, al área determinada como vulnerable se estima en 500 m², en este sitio el nivel del agua llega a subir hasta 1 metro de altura y el agua acumulada puede tardar en bajar aproximadamente 15 días (Fotografías 180 y 181).



Fotografía 180. Vista 1 de la Laguna Costera. Col. Felipe Carrillo Puerto, Celestún.



Fotografía 181. Vista 2 de la Laguna Costera. Col. Felipe Carrillo Puerto, Celestún.

En el municipio de Hunucmá, cuando se presenta marea de tormenta causada por algún fenómeno hidrometeorológico, el agua puede avanzar hasta casi 7 metros a partir de la línea de costa hacia el interior. Toda la costa del Estado presenta una inclinación de Este a Oeste por lo que hay zonas más bajas que otras, Sisal tiene una zona relativamente alta al Este y una zona baja al Oeste, ésta última es la que presenta inundaciones por sus características topográficas, se presentan inundaciones tanto por marea de tormenta como por desborde de las Ciénegas.

En este lugar se tomó el punto de control con clave YIBR7016 con coordenadas X: 808170, Y: 2343282, en la Calle 21 por 34 y 36, dentro de la colonia Barrio Los Gatos, en esta parte de Sisal Puerto, el nivel del agua llega a subir hasta 1.5 metros en época de ciclones, es decir la inundación se da por marea de tormenta y por desborde de Ciénega afectando aproximadamente 1 Km², el nivel del agua tarda en bajar aproximadamente 3 días, aproximadamente 200 casas han resultado afectadas (Fotografías 183 y 184). Cuando el nivel del agua de la Ciénega aumenta, puede incomunicar este sitio pues el único acceso queda cubierto por el agua.



Fotografía 182. Loc. Sisal Puerto, Mpio Hunucmá, el nivel del agua alcanza hasta 1.5 m.



Fotografía 183. El desborde de la Ciénega afecta el único acceso a la localidad.

La zona perteneciente a Progreso tiene un mayor número de sitios vulnerables ya que debido a su cercanía con la capital del Estado y ser el puerto de mayor afluencia las personas establecen sus viviendas en el entorno, incluso tratando de ganar terreno a las zonas de Ciénega. De las 25 localidades que conforman este municipio, cuatro se encuentran en la zona costera (Chuburná, Chelem, Chicxulub y Puerto Progreso). La superficie del terreno de Progreso es relativamente plana, aunque algunos lomeríos de baja altura, cuenta además con playa. En algunos sectores se localizan zonas pantanosas y Esteros. Se tienen humedales con vegetación de manglar, vegetación de dunas costeras, así como también en el resto del territorio, selva baja caducifolia.

Para esta porción se describen los 3 puntos más importantes, uno de ellos se localizó en la avenida principal de Chelem que se ve afectada por marea de tormenta una franja de aproximadamente 11 Km en donde se encuentran alrededor de 800 casas, cuando el nivel del mar sube ya sea por presencia de ciclones o nortes, el nivel del agua sube 50cm tardando en bajar 5 días, la clave del punto verificado es YIBR7021 con coordenadas X: 215406, y en Y: 2354623 En la zona no hay una barrera artificial que sirva contra la acción del mar, y esto ha provocado que los asentamientos ahí edificados queden ya a pocos metros del agua (Fotografía 184).

El segundo punto de verificación con clave de control YIBR7022, coordenadas X: 215504, Y: 2353858, se encuentra ubicado en la Colonia La Guadalupe al sur de Chelem en donde se está una Ciénega, que al saturarse en época de ciclones tropicales desborda el agua afectando 400 casas, el nivel del agua llega hasta los 60 cm y demora en recuperar su nivel normal aproximadamente 3 días, el área afectada son alrededor de 700 m² (Fotografía 185).



Fotografía 184. Chelem, en Progreso, el aumento en el nivel del mar afecta viviendas situadas en la costa.



Fotografía 185. Casas cerca de la Ciénega. Col. La Guadalupe, Progreso,

El tercer punto de relevancia se encuentra en el libramiento que va a Chicxulub en una zona de Ciénega la cual se le conoce como Canal Poniente, aquí se edificaron 500 casas que se ven afectadas cuando el nivel del agua crece en época de lluvias o cuando se presentan ciclones, el punto de verificación se tomó en la colonia Rancho San Pedro, clave: YIBR7023 X: 229255, Y: 2556334, el nivel del agua llega a subir 40 cm los cuales demoran en bajar alrededor de 4 días (Fotografía 186).



Fotografía 186. Casas a la orilla de la Ciénega, libramiento a Chicxulub.

Costa Centro. En esta zona continúan las mismas características descritas antes, terreno relativamente plano, cinco tipos de vegetación: duna costera, manglares, petenes, selva baja inundable y selva baja caducifolia, además de la flora acuática correspondiente a las lagunas costeras. En la Figura 289 se aprecia el tirante de agua que se registró en cada lugar verificado en campo, en ella se incluye la porción correspondiente a la Costa Este, además del tipo de inundación para cada sitio.

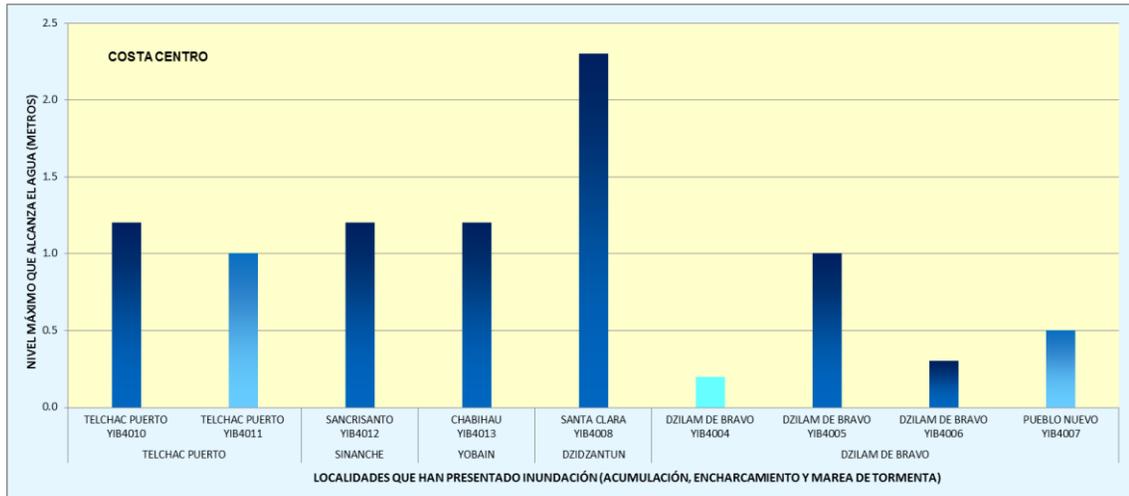


Figura 289. Altura máxima alcanzada durante una inundación en la Costa Centro.

Con el fin de una mejor visualización, en la Figura 290 pueden observar las zonas que resultan afectadas por inundaciones, que en su mayoría son por marea de tormenta o por aumento del nivel de agua en las ciénegas causado por lluvias intensas.

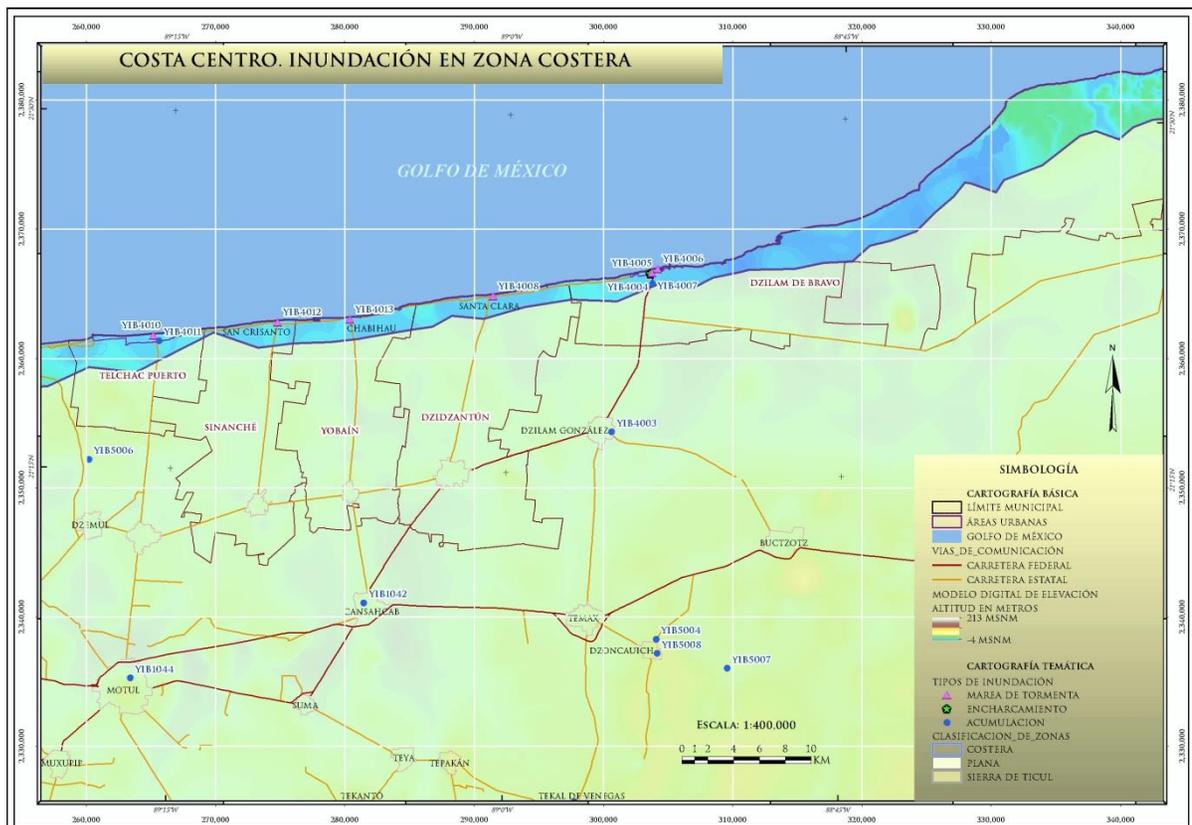


Figura 290. Puntos de inundación en Telchac Puerto, Sinanché, Yobain, Dzidzantón y Dzilam de Bravo.

De esta área se describen 4 puntos con cierta relevancia, se obtuvieron puntos de verificación en campo, en donde se presentan inundaciones por marea de tormenta (3 puntos) y por acumulación en zonas bajas (1 punto).

El primero de los puntos señalados con problemas de inundación por marea de tormenta es el YIB4005, localizado en la localidad de Dzilam de Bravo, con coordenadas 303773 en X, y 2366611 en Y, en donde por efecto de algún evento hidrometeorológico como lo fue el huracán Isidoro y los vientos que éste generó, el agua invadió el poblado llegando a alcanzar un tirante de hasta 1 m (Fotografía 187).

En la localidad de Santa Clara se tienen problemas de inundación debido a fenómenos hidrometeorológicos severos, el agua de mar ha entrado aproximadamente una distancia desde la costa de 7 Km, podría ser porque el terreno donde está asentado el poblado es una zona baja. El punto de verificación tiene clave YIB4008, coordenadas X: 291466, Y:2364820 (Fotografía 188). El nivel del agua llega a alcanzar en algunos sitios hasta 2.3 m.



Fotografía 187. Nivel que alcanzó el agua durante el huracán Isidoro.



Fotografía 188. Área inundada por Isidoro.

El tercero que es afectado por marea de tormenta está en el municipio de Telchac, el punto marcado con la clave YIB4010, con coordenadas X:265180, Y: 2361787, donde las inundaciones son a causa del aumento en el nivel del mar por algún fenómeno hidrometeorológico que se presente, en este sitio el nivel del agua ha alcanzado 1.2 m cuando tocaron la zona los huracanes Isidoro y Gilberto (Fotografía 189), incluso han tenido que evacuar el poblado.

El punto donde por acumulación se presentan inundaciones en el municipio Telchac es el marcado con la clave YIB4011 con coordenadas X: 265641 y en Y: 2361376, ubicado cerca de la Ciénega que cuando se presentan lluvias fuertes o con fuertes vientos, provocan que el agua se desborde afectando las viviendas edificadas en el sitio. El nivel máximo que ha alcanzado el agua es de 1 m (Fotografía 190).

Costa Este. La porción de la costa noreste del Estado sufre de dos tipos de inundaciones, por marea de tormenta y de acumulación causada por lluvias fuertes. Cuando se suscita la inundación llega a cubrir un área de hasta 16 Km, con un aproximado de posible afectación de 150 casas.

El tipo de geomorfología que se tiene en la zona es plana lo que propicia que en el sitio se den las inundaciones. De acuerdo a autoridades locales el paso de huracanes como Gilberto e Isidoro dejó inundaciones importantes que, a aunque se han construido muros de contención en la localidad de San Felipe, esta situación continúa dándose, afectando a casi 120 casas. El agua ha permanecido en el sitio desde 5 hasta 30 días como máximo.



Fotografía 189. Área inundada por Isidoro.



Fotografía 190. Casa ubicada cerca a la Ciénega.

Los niveles que alcanzó el agua durante las inundaciones más severas que afectaron esta zona se muestran en la Figura 291, al igual que los lugares donde se dio dicho evento. En su mayoría han sido ocasionadas por marea de tormenta y una por acumulación.

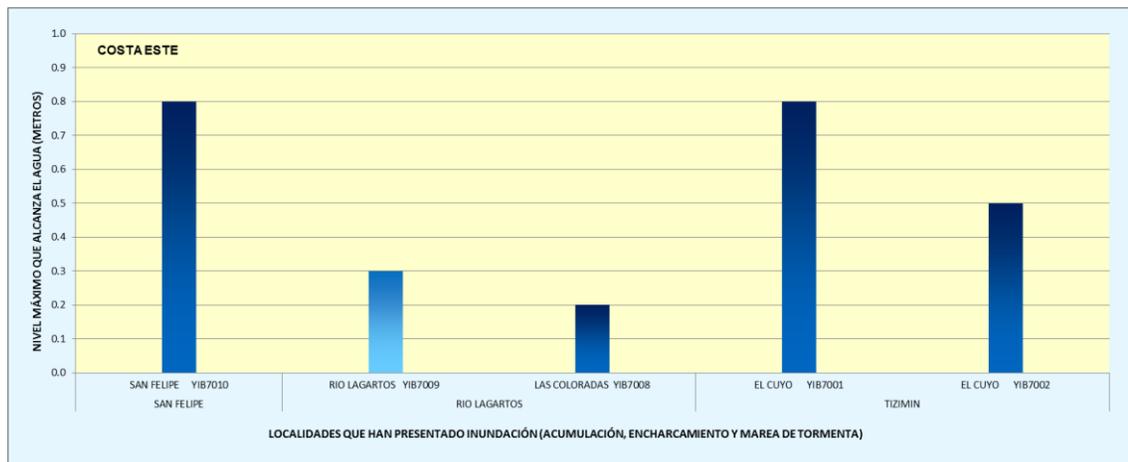


Figura 291. Altura máxima alcanzada durante una inundación en la Costa Este

Autoridades locales de protección civil tienen ubicados los sitios de mayor problemática por inundaciones. En caso de presentarse precipitaciones mayores a 200 mm, las viviendas situadas son evacuadas, sobre todo las que colindan con el área de la Ciénega, esto con el fin de que la población no quede incomunicada por tierra al quedar cubiertas por agua las vías de comunicación. Las localidades colindantes con la costa pueden apreciarse en la Figura 292.

En la localidad de El Cuyo, el tipo de inundación es por la acumulación en zonas bajas, por las lluvias extraordinarias y el paso de los huracanes. El nivel del agua sube a 50cm teniendo con ello un peligro Alto con el percance a la telesecundaria única de dicha localidad y a 30 casas distribuidas en la zona, este punto se registró con la clave YIBR7001 (Fotografía 191).



Fotografía 191. Zonas de inundación por marea de tormenta.

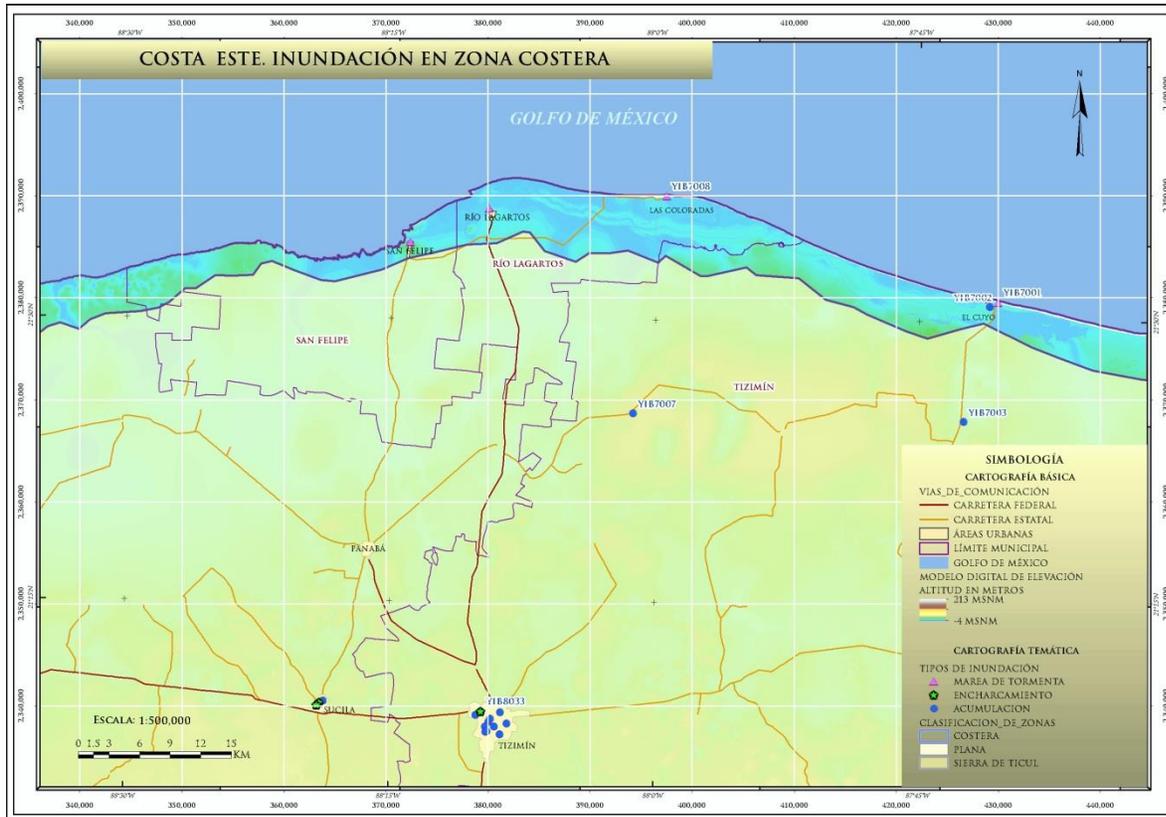


Figura 292. Distribución de puntos por inundación en los municipios de San Felipe, Rio Lagartos y Tizimin.

Otro sitio es el indicado con la clave YIB7010 ubicado en el municipio de San Felipe donde las inundaciones se han presentado por dos razones, cuando una creciente del mar por el paso de algún ciclón proveniente del norte o que se tengan lluvias continuas, se ve afectado todo el poblado, por el avance del mar, hasta 10 Km tierra adentro. Las láminas de agua que se han acumulado llegan a 1.60 mt (Figura 293).



Figura 293. Nivel máximo de agua en calles y viviendas, Mpo. San Felipe.

Zona Plana

Como se ha venido mencionando a lo largo del presente documento Yucatán es, en su mayoría, de relieve plano, sin escurrimientos superficiales y, sin embargo, puede presentar inundaciones importantes.

La Zona Plana presenta condiciones más o menos homogéneas en cuanto al relieve, que marcan la diferencia entre ésta y las otras dos zonas que se describen, acentuado por el tipo de geología kárstica, que como resultado originan depresiones en el terreno (dolinas), que localmente se conocen como rejolladas o aguadas.

El relieve puede considerarse como plano, aunque realizando una reclasificación de éste dentro de toda la zona, se tiene que para la porción Oeste el relieve o expresión topográfica es menor, basándose en que la diferencia de alturas va desde un metro a dos por espacios más extensos de terreno (algunos kilómetros), donde se presentan hondonadas incipientes a someras; y para la porción Este, que comienza casi a la mitad del Estado aproximadamente en las inmediaciones de los municipios de Buctutz y Piste, donde puede notarse que el relieve es de llanura ondulada con lomerío bajo y hondonadas desde incipientes hasta profundas. Las condiciones del terreno en la porción Este, favorecen la acumulación de agua de lluvia, en las hondonadas, el problema resulta si dentro de éstas se sitúan viviendas. En la porción Oeste, básicamente las inundaciones se dan por las modificaciones a las características del suelo, como es compactación y/o recubrimiento con carpeta asfáltica, disminuyendo la capacidad de dren de agua de lluvia.

Debido a las condiciones planas del terreno, y a que no hay corrientes superficiales de agua, sólo se abordan en esta zona los temas de inundación por encharcamiento y por acumulación en zonas bajas. Previo a la verificación en campo, se realizó un análisis para identificar las zonas de depresiones o de acumulación con base en el Modelo Digital de Elevación (MDE), de manera general no se distingue una relación directa entre depresiones en el terreno calculadas desde el MDE y acumulación de agua en éstas, esto debido principalmente a:

- La permeabilidad secundaria de las rocas, que es favorecida según el grado de fracturamiento que presente el macizo rocoso, así como a la presencia de estructuras kársticas;
- El grado de alcance del MDE no es suficiente para registrar el micro-relieve particular del sitio.

Para la descripción de los trabajos de campo basada en la regionalización o clasificación realizada, se tiene que el área que comprende la Zona Plana es la más extensa (Figura 294), pues abarca el 83% del territorio continental del Estado, que corresponde a 32777.2 Km² y se distribuye parcial o totalmente en los 105 municipios, a excepción de Santa Elena. Cabe mencionar que esta Zona comparte terreno con los municipios de las zonas Costera y Sierra de Ticul.

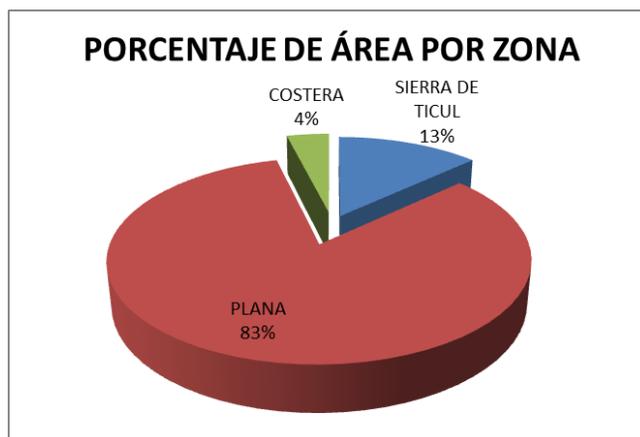


Figura 294. Distribución en porcentaje de la Zona plana con respecto a la “Costera” y “Sierra de Ticul”.

Con el apoyo de las autoridades locales y estatales de Protección Civil fue posible identificar qué sitios presentan problemas de inundación en planicies (excluyendo la zona costera y el área denominada “Cono Sur”), siendo el origen de éstos el paso de ciclones por el Estado, las fallas en el sistema de drenaje pluvial, modificación del micro-relieve, recubrimiento del suelo por carpeta asfáltica impermeable, la construcción de vías de comunicación que impiden el flujo de agua hacia zonas bajas o dolinas que pudiera haber en la zona.

Los encharcamientos que fueron detectados se presentan de manera puntual dentro de las localidades y no tienen grandes extensiones por las que puedan ser cartográficas a una escala de trabajo estatal.

Siendo que las inundaciones son recurrentes en la Zona Plana, organismos como la CONAGUA tienen el Plan Operativo del 2011, implementado por el Departamento de Atención de Emergencias del Organismo de Cuenca Peninsular de la misma dependencia donde identifican que en las zonas bajas y zonas urbanas que quedan comprendidas desde los 15 Km tierra adentro, hasta el kilómetro 40, se presentan inundaciones que afectan a las viviendas con poca resistencia, así como la interrupción de algunos servicios. La franja paralela a la costa desde los 40 hasta los 60 Km presenta encharcamientos en zonas urbanas y sitios bajos, tales como Maxcanú – Tizimín.

Un factor más que influye que el Estado resulte perjudicado, es por la construcción de vías de comunicación que no están correctamente edificadas y que, además no cuentan con obras de drenaje adecuadas, deteniendo el curso natural del agua, tales son los casos como en Tixcaltuyub y Sabacche. En general los tipos de inundación que se presentan en el Estado son ocasionados por precipitaciones atípicas, siendo de dos las predominantes, por encharcamientos y por acumulación en zonas bajas.

El total de puntos verificados en campo dentro de la Zona Plana es de 222 puntos, mismos que se enlistan en la Tabla 129 donde se especifica el tipo de inundación que se presenta y el nivel de agua que alcanzó en cada sitio.

Tabla 129. Sitios verificados en campo con problemas de inundación en la Zona Plana.

MUNICIPIO	LOCALIDAD	PUNTO	TIPO DE INUNDACIÓN	NIVEL MÁXIMO DEL AGUA (METROS)
Abalá	Mucuyche	YIB8029	Encharcamiento	0.3
Bokobá	Centro	YIB1041		0.5
Cacalchén	Cacalchén	YIB1040		0.4
Calotmul	Santa Cruz, La Granja	YIB8015	Acumulación	0.4
Cansahcab	Cansahcab	YIB1042		0.4
Chankom	Chankom	YIB3029		1.5
	Ticimul	YIB3005	Encharcamiento	0.2
		YIB3005A		0.35
		YIB3005B		0.25
	Xcopteil	YIB3028		0.5
		YIB3028A	Acumulación	0.4
YIB3028C			0.6	
Chapab	Chapab	YIB1024		1.5
Chemax	Chemax	YIB3002		1
Chichimilá	Dzitox	YIB3011		0.5
Chikindzonot	Chikindzonot	YIB3003	Encharcamiento	0.35
		YIB3003A		0.1
Chocholá	Barrio Guadalupe	YIB8020	Acumulación	0.52
	Centro	YIB8021		0.25
	Centro	YIB8022	Encharcamiento	0.3
Dzilam Gonzalez	Dzilam González	YIB4003	Acumulación	0.5
Dzitás	Dzitás	YIB3007	Encharcamiento	0.2
		YIB3007A		0.1
Dzoncauich	Centro	YIB5005	Acumulación	1
		YIB5006		1.2
		YIB5007		1
		YIB5008		0.4
	Dzoncauich	YIB5004		1
Espita	Francisco I Madero	YIB8014		0.6
Halacho	Ex Estacion	YIB8027	Encharcamiento	0.3
	Halacho	YIB8028		0.3
Hocabá	Sahcaba	YIB1035		0.7
Hunucmá	San Antonio Chel	YIB4023	Acumulación	0.5
		YIB4023B		0.5
	Tekax De Palomaque	YIB4018A		0.6
		YIB4019		0.4
		YIB4020		0.6
		YIB4021		0.8

.....Continuación de Tabla 129.

Ixil	Kanasco	YIB4001		0.4
	San Rafael	YIB4002		0.4
Izamal	Centro	YIB1033	Encharcamiento	0.2
	Izamal	YIB1039		0.2
	Kimballa	YIB1038	Acumulación	0.6
Kopomá	Centro	YIB8023	Encharcamiento	0.25
		YIB8024		0.25
Maxcanú	Chuachucmil	YIB1030	Acumulación	1
	Col Centro	YIB1032		1
	Lazaro Cardenas	YIB1031		0.6
Mayapán	Mayapán	YIB5002		0.6
Mérida	Bojorquez	YIB4051		0.45
	Bosques De Mulsay	YIB4063	Encharcamiento	0.3
	Centro	YIB4055		0.4
	Centro	YIB4056	Acumulación	0.5
	Centro	YIB4057		0.5
	Centro	YIB4058		0.4
	Dolores Otero	YIB4059		1
	Fracc. Bosques Del Poniente	YIB4062		0.4
	Juan Pablo li Seccion	YIB4052		0.4
	Komchem	YIB4025		0.5
	Komchem	YIB4025A		0.5
	Komchem	YIB4026A		0.5
	Komchem	YIB4026B		0.5
	Komchem	YIB4026C	0.5	
	Komchem	YIB4025C	Encharcamiento	0.3
	Komchem	YIB4026		0.35
	Libertad	YIB4061	Acumulación	0.4
	Lourdes Industrial	YIB4054	Encharcamiento	0.3
	Miguel Hidalgo	YIB4050	Acumulación	0.5
	Miguel Hidalgo	YIB4050A		1.5
	Mulsay	YIB4048		1.2
	Mulsay	YIB4049		0.4
	Nora Quintana	YIB4053		0.5
	San Pedro Chimay	YIB3036	Encharcamiento	0.25
	Santa Rosa	YIB4060	Acumulación	0.6
	Sierra Papacal	YIB4024	Encharcamiento	0.15
	Sierra Papacal	YIB4024A		0.2
	Sierra Papacal	YIB4024B		0.1
	Susula	YIB4045	Acumulación	0.4
	Susula	YIB4046		0.4
	Tahdzibichen	YIB3035	Encharcamiento	0.25
	Tixcacal	YIB4047	Acumulación	0.5
	Yaxnic	YIB3037	Encharcamiento	0.3
Motul	Motul	YIB1044	Acumulación	3
Muna	Col Centro	YIB1028		0.7
	Col Centro	YIB1029		0.6
	Col San Sebastian	YIB1027	Encharcamiento	0.3
	San Bernardo	YIB1026	Acumulación	0.5
Opichén	Centro	YIB8025	Encharcamiento	0.25
	Opichén	YIB8026		0.25
Peto	Esperanza	YIB2009		1
Quintana Roo	Quintana Roo	YIB3034A	Acumulación	0.8
		YIB3034B		0.6
		YIB3034E		0.5
		YIB3034H		0.8
		YIB3034	Encharcamiento	0.3
Sacalum	Col. Centro	YIB1025	Acumulación	1
	YIB4015	1		
Samahil	Centro	YIB4016	Encharcamiento	0.3
	Samahil	YIB4014	Acumulación	0.5
Sanahcat	Sanahcat	YIB1036		0.6
Sotuta	Tixcaltutyub	YIB5003		0.5
Sucilá	Sector San Andres	YIB8011	Encharcamiento	0.7
	Sector San Isidro	YIB8012		0.35
	Sucilá	YIB8013		0.35
Sudzal	Centro	YIB5015	Acumulación	1
		YIB5016		0.7
		YIB5018		1
		YIB5019		1
		YIB5020		1.2

.....Continuación de Tabla 129

		YIB5017	Encharcamiento	0.3
Tahmek	Holactun	YIB1037		0.6
Tecoh	Lepan	YIB8030	Acumulación	0.8
Ekal De Venegas	Centro	YIB5009		1
		YIB5010		1.5
		YIB5011		1
		YIB5013		1.5
		YIB5014		1.5
	La Esperanza	YIB5012		0.4
Tekantó	Tekantó	YIB1043		0.4
Temozón	San Juan	YIB8016	Encharcamiento	0.3
		YIB8018		0.3
		YIB8019		0.3
	Santa Clara	YIB8017	0.3	
Tinum	Piste	YIB3027	Acumulación	1
		YIB3032A		0.6
		YIB3033		0.6
		YIB3032		0.25
		YIB3033A		0.1
	San Francisco El Grande	YIB3030	Acumulación	0.6
		YIB3030C		0.4
		YIB3030F		0.5
		YIB3030H		0.6
		YIB3030K		0.4
		YIB3030B		0.15
		YIB3030D		0.2
	Tinum	YIB3031	Encharcamiento	0.3
		YIB3031A		0.2
		YIB3031B		0.25
		YIB3031C		0.25
		YIB3031D	0.2	
Tohopku	YIB3006		0.15	
Xcalacoop	YIB3004		0.2	
Tixméhuac	Sabacche	YIB5001		1.5
Tizimín	Agua Potable	YIB8002	Acumulación	0.8
	Centro	YIB8001		0.7
		YIB8005		0.8
		YIB8006		1.5
	Fracc Los Aguacates	YIB8006		0.8
	Lazaro Cardenas	YIB8003		0.6
	Moctezuma	YIB7003	1.5	
	Ocho Calles	YIB8004	0.35	
	Pinal De Sta Maria Y Sta Rita	YIB8033	Encharcamiento	0.6
	Samaria	YIB7006		0.5
	San Jose Nabalarn	YIB8010		0.8
	Santa Maria	YIB7004		1.2
	Santa Rosa	YIB7005		0.7
	Santa Rosa De Lima	YIB8007		0.6
	Santo Domingo	YIB8008		0.7
Yohactun Dehidalgo	YIB8009		1	
Umán	Dzibikak	YIB4022	Acumulación	0.4
	Itzincab	YIB4030		0.5
		YIB4031		0.7
		YIB4035		0.7
		YIB4036		0.45
		YIB4037		0.4
		YIB4040		0.4
		YIB4041		0.5
		YIB4042		0.7
		YIB4043		0.4
		YIB4029		0.35
		YIB4032		0.35
		YIB4033		0.35
		YIB4033A	0.35	
	YIB4034	0.35		
	YIB4038	0.35		
	YIB4039	0.35		
	YIB4039A	0.35		
	YIB4039B	0.35		
	YIB4039C	0.35		

.....Continuación de Tabla 129

Umán	Kinchil	YIB4018		0.35
	Oxholon	YIB4017	Acumulación	0.8
Valladolid	Bacalar	YIB3021		0.5
		YIB3022		0.5
		YIB3001	Encharcamiento	0.07
		YIB3001A		0.2
		YIB3023A		0.2
		YIB3024		0.25
		YIB3025	Acumulación	0.4
YIB3025A	Encharcamiento	0.2		
YIB3026		0.3		
Barrio Sisal	YIB3026C		0.25	
	YIB3018	Acumulación	0.4	
Fernando Novela	YIB3018A	Encharcamiento	0.25	
	YIB3018B		0.15	
	YIB3018C		0.15	
	YIB3018D		0.1	
	YIB3018F		0.1	
	YIB3018G		0.1	
	YIB3019	Acumulación	0.6	
	YIB3019A	Encharcamiento	0.1	
	YIB3020A		0.1	
	YIB3020B		0.1	
YIB3020C	0.1			
YIB3020D	0.15			
YIB3020E	0.1			
Militar Y Fracc. Los Cipreses	YIB3020	Acumulación	1	
Oaxaqueña	YIB3010	Encharcamiento	0.2	
San Carlos	YIB3023	Acumulación	0.68	
San Jose Tzal	YIB3038		0.5	
San Juan	YIB3017	Encharcamiento	0.3	
	YIB3025B		0.2	
	YIB3026B		0.1	
Santa Ana	YIB3013	Acumulación	0.5	
	YIB3014		0.45	
	YIB3015	Encharcamiento	0.4	
	YIB3016		0.3	
Sisal	YIB3026A		0.15	
Tahmuy	YIB8032	Acumulación	0.4	
	YIB8031	Encharcamiento	0.3	
YIB3012	0.3			
YIB3012A	0.3			
Xocen	YIB3012A	Encharcamiento	0.3	
	YIB3012A		0.3	
Xocchel	Xocchel	YIB1034	Acumulación	0.7

Dada la complejidad de realizar una descripción de cada uno de estos puntos verificados en campo, se mencionan aquellos que presentan una problemática típica de las características del área, con una distribución a lo largo y ancho de la Zona Plana, la Figura 295 muestra de manera resumida los puntos descritos más adelante.

La porción Oeste de la Zona Plana se caracteriza por tener una cantidad menor de estructuras kársticas que puedan funcionar como drenes naturales para el agua de lluvia, aunado a que el nivel estático del agua subterránea es muy somero y no permite que ésta sea absorbida por el suelo.

La topografía presente en esta zona es relativamente plana, se clasifica como una llanura ondulada con lomerío bajo, con hondonadas incipientes, someras y hasta profundas en algunas partes de la misma. Los tipos de suelos que se tienen son tres, leptosol, cambisol y luvisol; el primero de estos es el que tiene predominio territorial y cuya característica es ser pedregoso y a su vez de poco espesor, el segundo tipo corresponde a zonas donde el suelo fue transportado, producto de materiales de alteración, la cobertura en superficie es de un manchón a pie de la Sierra de Ticul y por último el luvisol con poca presencia en el área, en zonas donde la pendiente es muy suave o relativamente plana. Los regímenes de lluvia son en los meses de mayo a septiembre o por la ocurrencia de algún fenómeno hidrometeorológico.

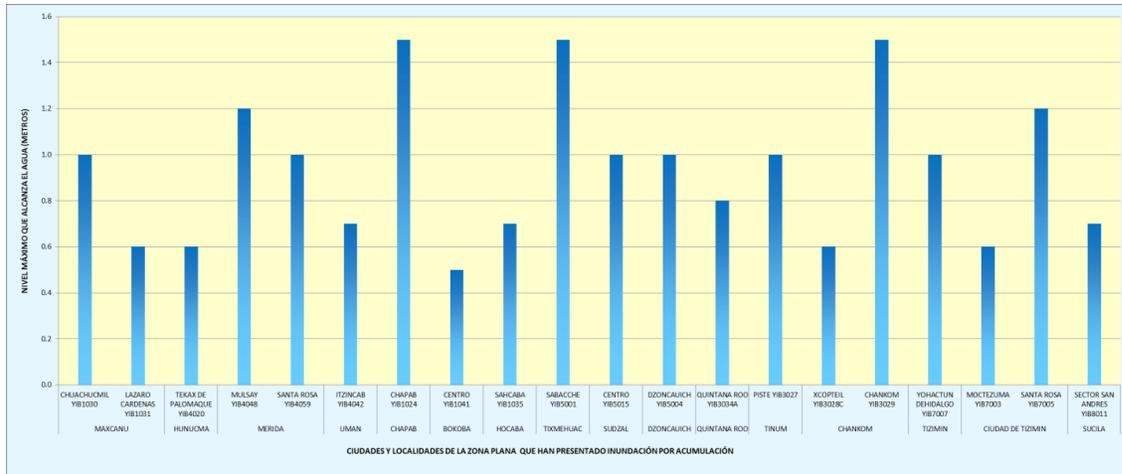


Figura 295. Altura del agua durante Inundación en Zona Plana.

A continuación se resumen algunos ejemplos de sitios que presentan problemas de inundación, en los cuales la constante son las precipitaciones intensas, pequeñas depresiones del terreno e insuficiencia del drenaje.

En el municipio de Maxcanú se verificaron tres puntos de inundación, de estos describimos sólo dos que son relevantes debido al nivel que alcanzó el agua en la zona, siendo característico el tipo de inundación por acumulación en zonas bajas.

Uno de los casos que se abordan, ocurrió durante el paso del Huracán Isidoro en la localidad de Chunchucmil, perteneciente a este municipio, con clave de verificación YIB1030 (Fotografía 192), este sitio se vio afectado por inundación, ya que el nivel agua acumulada de manera natural, alcanzó hasta un metro. Al quedar saturado el suelo, el agua permanece por lapsos de hasta un mes extendiendo la problemática a lo largo de todo el poblado.



Fotografía 192. Zonas inundables en Chunchucmil.

Para el mismo municipio se tiene el punto de verificación con clave YIB1031 (Fotografía 193) correspondiente a la localidad de Lázaro Cárdenas donde el nivel del agua acumulada alcanza los 60cm afectando aproximadamente diez viviendas. Este efecto se presenta por las condiciones del terreno y a las depresiones que tiene

Para el municipio de Hunucmá, donde en temporada de lluvias o con el paso de algún fenómeno hidrometeorológico resultan afectadas algunas comunidades los puntos verificados por inundación se relacionan a acumulación en zonas bajas, que en unos casos es natural (relieve del terreno) y en otras es por obras realizadas por el hombre, tales son la construcción de calles (o pavimentación de las mismas) con una elevación mayor a la de las viviendas o una carencia o ausencia de alcantarillas y obras pluviales, así como el malo o nulo mantenimiento de éstas, creando con ésto zonas susceptibles a ser afectadas.

Específicamente en la localidad de Texán de Palomaque, el comisario municipal señaló que durante el huracán Isidoro, 4 sitios dentro de la comunidad resultan afectados, uno de ellos es la secundaria Leyes de Reforma, con clave de verificación YIB4020, donde en esa ocasión tardó 8 días en bajar el nivel del agua misma que alcanzó los 70 cm situación que se presenta cada temporada de lluvias (Figura 194).



Fotografía 193. Depresiones del terreno que favorecen la acumulación de agua.



Fotografía 194. Zonas de acumulación de agua en temporada de lluvias.

Dentro del municipio de Mérida se revisaron 21 sitios con problemática de inundación tanto por encharcamiento como por acumulación en zonas bajas, donde las principales causas son la mala operación de los sistemas de drenaje, así como el poco mantenimiento que se da al mismo, acumulación de basura, entre otras causas. Se describen dos puntos relevantes de la ciudad.

Uno de los sitios con problemática de inundación se da en la colonia Mulsay, dentro del municipio de Mérida, donde debido a las características del terreno que es ondulado, se favorece la acumulación de agua (Fotografía 195), las calles que comúnmente se ven afectadas son: 33, 35, 37, 39 y 41, donde se tomó un punto de verificación con clave YIB4048. Los habitantes del lugar reportan que en el año 1999 el agua alcanzó 1.20 metros de altura durante el impacto de un fenómeno hidrometeorológico.



Fotografía 195. Relieve que favorece la acumulación de agua.

Del mismo municipio (Mérida), la colonia Santa Rosa, en la zona de cruce de las calles 97 por 50, presenta de igual manera problemas por acumulación de agua, donde el nivel alcanza hasta 1 m de altura con el impacto de algún evento hidrometeorológico extremo, la clave asignada a este punto es YIB4059, en este sitio el mal funcionamiento del alcantarillado y las características del terreno son factores detonantes (Fotografía 196). El municipio de Umán presenta los dos tipos de inundación característicos de la Zona Plana, en campo se verificaron 21 puntos, de los cuales 10 fueron de encharcamiento y 11 de acumulación, la mayoría de estos en la localidad de Itzincab.

En la temporada de lluvias o con la presencia de algún evento hidrometeorológico atípico, en Itzincab, se ven afectadas por acumulación las calles 44 y 25A por 42 y 46, se tomó el punto de verificación YIB4042, donde el nivel del agua ha llegado a alcanzar 70 centímetros de altura, en este sitio se tienen problemas con el drenaje, además es una zona baja donde se acumulan los escurrimientos provenientes de otros con mayor elevación (Fotografía 197).



Fotografía 196. Sitio con problemática de inundación.



Fotografía 197. En este lugar el nivel del agua alcanza los 70 cm.

La cabecera municipal de Chapab, se encuentra ubicada dentro de una amplia dolina, que geomorfológicamente condiciona a la población a inundaciones, en este sitio se tomó el punto con clave de verificación YIB1024 (Fotografía 198), donde el tirante del agua alcanzó un metro y medio de altura y tardo 4 días en drenarse, evento que se suscitó durante el Huracán Isidoro. Para el municipio de Bokobá, se presentaron inundaciones que alcanzaron hasta los 50 cm de altura durante el paso del huracán Isidoro, la acumulación de agua puede permanecer hasta por un día, las calles afectadas por este fenómeno son 14, 16, 18, 21, 22, 23, 25 y 20 lugar donde se registró el punto de verificación con clave YIB1041 (Fotografía 199).



Fotografía 198. Poblado establecido en una depresión del terreno.



Fotografía 199. Calles con problemática de inundación.

Un punto de verificación por inundación debida a acumulación es el mercado con la clave YIB1035 en la localidad de Sahcaba, municipio de Hocabá. En este sitio se generan inundaciones a partir de precipitaciones intensas, relacionadas a la presencia de algún evento hidrometeorológico, el nivel del agua alcanza los 70 cm de altura sobre el terreno, que se caracteriza por tener algunas depresiones, ésta tarda hasta doce horas en drenarse, afectando principalmente el centro de la localidad con los cruzamientos de las calles 11 y 18 (Fotografía 200). En la Localidad de Sabacche perteneciente al municipio de Tixméhuac, en zonas bajas las inundaciones alcanzan a acumular espesores de agua de 1.5 metros, por referencia de los habitantes del lugar, se sabe que el nivel del agua ha llegado a cubrir las albarradas (bardas circundantes hechas de piedra) y que la duración de la inundación normalmente llega a ser de hasta tres días, para el registro de este lugar se indica la clave YIB5001 (Fotografía 201).



Fotografía 200. El nivel del agua alcanza los 70 cm en este sitio.



Fotografía 201. Zonas bajas donde es factible la acumulación de agua.

En el centro de la cabecera municipal de Sudzal se registró el punto con clave YIB5015, donde debido a la morfología ondulada del terreno se acumula agua en zonas bajas, normalmente tarda 24 horas en drenarse. Como antecedente histórico, se tiene que durante el paso del huracán Isidoro el nivel de agua alcanzó 1.20 metros de altura y duró inundado por 8 días. En la Fotografía 202 se señala el nivel del agua que puede alcanzar con precipitaciones normales si el suelo en la zona se satura.

Por su cercanía a la costa la cabecera municipal de Dzoncauich, constantemente se ve afectada por inundaciones sobre todo con el paso de ciclones, el problema se concentra en las calles 25, 16, 14 (Con coordenadas X=304096; Y=2338285; Z=29), donde el nivel máximo que alcanzan las inundaciones es de un metro. Y ha llegado a durar hasta 5 días (Fotografía 203. Punto de Verificación YIB5004)



Fotografía 202. Punto de Verificación YIB5015.



Fotografía 203. Localidad de Dzoncauich, Calle 25 zona de inundación.

En la porción Oriental de la “Zona plana” existe una mayor concentración de estructuras kársticas que, si bien funcionan como conductos para drenar el agua pluvial, también son responsables de estructuras como rejolladas o aguadas que, morfológicamente canalizan las precipitaciones en zonas bajas del terreno, en general, la topografía es plana, y puede ser clasificada como llanuras onduladas con hondonadas incipientes u hondas, y en algunas partes como lomeríos con llanuras. Los tipos de suelos son: leptosoles de poco espesor, con alto contenido de clastos y luvisoles, que se asocian a pendientes suaves o planas. Por otra parte las lluvias se presentan en la época de junio a octubre con regímenes mayores a la porción Oeste.

En la cabecera municipal de Andrés Quintana Roo (Fotografía 204. Punto de verificación YIB3034A), es común encontrar áreas de acumulación de agua debido a ligeras ondulaciones del terreno y a que el nivel de la calle está por encima de los predios urbanos lo que ocasiona el agua escurra hacia las casas. El nivel máximo que alcanza el agua es de 80 centímetros.

La localidad de Piste, municipio de Tinum (Fotografía 205. Punto de verificación YIB3027), es afectada durante lluvias prolongadas e intensas que ocasionan los huracanes, tal ha sido el caso de los ciclones Isidoro, Roxana y Wilma, que en estos eventos el nivel del agua alcanzó hasta un metro y tardó hasta dos días en drenarse el agua del sitio, existen dos alcantarillas que minimizan el problema cuando ocurren lluvias que traen espesores menores de lámina de agua



Fotografía 204. Viviendas construidas por debajo del nivel de la calle.



Fotografía 205. Alcantarillas entre suelos descubiertos y vegetación que ocasionan azolve.

Durante las verificaciones de campo, se cartografió una zona de acumulación en las inmediaciones de la presidencia municipal de la localidad de Xcopteil, municipio de Chankom (Fotografía 206. Punto de verificación YIB3028C), a pesar que desde que se instalaron alcantarillas ya no se han presentados eventos de inundación es importante tener vigilado el buen funcionamiento del sistema de drenado, como por ejemplo retirar materiales sueltos que puedan ser arrastrados por el agua hacia las alcantarillas ya que esto puede ocasionar que este falle. Un problema constante en la zona Oriente del Estado se debe principalmente al agua que escurre de zonas altas de los lomeríos. Un ejemplo de este tipo de inundaciones se encuentra en la cabecera municipal de Chankom a lo largo de la calle 28 entre las calles 35 y 37 (Fotografía 207. Punto de verificación YIB302), en este sitio las inundaciones han llegado a alcanzar un tirante máximo de agua de metro y medio especialmente con las precipitaciones que traen consigo el paso de ciclones tropicales.

Para el municipio de Tizimín que es el de mayor extensión territorial de Yucatán, se verificaron 16 puntos de inundación, de los cuales 15 corresponden a acumulación y el resto a encharcamiento. Como se ha mencionado anteriormente, esta zona se caracteriza por tener alta concentración de estructuras kársticas que dan paso a geo-formas de pequeños lomeríos, en la zona limítrofe con el estado de Quintana Roo, los estratos rocosos presentan ligeros basculamientos hacia el Noreste. Es importante resaltar que el nivel freático somero en la parte norte favorece la duración de inundaciones. En zonas próximas a la costa sobre todo en aquellas donde el nivel freático es somero las inundaciones tardan más tiempo en desaparecer, esto debido a que una vez saturado este estrato la velocidad de filtración disminuye bruscamente, este proceso que ocurre en la localidad de Yohactun de Hidalgo, municipio de Tizimín (Fotografía 208.- Punto de verificación YIB7007), las inundaciones se hacen presente con el paso de huracanes, normalmente todo el poblado se ve afectado, el nivel de la inundación ha llegado a subir hasta un metro.

A pesar de que el relieve local es de pequeños lomeríos, a escalas mayores se configuran depresiones en el terreno que condicionan zonas de inundación como es el caso de la localidad de Moctezuma en el municipio de Tizimín (Fotografía 209. Punto de verificación YIB7003), que se ve afectado por acumulación de agua que alcanza 60 centímetros sobre el nivel del terreno, dicha inundación es ocasionada por las lluvias que traen los ciclones.



Fotografía 206. Zona en depresión relativa del terreno.



Fotografía 207. Zona de pequeños lomeríos que condicionan inundaciones en aras bajas.



Fotografía 208. Localidad de Yohactun de Hidalgo afectada por precipitaciones.



Fotografía 209. Poblado de Moctezuma ubicado en depresión del terreno.

La localidad de Santa Rosa municipio de Tizimín (Fotografía 210. Punto de verificación YIB7005), es identificado plenamente como una población que se ve afectado por inundaciones sobre todo con el paso de ciclones. El nivel máximo que han alcanzado la inundaciones es de 1.20 metros y ocurrió con el paso del Huracán Wilma. Otro factor que favorece el estancamiento de agua se debe a que la superficie del terreno es ligeramente ondulada lo que determina zonas bajas acumulativas. En sector San Andrés del municipio de Sucilá (Fotografía 211) se tomó el punto de verificación con clave YIB8011, donde el terreno presenta un relieve de ligeras ondulaciones, producto de la evolución kárstica en la roca. En las partes bajas del terreno se acumula el agua producto de lluvia, la cual alcanza un nivel de hasta 70 centímetros y ha tardado hasta una semana en drenarse.



Fotografía 210. Toda la localidad de Santa Rosa se vio afectada por el Huracán Isidoro.



Fotografía 211. Depresión del terreno que favorece la acumulación de agua.

Zona Sierra de Ticul

El estado de Yucatán está compuesto por rocas calcáreas marinas que presentan erosión cárstica que forma desde pequeños hoyos hasta amplias cavernas, a esta característica se le debe la alta permeabilidad de las formaciones rocosas en casi toda la península, sin embargo, al sur del Estado en la zona denominada Cono Sur, existen depresiones cubiertas de capas de suelo poco permeables que han dado lugar a la formación de lagunas someras y zonas ligeramente más bajas que periódicamente se inundan, donde los espesores variables de suelos arcillosos y limosos existente en estas zonas provienen del arrastre y transporte de suelo generado en las partes más altas.

El Cono Sur corresponde a una zona triangular alargada de aproximadamente cinco mil doscientos kilómetros cuadrados, que tiene como frontera norte la sierra de Ticul ubicada en línea recta desde las inmediaciones del poblado de Maxcanú, pasando por las ciudades de Muna, Ticul, Oxkutzcab y Tekax. Como frontera sur, está delimitado por los límites de los estados de Campeche y Quintana Roo. El relieve del Cono sur está compuesto por sierra, lomeríos, cuencas endorreicas y planicies de diversas génesis y formas, donde las elevaciones del terreno oscilan entre los 50 a 150 msnm (Frausto, *et al.*, 2006).

Las inundaciones presenten en las cuencas del Cono Sur, ocurren con diferente frecuencia y duración, algunas áreas se inundan cada uno a dos años y requieren precipitaciones mayores con periodos de recurrencia de más de diez años. Mientras que otras, se presentan inundaciones que desaparecen en unas cuantas horas y otras con tiempo de duración de varias semanas. De acuerdo a Espinosa (2004), el Cono Sur forma un pequeño altiplano donde se presentan inundaciones en zonas planas que han sido recubiertas en su fondo por suelos poco permeables, éstas zonas corresponden a cuencas endorreicas cerradas que son independientes una de otra.

En estas cuencas existen resumideros que actúan como bocas por donde el agua fluye hacia cavidades subterráneas, en algunas cuencas, estas bocas o resumideros permanecen siempre abiertos y en otras se tapan en forma intermitente durante la inundación. El funcionamiento cíclico del resumidero como boca de drenaje se puede describir como sigue **1)** Primero, el destaponamiento que se produce al aumentar las cargas hidráulicas durante inundaciones con tirantes importantes, entonces el agua penetra drenándose total o parcialmente la inundación del área involucrada (como ocurrió en el poblado de Chan Dzinut, cuando se originó una nueva cavidad drenando la inundación del Isidoro en el 2002). **2)** Se produce, pero no siempre, el taponamiento por obstrucción de la boca o de los conductos subterráneos debió al arrastre de vegetación y suelos (ramas, árboles, piedras, tierra, etc.), durante el flujo a través del resumidero y de las cavidades subterráneas (Espinosa, 2004).

Es importante mencionar que no todas las cuencas que existen en la zona son inundables, sin embargo existe un número considerable de cuencas inundables donde existen varios asentamientos humanos que son afectados, durante temporadas de lluvias normales y/o extraordinarias.

El presente contenido, incluye un trabajo de investigación de campo que comprende visitas de reconocimiento en las cuencas que son inundables, donde se obtuvo información a partir de testimonios recabados en 37 poblaciones de los seis municipios de Ticul, Santa Elena, Oxkutzcab, Tekax, Tzucacab y Peto (Figura 296).

Para ilustrar los problemas de inundación, se describirán algunos puntos de control de poblaciones que se inundaron durante el paso del Huracán Isidoro en septiembre del 2002, donde los tirantes de agua alcanzaron entre 80 cm a 8 m, durando entre uno a dos días en algunas cuencas y de tres a cuatro semanas en otras (Tabla 130).

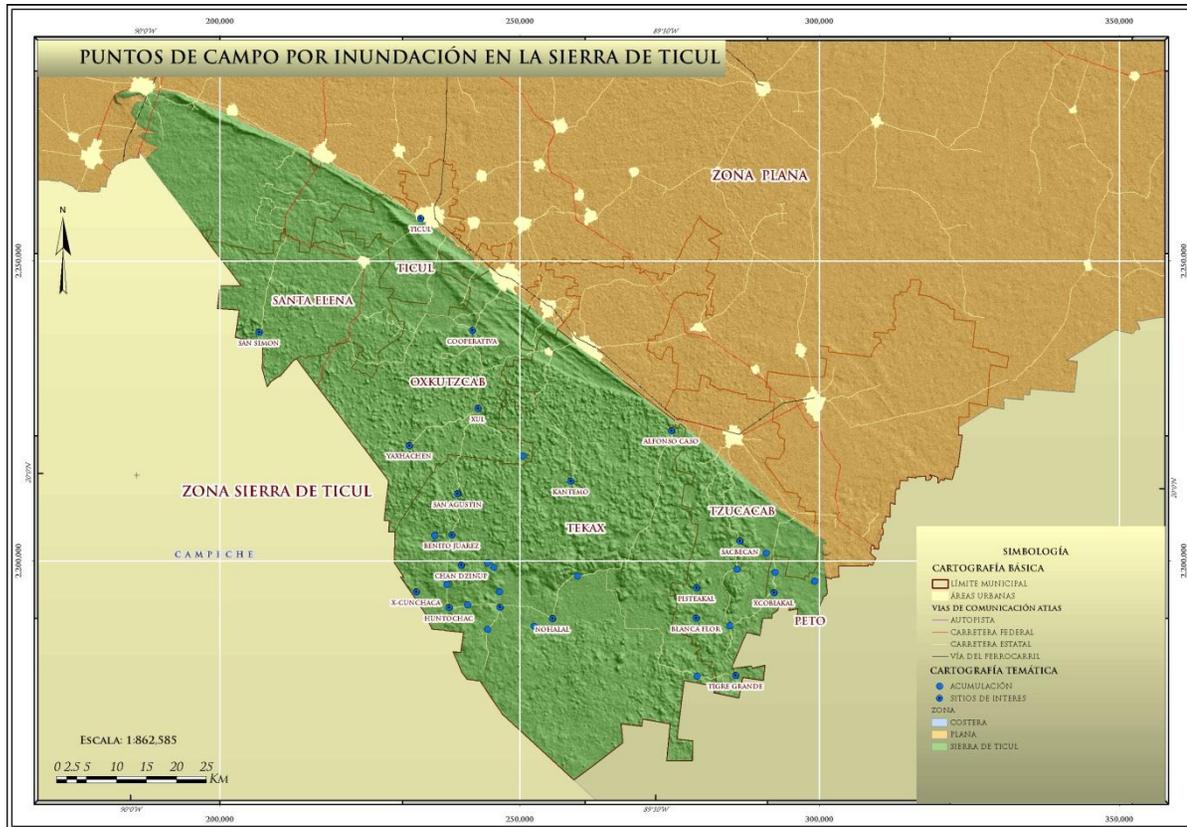


Figura 296. Distribución de puntos de control por inundación de la Sierra de Ticul del estado de Yucatán.

Tabla 130. Sitios donde ocurren eventos de Inundación en la zona de la Sierra de Ticul.

MUNICIPIO	LOCALIDAD	PUNTO	NIVEL MÁXIMO DEL AGUA	DURACIÓN DE LA INUNDACIÓN	MUNICIPIO	LOCALIDAD	PUNTO	NIVEL MÁXIMO DEL AGUA	DURACIÓN DE LA INUNDACIÓN
Ticul	Ticul	YIB1023	1.00	7 días	Tekax	San Martín Hili	YIB1005	1.50	10 días
Santa Elena	San Simón	YIB1022	0.80	2 días		Chan Dzinup	YIB1009	8.00	2 meses
Oxkutzcab	Cooperativa	YIB1021	1.50	7 días		San Isidro Yaxche	YIB1010	5.00	1 mes
	Xul	YIB1018	3.00	3 días		San Salvador	YIB1011	1.50	15 días
	Yaxhachen	YIB1019	1.80	15 días		Huntochac	YIB1004	7.00	2 meses
	Nohcacab	YIB1020	0.80	1 día		X-Cunchaca	YIB1003	4.00	2 meses
Tzucacab	Sacbecan	YIB2011	2.00	3 días		Jose Lopez Portillo	YIB1002	5.00	2 meses
	Pohuacxil	YIB2010	1.00	2 días		Huntochac	YIB1001	2.00	2 meses
	Noh Bec	YIB2003	1.00	5 días		San Felipe Segundo	YIB1017	4.00	1.5 meses
	Pisteakal	YIB2004	6.00	7 días		Mac Yan	YIB1012	2.00	2 meses
	Blanca Flor	YIB2005	6.00	7 días		Mesatunich	YIB1015	2.00	2 meses
	El Escondido	YIB2006	2.50	20 días		San Pedro Xtokil	YIB1016	1.00	3 días
	Tigre Grande	YIB2007	4.00	20 días		Poccheil	YIB1014	1.50	15 días
Peto	Uitzina	YIB2001	2.00	2 días		Nohalal	YIB1013	2.50	2 meses
	Xcobiakal	YIB2012	3.00	8 días		Alfonso Caso	YIB2008	3.00	3 días
	Tobxila	YIB2002	1.00	20 días		Kantemo	YIB2015	1.50	1 día
Tekax	Salvador Alvarado	YIB1008	2.00	8 días		San Diego Buenavista	YIB2014	0.80	N/D
	Benito Juárez	YIB1007	2.50	2 meses		Sudzal Chico	YIB2013	3.00	4 meses
	San Pedro Dzula	YIB1006	8.00	2 meses					

En las Figuras 297 y 298 se puede apreciar la variación de los tirantes de agua que se presentaron en los diferentes sitios verificados.

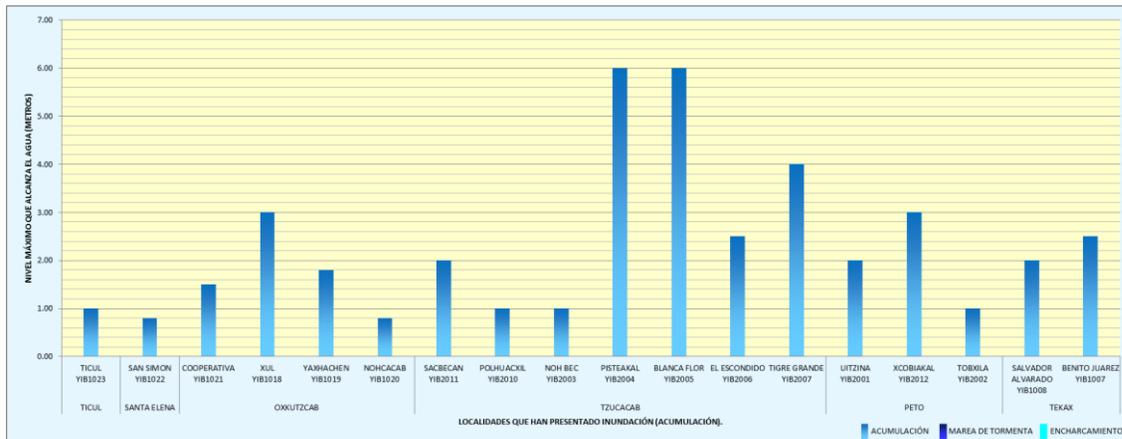


Figura 297. Altura máxima alcanzada durante un evento de inundación en seis municipios del cono sur.

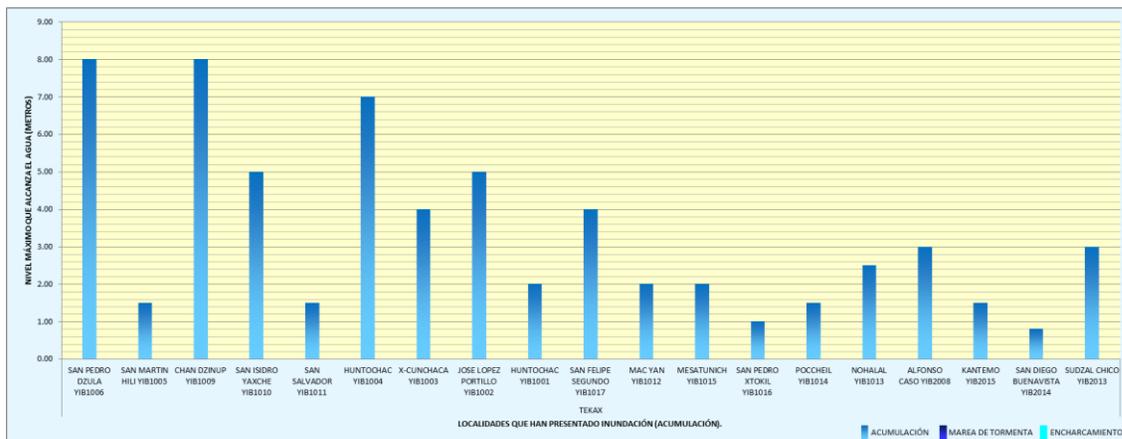


Figura 298. Altura máxima alcanzada durante un evento de inundación en el municipio de Tekax.

El municipio de Ticul tiene una extensión territorial de 340 Km² de los cuales 248 Km² se encuentran dentro de la zona Sierra de Ticul conformado por cerros y lomeríos, que contienen pequeñas cuencas endorreicas de diferentes formas y tamaños. Como se mencionó las inundaciones se presentan en pequeñas cuencas que pueden tener diferentes dimensiones, frecuencia y duración. Un ejemplo, se puede observar en la ciudad donde una porción se encuentra asentada en una pequeña depresión que pertenece a la sierra de Ticul.

En una de estas depresiones se ubica una pequeña colonia conocida como San Benito (YIB1023). Esta colonia fue edificada dentro de una pequeña depresión cubierta por una capa de 30 cm de suelo cambisol de color rojizo, el cual sirve como capa impermeable que impide la infiltración del agua que escurre de la parte más alta del cerro, además de poseer una densa cubierta vegetal que evidencia la presencia humedales en la pequeña cuenca. La altura máxima alcanzada durante la inundación es de 1 metro, la cual es suficiente para dañar los bienes y servicios de varias viviendas asentadas dentro de dicha depresión (Fotografía 212).



Fotografía 212. Colonia de San Benito en Ticul es afectada por inundación durante las lluvias.

El municipio de Santa Elena con extensión territorial de 514 Km² ubicada en la Sierra de Ticul. En el poblado de San Isidro (YIB1022) la morfología está compuesta por cerros con pendientes suaves, lomeríos y pequeñas dolinas, donde las viviendas están asentadas en pequeñas depresiones que son poco visibles a la vista. El suelo impermeable favorece la acumulación del agua durante la temporada de lluvias normales y en precipitaciones extraordinarias, dando lugar a eventos de inundación donde el tirante de agua alcanza los 0.80 m con una duración de casi dos días, como el evento ocurrido durante el paso del huracán Isidoro (Fotografía 213).



Fotografía 213. Poblado San Isidro en el municipio de Santa Elena, es afectado por inundación.

Municipio de Oxkutzcab

En la localidad conocida como Cooperativa - Emiliano Zapata (YIB1021) del , la morfología está compuesta por cerros y valles, donde las viviendas están asentadas en depresiones que son poco visibles a la vista. El suelo impermeable favorece la acumulación del agua durante la temporada de lluvias normales y en precipitaciones extraordinarias, como la ocurrida durante el paso del huracán Isidoro, dando lugar a eventos de inundación donde el tirante de agua alcanzó los 1.5 m de altura con duración de una semana afectando la comunidad entera (Fotografía 214).

La localidad de Xul (YIB1018), cuenta con 1,110 habitantes distribuidas en 334 viviendas las cuales se encuentran asentadas en una amplia depresión ubicada a una altitud de 74 msnm. Esta cuenca está rodeada por cerros, lomeríos que forman en las partes bajas, amplias depresiones y zonas planas. En este sitio también se realizó el reconocimiento de campo y de acuerdo a la encuestas, esta localidad también sufrió afectaciones por inundación durante el Isidoro, donde el tirante máximo del agua alcanzó 3 metros en las partes más bajas y donde el nivel de agua duro tres días (Fotografía 215).



Fotografía 214. Cooperativa-Emiliano Zapata en el municipio de Oxkutzcab, fue afectado por inundación.



Fotografía 215. Poblado Xul en el municipio de Oxkutzcab, también fue afectado por inundación.

La localidad de **Yaxhachen** (YIB1019) ubicada al sur del **municipio de Oxkutzcab**, se encuentra en una cuenca rodeada por pequeños cerros con pendientes suaves y lomeríos que alcanzan una altitud máxima de 95 msnm. La población compuesta por 1,633 habitantes distribuidas en 393 viviendas presento eventos de inundación durante el paso del huracán Isidoro. Durante la etapa de investigación y recorrido por toda la población, se concluyó que esta localidad sufrió inundación y el nivel del agua subió hasta alcanzar la altura de 1.80 y 3 metros en las partes más bajas donde el nivel de agua tardo 15 días en bajar (Fotografía 216).



Fotografía 216. Poblado Yaxhachen en el municipio de Oxkutzcab, fue afectado por inundación.

Municipio de Tekax

Cubre la mayor extensión con una superficie de 2,770 Km², de los cuales 2,388 Km² se encuentran en la Sierra de Ticul y el resto se distribuye en la planicie. Su morfología está conformada por cerros y lomeríos con pendientes suaves que contienen cuencas endorreicas de diferentes formas, tamaños, dimensiones y profundidades. Estas cuencas corresponden a depresiones conocidas como dolinas, muchas de estas están aisladas formando depresiones de diversos tamaños como las cuencas donde se encuentran las poblaciones Benito Juárez, Chan Dzinup, mientras otras dolinas se han conectado formando amplias planicies como las ubicadas en X-Cunchaca y entre Mesatunich y Nohalal.

Todas las localidades en este municipio han presentado eventos de inundación, donde el tirante de agua ha alcanzado entre 1 a 8 metros de altura), afectando las comunidades de San Agustín conocido como Salvador Alvarado, Benito Juárez, San Pedro Dzula, San Martín Hili, Chan Dzinup, San Isidro Yaxche, San Salvador, Huntochac, X-Cunchaca, José López Portillo, San Felipe Segundo, Mac Yan, Mesatunich, San Pedro Xtokil, Poccheil, Nohalal, Alfonso Caso, Kantemo, San Diego Buenavista y Sudzal Chico . A continuación se ilustrara los sitios más críticos de algunas poblaciones donde el nivel del agua alcanzó alturas considerables.

El poblado San Agustín conocido como Salvador Alvarado (YIB1008) está asentado en una pequeña cuenca endorreica rodeada por cerros que alcanzan altitudes de 190 msnm, en esta localidad la inundación que alcanzo 2 metros de altura, tuvo una duración de ocho días (Fotografía 217). En Benito Juárez (YIB1007) el nivel del agua alcanzó 2.5 metros donde el nivel de agua tardo 2 meses en bajar (Fotografía 218), así mismo ocurrió en los poblados cercanos de San Pedro Dzula (YIB1-006) donde el agua subió hasta alcanzar el nivel de 8 metros en las partes más bajas del poblado y el nivel de agua tardo 2 meses en bajar. Y en San Martín Hili (YIB1-005) el nivel del agua subió hasta alcanzar el nivel de 1.50 metros en las partes más bajas del poblado y el nivel de agua tardo 10 días en bajar (Fotografía 219).



Fotografía 217. San Agustín-Salvador Alvarado en el municipio de Tekax, es afectado por inundación.



Fotografía 218. Benito Juárez en el municipio de Tekax, es afectado por inundación.



Fotografía 219. San Martín Hili en el municipio de Tekax, es afectado por inundación.

En la depresión o cuenca que a continuación se menciona, encierra las poblaciones de Chan Dzinup, Santa Rosa, San Isidro Dos, San Isidro Yaxché (YIB1010) y San Salvador. En estas poblaciones la inundación máxima se presentó en Chan Dzinup (YIB1009), donde el agua alcanzó 8 metros y duro alrededor de 3 meses, en San Isidro Yaxche (YIB1010) el nivel del agua subió 5 metros y en este caso el nivel de agua tardo 1 mes en bajar, mientras que en el poblado de San Salvador (YIB1011), ubicado en la parte oriente de la cuenca, el nivel del agua subió 1.5 metros en las partes más bajas de la localidad inundando una parte del pueblo, la inundación duro alrededor de 5 días. (Fotografías 220 y 221).



Fotografía 220. Chan Dzinup en el municipio de Tekax, es afectado por inundación.



Fotografía 221. San Isidro Yaxche en el municipio de Tekax, es afectado por inundación.

Al sur del municipio de Tekax, se encuentran unas zonas que son más susceptibles a inundación, estas corresponden a extensas planicies conocidas localmente como “La Sabana”, estas forman parte de estructuras kársticas conocidas como poljes, las cuales son el resultado de la unión de varias depresiones y dolinas. En estas planicies se encuentran asentadas las localidades de X-Cunchaca, José López Portillo, Huntochac, San Felipe Segundo, Mac Yan (San Isidro Mac-Yan), Mesatunich, San Pedro Xtokil, Chun Wuitz, Poccheil, Xcunya, Nohalal, San Diego Buena Vista, Sudzal Chico entre otras.

La localidad Huntochac (YIB1001) cuenta con 304 habitantes distribuidas en 99 viviendas esta comunidad esta asentadas en las partes más bajas de la zona con una altitud de 90 msnm, este poblado se encuentra en las orillas de la planicie y en las faldas de varios lomeríos. La inundación alcanzo 1.20 m en las partes más elevadas del poblado y 3 metros en la partes más bajas (Fotografía 222), en la carretera Huntochac-Benito Juárez (YIB1004) quedo inundada donde el nivel del agua subió 7 metros. Al quedar inundada esta carretera quedaron incomunicadas las poblaciones antes mencionadas. El agua tardo 2 meses el bajar.



Fotografía 222. Poblado de Huntochac se inundó hasta 3 metros en las partes más bajas.



Fotografía 223. Localidad José López Portillo, fue severamente afectado por la inundación del Isidoro.

En la localidad de José López Portillo se ubicada en la planicie a una altitud de 81 msnm. Corresponde a una localidad pequeña que cuenta con 38 habitantes distribuidas en 15 viviendas. En esta localidad también sufrió inundación durante el paso del huracán Isidoro. En este sitio el nivel del agua subió hasta alcanzar el nivel de 5 metros, cubriendo todas las casas por completo y afectando severamente su infraestructura, al igual que el punto anterior el nivel de agua tardo 2 meses en bajar (Fotografía 223). Las siembras y/o cultivos de la zona, también se vieron fuertemente afectados ya que el agua cubrió completamente la extensa planicie (Fotografía 224).



Fotografía 224. Planicie localmente conocida como La Sabana se inundó durante el huracán Isidoro

Localidad Mac-Yan (YIB1-012), se ubica en otra extensa planicie del municipio de Tekax, a una altitud de 52 msnm. Corresponde a una localidad pequeña que cuenta con 68 habitantes distribuidas en 39 viviendas. En esta localidad igualmente sufrió inundación durante el paso del huracán Isidoro. En este sitio el nivel del agua subió hasta alcanzar el nivel de 2 metros y en este caso el nivel de agua tardo 2 meses en bajar. Como se observa en la fotografía la extensa planicie fue también inundada alcanzando 3 metros de inundación en las partes más bajas de la zona (Fotografía 225), afectando toda la infraestructura quedando incomunicadas todas las localidades y comunidades de la zona.

Localidad Nohalal (YIB1013), se localiza a una altitud de 59 msnm. Corresponde a una localidad pequeña que cuenta con 32 habitantes distribuidas en 18 viviendas. En esta localidad igualmente sufrió inundación durante el paso del huracán Isidoro, el nivel del agua subió hasta alcanzar el nivel de 8 metros y en este caso el nivel de agua tardo 3 meses en bajar (Fotografía 226). Así mismo sucedió en la localidad de Poccheil (YIB1014), la cual corresponde a una localidad de 7 habitantes distribuidas en 5 viviendas. En esta localidad el agua subió hasta alcanzar el nivel de 1.5 metros y el nivel de agua tardo 15 días en bajar, todas las viviendas sufrieron pérdidas de sus bienes así como de sus cosechas.



Fotografía 225. Localidad de Mac-Yan del municipio de Tekax, fue inundada durante el huracán Isidoro.



Fotografía 226. Nohalal fue afectada por inundación donde el nivel del agua alcanzó los 3 metros.

La localidad X-Cunchaca ubicada a una altitud de 73 msnm. Corresponde a una localidad pequeña que cuenta con 20 habitantes distribuidas en 4 viviendas. En esta localidad también sufrió inundación durante el paso del huracán Isidoro.

En este sitio el nivel del agua subió hasta alcanzar el nivel de 8 metros, en este caso el nivel del agua tardó 3 meses en bajar (Fotografía 227 y 228). Esta zona se ubica en la zona conocida como La Sabana, corresponde a una extensa área de cultivo, donde su morfología es una planicie (Fotografía 229 y 230).



Fotografía 227. Casas de la localidad de X-Cunchaca, fue afectada por inundación durante el huracán Isidoro.



Fotografía 228. Las casas construidas en alto, fueron afectadas por la inundación.



Fotografía 229. Vista panorámica del poblado X-Cunchaca rodeada por la extensas planicies.



Fotografía 230. Vista panorámica de la Planicie La Sabana, esta zona fue totalmente cubierta por el agua, durante la inundación del huracán Isidoro.

La localidad Mesatunich (YIB1015) se ubica a una altitud de 82 msnm y cuenta con 6 habitantes distribuidas en 4 viviendas. En esta localidad igualmente sufrió inundación donde el nivel del agua alcanzó 2 metros y también tardo 2 meses en bajar (Fotografía 231). La localidad de San Pedro Xtokil (YIB1016), se ubica a una altitud de 93 msnm, corresponde a una localidad pequeña que cuenta con 22 habitantes distribuidas en 11 viviendas, en este sitio el nivel del agua subió hasta alcanzar el nivel de 1 metro y en este caso el nivel de agua tardo 3 días en bajar (Fotografía 232).



Fotografía 231. Planicie donde se ubica la localidad de Mesatunich, se inundó hasta 2 metros.



Fotografía 232. Localidad de San Pedro Xtokil, se inundó hasta alcanzar 1 metro de agua.

Municipio de Tzucacab

En municipio de Tzucacab se tiene la presencia de depresiones donde las localidades están asentadas en las zonas bajas que son susceptibles encharcamientos en época de lluvias e inundaciones en época de ciclones. Se observó que la mayoría de las localidades tienen un suelo impermeable que se satura rápidamente, evitando que el agua se infiltre ocasionando acumulación.

En las localidades de Pisteakal, Blanca Flor (Fotografía 233), Tigre Grande, El Escondido, Sacbecan, Noh Bec y Polhuacxil, de acuerdo al reconocimiento de campo, en el año 2002 las intensas lluvias del huracán Isidoro provocó inundación en las partes más bajas afectando siete localidades. El agua alcanzó niveles máximos de inundación entre 1, 2, 4 y 6 metros de altura, quedando estancada el agua hasta por veinte días, afectando viviendas y pertenencias de las mismas, así como caminos importantes, dejando incomunicadas a muchas localidades (Fotografías 234 y 235).



Fotografía 233. Localidad de Blanca Flor en el municipio de Tzucacab, es afectado por inundación.



Fotografía 234. Pisteakal en el municipio de Tzucacab, es afectado por inundación.



Fotografía 235. Tigre Grande en el municipio de Tzucacab, es afectado por inundación.

Municipio de Peto

En el municipio de Peto se visitaron las localidades de Uitzina (YIB2001), Xcobiakal (YIB212) y Tobxila (YIB2002). Estas comunidades se encuentran asentadas en zonas bajas, donde durante épocas de lluvias se llega a acumular el agua hasta por tres días, esto ocurre frecuentemente durante la temporada de ciclones.

Los tres poblados se encuentran asentados en una zona plana que se alterna con depresiones conocidas como dolinas que son susceptibles a inundación durante temporada de lluvias. Cuando se registra un fenómeno con precipitaciones mayores, estas áreas se anegan hasta alcanzar niveles entre 1 a 3 metros en las zonas más bajas, como los ocurridos durante el paso del huracán Isidoro cuando las precipitaciones causaron la inundación en las comunidades durante periodos de 2 a 8 días como sucedió en Uitzina y Xcobiakal y hasta de 20 días como lo ocurrido en la comunidad de Tobxila (Fotografía 236).



Fotografía 236. Poblado de Xcobiakal en el municipio de Peto, es afectado por inundación.

En resumen la zona de la Sierra de Ticul, muestra una variedad en la configuración del relieve, de sierra, lomeríos, cuencas endorreicas y planicies de diversa génesis y formas. Entre las principales causas de inundación en la zona está la saturación de las capas de baja permeabilidad, la presencia de crecientes por lagunas y aguadas y la interrupción del paso del agua por la presencia de infraestructura.

Los datos recabados en el Cono Sur del Estado, muestran que son varias las localidades susceptibles de inundarse: Sudzal Chico, Dos Aguadas, Tigre Grande, El Escondido, San Juan Tekax, Nohalal, Chan Dzinup y Benito Juárez. También están en esta situación San Pedro Dzulá, San Isidro Yaxché, San Diego Buenavista, San Felipe II, Alfonso Caso, San Isidro, Kantemó, Nohcacab, Salvador Alvarado, Polhuacxil, Noh bec, Xcobiakal y Sacbecán.

VIII.4.6. Susceptibilidad a la Inundación

En este análisis se llegó a la determinación de la susceptibilidad a la Inundación, ya que CENAPRED, 2006, sólo tiene la metodología para los mapas de riesgo por inundación y avenidas súbitas en zonas rurales, con arrastre de sedimentos, en el caso particular del Estado no cuenta con ríos, a lo cual no podemos llegar al grado de Peligro y Riesgo. Para lo cual, se analizaron y definieron los elementos físicos geográficos que influyen en la susceptibilidad (Batista y Sánchez, 1999).

Debido a la complejidad de los sistemas físicos en los cuales un gran número de variables pueden condicionar el proceso, por esta razón, la evaluación de la susceptibilidad, en la mayoría de los casos, se realiza combinando el análisis probabilístico con el análisis del comportamiento físico de la fuente generadora, utilizando información de eventos que han ocurrido en el pasado y modelando con algún grado de aproximación los sistemas físicos involucrados (Palacio, et. al. 2005).

La ponderación de valores se realizó mediante el análisis multicriterio utilizando el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) (Saaty, 1990; Saaty, 2008). Este método consiste en la elaboración de una matriz de comparación por pares, en la que se especifica la importancia relativa de cada indicador respecto a los demás.

El cual incluyó 8 variables donde se ponderó su peso (Tabla 131), tomando en consideración su relativo impacto en términos de susceptibilidad a la inundación. La comparación se realiza considerando que el valor de 1 representa la variable de mayor importancia respecto de las demás que a su vez representan una fracción. Con estos datos se obtuvo la Matriz de Comparaciones Pareadas (MCP).

Tabla 131. Matriz de comparaciones pareadas de variables (MCP) en susceptibilidad a la inundación.

CRITERIO	PLANICIES	PENDIENTES	PRECIPITACIÓN	FRACTURAMIENTO	ESPESOR SUELO	DOLINAS	ESCURRIMIENTO	INFILTRACIÓN
Planicies	1	3	4	5	0.2	5	5	0.14
Pendientes	0.33	1	4	3	0.25	3	3	0.2
Precipitación	0.25	0.25	1	3	0.16	3	2	0.11
Fracturamiento	0.20	0.33	0.33	1	0.12	0.25	2	0.25
Espesor suelo	5	4	6	8	1	9	7	0.33
Dolinas	0.20	0.33	0.33	4	0.11	1	2	0.11
Escurrimiento	0.20	0.33	0.50	0.50	0.14	0.5	1	0.12
Infiltración	7	5	9	8	3	9	8	1

Posteriormente se realizó la normalización para cada variable. Dicha normalización se presenta a en la Tabla 132. La normalización se obtiene del resultado del producto entre la MCP y la adición de los valores de las variables.

Tabla 132. Matriz de normalización.

PLANICIES	PENDIENTE	INFILTRACIÓN	ESPESOR SUELO	ESCURRIMIENTO	DOLINAS	FRACTURAMIENTO	PROMEDIO
0.395	0.472	0.436	0.320	0.258	0.223	0.209	0.330
0.197	0.236	0.291	0.320	0.258	0.191	0.186	0.240
0.130	0.118	0.145	0.240	0.206	0.191	0.186	0.174
0.099	0.059	0.048	0.080	0.206	0.223	0.186	0.129
0.079	0.047	0.036	0.020	0.052	0.128	0.140	0.072
0.056	0.039	0.024	0.011	0.013	0.032	0.070	0.035
0.044	0.029	0.018	0.010	0.009	0.011	0.023	0.021
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.000

A partir del resultado del producto de los valores de la MCP y del promedio de la Matriz de Normalización (MN), se obtiene el Vector de la Suma Ponderada (VSP) (Tabla 133. Finalmente el valor de consistencia, se obtiene a partir del cociente entre la suma ponderada y el promedio de la MN. Lambda se obtiene a partir del cociente entre la adición de los valores de consistencia y el número de variables consideradas.

Tabla 133. Vector de la suma ponderada y valor de consistencia.

CRITERIOS								SUMA PONDERADA	VECTOR DE CONSISTENCIA
Planicies	0.330	0.480	0.521	0.515	0.358	0.246	0.185	2.635	7.978
Pendiente	0.165	0.240	0.348	0.515	0.358	0.211	0.165	2.001	8.344
Infiltración	0.109	0.120	0.174	0.386	0.286	0.211	0.165	1.451	8.346
Espesor suelo	0.083	0.060	0.058	0.129	0.286	0.246	0.165	1.026	7.968
Escurrimiento	0.066	0.048	0.043	0.032	0.072	0.141	0.123	0.525	7.336
Dolinas	0.047	0.040	0.029	0.018	0.018	0.035	0.062	0.249	7.096
Fracturamiento	0.037	0.030	0.022	0.016	0.012	0.012	0.021	0.149	7.231
								λ = 7.757	

Por otra parte, también se obtiene el índice de consistencia (IC). Donde “n” representa el número de variables y el índice de aleatoriedad (IA) o de consistencia aleatoria (Tabla 134). Este último se toma de los índices considerados en la literatura los cuales son constantes y se relacionan con el número de variables consideradas dentro del análisis.

$$IC = \frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{7.757 - 7}{7 - 1} = 0.126$$

Tabla 134. Índice de inconsistencia aleatoria o índice de aleatoriedad.

INDICE ALEATORIO (IA)									
Número de Elementos que se comparan	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatorio de consistencia	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Por último se calcula la Razón de Consistencia (RC) (o CR, de *Consistency Ratio*). Esta razón o cociente está diseñado de manera que los valores que exceden de 0.10 son señal de juicios inconsistentes; es probable que en estos casos el tomador de decisiones desee reconsiderar y modificar los valores originales de la matriz de comparaciones pareadas.

Se considera que los valores de la razón de consistencia de 0.10 o menos son señal de un nivel razonable de consistencia en las comparaciones pareadas.
(http://sisbib.unmsm.edu.pe/bivirtualldata/tesis/basic/toskano_hg/cap3.pdf).

$$RC = \frac{IC}{IA} = \frac{0.126}{1.32} = 0.096$$

Siendo el valor de Razón de consistencia menor a 0.10, se dice que es una Consistencia Razonable.

Los resultados de la tabla 133, indican el peso promedio para cada capa de información en la generación de inundaciones, dándoles los valores más altos a la planicie, pendiente e infiltración. El cual se utilizó la extensión de AHP para ArcGis10.1, en el cual se introducen el peso de cada capa de información y se genera el mapa.

En el análisis de la susceptibilidad a la inundación, se calculó toda la superficie del Estado, como resultado se definieron 5 niveles; en Muy Bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy Alto, cubren una superficie en kilómetros cuadrados de: 906, 2 525, 20 787, 13 012 y 2 294 respectivamente (Figura 299, Tabla 135).

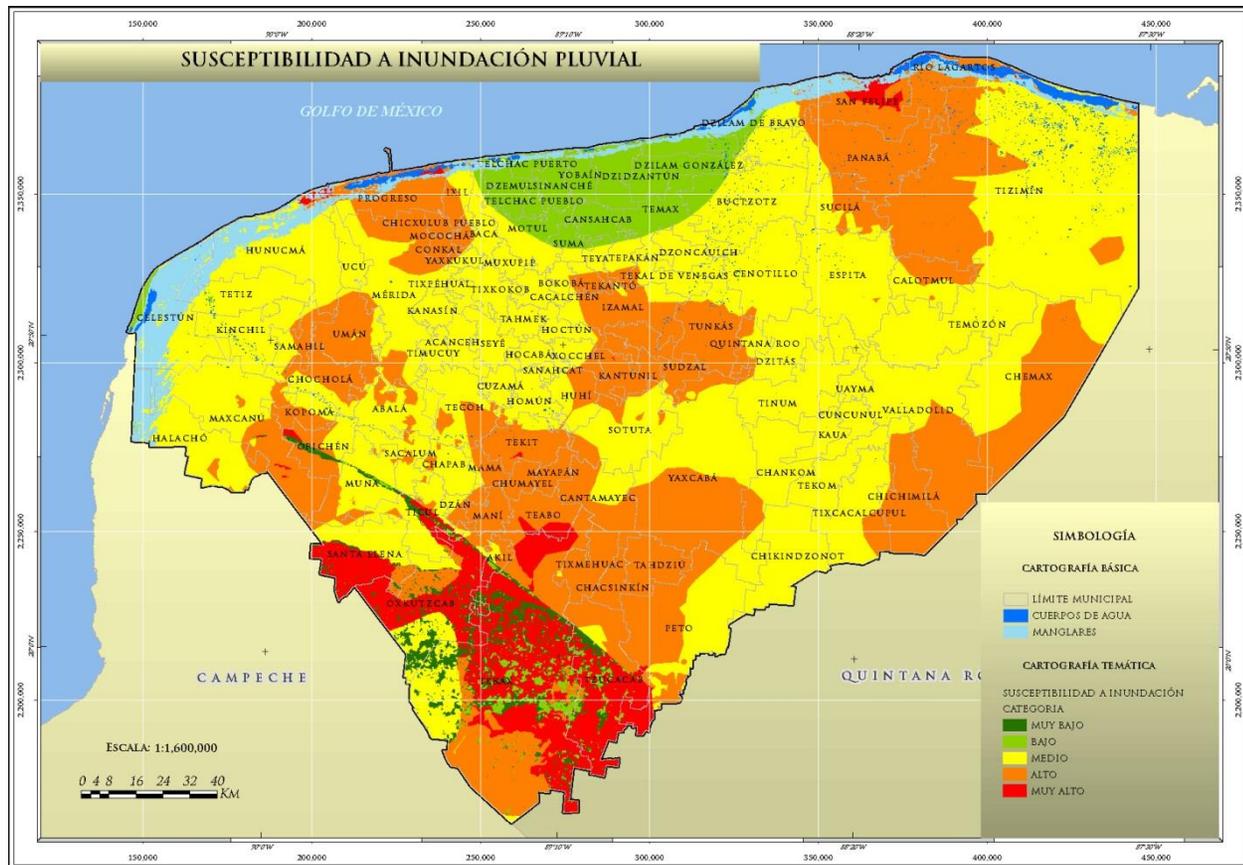


Figura 299. Mapa de susceptibilidad del terreno a inundaciones pluviales.

La zona del Cono Sur es la más propensa a sufrir inundaciones debido a sus condiciones físicas y geomorfológicas de terreno, aunado a lluvias extremas, siendo una franja de media a muy alta susceptibilidad.

Tabla 135. Superficie en kilómetros cuadrados por categorías con respecto a las zonas de estudio.

ZONA	CATEGORIA					SUPERFICIE
	MUY ALTO	ALTO	MEDIO	BAJO	MUY BAJO	
CONO SUR	1834	1122	912	432	904	5204
PLANA	294	11487	19130	1835	2	32748
COSTERA	164	403	746	259		1572

De acuerdo al mapa de susceptibilidad a Inundación, se puede decir que la mayor parte del territorio presenta una categoría media y alta. Las zonas con una categoría muy alto corresponden a terrenos que presentan una pendiente menor a 10 grados y se encuentran en la zona del cono sur.

En la zona del cono sur se tienen las 5 categorías de muy alto a muy bajo, debido a que se tienen las máximas elevaciones del Estado sirviendo de barrera para que el agua se acumule y provoque inundaciones, como en lo analizado en los trabajos de campo, que en esa zona, principalmente los municipios de Tekax, Tzucacab, Oxkutzcab, Santa Elena y Peto.

En la zona plana, se tiene la susceptibilidad alta en los municipios de Umán, Chocholá, Izamal, Tunkás, Panabá, Tizimín, Chemax y Valladolid, que se ubican al poniente, centro y oriente del Estado y algunas zonas pequeñas esparcidas por la zona. La susceptibilidad media es la que abarca gran parte de la zona, abarcando la mayoría de los municipios y la baja, que abarca algunas zonas en la parte centro-norte, oriente-centro, y poniente.

En la zona próxima a la costa, se tienen cuerpos de agua y manglares que tienen esa parte del Estado inundada, sin embargo en el análisis resultó que es una zona de rangos alto, medio y baja susceptibilidad, dicho fenómeno es atribuible al nivel del manto freático que para estos sitios es prácticamente superficial. Para un mejor entendimiento de inundaciones costeras, en el apartado de Marea de Tormentas de este Atlas, se puede encontrar más detalladamente esta zona.

A partir del mapa general de susceptibilidad del terreno a inundaciones por precipitación pluvial y los mapas de periodos de retorno proporcionados por CENAPRED, se generaron una serie de mapas que muestran diferentes escenarios de los efectos producidos por las inundaciones en diversas zonas de acuerdo a determinados lapsos de tiempo (Figuras 300 a 305).

Cabe mencionar que los mapas resultantes, no son la representación de algún modelo hidráulico, por lo que no se representan en ellos escenarios de magnitud o intensidad del fenómeno de inundación, más bien en ellos se diferencian las áreas que se verían más afectadas de las que menos problemas presentarían, cuando se presente una lámina de precipitación similar a las analizadas, otra consideración importante es que en los cálculos de las áreas susceptibles no se considera la superficie de las islas del Estado, esto debido a que no fueron analizados por lo que en esta sección se consideró una superficie de 39,501 Km².

En las Figuras 300 a 305, la cartografía de las zonas con problemas por inundación esta dividida en 5 categorías de susceptibilidad, que según su clasificación, son representadas en una gama de colores que corresponden a: Muy Bajo (color verde), Bajo (verde claro), Medio (amarillo), Alto (anaranjado) y Muy Alto (rojo).

Como se puede observar en los mapas 300 a y b, se muestran las clases de susceptibilidad con periodos de retorno de 2 y 5 años respectivamente, con una hora de duración, notándose de acuerdo a la configuración de las isoyetas, coincidencias en la configuración de los niveles de susceptibilidad; esto debido a que los periodos de retorno no cambian mucho y por consiguiente presentan una homogeneidad en los resultados. Para el caso de los mapas c (10 años una hora) y d (20 años una hora), el comportamiento general de las zonas es similar.

En el mapa 300a. De los 39,501 Km² de superficie del Estado, la categoría muy baja, abarca 1,946 Km² equivalente al 4.93% del territorio, la categoría baja el 2,953 Km² equivalente al 7.48%, la

categoría media 19,862 Km² equivalente al 50.28%, la alta 12,486 Km² equivalente al 31.6%, y la muy alta 2,254.5 Km² equivalente al 5.71%.

De manera general se puede observar que las áreas que cubren la mayoría de la superficie son medias y altas, donde destacan los municipios que se encuentran al Sur del Estado, debido a que esta zona tiene los problemas más importantes de inundación. En segundo término se encuentran los municipios que limitan con el estado de Quintana Roo y por último los que se encuentran en la parte central del Estado. Las áreas con categorías muy bajo, bajo, se ubican en toda la franja de la línea de costa, estos valores se observan en forma de la mitad de un círculo que va desde el municipio de Ixil hasta Dzilam de Bravo, y por último la categoría muy alto, se encuentra en la zona “Sierra de Ticul”, destacando los municipios de Santa Elena, Tekax, Tzucacab y Peto.

En el mapa 300b. De la superficie del Estado, la categoría muy baja, abarca 1,431 Km² que representa el 3.62% del territorio, la baja 3,059 Km² que representa el 7.74%, la media 17,571 Km² que representa el 44%, la alta 15,022 Km² que representa el 38%, y la muy alta 2,418 Km² que representa el 6.12%. Notándose que es muy similar al mapa 298b, diferenciándose únicamente por presentar una zona de categoría alta que es de forma semicircular y que se extiende por los municipios de Dzitás, Espita Temozón, Valladolid, Cuncunul y Tinum, en la zona de costa se reduce su área de influencia, y la categoría Bajo, mientras que en el sur de Peto incrementa la susceptibilidad a muy alto.

En el mapa 300c. Del total de la superficie continental del Estado, la categoría muy baja, abarca 3,013.4 Km² que equivale al 7.6% del territorio, la baja 2,396 Km² que equivale al 6.1%, la media 20,044 Km² que equivale al 50.7%, la alta 11,936 Km² que equivale al 30.2%, y la muy alta 2,112 Km² que equivale 5.3%. En este Mapa, las zonas de susceptibilidad alta y muy alta disminuyen, tal es el caso de los municipios de Dzitás, Espita Temozón, Valladolid, Cuncunul y Tinum que en este mapa son clasificados con susceptibilidad media, lo mismo ocurre en la zona limítrofe de Tizimín con el estado de Quintana Roo donde la ponderación cambio de alto a medio, un tercer caso se presenta en la parte Poniente del Estado donde la disminución de la ponderación de alto a medio concierne a los municipios de Celestún Hunucmá y Tetiz

Para el caso del mapa 300d las 5 clases de susceptibilidad se distribuyen de la siguiente forma: para la categoría muy baja abarca 1,033.6 Km² que representa el 2.6% del territorio, la baja 2,728 Km² que representa el 6.9%, la media 18,319.6 Km² que representa el 46.4%, la alta 14,406.2 Km² que representa el 36.5%, y la muy alta 3,014.9 Km² que representa el 7.6%. De manera general para este escenario, los porcentajes de susceptibilidad alto aumentan, por ejemplo en los municipios de Halachó, Celestún y Maxcanú, al sur de este último municipio se observa una zona de clasificación muy alta. Por otra parte En los municipios de Tetiz, Ucú y Hunucmá se observa que su ponderación cambia de bajo a medio respecto al mapa anterior, de igual forma una zona semicircular que se extiende desde el Este de Ixil, pasando por el Noreste de Motul, Norte de Teya, Noroeste de Buctzonot y llegando hasta Dzilam de Bravo cambio de ponderación de muy bajo a bajo.

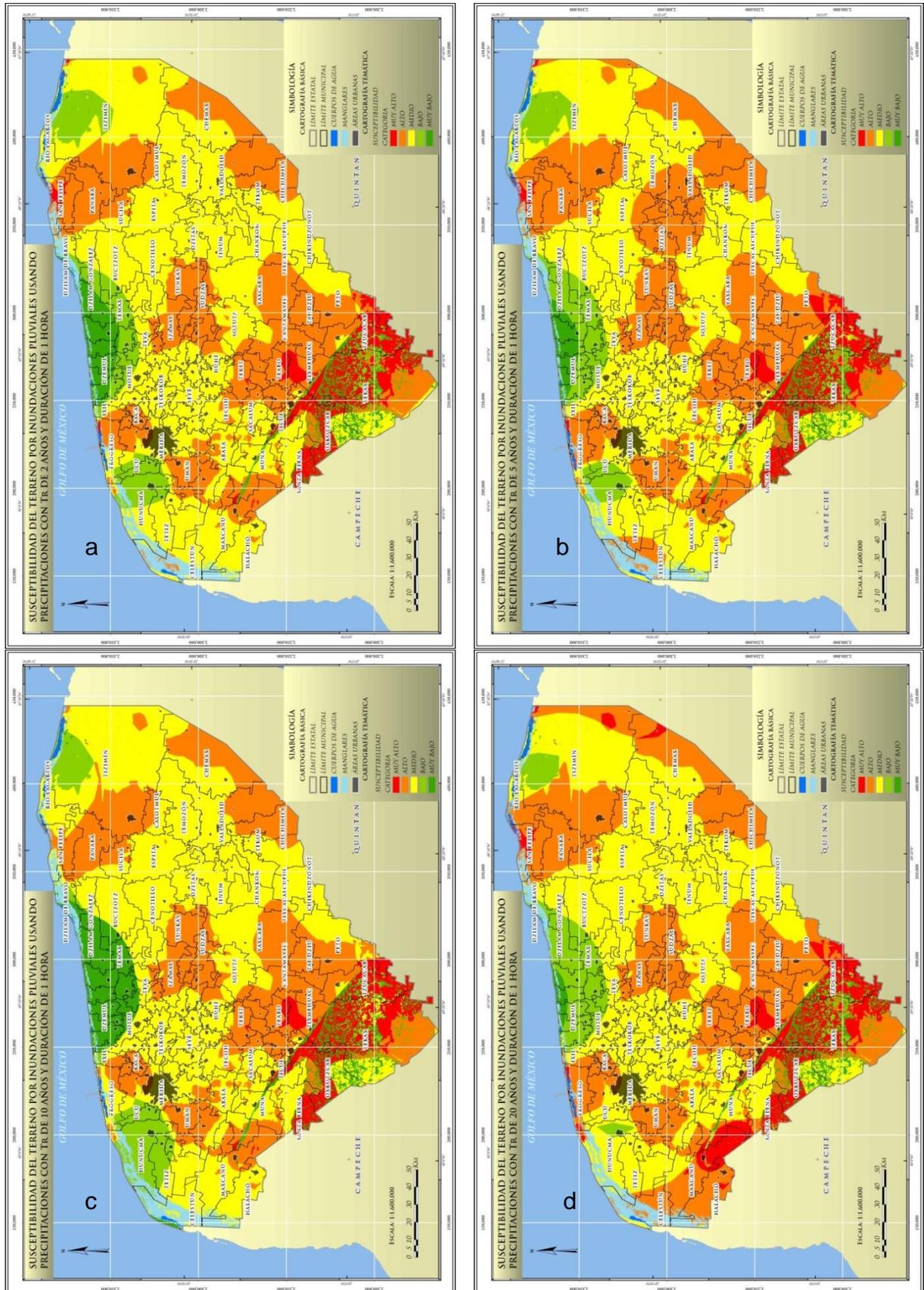


Figura 300. Susceptibilidad del terreno a inundaciones pluviales con periodos de retorno de 2, 5, 10 y 20 años con duración de 1 hora.

En la figura 301, los mapas a y b muestran las clases de susceptibilidad con periodos de retorno de 50 y 100 años respectivamente, con una hora de duración, notándose de acuerdo a la configuración de las isoyetas, algunas diferencias en la configuración de los niveles de susceptibilidad, esto debido a que los periodos de retorno tienen cambios y por consiguiente presentan variaciones en los resultados; sobre todo en la clasificación media que disminuye mientras que la susceptibilidad alta y baja aumentan. Para el caso de los mapas 301c (200 años una hora) y d (500 años una hora), el comportamiento general de las zonas clasificadas como bajo cambian a medio.

En el mapa 301a. De los 39,501 Km² de superficie del Estado, la categoría muy baja, abarca 2,918.7 Km² equivalente al 7.4% del territorio, la baja 7,576.8 Km² equivalente al 19.2%, la media 17,664.8 Km² equivalente al 44.7%, la alta 9,008.6 Km² equivalente al 22.8%, y la muy alta 2,333.5 Km² equivalente al 5.9%. De manera general se puede observar que las áreas que cubren la mayoría de la superficie son medias y altas, donde destacan los municipios que se encuentran al Sur del Estado, debido a que esta zona tiene los problemas más importantes de inundación. En segundo término se encuentran los municipios que limitan con los estados de Quintana Roo y Campeche y por último los que se encuentran en la parte central del Estado. Las áreas con categorías muy bajo, bajo, se ubican en la franja de costa, estos valores se observan en forma de la medio círculo que va desde el municipio de Ixil hasta Dzilam de Bravo, Mérida en general presenta susceptibilidad baja, mientras que la categoría muy alto, se encuentra en la zona "Sierra de Ticul", destacando los municipios de Santa Elena, Tekax, Tzucacab y Peto.

En el mapa 301b. De la superficie del Estado, la categoría muy baja, abarca 3,059.4 Km² que representa el 7.7% del territorio, la baja 8,202.3 Km² que representa el 20.8%, la media 11,718.5 Km² que representa el 29.7%, la alta 13,615.6 Km² que corresponde al 34.5%, y la muy alta 2,906.6 Km² que constituye el 7.4%. De manera general se puede diferenciar al mapa 301a por el cambio de categoría de medio a alto sobre todo en la parte central del Estado, ejemplo de esto se observa en los municipios de Chocholá, Umán, Progreso, Norte de Mérida, Mocochoá, Conkal y Chicxulub Pueblo. Al sur de esta zona en los municipios de Mama, Chumayel, Mayapán y Maní se observó el mismo cambio.

En el mapa 301c. Del total de la superficie continental del Estado, la categoría muy baja, abarca 4,427.1 Km² que constituye el 11.2% del territorio, la baja 16,280.9 Km² que constituye el 41.2%, la media 12,574.2 Km² que constituye el 31.8%, la alta 4,513 Km² que constituye el 11.4%, y la muy alta 1,707.4 Km² que constituye el 4.3%. En este Mapa, las zonas de susceptibilidad baja se extienden por la mayor parte del Estado, la categoría muy alta se distribuye en el Suroeste abarcando los municipios de Halachó, Maxcanú, Santa Elena, Oxcutzcab y hacia el sur de Tzucacab y Tekax, mientras que en el límite con Quintana Roo se observa otra zona de categoría alta en los municipios que van desde Tizimín, Chemax, Valladolid, Chichimilá hasta el Este de Tixcacalcupul.

Para el caso del mapa 301d. Las 5 clases de susceptibilidad se distribuyen de la siguiente forma: la categoría muy baja abarca 1,767.5 Km² que equivale al 4.5% del territorio, la baja 2,890.7 Km² que equivale al 7.3%, la media 18,474.8 Km² que equivale al 46.8%, la alta 13,132.9 Km² que equivale al 33.2%, y la muy alta 3,236.3 Km² que equivale al 8.2%. De manera general para este escenario, los porcentajes de susceptibilidad medio y alto aumentan, mientras que los rangos muy bajo y bajo se relacionan a la zona de pequeñas elevaciones en la Sierra de Ticul, las zonas bajas de esta misma sierra corresponden a susceptibilidad alta y muy alta, en la parte norte del Estado se observan tres zonas con valores bajo y muy bajo, la primera abarca los municipios de Ucú, Hunucmá y Tetiz, la segunda zona corresponde a una extensión semicircular que va desde el municipio de Ixil hasta Dzilam pasando por el Noreste de Motul, Norte de Teya, Noroeste de Buctzonot, la última zona que correspondiente a susceptibilidad baja se ubica al norte de Tizimín, por otra parte podemos observar que las clasificaciones medio y alto se distribuyen a lo largo de la zona central del Estado.

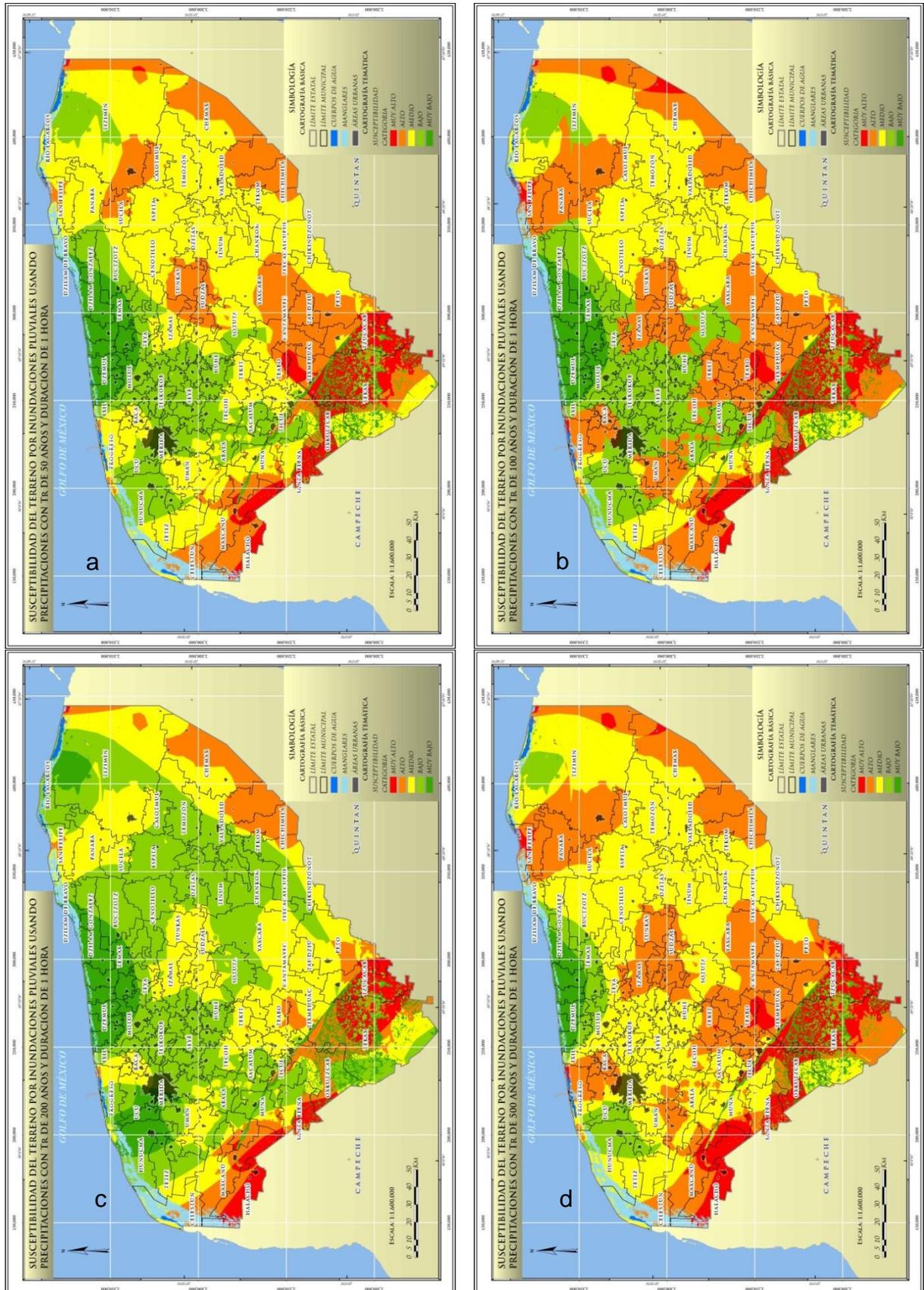


Figura 301. Susceptibilidad del terreno a inundaciones pluviales con periodos de retorno de 50, 100, 200 y 500 años con duración de 1 hora.

En los mapas a, b, c y d de la figura 302, se muestran las clases de susceptibilidad con periodos de retorno de 1 000, 2 000, 5 000 y 10 000 años con una hora de duración respectivamente, de acuerdo a la configuración de las isoyetas que se usaron para generar los diferentes escenarios, podemos observar algunas diferencias en el arreglo de los niveles de susceptibilidad, sin embargo en la zona de la “Sierra de Ticul” se comporta prácticamente igual, por consiguiente las variaciones se presentan; sobre todo en la zona plana del Estado. En general, las zonas que colindan con Campeche y Quintana Roo presentan áreas con clasificación que va de alto a muy alto, mientras que los valores intermedios se distribuyen en el centro del esta, por ultimo las áreas con susceptibilidad menor se encuentran paralelo a la costa.

En el mapa 302a. De los 39,501 Km² de superficie del Estado, la categoría muy baja, abarca 2,932.6 Km² equivalente al 7.4% del territorio, la baja 8,708.9 Km² equivalente al 22%, la media 18,567.7 Km² equivalente al 47%, la alta 7,130.5 Km² equivalente al 18.1%, y la muy alta 2,163 Km² equivalente al 5.5%. De manera general se puede observar que las áreas que cubren la mayoría de la superficie son de susceptibilidad media y baja, por presentar un nivel alto destacan los municipios que limitan con los estados de Quintana Roo (Chemax, Valladolid y Chichimilá) y Campeche (Halachó y Maxcanú), sin embargo la zona de susceptibilidad Muy alta se ubica en los municipios de Santa Elena, Oxkutzcab, y Tecax y tzucacab.

En el mapa 302b. De la superficie del Estado, la categoría muy baja, abarca 3,391 Km² que representa el 8.6% del territorio, la baja 12,484 Km² que representa el 31.6%, la media 15,868.5 Km² que representa el 40.2%, la alta 4,977 Km² que representa el 12.6%, y la muy alta 2,782 Km² que representa 7%. De manera general se puede diferenciar al mapa 302a por el cambio de categoría de medio a bajo sobre todo en los municipios de Cenotillo, Espita, Tinum, Chancom y Yaxcabá, mientras que en los alrededores del municipio de Tunkás el valor de la susceptibilidad baja de alto a medio, por último se observa una franja que va de la zona costera hacia Hunucmá, Tetiz, Kinchil y Samahil la cual tiene valor de muy alto.

En el mapa 302c. Del total de la superficie continental del Estado, la categoría muy baja, abarca 3,198.3 Km² que constituye el 8.1% del territorio, la baja 16,783.8 Km² que constituye el 42.5%, la media 10,359.4 Km² que constituye el 26.2%, la alta 6,102.8 Km² que constituye el 15.4%, y la muy alta 3,057.8 Km² que constituye el 7.7%. En este Mapa, las zonas de susceptibilidad baja se extienden por la mayor parte del Estado, la categoría muy alta se distribuye en el Suroeste abarcando los municipios de Halachó, Maxcanú, Santa Elena, Oxkutzcab y hacia el sur de Tzucacab y Tekax, mientras que en la zona costera en los alrededores de Puerto Progreso se observan áreas de susceptibilidad muy alta, San Felipe y Río Lagartos también presentan este nivel, por otro lado en el límite con Quintana Roo se observa otra zona de categoría alta en los municipios de Chemax, Valladolid, Chichimilá y Sureste de Tixcacalcupul.

Con lo que respecta al mapa 302d. Las 5 clases de susceptibilidad se distribuyen de la siguiente forma: para la categoría muy baja abarca 3,057.6 Km² que corresponde al 7.7% del territorio, la baja 12,608.6 Km² que corresponde al 31.9%, la media 17,024.8 Km² que corresponde al 43.1%, la alta 4,747.2 Km² que corresponde al 12%, y la muy alta 2,064.7 Km² que corresponde al 5.2%. De manera general para este escenario, los porcentajes de susceptibilidad Muy alta se concentran tanto en los límites con Campeche como son los municipios de Halachó, Maxcanú y Santa Elena y en el “Con Sur” en Tekax y Tzucacab, de igual forma los valores altos disminuyen a susceptibilidad media, tal es el caso de Sucilá, Tizimín, Tunkás, Sudzal, Tixméhuac y Yaxcabá, por otra parte en los alrededores de Dzitás, Temozón y Valladolid aumenta la ponderación de baja a media, por último se observa que en los en la zona costera en los alrededores de Puerto Progreso y San Felipe disminuye de Muy alto a Alto.

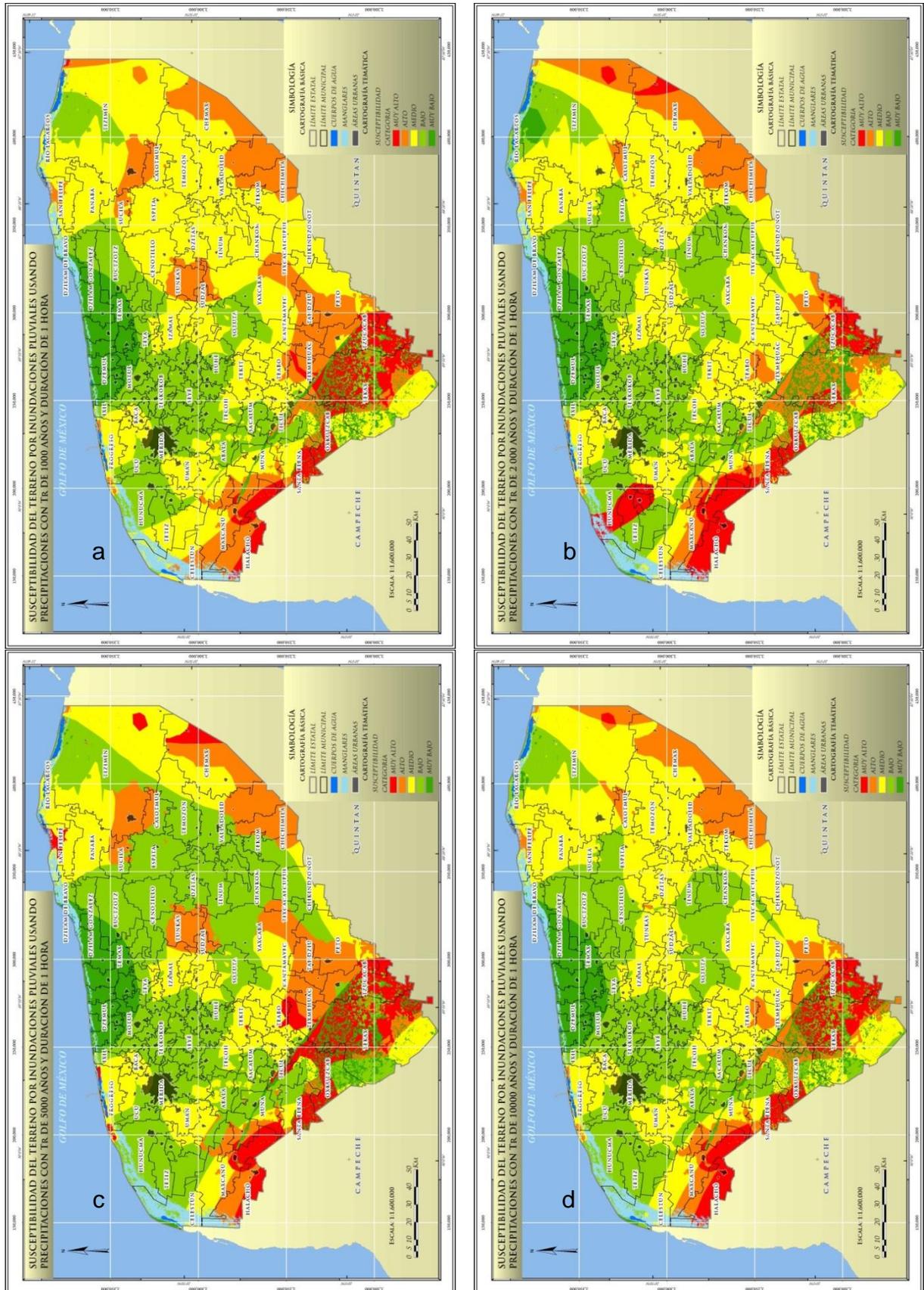


Figura 302. Susceptibilidad del terreno a inundaciones pluviales con periodos de retorno de 1000, 2000, 5000 y 10000 años con duración de 1 hora.

Siguiendo el mismo esquema que en los mapas con duración de una hora, pero ahora con una duración de 24 horas, en los mapas a y b, de la figura 303, se muestran las clases de Susceptibilidad con periodos de retorno de 2 y 5 años con duración de 24 horas respectivamente, notándose de acuerdo a la configuración de las áreas, coincidencias en la configuración de los niveles de susceptibilidad, esto debido a que los periodos de retorno no cambian mucho y por consiguiente presentan una homogeneidad en los resultados; para el caso de los mapas 303c (10 años 24 horas) y d (20 años 24 horas), pasa casi lo mismo que en los anteriores con la pequeña diferencia de que la zona de muy alta susceptibilidad tiene más área de afectación.

En el mapa 303a. De los 39,501 Km² de superficie del Estado, la categoría de Susceptibilidad muy baja, abarca 2,846 Km², que abarca el 7.2% del territorio, la baja con 5,569 Km², que representa el 14.1%, la media con 14,496 Km², que representa el 36.7%, la alta con 13,272 Km², que representa el 33.6%, y la muy alta con 3,318 Km², que representa el 8.4%. De manera general se puede observar que las áreas que cubren la mayoría de la superficie son medias y altas, donde destacan los municipios que se encuentran cerca del límite con el estado de Campeche, debido a que esta zona tiene los problemas más importantes de inundación. En segundo término se encuentran los municipios que limitan con el estado de Quintana Roo y por último los que se encuentran en la parte central del Estado. Las áreas con categorías muy bajo, bajo, se ubican en toda la franja de la línea de costa, y por último la categoría muy alto, se encuentra en el cono sur, destacando los municipios de Santa Elena, Tekax, Tzucacab y Peto.

En el mapa 303b. De la superficie del Estado, se calcularon en 5 categorías, donde la muy baja abarca 1,501 Km², que corresponde al 3.8% del territorio, la baja con 3,555 Km², que corresponde al 9%, la media con 18,209 Km², que corresponde al 46.1%, la alta con 13,864 Km², que corresponde al 35.1% y la muy alta con 2,372 Km², que corresponde al 6%. Siendo muy similar al mapa 303a, diferenciándose en la categoría muy bajo en la zona centro norte, es más amplia y en la zona de costa se reduce su área de influencia, y la categoría muy alto se ubica solamente en el cono sur.

En el mapa 303c. De la superficie estatal, se obtuvieron 5 categorías, muy baja abarca 3,160 Km², que representa el 8% del territorio, la baja con 9,638 Km², que constituye el 24.4%, la media con 17,696 Km², que constituye el 44.8%, la alta con 7,268 Km², que constituye el 18.4% y la muy alta con 1,739 Km², que constituye el 4.4%. Las categorías que cubren la mayoría del territorio son bajo y medio, destacando los municipios de Mérida y los que se encuentran en la zona de la costera, y los que se encuentran en la parte centro-oriente. Las zonas con más problemas por inundación son los municipios de Santa Elena, Tekax, Tzucacab y Peto del cono sur; los municipios de Chémax, Valladolid y Chichimilá que se encuentran en el límite con Quintana Roo; Tunkás, Sudzal, Kantunil de la parte central y algunas partes de la zona costera.

Con lo que respecta al mapa 303d. De las 5 categorías existentes se tiene que la muy baja abarca 2,962 Km², que presenta el 7.5%, del territorio, la baja con 8,848 Km², que representa el 22.4%, la media con 17,577 Km², que representa el 44.5%, la alta con 8,058 Km², que representa el 20.4% y la muy alta con 2,056 Km², que representa el 5.2%. Los resultados son muy similares al mapa 303c, diferenciándose en se tiene más área en la categoría de muy alto, siendo los municipios de Maxcanú y Halachó que se encuentran en la zona limítrofe con el estado de Campeche.

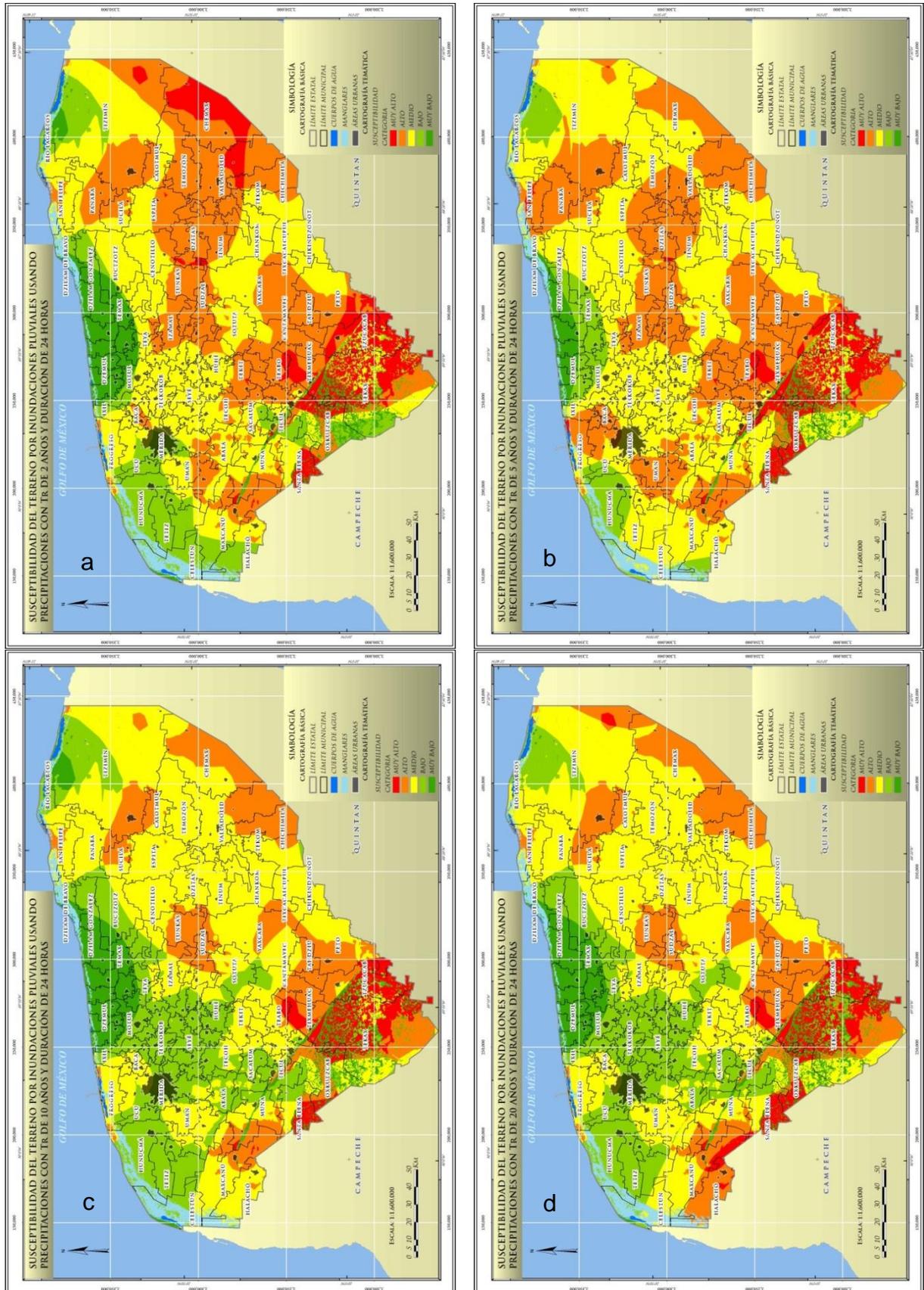


Figura 303. Susceptibilidad del terreno a inundaciones pluviales con periodos de retorno de 2, 5, 10 y 20 años con duración de 24 horas.

Como se puede observar en la figura 304, los mapas b y d, muestran las clases de Susceptibilidad con periodos de retorno de 100 años 24 horas y 500 años 24 horas respectivamente, notándose de acuerdo a la configuración de las áreas, coincidencias en la configuración de los niveles de susceptibilidad, esto debido a que los periodos de retorno no cambian mucho y por consiguiente presentan una homogeneidad en los resultados; para el caso de los mapas 304a (50 años 24 horas) y c (200 años 24 horas), éstos se diferencian en que los grados de susceptibilidad alta y muy alta, tienen más área de afectación.

En el mapa 304a. De los 39,501 Km² de superficie del Estado, la categoría de Susceptibilidad muy baja, abarca 1,571 Km², que representa el 3.9% del territorio, la baja con 3,308 Km², que representa el 8.3%, la media con 16,913 Km², que representa el 42.8%, la alta con 13,107 Km², que representa el 33.3%, y la muy alta con 4,602 Km², que representa el 11.7%. De manera general se puede observar que las áreas que cubren la mayoría de la superficie son medias y altas, donde destacan los municipios que se encuentran cerca del límite con el estado de Campeche y Quintana Roo, debido a que esta zona tiene las áreas más propensas a la inundación. En segundo término se encuentran los municipios que se encuentran en la zona oriente-centro y el municipio de Mérida y por último los que se encuentran en la parte central del Estado. Las áreas con categorías muy bajo, bajo, se ubican en la franja de la línea de costa, y por último la categoría muy alto, se encuentra en el cono sur, destacando los municipios de Halachó, Maxcanú, Santa Elena, Oxkutzcab, Tekax, Tzucacab y Peto; y los municipios de Chemax, Valladolid y Chichimilá que se encuentran limitando con el estado de Quintana Roo.

En el mapa 304b. De la superficie del Estado, la categoría de susceptibilidad muy baja abarca 5,504 Km², que corresponde al 14% del territorio, la baja con 15,804 Km², que corresponde al 40%, la media con 12,037 Km², que corresponde al 30.4%, la alta con 4,566 Km², que corresponde al 11.6% y la muy alta con 1590 Km², que corresponde al 4%. Como puede notarse es muy similar al mapa 304d, diferenciándose únicamente en la categoría muy alta que es más amplia y abarca parte del límite con el estado de Quintana Roo.

En el mapa 304c. De la superficie estatal, la categoría muy baja abarca 3,048 Km², que equivale al 7.7% del territorio, la baja con 11,160 Km², que equivale al 28.3%, la media con 17,530 Km², que equivale al 44.4%, la alta con 5,577 Km², que equivale al 14.1% y la muy alta con 2,186 Km², que equivale al 5.5%. Las categorías que cubren la mayoría del territorio son baja y media, destacando los municipios de Mérida y los que se encuentran en la zona centro del Estado. Las zonas con más problemas por inundación son los municipios de Halachó, Maxcanú, Santa Elena, Oxkutzcab, Tekax Tzucacab, Peto, Chemax y Tizimín que se ubican en el cono sur y limitando con los estados de Campeche y Quintana Roo.

Con lo que respecta al mapa 304d. La categoría muy baja abarca 6,288 Km², que corresponde al 16%, del territorio, la baja con 16,056 Km², que corresponde al 40.6%, la media con 12,127 Km², que corresponde al 30.7%, la alta con 4,141 Km², que corresponde al 10.4% y la muy alta con 889 Km², que corresponde al 2.3%. De manera general las áreas que cubren la mayoría de la superficie son baja y media, destacando el municipio de Mérida. En Segundo término se encuentran la categoría muy baja, que se encuentra abarcando en su mayoría la zona costera, y por último las categorías alta y muy alta, se encuentran cubriendo los municipios de Halachó, Maxcanú, Santa Elena, Oxkutzcab, Tzucacab, Peto, Chichimilá, Valladolid y Chemax que se encuentran limitando con los estados de Campeche y Quintana Roo.

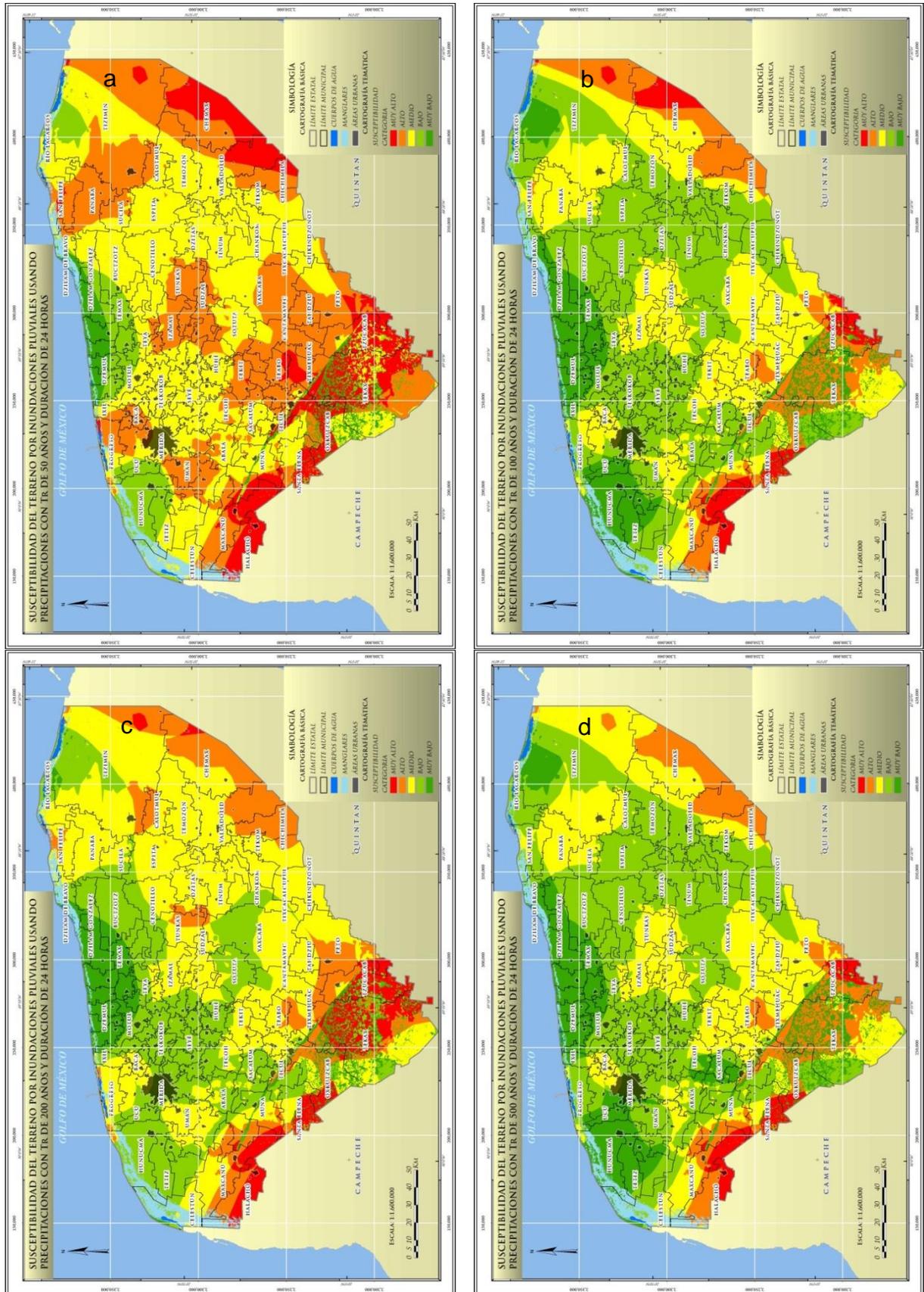


Figura 304. Susceptibilidad del terreno a inundaciones pluviales con periodos de retorno de 50, 100, 200 y 500 años con duración de 24 horas.

En los mapas 305c y d, se muestran las clases de Susceptibilidad con periodos de retorno de 5,000 años 24 horas y 10,000 años 24 horas respectivamente, notándose de acuerdo a la configuración de las áreas, coincidencias en la configuración de los niveles de amenaza presentando una homogeneidad en los resultados. Para el caso de los mapas 305a (1,000 años 24 horas) y b (2,000 años 24 horas), pasa casi lo mismo que en los anteriores pero con la pequeña diferencia de que la zona de muy alta susceptibilidad tiene más área de afectación.

En el mapa 305a. De los 39,501 Km² de superficie del Estado, la categoría de Susceptibilidad muy baja, abarca 5,916 Km², que representa el 15% del territorio, la baja con 16,332 Km², que representa el 41.3%, la media con 12,037 Km², que representa el 30.5%, la alta con 4,042 Km², que representa el 10.2%, y la muy alta con 1,174 Km², que representa el 3%. De manera general se puede observar que las áreas que cubren la mayoría de la superficie son baja y media, donde destacan los municipios que se encuentran en la parte central del Estado, destacando el municipio de Mérida; las áreas que tienen las categorías de muy bajo se ubican en la zona de costa como son los municipios de Hunucmá, Tetiz, Kinchil, Ixil, Dzemul, Telchac Puerto, Sinanché, Yobaín, Dzidzantún, Dzilam de Bravo, Dzilam González y parte norte de Tizimín; y por último los municipios que caen dentro de la categoría muy alta, los cuales son: Halachó, Maxcanú, Santa Elena, Tzucacab y Peto.

En el mapa 305b. La categoría muy baja abarca 3,888 Km², que corresponde al 9.8% del territorio, la baja con 12,543 Km², que corresponde al 31.8%, la media con 15,870 Km², que corresponde al 40.2%, la alta con 4,977 Km², que corresponde al 12.6% y la muy alta con 2,223 Km², que corresponde al 5.6%. Siendo muy similar al mapa 305a, pero diferenciándose en que los municipios de Temozón, Calotmul, Uaymas y Dzitá y Cuncunul caen dentro de la categoría de susceptibilidad media.

En el mapa 305c. De las 5 categorías, la muy baja abarca 3,060 Km², equivalente al 7.7% del territorio, la baja con 13,146 Km², equivalente al 33.3%, la media con 17,193 Km², equivalente al 43.5%, la alta con 4,405 Km², equivalente al 11.2% y la muy alta con 1,697 Km², equivalente al 4.3%. Las categorías que cubren la mayoría del territorio son baja y media, que se extiende en la zona centro del Estado, destacando el municipio de Mérida y parte de la zona costera. Los municipios que presentan una susceptibilidad alta a muy alta son: Progreso, San Felipe, Río Lagartos y Tizimín que se encuentran en la zona costera; Halachó, Santa Elena, Maxcanú y Oxcutzcab que limitan con el estado de Campeche; Tzucacab, Peto, Tixcacalpulul, Chichimilá, Valladolid y Chemax que limitan con Quintana Roo.

Finalmente, con lo que respecta al mapa 305d. de las cinco categorías existentes, la categoría muy baja abarca 3,885 Km², que presenta el 9.8%, del territorio, la baja con 15,390 Km², que representa el 39%, la media con 14,112 Km², que representa el 35.7%, la alta con 4,339 Km², que representa el 11% y la muy alta con 1,775 Km², que representa el 4.5%. Los resultados son muy similares al mapa 31c, diferenciándose en se tiene 2% más área en la categoría de muy alta. Siendo los mismos municipios que presentan las áreas de susceptibilidad.

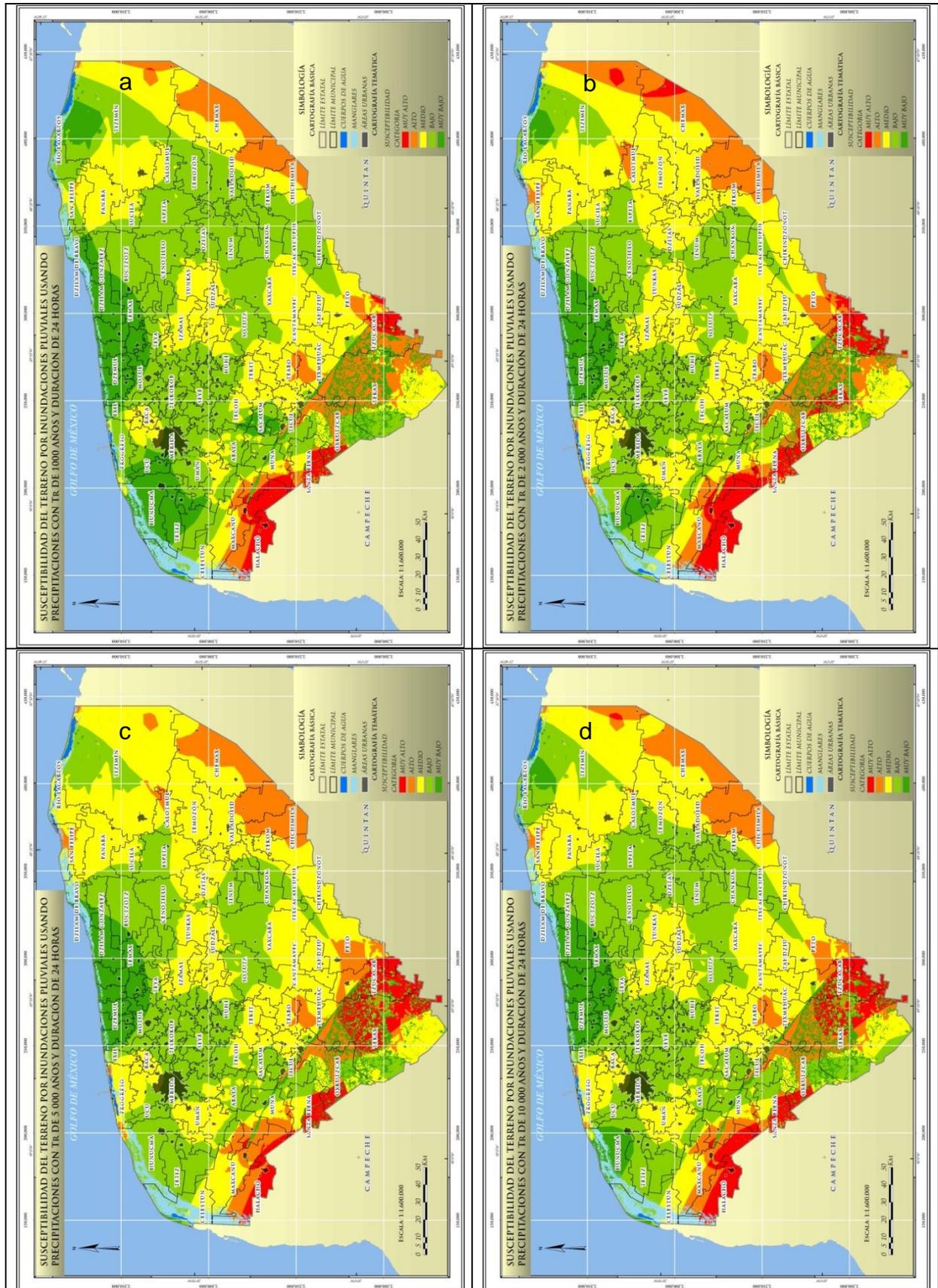


Figura 305. Susceptibilidad del terreno a inundaciones pluviales con periodos de retorno de 1000, 2000, 5000 y 10000 años con duración de 24 horas.

VIII.5. Ciclones Tropicales

Los fenómenos conocidos como ciclones tropicales, están caracterizados por generar fuertes vientos, aumento del oleaje, sobreelevación del nivel del mar y abundante lluvia, estos por su naturaleza destructiva tienen un impacto económico importante a nivel mundial.

En la actualidad este tipo de fenómenos se les observa y monitorea constantemente mediante satélites, radares meteorológicos, aviones “cazahuracanes”, con equipo tecnológico de punta, sin embargo, a pesar de todas las prevenciones y alertas tomadas los ciclones tropicales causan decesos y daños económicos considerables en todo el mundo, como lo sucedido con el huracán Katrina en 2005, provocando más de mil quinientos decesos y daños materiales calculadas en 108 mil millones de dólares en Estados Unidos.

En México, el huracán Gilberto cobro 255 decesos con un costo de pérdidas económicas de alrededor de 766 millones de dólares, siendo además este fenómeno responsable de la remoción de muchas toneladas de playa de la zona de costera de Progreso en el estado de Yucatán, el cual, debido a la ubicación geográfica en la que se encuentra, ha recibido constantemente el impacto de ciclones tropicales. Sin embargo, con el pasar del tiempo debido a la pronta acción de los sistemas de alerta y el oportuno seguimiento de estos fenómenos, se ha logrado disminuir los decesos causados por los mismos.

Otros ciclones que han tenido una importancia en cuanto a daños, han sido en el 2002: el Isidoro que tuvo vientos de más de 200 Km/hora (rachas de 250 Km/hora) que afectaron por más de 3 días la costa norte del estado y la zona centro sur, generando fuertes inundaciones en la porción conocida como cono sur del estado de Yucatán al alcanzar un tirante de agua de más de 10 metros de altura; en el 2005 el huracán Wilma tocó tierra en la Península de Yucatán siendo huracán categoría 4, con vientos de más de 150 millas por hora (250 Km/h), diversas zonas de la Península de Yucatán tuvieron vientos de huracán por más de 24 horas consecutivas y se generaron inundaciones en diversos municipios del estado y en 2007 el huracán Deán ingresó a tierra firme en la Península, donde alcanzó el nivel 5 de intensidad, convirtiéndose en el segundo huracán de esa categoría en tocar tierra desde 1992, y el tercero en intensidad desde 1850. Posteriormente se degradó a tormenta tropical.

El presente análisis tiene como principal objetivo determinar el comportamiento histórico de los ciclones tropicales en el estado de Yucatán, con la finalidad de involucrar un parámetro más que sirva de insumo en otros niveles de información, y así por ejemplo poder definir con mayor precisión la problemática existente en relación a vientos, sequías, inundaciones y precipitaciones, que a su vez, pueden actuar como detonantes para otro tipo de fenómenos como deslizamientos y hundimientos, que en conjunto o de manera individual conllevan a desastres naturales en el Estado.

Cabe mencionar, que los mapas obtenidos en el presente trabajo, se generaron a partir de las trayectorias que han cruzado y atravesado las proximidades del estado, creándose así mapas de frecuencia para visualizar los lugares geográficos en donde se ha tenido mayor presencia de este tipo de fenómenos. Las categorías de los ciclones tropicales y los periodos de tiempo son los parámetros principales a partir de los cuales de acuerdo a la metodología de CENAPRED, se realizaron los cálculos para determinar los periodos de retorno, peligro y riesgo por presencia de ciclones tropicales.

VIII.5.1. Conceptos Básicos

Ciclón tropical es un término meteorológico usado para referirse a un sistema de tormentas caracterizado por una circulación cerrada alrededor de un centro de baja presión que produce fuertes vientos y abundante lluvia. Estos ciclones tropicales extraen su energía de la condensación de aire húmedo, produciendo fuertes vientos. Se distinguen de otras tormentas ciclónicas, como las bajas polares, por el mecanismo de calor que las alimenta y las convierte en sistemas tormentosos de "núcleo cálido".

En términos simples, un ciclón es un sistema de baja presión atmosférica y a su alrededor se forman patrones de vientos intensos y organizados rotatorios en dirección inversa a las manecillas del reloj en el hemisferio norte, además de nubes de tormenta, al centro con aire tibio además que tiene presión relativa mínima. Se originan en el mar entre las latitudes 5° a 15°, tanto en el hemisferio norte como en el sur, en la época en que la temperatura del agua es mayor o igual a 26 °C.

Las regiones donde se originan los ciclones se les conocen como zonas ciclogénicas. Los que llegan a México provienen de la sonda de Campeche, Golfo de Tehuantepec, Caribe (alrededor de los 13 grados latitud norte y 65 grados longitud oeste) y sur de las islas Cabo Verde (cerca de los 12 grados latitud norte y 57 grados longitud oeste).

Clasificación

Dependiendo de la magnitud de los vientos sostenidos en la superficie, el sistema se clasifica como perturbación tropical, depresión tropical, tormenta tropical, huracán o tifón. La circulación gira en sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio norte y viceversa en el hemisferio sur. Cabe mencionar que serán más intensos sus vientos mientras más estrechas sean las isobaras (líneas de igual presión atmosférica). Una condición que favorece la formación de un ciclón es la humedad en las capas bajas de la atmósfera es superior al 70%.

Cuando hay áreas de baja presión, se considera como una depresión para una etapa en el desarrollo de un ciclón tropical. Ahora bien, si ésta se desarrolla en zona tropical con vientos sostenidos de superficie de 61 Km/h, no sobrepasan éste límite se les denomina Depresión Tropical.

Si esta depresión alcanza vientos máximos sostenidos entre 62 Km/h y 117 Km/h se denomina tormenta tropical al sistema, en este punto se le designa un nombre para poder identificarlo y seguirlo (por ejemplo Isidoro, Pauline, etc.). Un ciclón tropical con vientos sostenidos de 65 nudos (117 Km/h) o más, que se desarrolla en el Atlántico Norte, Mar Caribe, Golfo de México y al Este del Pacífico Norte se le denomina Huracán. En otros lugares es conocido de diversas formas, en el Pacífico Occidental como tifón y en el Océano Índico como ciclón. Por lo general tiene un alto grado de destrucción después de ser tormenta tropical. Como se mostró en la tabla 1, el huracán tiene 5 grados de intensidad con velocidades que varían entre los 118 y más de los 250 Km/h.

Los ciclones tropicales se forman sobre las cálidas aguas del trópico, a partir de disturbios atmosféricos preexistentes tales como sistemas de baja presión y ondas tropicales. Las ondas tropicales se forman cada tres o cuatro días sobre las aguas del Océano Atlántico, cerca de la línea ecuatorial. Los ciclones tropicales también pueden formarse de frentes fríos y, ocasionalmente, de un centro de baja presión en los niveles altos de la atmósfera.

El proceso por medio del cual una tormenta tropical se forma y, subsecuentemente, se intensifica al grado de huracán depende de, al menos, tres de las condiciones: que haya un disturbio atmosférico preexistente (onda tropical), que las temperaturas oceánicas sean cálidas, con al menos 26 °C, esto desde la superficie del agua hasta 15 metros por debajo de ésta, que los vientos débiles no cambien mucho en dirección y velocidad en los niveles altos de la atmósfera.

Para clasificar un ciclón, podemos tomar como base la escala que Herbert Saffir y Robert Simpson diseñaron en 1970 (Tabla 136), donde ponderan la intensidad utilizando niveles o categorías del 1 al 5, basándose en los registros de presión barométrica, velocidad del viento y el aumento repentino del nivel del mar por efecto de la tormenta además de clasificar los daños potenciales.

Tabla 136. Escala de daño potencial de Saffir-Simpson.

CATEGORIA	PRESIÓN CENTRAL (MB)	VIENTOS (KM/H)	MAREA DE TORMENTA (M)	CARACTERÍSTICAS DE LOS POSIBLES DAÑOS MATERIALES E INUNDACIONES
Perturbación Tropical	1008.1 a 1010	-	-	Ligera circulación de vientos
Depresión Tropical	1004.1 a 1008	< 62	-	Localmente destructivo
Tormenta Tropical	985.1 a 1004	62.1 a 118	1.1	Tiene efectos destructivos
Huracán Categoría 1	980.1 a 985	118.1 a 154	1.5	Potencial Mínimo. Sin daño efectivo en las estructuras de los edificios, sí a casas rodantes no ancladas, arbustos, follaje y árboles, a señales pobremente construidas y en muelles. Algunas inundaciones de carreteras costeras en zonas bajas. Embarcaciones pequeñas son arrancadas de sus amarres.
Huracán Categoría 2	965.1 a 980	154.1 a 178	2.0 a 2.5	Potencial Moderado. Daños considerables a arbustos y a follaje de árboles, algunos son derribados, a señales pobremente construidas, a techos de casas, puertas y ventanas, a muelles. Daño grave a casas rodantes. Carreteras costeras inundadas de 2 a 4h antes de la entrada del centro del huracán. Evacuación de residentes de la línea de costa.
Huracán Categoría 3	945.1 a 965	178.1 a 210	2.5 a 4.0	Potencial Extensivo. Árboles altos derribados. Ciertos daños en los techos de casas, puertas y ventanas, algunos daños estructurales en pequeñas residencias. Destrucción de casas rodantes. Las inundaciones cerca de la costa destruyen las estructuras más pequeñas; los escombros flotantes y el embate de las olas dañan a las estructuras mayores cercanas a la costa. Los terrenos sobre 1.5 msnm, pueden resultar inundados hasta 13 Km tierra adentro (ó más) desde la costa.
Huracán Categoría 4	920.1 a 945	210.1 a 250	4.0 a 5.5	Potencial Extremo. Arbustos y árboles derribados; señales destruidas. Daños severos a techos, puertas y ventanas. Destrucción de casas móviles. Terrenos a 3 msnm pueden inundarse hasta 10 Km tierra adentro de la costa. Erosión importante de las playas.
Huracán Categoría 5	< 920	> 250	> 5.5	Potencial Catastrófico. Derribo de arbustos y árboles, caída de señales. Daño muy severo en ventanas, puertas, techos en residencias y edificios industriales. Destrucción de casas móviles. Daños graves en plantas bajas a menos de 4.6 msnm y a una distancia de hasta 460 m de la costa.

Fuente: <http://www.weatherwise.org>, <http://www.comet.ucar.edu>, <http://www.hurricanewarning.net>. Fascículo No. 5 Huracanes. Secretaría de Gobernación. Sistema Nacional de Protección Civil. Segunda edición, junio 1994.

Los huracanes se forman en muchas regiones oceánicas del mundo. Así como existe la Cuenca del Atlántico existen otras 6 cuencas o áreas en las que se forman ciclones tropicales. Sin embargo el nombre que reciben estos fenómenos atmosféricos depende de la región del mundo en que se formen (Figura 306). Por ejemplo en aguas de las Antillas se denominan huracanes; al este de la India y en aguas del Japón se conocen con el nombre de tifones, en el Océano Índico (bahía de Bengala), ciclones; cerca de las costas australianas willy-willies y por las de Filipinas, baguios, Técnicamente son todos ciclones tropicales...”; en América es normal referirse a ellos, con los nombres de huracanes (que es la etapa más intensa de un ciclón) o ciclones tropicales.

Los huracanes que se forman como un sistema de baja presión en las cercanías de las islas de Cabo Verde (al norte de África), tienen trayectorias posibles al Mar Caribe especialmente en los meses de septiembre y octubre. De manera un poco más detallada se aborda la Cuenca del Atlántico (Figura 307) que es una de las zonas donde se generan la mayoría de los ciclones que afectan o tienen impacto en la Península de Yucatán.

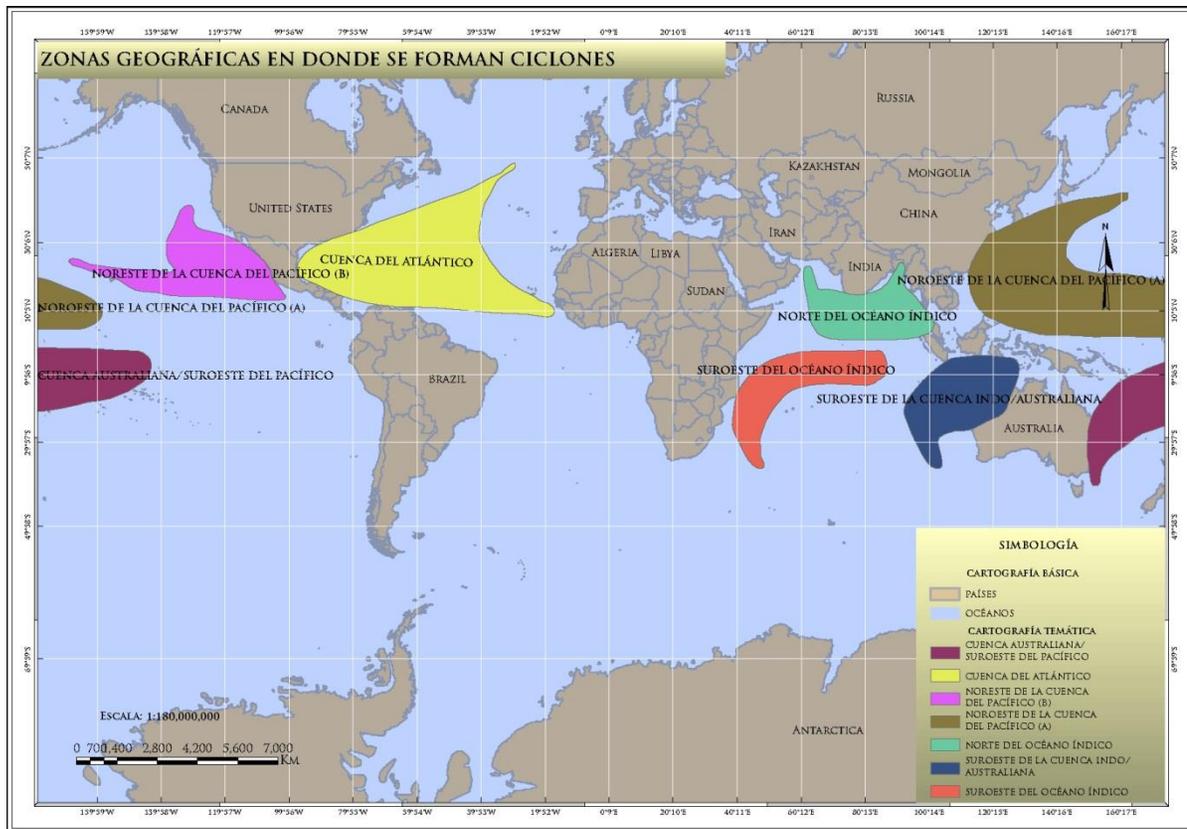


Figura 306. Zonas de formación de ciclones. Fuente: <http://www.jmarcano.com/variados/desastre/huracan2.html>.

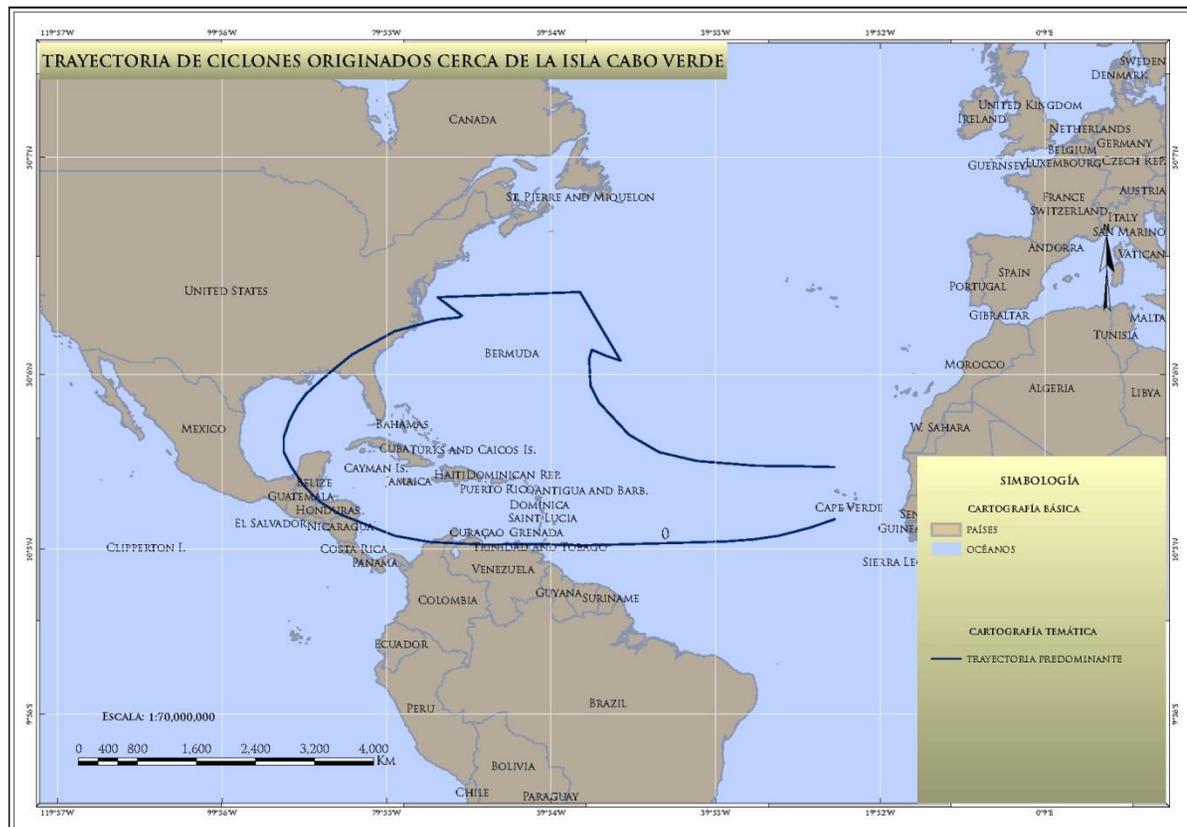


Figura 307. Zonas de formación de ciclones en el Atlántico (Fuente: <http://www.jmarcano.com/variados/desastre/huracan2.html>).

En los siguientes mapas (Figura de 308 a 313) se ilustra cómo las áreas de formación de ciclones tropicales en la cuenca del Atlántico están en función del mes y del año. Las flechas indican las trayectorias predominantes y las áreas de color las probabilidades (baja, media, alta) de formación de un ciclón tropical (depresión tropical, tormenta tropical, huracán). Pero cabe señalar, que los huracanes pueden formarse en cualquier parte de la trayectoria predominante o dentro de las áreas coloreadas.

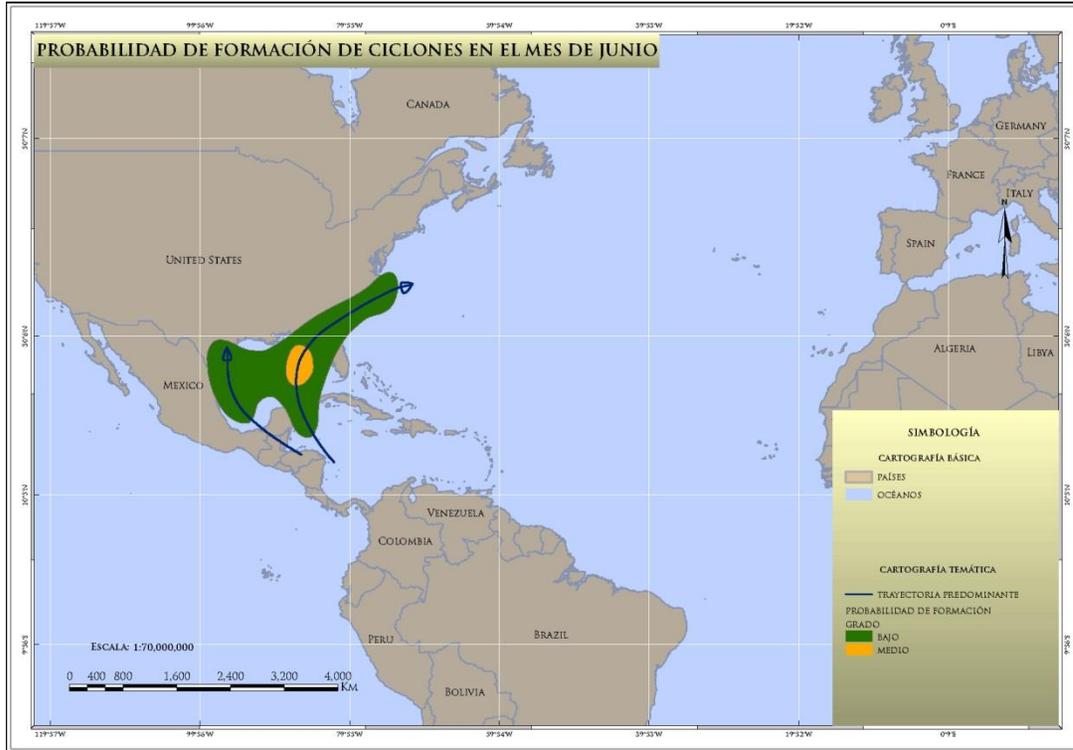


Figura 308. Zonas de formación de ciclones en junio y rutas posibles de trayectorias Fuente: <http://www.noaa.gov/>.

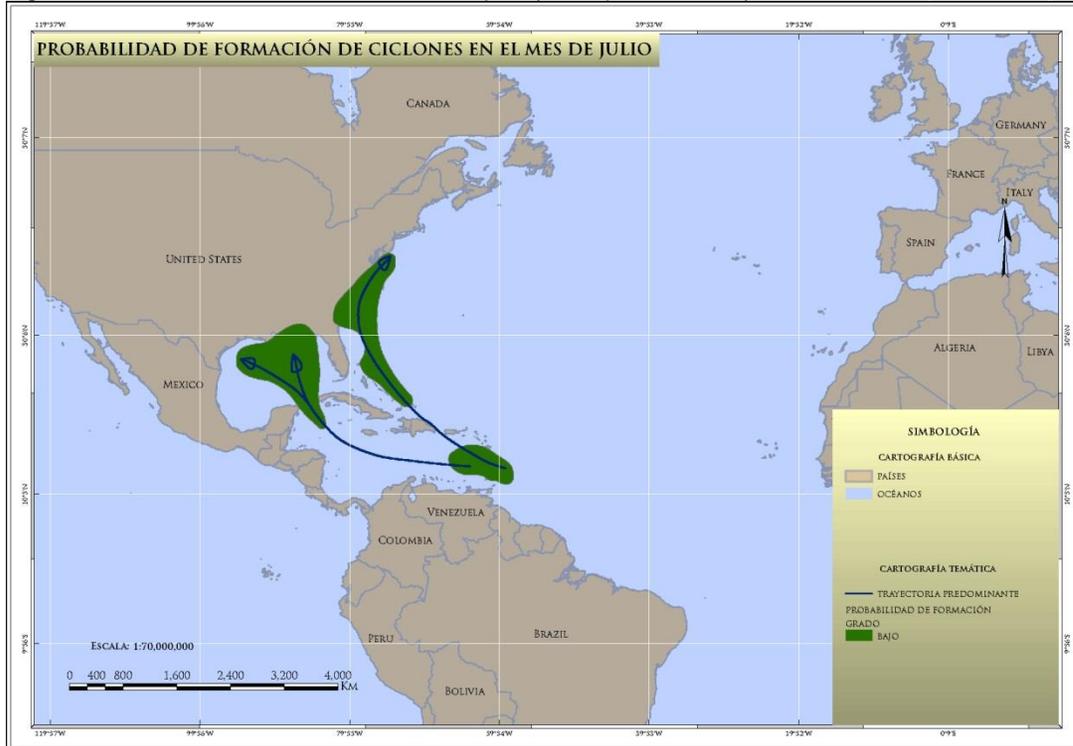


Figura 309. Zonas de formación de ciclones en julio y rutas posibles de trayectorias Fuente: <http://www.noaa.gov/>.

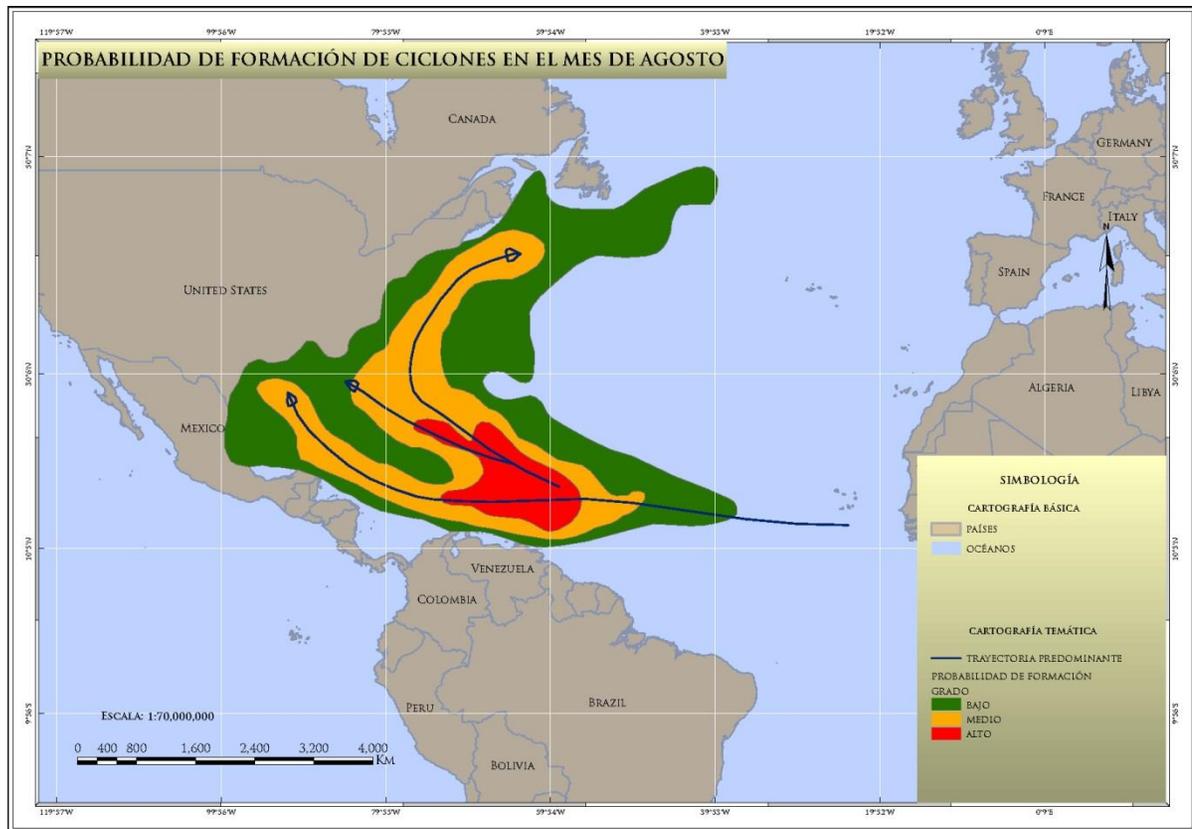


Figura 310. Zonas de formación de ciclones en agosto y rutas posibles de trayectorias (Fuente: <http://www.noaa.gov/>).

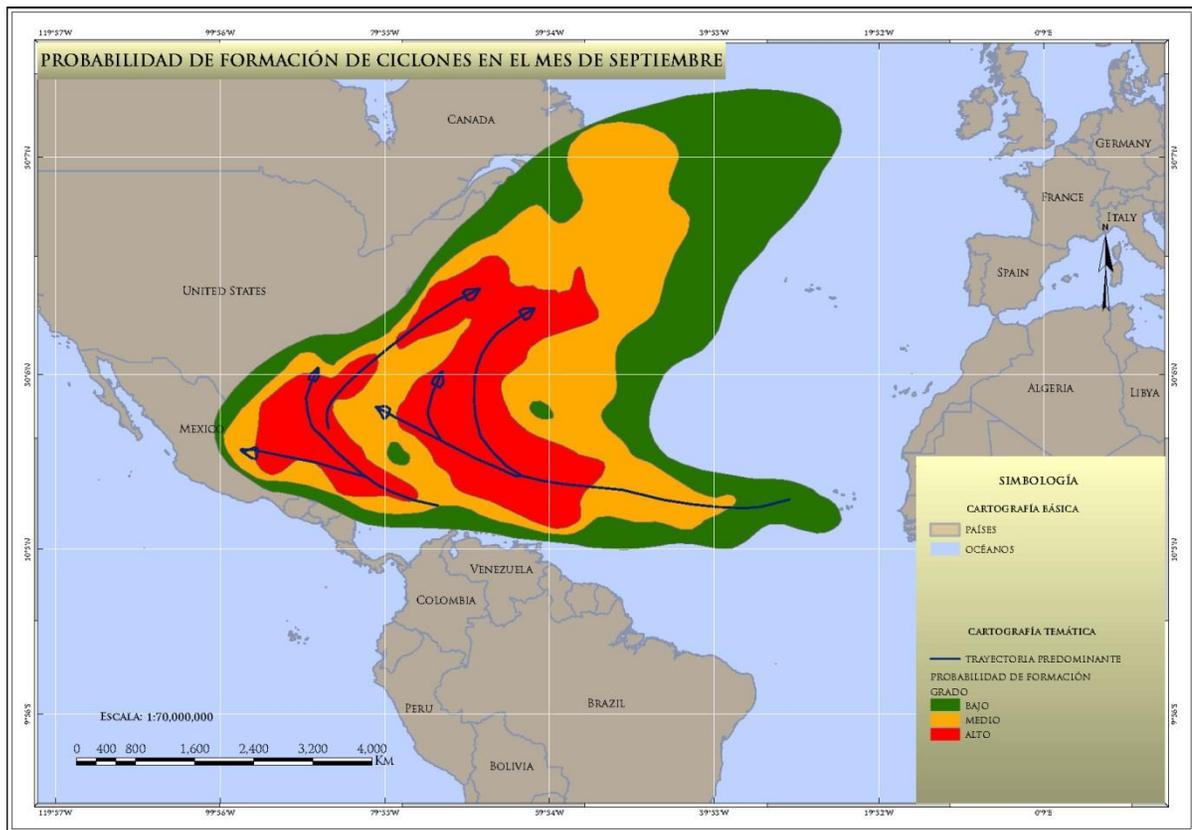


Figura 311. Zonas de formación de ciclones en septiembre y rutas posibles de trayectorias (Fuente: <http://www.noaa.gov/>).

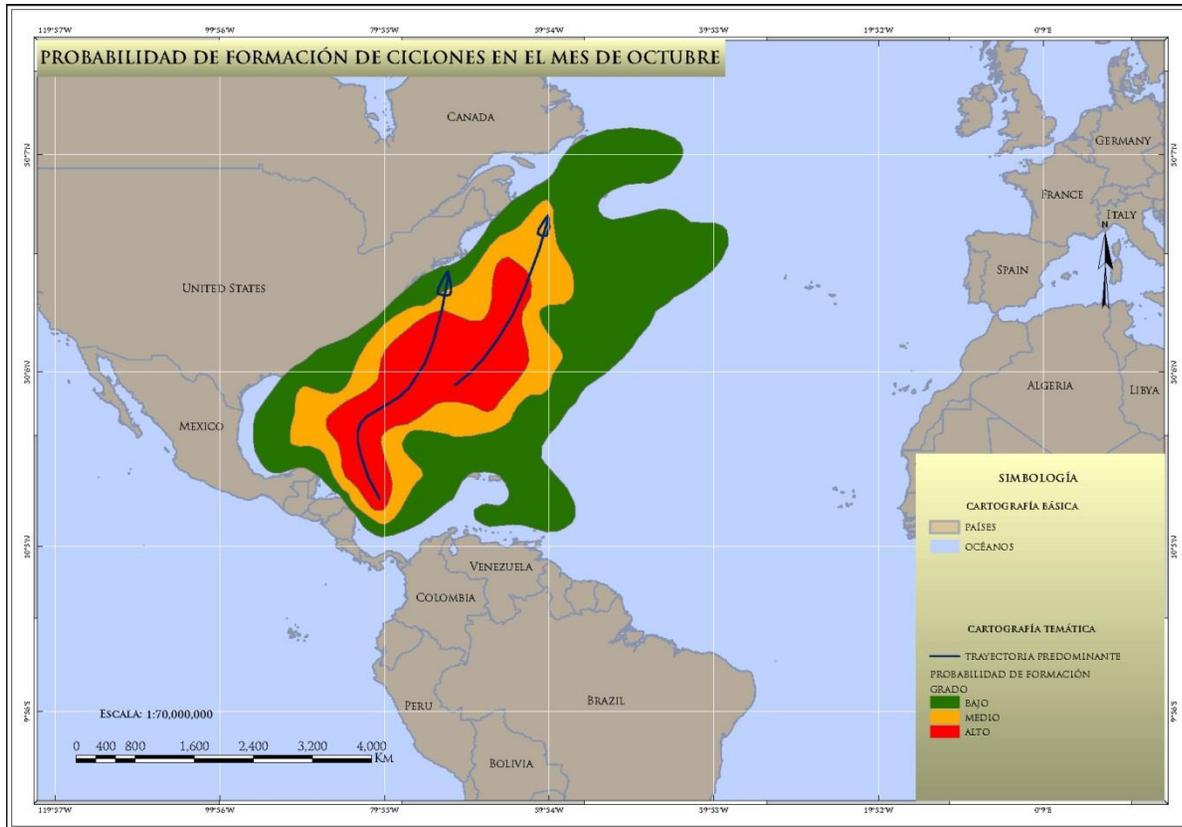


Figura 312. Zonas de formación de ciclones en octubre y rutas posibles de trayectorias (Fuente: <http://www.noaa.gov/>).

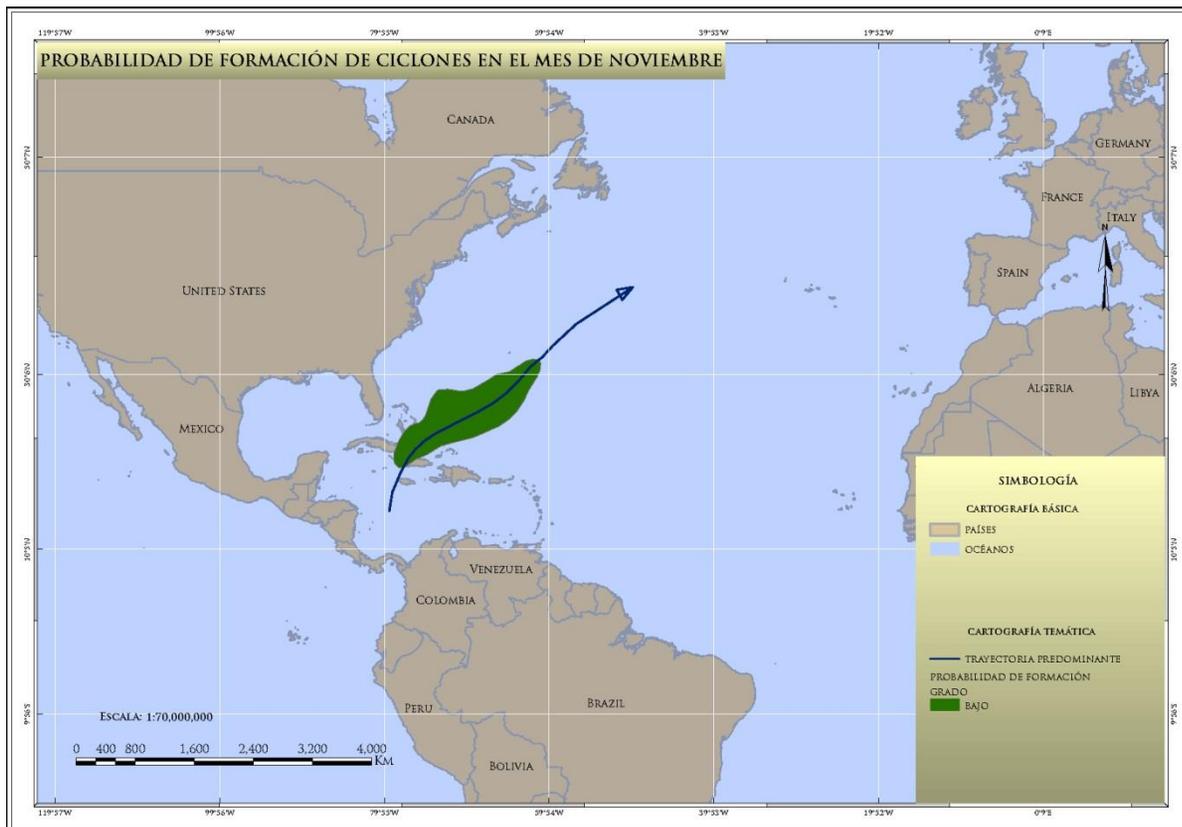


Figura 313. Zonas de formación de ciclones en noviembre y rutas posibles de trayectorias (Fuente: <http://www.noaa.gov/>).

Cabe señalar, que al menos cinco procesos participan en la alteración de la marea durante una tormenta: los efectos de presión, el efecto directo del viento, el efecto de la rotación terrestre, el efecto de las olas y el efecto de la lluvia (Harris, 1963), generando un aumento repentino en el nivel del mar y el oleaje que se conoce como marea de tormenta. Los huracanes, en su mayoría son los principales responsables de este fenómeno, aunque también pueden serlo los sistemas menores de baja presión. La trayectoria de un ciclón es el recorrido que sigue desde su origen hasta su disipación y está en función de las condiciones climatológicas existentes.

Por otra parte, es importante mencionar, que los ciclones tropicales también pueden formarse de frentes fríos y, ocasionalmente, de un centro de baja presión en los niveles altos de la atmósfera. Por lo tanto es importante tener en cuenta a los frentes que son zonas de transición o contacto entre dos masas de aire de diferentes características meteorológicas, lo que casi siempre implica diferentes temperaturas. Por ejemplo: el área de convergencia entre el aire tibio y húmedo con el aire seco y frío.

Un Frente Frío es una zona frontal de una masa de aire frío en movimiento que empuja aire más cálido a su paso, es fuerte y puede causar perturbaciones atmosféricas tales como tormentas de truenos, chubascos, tornados, vientos fuertes y cortas tempestades de nieve antes de su paso, acompañadas de condiciones secas a medida que el frente avanza. Dependiendo de la época del año y de su localización geográfica, los frentes fríos pueden venir en una sucesión de 5 a 7 días.

Generalmente, con el paso de un frente frío, disminuye la temperatura y la humedad, la presión aumenta y el viento cambia de dirección. La precipitación ocurre generalmente dentro o detrás del frente. En el caso de un sistema de desplazamiento rápido puede desarrollarse una línea de tormentas precediendo al frente.

VIII.5.2. Antecedentes

El estado de Yucatán debido a la geomorfología del terreno y su relativa cercanía con la costa (Golfo de México y Mar Caribe) es un estado propenso a tener problemas en cuanto a fenómenos hidrometeorológicos, de alguno de los tipos antes descritos, o al menos recibir los efectos de fenómenos relativamente cercanos. Por lo anterior, es de suma importancia contar con el registro histórico de dichos fenómenos, con el fin de tener los antecedentes que permitan conocer sus características y efectos, para poder crear escenarios que permitan prevenir y mitigar los daños que pudieran darse al momento en que la región se encuentre amenazada ante la presencia de alguno de estos tipos de eventos meteorológicos, los cuales a su vez también podrían detonar algún otro tipo de fenómenos ligado a ellos, como podrían ser fuertes precipitaciones, vientos intensos, mareas de tormenta, cambios de temperatura, algunos más, los cuales llegan a afectar la vida cotidiana de los habitantes de esta región.

De acuerdo a lo anterior, haciendo inicialmente una breve recopilación de los fenómenos que mayormente han afectado el Estado, podemos observar que de acuerdo con información de CENAPRED (2007), en México, entre los meses de mayo a noviembre, se presentan en promedio 23 ciclones tropicales con vientos mayores a 63 Km/h. De un promedio de 14 ciclones tropicales, 9 ocurren en el Golfo de México y el Mar Caribe. Con base en las zonas de ingreso, el período de recurrencia o penetración de ciclones por el estado de Yucatán es de 8 a 26 años, con un 0.16% de probabilidad de resultar afectado por el paso de ciclones.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 137, se hace una breve descripción de los principales ciclones tropicales que han afectado a la península de Yucatán.

La Península de Yucatán es la región más afectada por la marea de tormenta, debido a que la sobre-elevación del nivel medio del mar generado por los huracanes Janet (1955), Camille (1969), Gilbert (1988), Roxanne (1995) e Isidore (2002), esto ha provocado las mayores inundaciones en zonas costeras, hasta de 3.00 m y hasta 7.50 m.

Tabla 137. Ciclones tropicales que han afectado a Yucatán en las últimas décadas.

AÑO	NOMBRE	OCÉANO	FECHA	SITIOS AFECTADOS	NO. DE MUERTOS	PÉRDIDAS ECONÓMICAS
1955	Gladys	Atlántico	1 a 6 Sep	Yucatán, Tamaulipas, San Luis Potosí, Quintana Roo Veracruz	40	Los daños se debieron a la aparición consecutiva de éstos tres huracanes: Gladys: Afectó las zonas bajas de la ciudad de Tampico, Hilda: Hubo inundaciones en la ciudad de Tampico con elevación de hasta 3.30 m sobre el nivel del mar, Janet: La presa San José, San Luis Potosí se desbordó inundando gran parte de la ciudad de San Luis Potosí.
	Hilda		12 a 20 Sep			
	Janet		22 a 29 Sep			
1967	Beulah	Atlántico	14 Sep			
1967	Beulah	Atlántico	8 de septiembre	Tamaulipas, Nuevo León, Yucatán y Quintana Roo	-	Los flujos provocados por el huracán afectaron los ciudadanos de Reynosa y Matamoros, se estima que los daños económicos sobrepasaron los 500 millones de dólares.
1988	Gilbert	Atlántico	14 de septiembre	Yucatán, Quintana Roo, Campeche, Tamaulipas, Nuevo León y Coahuila	Más de 250	Se estima que las pérdidas económicas fueron de alrededor de los 766 millones de dólares
1995	Roxanne	Atlántico	7 al 20 de octubre	Campeche y Yucatán		
2002	Isidore	Atlántico	septiembre	Yucatán y otros estados		El estado de Yucatán fue el más dañado, con vientos de más de 200 Km/hora (rachas de 250 Km/hora) afectó por más de 3 días la costa norte del estado y la zona centro sur. Llegó hasta categoría 3
2005	Wilma	Atlántico	21 Octubre	Yucatán		Tocó tierra en la Península de Yucatán siendo huracán categoría 4, con vientos de más de 150 millas por hora (250 Km/h). Diversas zonas de la península de Yucatán tuvieron vientos de huracán por más de 24 horas consecutivas.
2007	Deán	Atlántico	16 agosto	Yucatán		Ingresó a tierra firme en la península de Yucatán, donde alcanzó el nivel 5 de intensidad, convirtiéndose en el segundo huracán de esa categoría en tomar tierra desde 1992, y el tercero en intensidad desde 1850. Posteriormente se degradó a tormenta tropical.
2008	Arthur y Dolly	Atlántico	21 Julio	Yucatán		Daños mínimos

Fuente: <http://www.cenapred.unam.mx/es/Investigacion/RHidrometeorologicos/FenomenosMeteorologicos/CiclonesTropicales/>

Existe un corredor de presencia importante de ciclones tropicales entre la Península de Yucatán y Cuba, y llega hasta las costas de Luisiana y Texas, en los E. U. A. Según estudios que se han realizado, la Península de Yucatán está expuesta a un promedio de más de 20 ciclones tropicales en 150 años.

Los ciclones causan algunas veces daños severos en los lugares por donde pasa, sin embargo también sirven de gran ayuda puesto que traen lluvias para las cosechas de temporada y proporcionan agua para el abastecimiento de agua a las ciudades, el riego en zonas semiáridas.

VIII.5.3. Método de Trabajo

Para el desarrollo del tema de ciclones tropicales, se tomó como base la metodología indicada por CENAPRED y por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica por sus siglas en inglés NOAA, la cual es una agencia científica del Departamento de Comercio de los Estados Unidos, a partir de la cual se obtuvieron las trayectorias de los ciclones (en todas sus categorías) que han afectado al estado de Yucatán, realizando un análisis estadístico para conocer su frecuencia y distribución por periodos, determinando así su comportamiento histórico, períodos de ocurrencia, así como los ciclones tropicales que han sido de mayor afectación.

Adicionalmente, se utilizó la metodología de la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (Fenómenos Hidrometeorológicos) indicada por CENAPRED, para el análisis de cuatro municipios, siendo estos: en la zona oriente el municipio de Mérida, en el Sur el municipio de Oxtukzcab y para el poniente los municipios de Valladolid y Tizimín, los cuales fueron seleccionados por su mayor densidad de población e infraestructura, así como su ubicación para tener puntos estratégicos dentro de todo el estado, que nos pudieran mostrar como es la afectación de este tipo de fenómeno en diferentes zonas.

Cabe aclarar que no se utilizaron municipios costeros, por que estos se manejan por su naturaleza y complejidad para el apartado de Marea de Tormenta. Por otra parte, también es importante señalar que los análisis a nivel municipal no se aplicaron en todas las localidades ni son tan detallados debido a que dicho análisis no entra dentro de los alcances del presente el Atlas a nivel Estatal. En la Figura 314, ilustra de forma simplificada el proceso metodológico, realizado.

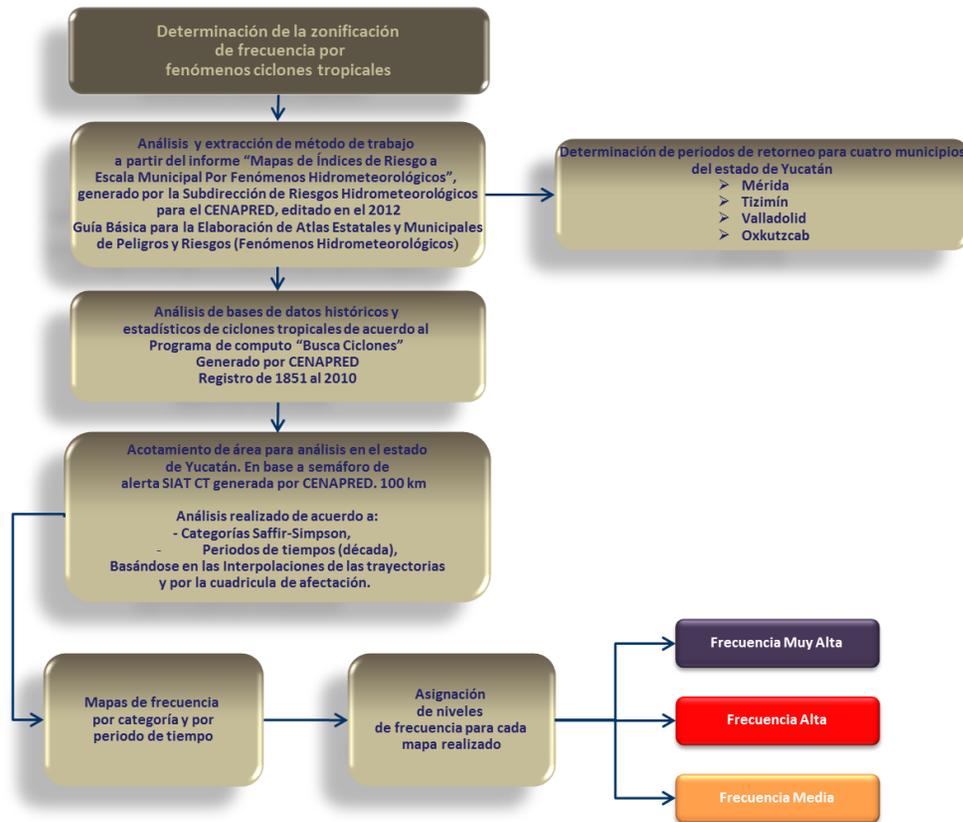


Figura 314. Método de trabajo para el tema de ciclones.

Para la elaboración de los mapas de frecuencia realizados en este trabajo se tomó como base el método para el desarrollo de los mapas de índice de riesgo a escala municipal por fenómenos hidrometeorológicos elaborado por la Subdirección de Riesgos Hidrometeorológicos para el CENAPRED, editado en el 2012, y a partir de los cuales se hizo un análisis más detallado con las siguientes características:

- La malla de trabajo es de menor escala, lo que permite obtener resultados afinados y con mayor detalle.
- Se abarcaron todos los eventos ciclónicos desde 1851 al 2010, por lo que no necesariamente los niveles deben ser iguales, esto debido a que difieren en la cantidad de elementos para la realización del análisis estadístico.
- Se diferenció y se realizó un mapa por categoría de ciclón tropical de acuerdo a la clasificación Saffir-Simpson (depresión tropical, tormenta tropical, Huracán categoría 1, 2, 3, 4 y 5) y por periodos de tiempo, lo que ayuda a identificar con mayor precisión el contexto histórico de los ciclones tropicales en el estado de Yucatán.
- Las áreas resultantes están basada en las trayectorias de los ciclones tropicales, por lo que en un mismo municipio se puede obtener diferentes grados de frecuencia.

Para el desarrollo de períodos de retorno para los cuatro municipios, se utilizaron los mapas de probabilidad de ocurrencia de los eventos ciclónicos en México, interpolando los valores de probabilidad en las cuatro zonas de interés y el mapa de número total de ciclones tropicales a nivel nacional. Para el cálculo de estos periodos de retorno se utilizó la hoja de cálculo proporcionada por el CENAPRED “Cálculo *Tr* Ciclones 2005 V2.2”, haciendo hincapié que en esta hoja se alimentan la probabilidad de ocurrencia y el número total de ciclones que cruzaron el área de interés, los cuales están basados en un periodo de tiempo que comprende del año 1851 al 2005 (155 años).

Análisis de Ciclones

Para la realización de un análisis más detallado del fenómeno de ciclones en sus diversas categorías, se tomaron de base ciertos aspectos del Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales SIAT CT, creado a partir de la necesidad de tener una óptima organización del Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC).

Constantemente se está monitoreando alguna formación Tropical con posibilidades de afectar ó con cercanía a Territorio Mexicano por 3 dependencias: Servicio Meteorológico Nacional (SMN), entidad que depende de la Dirección General de la CONAGUA; Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) que depende de una Junta de Gobierno coordinada por la Secretaría de Gobernación, la Dirección General de este Centro y siete direcciones: Investigación, Difusión, Capacitación, Enlace Nacional, Asuntos Internacionales, Programas y Normas y Administración; finalmente de la Dirección General de Protección Civil (DGPC) la cual depende de la Secretaría de Gobernación que trabajan en conjunto y llevan a cabo estudios, determinando la etapa en la que se encuentra el evento climático.

El Semáforo de Alerta Temprana SIAT funciona por medio de cinco fases (colores fijos) (Tabla 136) y dos etapas (acercamiento y alejamiento) indicando el nivel de peligro según sea el caso.

Tabla 138. Fases del Semáforo de Alerta Temprana SIAT CT.

ALERTA ROJA (PELIGRO MÁXIMO)
ALERTA NARANJA (PELIGRO ALTO)
ALERTA AMARILLA (PELIGRO MODERADO)
ALERTA VERDE (PELIGRO BAJO)
ALERTA AZUL (PELIGRO MÍNIMO)
<small>Fuente: http://geografica.cenapred.unam.mx/DocumentosSIAT/SIAT_CT.pdf</small>

Por los estudios realizados, se mejora el SIAT CT, se anexa a la tabla de acercamiento (que se refiere al impacto del fenómeno), una tabla de alejamiento (que corresponde a la parte trasera del ciclón) que en este caso servirá para determinar las áreas de estudio para el presente Atlas.

La primera de estas tablas, se refiere a cuando el SIAT se encuentra en la Fase de Acercamiento (parte delantera) queriendo decir que el ciclón se encuentra aproximándose al territorio nacional y por lo tanto algunas zonas se vuelven vulnerables al impacto de este fenómeno. En esta tabla se consideran 5 etapas de alerta de acuerdo a la detección en tiempo y categoría (Tabla 139).

Tabla 139. Tabla de acercamiento por detección de tiempo y categoría (escala Saffir-Simpson).

Escala Saffir Simpson	Detección ó más de 72 hrs.	72 a 60 horas	60 a 48 horas	48 a 36 horas	36 a 24 horas	24 a 18 horas	18 a 12 horas	12 a 6 horas	menor a 6 horas
Tormenta Tropical									
Huracán Cat. 1									
Huracán Cat. 2									
Huracán Cat. 3									
Huracán Cat. 4									
Huracán Cat. 5 +									
Etapa ->	AVISO	PREVENCION	PREPARACION		ALARMA		AFECCION		
<small>Fuente: http://geografica.cenapred.unam.mx/DocumentosSIAT/SIAT_CT.pdf</small>									

Ahora, para la Fase de Alejamiento, como su nombre lo dice, es cuando el ciclón está alejándose de un área de afectación, habiendo tenido o no impacto en tierra firme, al igual que en la fase anterior se consideran 5 etapas de alerta (Tabla 140).

Tabla 140. Tabla de alejamiento por distancia y categoría (escala Saffir-Simpson).

Escala Saffir Simpson	0 a 100 Km.	100 a 150 Km.	150 a 200 Km.	200 a 250 Km.	250 a 300 Km.	300 a 350 Km.	350 a 400 Km.	400 a 500 Km.	500 a 750 Km.	Mayor a 750 Km.
Tormenta Tropical	Red	Orange	Light Orange	Yellow	Light Green	Green	Dark Green	Dark Green	Dark Green	Blue
Huracán Cat. 1	Red	Orange	Light Orange	Light Orange	Yellow	Light Green	Light Green	Dark Green	Dark Green	Blue
Huracán Cat. 2	Red	Red	Light Orange	Light Orange	Yellow	Light Green	Light Green	Dark Green	Dark Green	Blue
Huracán Cat. 3	Red	Red	Light Orange	Light Orange	Light Orange	Yellow	Light Green	Light Green	Dark Green	Blue
Huracán Cat. 4	Red	Red	Red	Light Orange	Light Orange	Light Orange	Yellow	Light Green	Dark Green	Blue
Huracán Cat. 5 +	Red	Red	Red	Red	Light Orange	Light Orange	Light Orange	Yellow	Dark Green	Blue
Etapa ->	AFECTACION			ALARMA				SEGUIMIENTO	VIGILANCIA	MONITOREO

Fuente: http://geografica.cenapred.unam.mx/DocumentosSIAT/SIAT_CT.pdf

VIII.5.4. Análisis de Información y Generación de Mapas Base

De acuerdo a la metodología empleada, se analizan las trayectorias que impactaron directamente en el estado de Yucatán así como los trayectos localizados entre el límite estatal y 100 Km de distancia partiendo del borde estatal; este trayecto se basó en la tabla de alejamiento del impacto del meteoro y que es señalada en el capítulo anterior, esto, debido a que se considera que en este rango existe afectación directa en el Estado tanto en la entrada como en la salida del meteoro en un área de afectación. Para el análisis estadístico se utilizó la categoría más alta de la trayectoria que cruzó el área marcada pero no necesariamente siendo la más alta de la trayectoria total (Figura 304).

De acuerdo a la Administración Nacional Atmosférica (NOAA) y al área delimitada, se han registrado 107 ciclones tropicales durante un periodo de 158 años (1852-2010), de estos, la trayectoria de 59 han impactado de manera directa en el Estado y 48 de forma indirecta, es decir los trayectos localizados entre el límite estatal y 100 Km a la redonda del contorno del estado gubernativo. Del total, 20 trayectorias alcanzaron la Categoría Depresión Tropical, 47 la de Tormenta Tropical, y de Huracanes, Categoría 1 con 12 eventos, Categoría 2 con 18, Categoría 3 con dos, Categoría 4 con 5 y finalmente con una Categoría 5, sólo tres en el área delimitada (Figura 315).

Como se observa en la Figura 316, las tormentas tropicales, seguidas de depresiones tropicales, huracanes de Categoría 2 y 1 representan el fenómeno con un mayor número de eventos en 158 años de registro, seguido de huracanes de categoría 4, 5 y 3 respectivamente, esto considerando la categoría mayor de una misma trayectoria en el área propuesta.

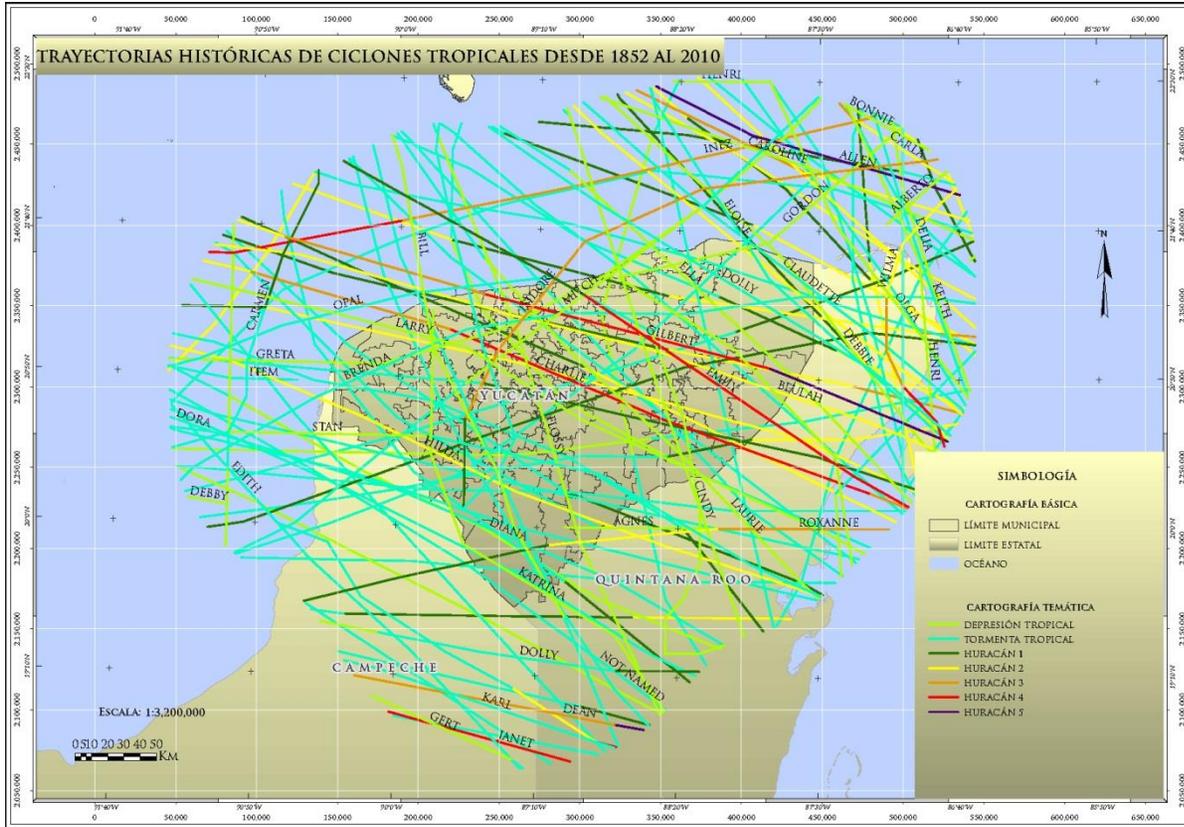


Figura 315. Trayectorias históricas de los ciclones tropicales desde 1852 al 2010, hasta 100 Km partiendo del límite estatal, el color indica la categoría de acuerdo a la escala Saffir-Simpson.

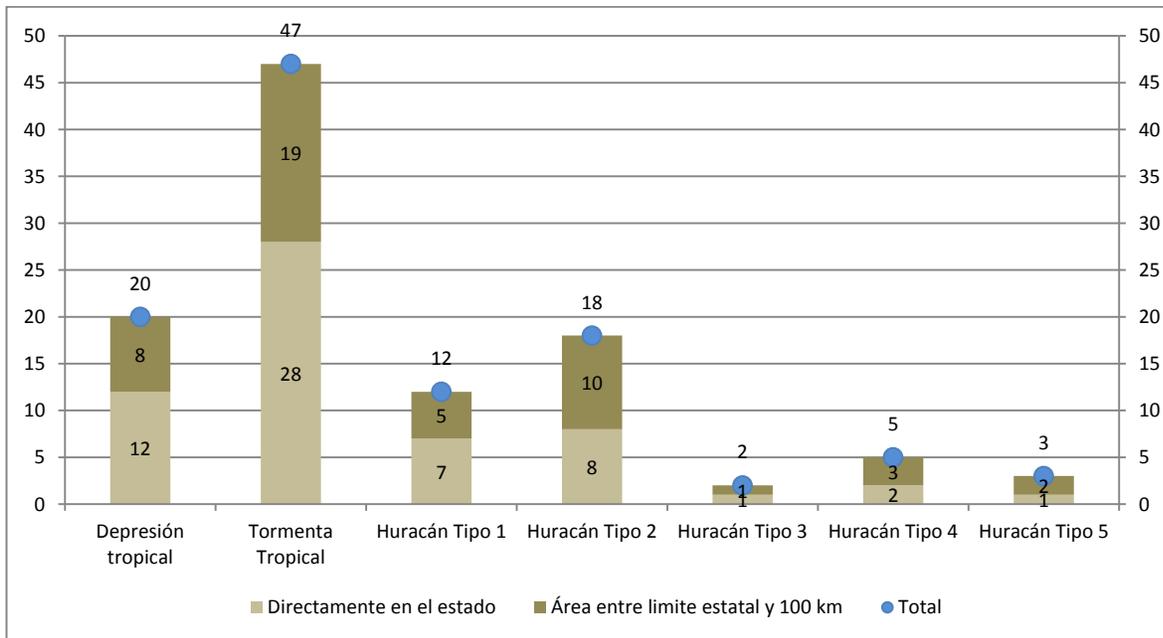


Figura 316. Frecuencia de ciclones registrados en el área delimitada para el estado de Yucatán, 1852 al 2010.

En relación a los meses de mayor incidencia de ciclones tropicales, estos ocurren entre agosto, septiembre y octubre con 26, 40 y 17 trayectorias respectivamente, mientras que en menor medida los meses junio, julio y noviembre con 9, 7 y 5 eventos registrados, finalmente en casos extraordinarios los meses de febrero, mayo y diciembre cuyos eventos ocurrieron en los años 1952 y 1933 alcanzando ambos una categoría máxima de Tormenta Tropical en el área y para el año 2007 con una categoría de depresión tropical respectivamente (Figura 317).

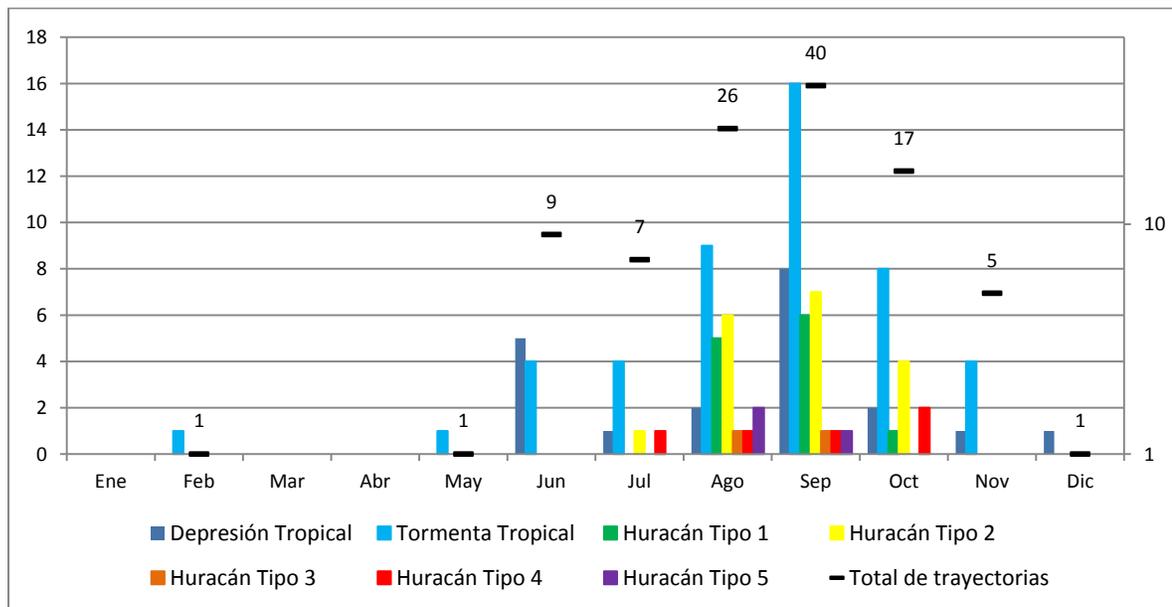


Figura 317. Meses con mayor número de ciclones tropicales registrados en el estado de Yucatán.

A continuación se presenta un cuadro resumen de las características de los ciclones que se localizan dentro del área delimitada desde 1852 hasta 2010 (Tablas 141 y 142).

Tabla 141. Ciclones cuya trayectoria cruzo por el estado de Yucatán a partir de 1852 al 2010.

NOMBRE	FECHA	CATEGORÍA EN EL ESTADO	LUGAR GEOGRÁFICO DONDE SE ORIGINÓ	LUGAR GEOGRÁFICO DONDE CONCLUYÓ	VIENTO KM/H	MUNICIPIOS QUE ATRAVIESA (TRAYECTORIA)
1874	26-sep-1874	Depresión, tormenta tropical	Mar del Caribe	Golfo de San Lorenzo	60-70	Chikindzonot, Chankom, Yaxcabá, Dzoncauich, Dzitás, Tunkás, Tinum, Temax, Tekal De Venegas, Buctzotz, Dzilam González y Dzilam De Bravo
1879	20-ago-1879	Tormenta tropical, Huracán 1	Mar del Caribe	Kentucky, USA	110-130	Peto, Tahdziú, Chocholá, Samahil, Sacalum, Maní, Kinchil, Hunucmá, Dzán, Chapab, Chacsinkin, Tixméhuac, Tetiz, Tekax, Teabo, Abalá y Celestún
1880	9-10-ago-1880	Tormenta tropical, Huracán 1	Mar del Caribe	Texas, USA	60-130	Tizimín, San Felipe, Panabá y Dzilam De Bravo
1887	7-oct-1887	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Estado de Querétaro, MEX	75-95	Tzucacab y Tekax
1888	6-sep-1888	Tormenta tropical, Huracán 1	Océano Atlántico Norte entre mar del Caribe y mar de los Sargazos	Estado de Veracruz, Mex	100-130	Tizimín, Quintana Roo, Kantunil, Izamal, Espita, Tunkás, Sudzal, Cenotillo, Calotmul, Sanahcat, Sacalum, Opichén, Muna, Maxcanú, Huhí, Xocchel, Timucuy, Tecoh, Abalá, Halachó, Homún y Cuzamá
1893	5-sep-1893	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Tennessee, USA	65-100	Chichimilá, Quintana Roo, Kaua, Dzitás, Tunkás, Tixcacalcupul, Tinum, Tekom, Cuncunul, Dzoncauich, Dzidzantún, Yobain, Temax y Tekal De Venegas
1893a	29-sep-1893	Huracán 1	Mar del Caribe	Norte del Océano Atlántico Norte	120	Río Lagartos y Tizimín
1895	28-sep-1895	Depresión tropical	Mar del Caribe	Mar de Labrador	65	Chichimilá, Sotuta, Kantunil, Chankom, Yaxcabá, Tixcacalcupul, Tekom, Muxupip, Mocochá, Ixil, Hochtún, Xocchel, Tixkokob, Cacaichén, Baca y Progreso
1895a	3-4-oct-1895	Depresión tropical	Mar del Caribe	Luisiana, USA	55	Tzucacab, Tekax, Oxkutzcab y Tekax

.....Continuación de Tabla 141.

NOMBRE	FECHA	CATEGORÍA EN EL ESTADO	LUGAR GEOGRÁFICO DONDE SE ORIGINÓ	LUGAR GEOGRÁFICO DONDE CONCLUYÓ	VIENTO KM/H	MUNICIPIOS QUE ATRAVIESA (TRAYECTORIA)
1898	23-24-sep-1898	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Texas, USA	65-95	Chemax, Temozón, Calotmul, Panabá, Espita, Dzilam González, Tizimín, Sucilá, Buctzotz y Dzilam De Bravo
1903	13-ago-1903	Huracán 1, 2	Centro del Océano Atlántico Norte	Estado de SLP, Mex	120-160	Espita, Chemax, Temozón, Calotmul, Dzoncauich, Dzemul, Tepakán, Temax, Telchac Pueblo, Tekal De Venegas, Suma, Cenotillo, Cansahcab, Motul, Ixil, Baca y Progreso
1905	25-sep-1905	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Arkansas, USA	65-75	Chichimilá, Valladolid, Quintana Roo, Kaua, Dzitás, Tunkás, Tixcacalcupul, Tinum, Tekom, Cuncunul, Izamal, Ixil, Dzemul, Eya, Tepakán, Telchac Pueblo, Tekal De Venegas, Suma, Cansahcab y Motul
1909	8-ago-1909	Depresión, tormenta tropical	Mar del Caribe	Estado de Nuevo León, Mex	55-75	Chichimilá, Chemax, Chancóm, Tixcacalcupul, Tekom, Yaxcabá, Teabo, Cantamayec, Muna, Maxcanú, Maní, Dzán, Ticul y Valladolid
1909a	25-26-ago-1909	Huracán 1, 2	Centro del Océano Atlántico Norte	Estado de Tamaulipas, Mex	150-165	Panabá, Tizimín, Sucilá, Panabá, Dzilam González, Dzilam De Bravo y Sucilá
1912	13-oct-1912	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Texas, USA	85-110	San Felipe, Río Lagartos y Tizimín
1916	16-oct-1916	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Illinois, USA	75-95	Santa Elena, Oxkutzcab, Tzucacab, Tekax, Maxcanú, Halachó y Celestún
1920	20-sep-1920	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Kansas, Usa	65-85	Valladolid, Tizimín, Temozón, Calotmul, San Felipe, Panabá y Tizimín
1922	18-19-oct-1922	Tormenta tropical, Huracán 1	Mar del Caribe	Estado de Tabasco, Mex	95-120	Chichimilá, Chemax, Valladolid, Tixcacalcupul, Tekom, Chikindzonot, Chankom, Yaxcabá, Oxkutzcab, Maní, Ticul, Tekax, Teabo, Cantamayec, Akil y Santa Elena
1928	5-sep-1928	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Estado de Tamaulipas, Mex	65-95	Peto, Tzucacab, Tekax, Santa Elena y Oxkutzcab
1931	13-jul-1931	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Kansas, Usa	65	Tekax, Sacalum, Oxkutzcab, Muna, Ticul, Chocholá, Samahil, Hunucmá, Umán, Tetiz y Abalá
1933	18-19-jul-1933	Tormenta tropical	Centro del Océano Atlántico Norte	Estado de Veracruz, Mex	65-75	Peto, Chikindzonot, Chacsinkín, Tahdziú, Santa Elena, Oxkutzcab, Tixméhuac, Tekax y Akil
1933a	13-sep-1933	Tormenta tropical	Golfo de Honduras	Estado de Hidalgo, Mex	100-110	Tekax
1933b	22-sep-1933	Huracán 2	Centro del Océano Atlántico Norte	Estado de SLP, Mex	160-165	Chichimilá, Quintana Roo, Izamal, Hochtún, Dzitás, Chemax, Valladolid, Uayma, Tunkás, Tinum, Sudzal, Cuncunul, Mérida, Kanasín, Seyé, Hunucmá, Ucú, Tixpéhuac, Tixkokob, Tahmek y Celestún
1934	9-jun-1934	Tormenta tropical	Golfo de Honduras	Golfo de San Lorenzo	75-110	Peto, Chikindzonot, Yaxcabá, Cantamayec, Chocholá, Mayapán, Mama, Chumayel, Tekit, Tecoh, Abalá, Maxcanú y Celestún
1935	30-31-ago-1935	Tormenta tropical	Golfo de México	Estado de Oaxaca, Mex	65-100	Río Lagartos, Panabá, Espita, Tizimín, Sucilá, Cenotillo, Sotuta, Maní, Mama, Kantunil, Huhí, Dzán, Chumayel, Tunkás, Ticul, Tekit, Sudzal, Homún y Santa Elena
1936	28-ago-1936	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Estado de Veracruz, Mex	65-75	Tekax
1938	26, ago-1938	Huracán 1, 2	Mar del Caribe	Estado de SLP, Mex	90-160	Chichimilá, Quintana Roo, Kaua, Izamal, Dzitás, Valladolid, Uayma, Tunkás, Tinum, Tekom, Cuncunul, Mérida, Muxupip, Mocochoá, Chicxulub Pueblo, Tekantó, Cacalchén, Bokobá, Baca, Motul y Progreso
1938a	11-12-oct-1938	Tormenta tropical	Golfo de Honduras	Texas, USA	65-75	Oxkutzcab, Maní, Dzán, Chapab, Tzucacab, Tekax, Tecoh, Akil, Abalá, Mérida, Hunucmá, Umán, Ucú y Progreso
1942	28-ago-1942	Huracán 2	Mar del Caribe	Texas, USA	160-175	Tizimín y Río Lagartos
1942a	11-nov-1942	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Estado de Yucatán, Mex	65-75	Maxcanú, Celestún, Peto, Oxkutzcab, Opichén, Muna, Tzucacab, Tixméhuac, Ticul, Tekax y Akil
1944	22-23-ago-1944	Tormenta tropical, Huracán 1	Centro del Océano Atlántico Norte	Golfo de México	85-150	Chichimilá, Kaua, Chemax, Chankom, Valladolid, Tixcacalcupul, Tekom, Cuncunul, Sotuta, Seyé, Sanahcat, Kantunil, Huhí, Yaxcabá, Tinum, Timucuy, Sudzal, Acanceh, Homún, Cuzamá, Mérida, Chocholá, Samahil, Maxcanú, Kinchil, Umán, Celestún

.....Continuación de Tabla 141.

NOMBRE	FECHA	CATEGORÍA EN EL ESTADO	LUGAR GEOGRÁFICO DONDE SE ORIGINÓ	LUGAR GEOGRÁFICO DONDE CONCLUYÓ	VIENTO KM/H	MUNICIPIOS QUE ATRAVIESA (TRAYECTORIA)
1944a	20-21-sep-1944	Huracán 1	Mar del Caribe	Golfo de Tehuantepec	130	Espita, Tizimín, Temozón, Calotmul, Sotuta, Quintana Roo, Mama, Huhí, Dzitás, Chapab, Yaxcabá, Uayma, Tunkás, Tinum, Tekit, Sudzal, Homún, Santa Elena, Sacalum, Muna y Maxcanú
1947	12-ago-1947	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Estado de SLP, Mex.	85-100	Peto, Oxkutzcab, Chikindzonot, Chacsinkín, Tixméhuac, Ticul, Tekax, Tahdziú, Akil, Santa Elena, Muna y Maxcanú
Charlie	20-ago-1951	Huracán 3, 4	Centro del Océano Atlántico Norte	Estado de SLP, Mex	175-215	Chichimilá, Kaua, Valladolid, Tixcacalcupul, Tekom, Cuncunul, Kantunil, Izamal, Hochtún, Yaxcabá, Tixpéhuac, Tixkokob, Tinum, Tahmek, Sudzal, Conkal, Cacalchén, Mérida, Hunucmá, y Ucú.
Hilda	16-17-oct-1955	Huracán 2	Mar del Caribe	Estado de SLP, Mex	160-175	Peto, Tzucacab, Tixméhuac, Tekax, Santa Elena, Oxkutzcab, Muna, Maxcanú, Ticul, Akil y Halachó
Flossy	21-22-sep-1956	Depresión tropical	Mar del Caribe	Océano Atlántico Norte	45-55	Peto, Sotuta, Sanahcat, Muxupip, Huhí, Hochtún, Hocabá, Chacsinkín, Xocchel, Tzucacab, Tixméhuac, Tahmek, Cantamayec, Cacalchén, Motul y Dzemul
Debbie	26-sep-1965	Depresión tropical	Mar del Caribe	Costas de Mississippi y Luisiana, USA	45	Tizimín
Beulah	17-sep-1967	Huracán 2	Mar del Caribe	Estado de Nuevo León, Mex	160-175	Espita, Chemax, Valladolid, Temozón, Cenotillo, Dzoncauich, Dzemul, Teya, Tepakán, Temax, Telchac Pueblo, Tekal De Venegas, Suma, Cansahcab, Motul, Progreso, Ixil y Baca
Laurie	18-19-oct-1969	Depresión, tormenta tropical	Mar del Caribe	Estado de Tabasco, Mex	45-85	Chichimilá, Tixcacalcupul, Kaua, Izamal, Chankom, Yaxcabá, Tunkás, Tinum, Teya, Tepakán, Tekom, Sinanché, Dzemul, Telchac Pueblo, Suma, Cansahcab y Motul
Ella	10-sep-1970	Depresión tropical	Mar del Caribe	Estado de Nuevo León, Mex	55	San Felipe, Panabá, Dzilam De Bravo, Chemax y Tizimín
Greta	1-2-oct-1970	Depresión tropical	Poniente del Océano Atlántico Norte	Estado de Tamaulipas, Mex	45-55	Dzilam De Bravo, Sinanché, Dzilam González, Dzidzantún, Yobaín, Telchac Pueblo, Baca, Motul, Mérida, Mocoohá, Kinchil, Hunucmá, Yaxkukul, Ucú, Tetiz, Conkal y Celestún
Agnes	14-jun-1972	Depresión tropical	Estado de Yucatán	New York, USA	45	Peto y Tzucacab
Brenda	19-20-ago-1973	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Estado de Chiapas, Mex	85-100	Tizimín, Panabá, Sucilá, Dzidzantún, Temax, Buctzotz, Mérida, Mocoohá, Chicxulub, Pueblo, Telchac, Pueblo, Conkal, Cansahcab, Baca, Motul, Celestún, Kinchil, Hunucmá, Ucú Y Tetiz
Eloise	21-sep-1975	Tormenta tropical	Centro del Océano Atlántico Norte	Virginia, USA	75-10	Tizimín y Río Lagartos
Gilbert	14-15-sep-1988	Huracán 3, 4, 5	Centro del Océano Atlántico Norte	Michigan, USA	185-295	Chemax, Sinanché, Ixil, Espita, Dzoncauich, Dzemul, Yobaín, Temozón, Temax, Telchac Pueblo, Cenotillo, Cansahcab, Calotmul, Buctzotz, Motul y Progreso
Diana	6-ago-1990	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Océano Pacifico Norte	85-95	Peto, Oxkutzcab, Tzucacab y Tekax
Opal	30-sep-1995	Depresión, tormenta tropical	Mar del Caribe	Ontario, Canadá	55-75	Chichimilá, Tixcacalcupul, Tekom, Cuncunul, Espita, Dzitás, Uayma, Tinum, Cenotillo, Dzilam González, Dzidzantún, Temax y Buctzotz
Roxxanne	11-oct-1995	Huracán 1, 2	Mar del Caribe	Bahía de Campeche	130-165	Peto, Tzucacab y Tekax
Mitch	4-nov-1998	Depresión, tormenta tropical	Mar del Caribe	Mar de Noruega	65-75	Chocholá, Opichén, Maxcanú, Kopomá, Umán, Abalá, Halachó, Mérida, Kanasín, Seyé, Muxupip, Dzilam González, Dzilam De Bravo, Dzidzantún, Tixpéhuac, Tixkokob, Timucuy, Suma, Cansahcab, Cacalchén, Acanceh y Motul
Katrina	1-nov-1999	Depresión tropical	Mar del Caribe	Estado de Yucatán, Mex	35	Tekax, Santa, Elena, Oxkutzcab, Muna, Mérida, Progreso, Chocholá, Opichén, Kopomá, Hunucmá, Umán Y Ucú
Gordon	15-sep-2000	Depresión tropical	Mar del Caribe	Nueva Escocia, Canadá	45-55	Chemax, Temozón, Panabá, Espita, Dzilam González, Dzilam De Bravo, Tizimín, Sucilá, Calotmul, Buctzotz, San Felipe Y Río Lagartos

.....Continuación de Tabla 141.

NOMBRE	FECHA	CATEGORÍA EN EL ESTADO	LUGAR GEOGRÁFICO DONDE SE ORIGINÓ	LUGAR GEOGRÁFICO DONDE CONCLUYÓ	VIENTO KM/H	MUNICIPIOS QUE ATRAVIESA (TRAYECTORIA)
Isidore	22-23-24-sep-2002	Tormenta tropical, huracán 1, 3	Mar del Caribe	Pennsylvania, USA	95-205	Sinanché, Muxupip, Yobain, Tixkokob, Telchac Pueblo, Motul, Seyé, Tixpéhual, Timucuy, Tecoh, Acanceh, Abalá, Santa Elena, Sacalum, Oxkutzcab, Ticul, Maní, Mama, Chumayel, Mérida, Kanasin, Cuzamá, Progreso, Chicxulub pueblo, Conkal, Tekit y Homún
Bill	28-jun-2003	Depresión tropical	Estado de Quintana Roo, Mex	Virginia, USA	35	Tekax, Oxkutzcab, Akil, Mérida, Sacalum, Dzán, Chapab, Umán, Ucú, Abalá, Progreso y Hunucmá
Claudette	11-jul-2003	Tormenta tropical	Centro del Océano Atlántico Norte	Estado de Chihuahua, Mex	85-95	Río Lagartos y Tizimín
Larry	29-sep-2003	Depresión tropical	Mar del Caribe	Golfo de Tehuantepec	35	Chichimilá, Sotuta, Chankom, Yaxcabá, Tixcacalcupul, Tekom, Mérida, Kanasin, Seyé, Sanahcat, Huhí, Hocabá, Tixpéhual, Tahmek, Acanceh, Hunucmá Y Ucú
Cindy	4-jul-2005	Depresión tropical	Mar del Caribe	Golfo de San Lorenzo	45-55	Kaua, Dzitás, Uayma, Tixcacalcupul, Tinum, Tekom, Cuncunul, Dzilam González, Dzilam De Bravo, Cenotillo y Bucutzotz
Emily	18-jul-2005	Huracán 1, 4	Centro del Océano Atlántico Norte	Estado de Coahuila, Mex	120-220	Espita, Dzilam, González, Chemax, Valladolid, Temozón, Temax, Cenotillo, Bucutzotz y Dzidzantún
Stan	2-3-oct-2005	Depresión, tormenta tropical	Mar del Caribe	Estado de Oaxaca, Mex	55-95	Peto, Chikindzonot, Yaxcabá, Sacalum, Opichén, Muna, Maní, Dzán, Chapab, Tixméhuac, Ticul, Tekax, Teabo, Tahdziú, Cantamayec, Maxcanú y Halachó
Dolly	21-jul-2008	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Nuevo México, USA	85	San Felipe, Río Lagartos, Panabá y Tizimín

Fuente: http://atl.cenapred.unam.mx/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=49&Itemid=215

Tabla 142. Ciclones cuya trayectoria cruzo el área delimitada por el límite estatal y 100 Km a la redonda a partir de 1852 al 2010.

NOMBRE	FECHA	CATEGORÍA EN EL LÍMITE ESTABLECIDO	LUGAR GEOGRÁFICO DONDE SE ORIGINÓ	LUGAR GEOGRÁFICO DONDE CONCLUYÓ	VIENTO	DISTANCIA MÍNIMA Y UBICACIÓN RESPECTO AL LÍMITE ESTATAL	MUNICIPIO DE YUCATÁN MÁS PRÓXIMO
1852	8-oct-1852	Huracán 2	Mar del Caribe	Océano Atlántico Norte (Golfo de Maine)	170	97.7 Km al nororiente	Tizimín
1857	28-29-sep-1857	Tormenta tropical, Huracán 1, 2	Centro del Océano Atlántico Norte	Texas, USA	110-170	2.7-11.7 Km al nororiente	Tizimín y Río Lagartos
1865	11-sep-1865	Huracán 2	Centro del Océano Atlántico Norte	Arkansas, USA	170	97.6 Km al nororiente	Tizimín
1866	16-ago-1866	Tormenta tropical, Huracán 1	Mar del Caribe	Estado de Querétaro, MEX	110-150	51.1 Km al sur	Tekax
1870	2-nov-1870	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Golfo de México	70-90	40.5 Km al oriente	Tizimín y Chemax
1877	29-sep-1877	Huracán 1	Centro del Océano Atlántico Norte	Golfo de Maine	80-130	88.4 Km al nororiente	Tizimín
1880	5-6-oct-1880	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Mar de Los Sargazos	70-90	24.4 Km al oriente	Tizimín
1881	16-ago-1881	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Mar de Labrador	70	94.5 Km al suroriente	Chemax
1886	19-sep-1886	Tormenta tropical, Huracán 1	Océano Atlántico Norte entre mar del caribe y mar de los Sargazos	Texas, USA	85-110	58-65 Km al norte	Tizimín y Río Lagartos
1887	25-jul-1887	Huracán 1, 2	Centro del Océano Atlántico Norte	Georgia, USA	140-160	34.9 Km al oriente	Tizimín
1887	17-18-sep-1887	Huracán 1, 2	Centro del Océano Atlántico Norte	Estado de Nuevo León, Mex	140-160	18.6 Km al nororiente	Tizimín y Río Lagartos
1889	17-18-sep-1889	Tormenta tropical, Huracán 1, 2	Mar del Caribe	Golfo de San Lorenzo	110-120	5.6 Km al sur	Tekax
1890	25-ago-1890	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Mississippi, USA	95	51.6 Km al nororiente	Tizimín
1895	26-27-ago-1895	Huracán 2	Centro del Océano Atlántico Norte	Estado de Nuevo León, Mex	160	30.9 Km al nororiente	Tizimín
1900	11-sep-1900	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Georgia, USA	55-95	64.8 Km al nororiente	Tizimín
1902	7-8-oct-1902	Huracán 2	Océano Pacifico Norte	Norte del Océano Atlántico Norte	160-165	70.9 Km al norponiente	Celestún

.....Continuación de Tabla 142.

NOMBRE	FECHA	CATEGORÍA EN EL LÍMITE ESTABLECIDO	LUGAR GEOGRÁFICO DONDE SE ORIGINÓ	LUGAR GEOGRÁFICO DONDE CONCLUYÓ	VIENTO	DISTANCIA MÍNIMA Y UBICACIÓN RESPECTO AL LÍMITE ESTATAL	MUNICIPIO DE YUCATÁN MÁS PRÓXIMO
1913	25-26-jun-1913	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Texas, USA	75-100	30.5 Km al nororiente	Tizimín
1916	17-ago-1916	Huracán 2, 3	Centro del Océano Atlántico Norte	Texas, USA	165-205	52-55 Km al norte	Tizimín y Río Lagartos
1921	17-18-jun-1921	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Kansas, Usa	65-85	67.6 Km al surponiente	Tekax
1922	14-jun-1922	Depresión tropical	Mar del Caribe	Estado de Nuevo León, Mex	45-55	13.3 Km al surponiente	Tekax
1931	15-sep-1931	Tormenta tropical	Centro del Océano Atlántico Norte	Estado de Puebla, Mex	60-100	80.1 Km al sur	Tekax
1933	16-17-18-may-1933	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Estado de Tabasco, Mex	65-75	38-53 Km norte (paralela a la línea de costa norte)	Tizimín, Río Lagartos, San Felipe, Dzilam de Bravo, Dzidzantún, Yobain, Sinanché, Telchac Puerto, Ixil, Progreso, Hunucmá y Celestún
1936	15-ago-1936	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Estado de Veracruz, Mex	65-110	24.1 Km al oriente	Tizimín
1938	13-ago-1938	Huracán 2	Mar del Caribe	Texas, USA	160	36.8 Km al nororiente	Tizimín
1939	12-13-jun-1939	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Mississippi, USA	65-75	55.8 Km al oriente	Tizimín
1940	21-sep-1940	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Mississippi, USA	65-75	14-19 Km al surponiente	Tekax, Oxtutzcab, Santa Elena, Maxcanú y Halachó
Item	8-oct-1950	Tormenta tropical	Bahía de Campeche	Bahía de Campeche	75-85	20.8 Km al poniente	Celestún
1952	2-feb-1952	Depresión, tormenta tropical	Mar del Caribe	Golfo de San Lorenzo	55-65	64 Km al oriente	Chemax y Valladolid
Janet	28-sep-1955	Huracán 4	Centro del Océano Atlántico Norte	Estado de Hidalgo, Mex	165-240	82.9 Km al sur	Tekax
Dora	10-sep-1956	Tormenta tropical	Bahía de Campeche	Estado de Veracruz, Mex	65-95	74.6 Km al poniente	Halachó
Carla	7-sep-1961	Huracán 2	Mar del Caribe	Quebec, Canadá	45-55	89.6 Km al nororiente	Tizimín
1965	13-jun-1965	Depresión tropical	Océano Pacifico Norte	Océano Atlántico Norte (Golfo de Maine)	150-175	64.4 Km al poniente	Celestún y Halachó
Inez	7-oct-1966	Huracán 3, 4	Centro del Océano Atlántico Norte	Estado de SLP, Mex	195-215	49-58 Km paralela a la línea de costa norte del estado	Celestún, Hunucmá, Progreso, Ixil, Dzemul, Telchac Puerto, Yobain, Dzidzantún, Dzilam de Bravo, San Felipe y Río Lagartos
Edith	11-sep-1971	Tormenta tropical	Centro del Océano Atlántico Norte	Georgia, USA	65-110	64-88 Km paralela a limite estatal con el estado de Campeche	Tekax, Oxtutzcab, Santa Elena, Maxcanú y Halachó
Delia	1-2-sep-1973	Depresión tropical	Mar del Caribe	Estado de Coahuila, Mex	55	67.3 Km al nororiente	Tizimín
Carmen	3-4-5-sep-1974	Tormenta tropical, Huracán 1	Centro del Océano Atlántico Norte	Texas, USA	95-120	44-89 Km paralela a limite estatal con el estado de Campeche	Tekax, Oxtutzcab, Santa Elena, Maxcanú, Halachó y Celestún
Caroline	27-28-ago-1975	Depresión tropical	Poniente del Océano Atlántico Norte	Estado de Nuevo León, Mex	45	53-59 Km al nororiente	Tizimín y Río Lagartos
Henri	15-sep-1979	Depresión tropical	Mar del Caribe	Golfo de México	45-55	59.7 Km al oriente	Tizimín
Allen	7-8-ago-1980	Huracán 5	Centro del Océano Atlántico Norte	Estado de Coahuila, Mex	270-305	65 Km al nororiente	Tizimín y Río Lagartos
Alberto	2-jun-1982	Depresión tropical	Canal de Yucatán	Golfo de México	35-45	50.59 Km al nororiente	Tizimín
Debby	31-ago-1988	Depresión tropical	Bahía de Campeche	Golfo de California	45	82.9 Km al surponiente	Halachó

.....Continuación de Tabla 142.

NOMBRE	FECHA	CATEGORÍA EN EL LÍMITE ESTABLECIDO	LUGAR GEOGRÁFICO DONDE SE ORIGINÓ	LUGAR GEOGRÁFICO DONDE CONCLUYÓ	VIENTO	DISTANCIA MÍNIMA Y UBICACIÓN RESPECTO AL LÍMITE ESTATAL	MUNICIPIO DE YUCATÁN MÁS PRÓXIMO
Keith	21-nov-1988	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Océano Labrador	110	63.67 Km al nororiente	Tizimin
Gert	18-sep-1993	Depresión, tormenta tropical	Mar del Caribe	Estado de Jalisco, Mex	55-65	86,2 Km al sur	Tekax
Dolly	20-21-ago-1996	Huracán 1, tormenta-depresión tropical	Mar del Caribe	Océano Pacífico Norte	55-120	30.18 Km al sur	Tekax
Wilma	21-22-oct-2005	Huracán 2,3,4	Mar del Caribe	Océano Labrador	105-150	48.9 Km al oriente	Tizimin
Dean	21-ago-2007	Huracán 3, 5	Centro del Océano Atlántico Norte	Estado de Hidalgo, Mex	205-270	59.3 Km al sur	Tekax
Olga	15-dic-2007	Depresión tropical	Mar del Caribe	Golfo de México	55	25.3 Km al nororiente	Tizimin
Karl	15-sep-2010	Tormenta tropical	Mar del Caribe	Estado de Puebla, Mex	75-100	62.6 Km al sur	Tekax

Fuente: http://atl.cenapred.unam.mx/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=49&Itemid=215

Tomando en cuenta el origen geográfico de los ciclones que cruzan el área delimitada de 100 Km del Estado, 67 provienen principalmente del Mar del Caribe, 24 del Océano Atlántico Norte y el resto (16) de las 107 se originaron en otras áreas, incluyendo dos del Océano Pacífico.

De las 67 trayectorias que se originaron en Mar del Caribe, 36 alcanzaron una categoría máxima de Tormenta Tropical, 13 Depresiones Tropicales, 9 huracanes de Categoría 3, 7 alcanzaron Categoría 2, y Categoría 3 y 4 con un evento cada uno.

Los huracanes que han alcanzado la categoría Saffir-Simpson más alta en la región delimitada provienen del centro del Océano Atlántico Norte, los cuales están representados con 3 huracanes que alcanzaron Categoría 5, 4 con Categoría 4, 1 de Categoría 3, 8 eventos que alcanzaron Categoría 2 y finalmente huracanes con Categoría 1 y Tormenta Tropical 3 y 5 respectivamente (Figuras 318 y 319).

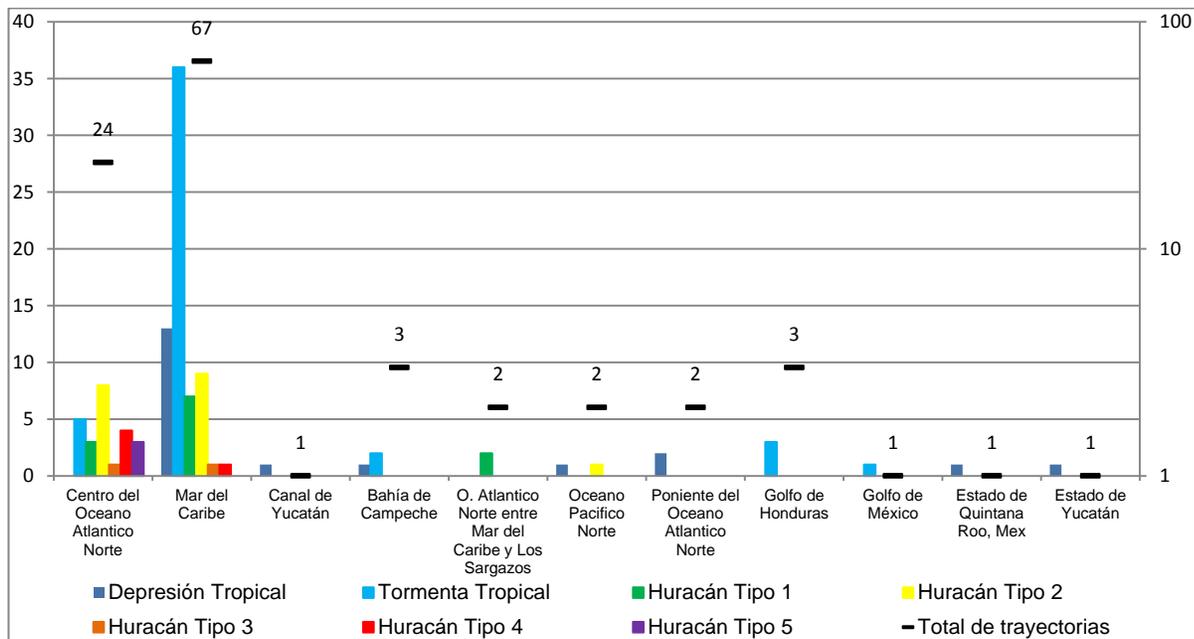


Figura 318. Origen geográfico de las trayectorias de ciclones tropicales localizadas en el área delimitada.

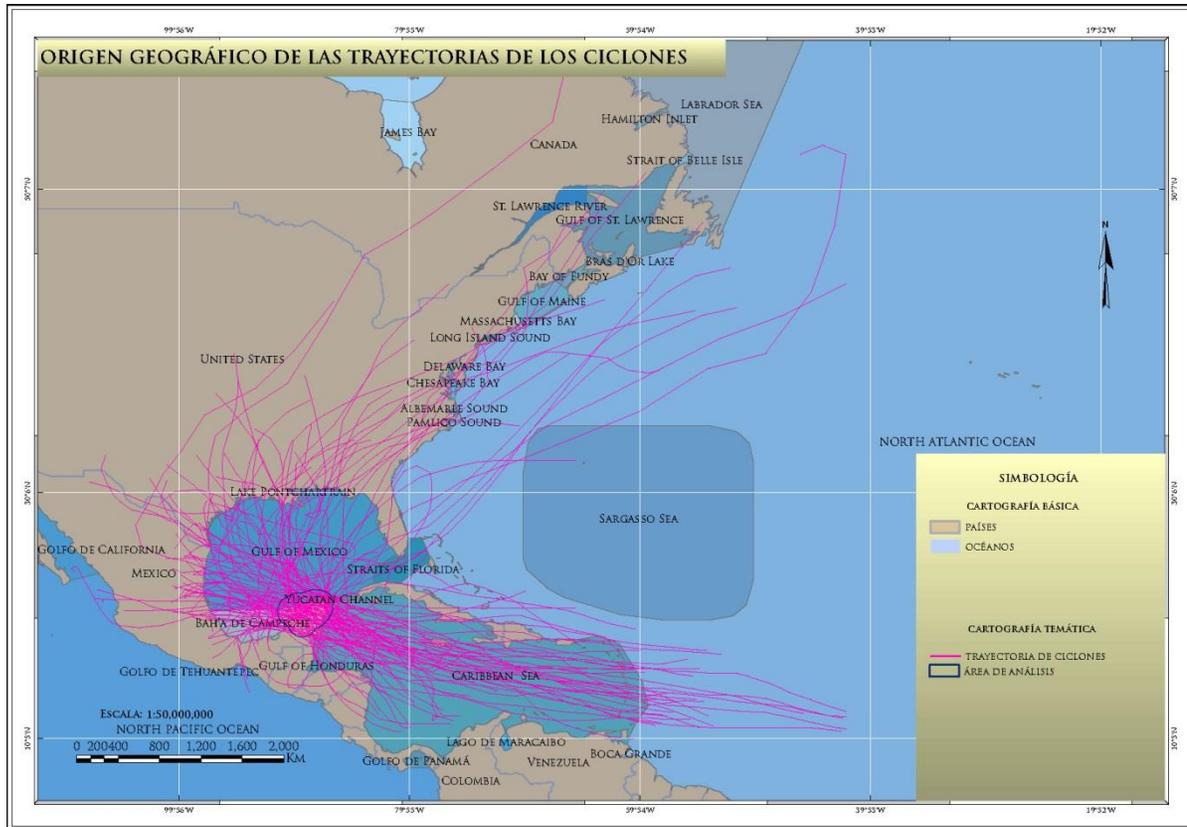


Figura 319. Origen geográfico de las trayectorias de los ciclones tropicales que cruzan el área delimitada en el estado de Yucatán.

En lo que respecta a la frecuencia anual de eventos en la zona delimitada y de acuerdo al análisis realizado se determinó que en la década de entre 1931 y 1940 se registraron 15 eventos, de los cuales 12 fueron Tormentas Tropicales y el resto huracanes de Categoría 2, en la década que comprende los años de 1881-1890 se registraron 8 eventos de los cuales 2 alcanzaron Categoría de huracán tipo 1 y con Categoría de Tormenta Tropical y huracán Categoría 2 se registraron 3 eventos respectivamente, en las décadas que comprenden los años 1961-1970 y 1971-1980, se registraron 9 eventos en cada 1, en cada una de estas décadas se registraron cuatro Depresiones Tropicales y el resto entre Tormentas Tropicales y huracanes que alcanzaron la máxima categoría (Tabla 143 y Figura 320).

Tabla 143. Frecuencia por década de los ciclones tropicales localizados en el área delimitada.

DÉCADA	DEPRESIÓN TROPICAL	TORMENTA TROPICAL	HURACÁN TIPO 1	HURACÁN TIPO 2	HURACÁN TIPO 3	HURACÁN TIPO 4	HURACÁN TIPO 5	TOTAL DE TRAYECTORIAS
1852-1860				2				2
1861-1870		1	1	1				3
1871-1880		2	3					5
1881-1890		3	2	3				8
1891-1900	2	3	1	1				7
1901-1910		2		3				5
1911-1920		4			1			5
1921-1930	1	2	1					4
1931-1940		12		3				15
1941-1950		2	2	1				5

.....Continuación de Tabla 143.

DÉCADA	DEPRESIÓN TROPICAL	TORMENTA TROPICAL	HURACÁN TIPO 1	HURACÁN TIPO 2	HURACÁN TIPO 3	HURACÁN TIPO 4	HURACÁN TIPO 5	TOTAL DE TRAYECTORIAS
1951-1960	1	3		1		2		7
1961-1970	4	1		2		1	1	9
1971-1980	4	3	1				1	9
1981-1990	2	2						4
1991-2000	2	3	1	1				7
2001-2010	4	4			1	2	1	12

Los huracanes de Categoría 4 se han presentado en la década de los 50's con dos eventos, con un suceso en los 60's y un acontecimiento entre el 2001 y 2010; de Categoría 5 se ha presentado un evento en la década de los 60's, 70's y entre la década que comprende entre 2001 y 2010, se presentaron 12 acontecimientos, de los cuales, 4 han alcanzado categoría de Depresión y Tormenta Tropical respectivamente, uno de Categoría 3, 2 Categoría 4 y como se comentó, 1 alcanzando la máxima Categoría de la escala Saffir-Simpson.

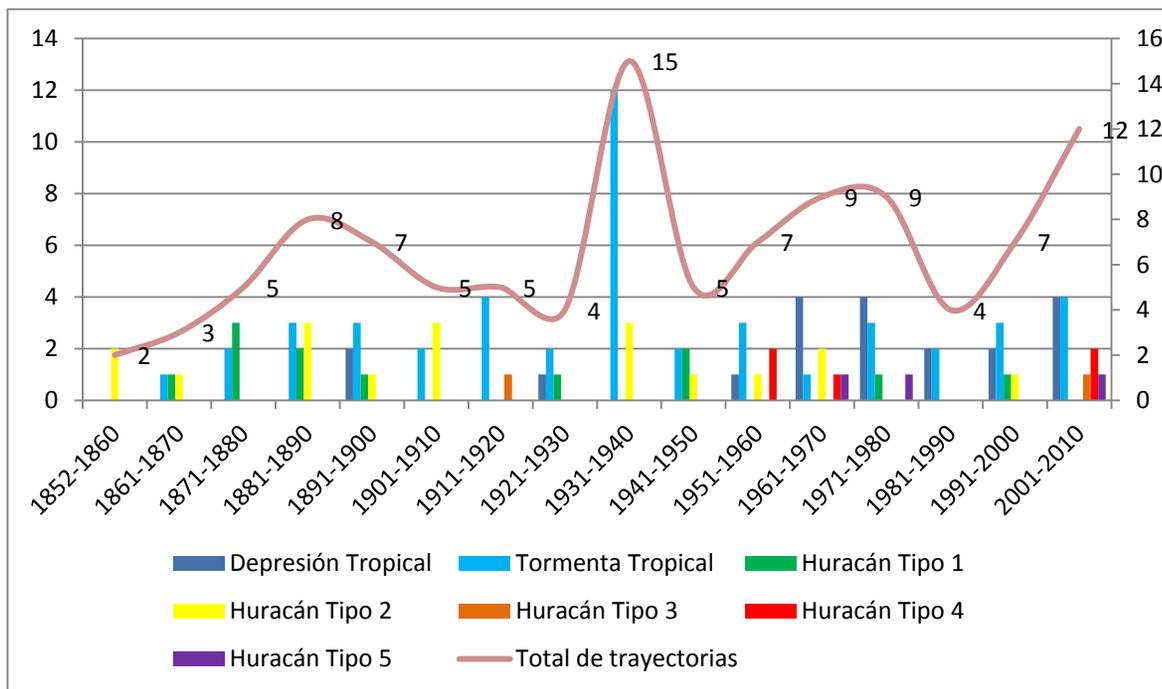


Figura 320. Frecuencia por década de los ciclones tropicales localizados en el área delimitada.

En la gráfica anterior (Figura 309) se muestra un aumento de eventos que han impactado la zona desde hace dos décadas.

Análisis de Frecuencia de Ciclones Tropicales.

Como se mencionó anteriormente se utilizaron las trayectorias de los ciclones que cruzan el área delimitada por 100 Km partiendo del límite del estado de Yucatán (Figura 321). Para el área de análisis se realizó un mallado de 40 x 40 Km (Figura 322), con la finalidad de obtener la frecuencia en cada celda con base en la longitud que cruza cada polígono, de acuerdo a la sumatoria de cada trayectoria de cada cuadro dando como resultado la interpolación asignando valores para determinar la frecuencia del estado por cada categoría (Figura 232).

En la figura 324 se muestra el resultado del mapa de frecuencia. Para este caso se utilizaron todas las categorías que han cruzado históricamente el área delimitada en el periodo que comprende entre 1851 al 2010, los grados o nivel de frecuencia fueron clasificados tomando el valor mayor del resultado y dividiéndolo en tres partes iguales para obtener el grado medio, alto y muy alto respectivamente; el resultado obtenido en este mapa es la condición en la que se encuentra el Estado en referencia al fenómeno de ciclones tropicales y su frecuencia constante a la que se enfrenta en cada temporada de huracanes, esto considerando todas las categorías de acuerdo a la escala Saffir-Simpson.

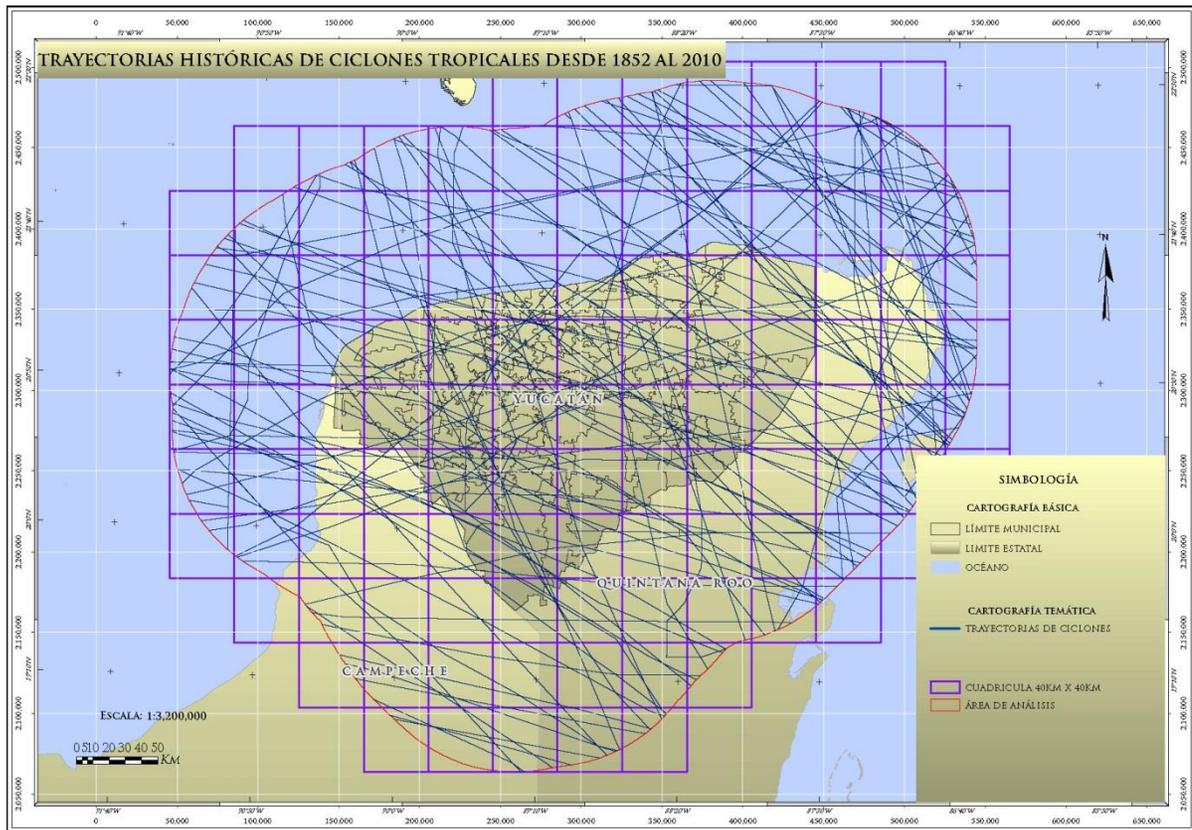


Figura 321. Trayectorias de los ciclones tropicales y área de análisis que comprende (100 Km).

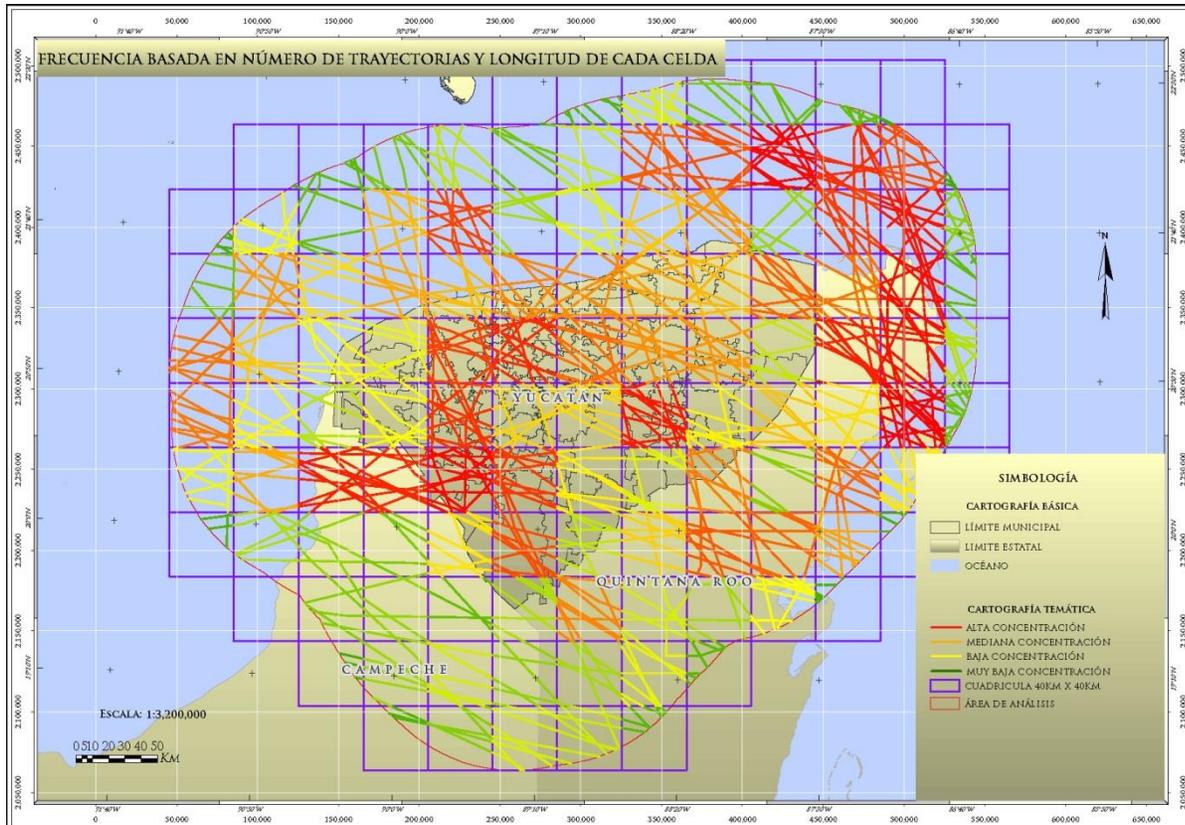


Figura 322. Cuadrícula de análisis en el área analizada conformada por celdas de 40 X 40 Km, la frecuencia está dada por el número y longitudes de las trayectorias.

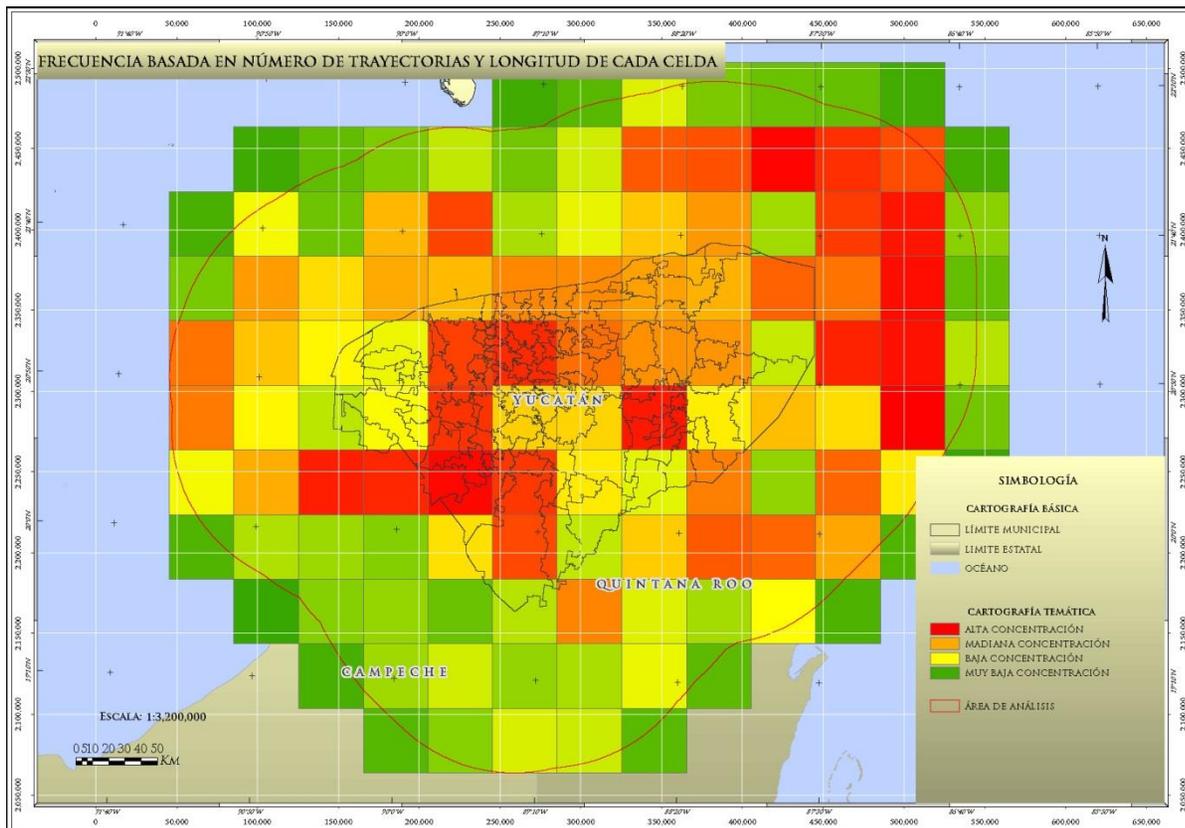


Figura 323. Frecuencia de cada celda en base a la sumatoria de las longitudes de las trayectorias de los ciclones.

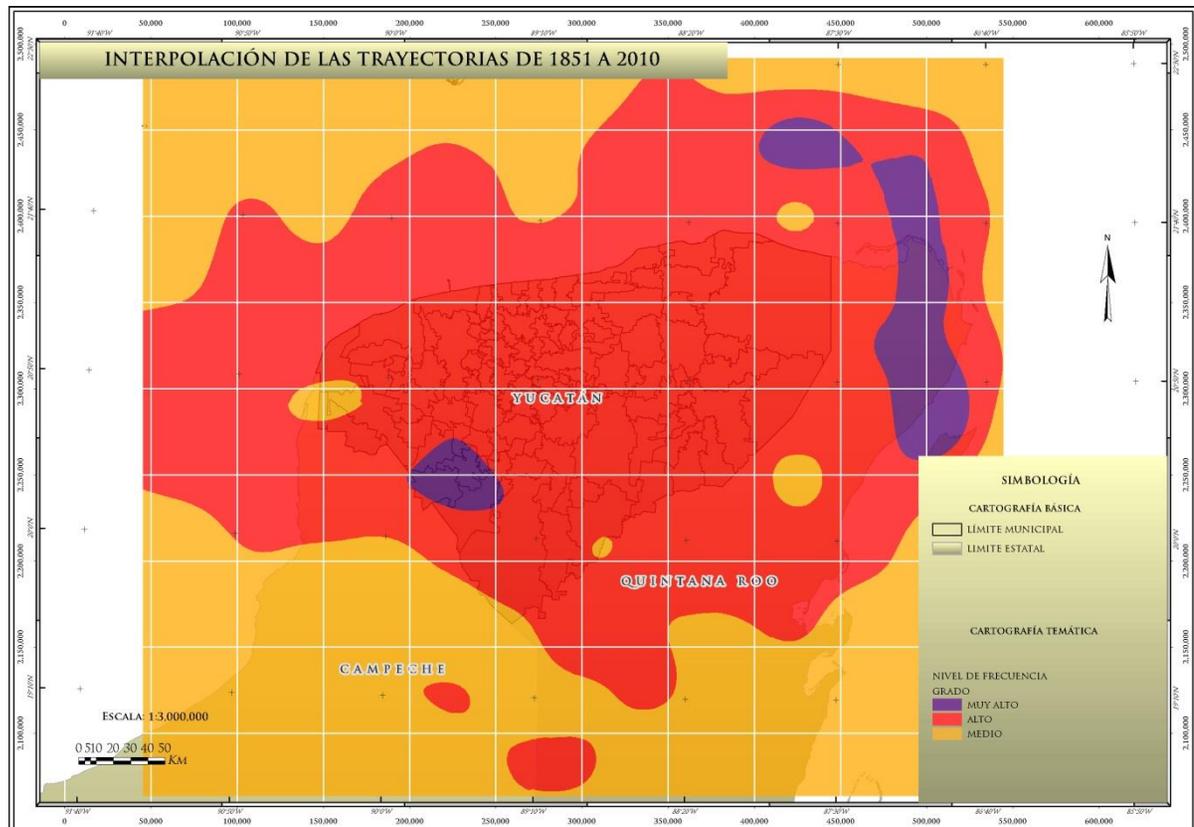


Figura 324. Mapa de frecuencia considerando las trayectorias que han cruzado el área de análisis en el periodo que comprende de 1851 al 2010.

A partir de la Figura 324, se realizarán los mapas de frecuencia con base a la categoría según la escala Saffir-Simpson, así como por periodo de tiempo (década) considerando todos los fenómenos referentes a ciclones ocurridos en ese periodo.

Tomando en cuenta todo lo anterior y el Mapa Índice de peligro por ciclones tropicales de México por cuadros de 1° x 1° del documento desarrollado por el CENAPRED “Mapas de índices de riesgo a escala municipal por fenómenos hidrometeorológicos” y las prospecciones en campo, se determinó que en la región delimitada se cuenta al menos con un nivel de frecuencia medio.

En la tabla 144 se muestran los municipios con mayor área en donde se presenta la ocurrencia de depresiones tropicales en la zona demarcada, así como el grado de frecuencia en cada municipio. El resto de los municipios también presentan un grado de repetición, sin embargo el área expuesta es menor al valor mínimo de esta tabla.

Tabla 144. Área de ocurrencia por depresiones tropicales por municipio y por grado de frecuencia.

NOMBRE DEL MUNICIPIO	GRADO DE FRECUENCIA	ÁREA [Km ²]
Tizimín	Medio	3,456.25
Tekax	Alto	2,761.79
Chemax	Medio	1,397.52
Oxkutzcab	Alto	863.72
Yaxcabá		823.96
Maxcanú		796.03
Valladolid	Medio	777.40
Tzucacab	Alto	765.85

.....Continuación de Tabla 144.

NOMBRE DEL MUNICIPIO	GRADO DE FRECUENCIA	ÁREA [Km ²]
Peto	Medio	733.48
Espita	Alto	733.31
Mérida	Muy alto	731.45
Temozón	Medio	638.35
Hunucmá	Alto	609.97
Celestún	Medio	598.13
Halachó		587.47
Cenotillo	Alto	542.47
Yaxcabá	Muy alto	538.36
Sotuta	Alto	522.48
Santa Elena		514.44
Dzilam González	Muy alto	504.67

El área expuesta en el Estado, respecto a depresiones tropicales, es de 10,634.16 Km² con una clasificación de frecuencia media, en un área de 21,429 Km² con una clasificación de frecuencia alta y con una frecuencia muy alta en 7,473 Km² (Figura 325).

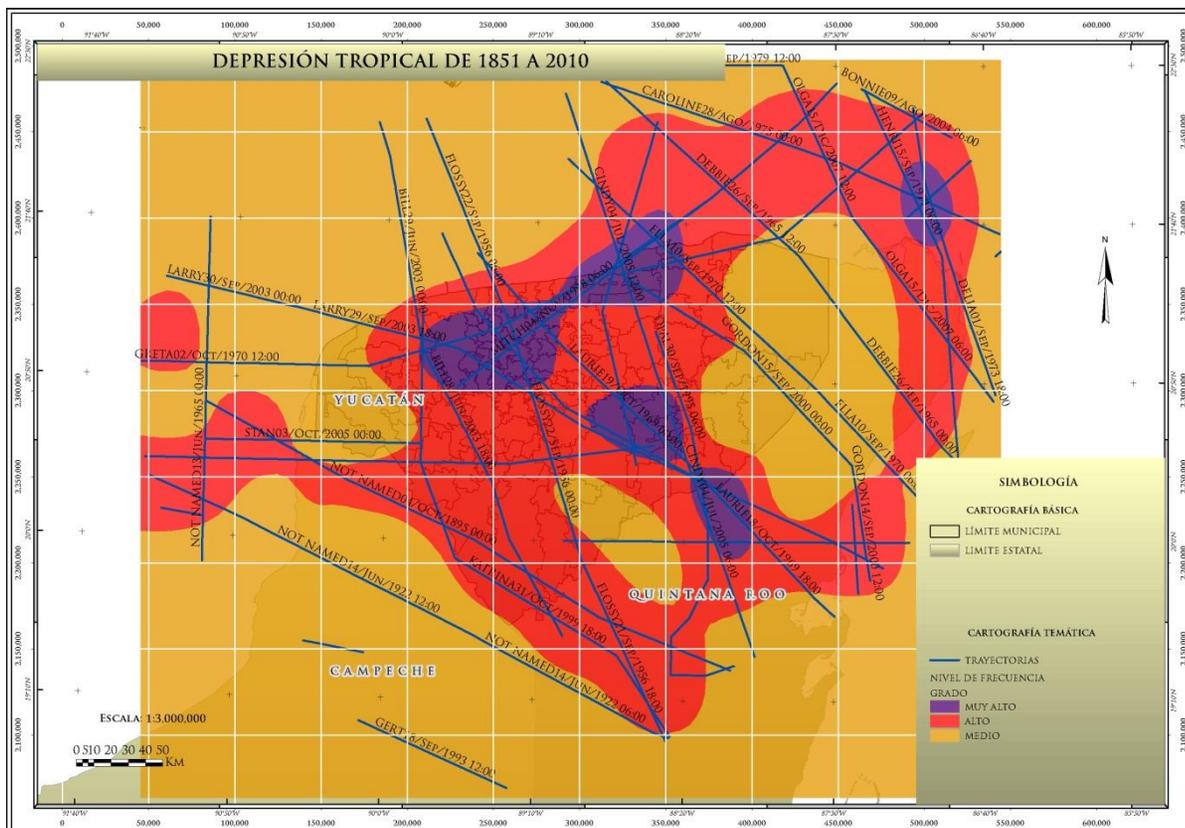


Figura 325. Mapa de frecuencia y trayectorias de depresiones tropicales que han cruzado el área de análisis en el periodo que comprende de 1851 al 2010.

En la Tabla 145 se exponen los municipios con mayor área en donde se presenta la ocurrencia de tormentas tropicales en la zona delimitada y el grado de frecuencia de cada polígono. El resto de los municipios también presentan un grado de periodicidad, sin embargo, el área expuesta es menor al valor mínimo de esta tabla.

En la Tabla 146 se exponen los municipios con mayor área en donde se presenta la ocurrencia de ciclones tropicales con categoría 1, así como el grado de frecuencia en cada zona marcada. El resto de los municipios también presentan un grado de periodicidad, sin embargo, el área expuesta es menor al valor mínimo de esta tabla.

Tabla 146. Área de ocurrencia por ciclones tropicales de categoría 1, por municipio y por grado de frecuencia.

NOMBRE DEL MUNICIPIO	GRADO DE FRECUENCIA	ÁREA [Km ²]
Tizimín	Muy alto	2,014.42
Tekax	Alto	1,698.83
Tizimín		1,628.92
Tekax	Medio	1,071.32
Peto		1,054.58
Valladolid	Alto	1,002.21
Yaxcabá		907.17
Maxcanú	Medio	837.05
Chemax	Alto	835.40
Espita		735.05
Oxkutzcab		705.12
Buctzotz		654.29
Hunucmá	Medio	644.67
Temozón	Alto	627.25
Tzucacab	Medio	621.64
Panabá		600.32
Celestún		598.13
Halachó		587.47
Cenotillo	Alto	542.47
Mérida	Medio	531.33
Santa Elena	Alto	514.44

El área expuesta en el Estado, respecto a los ciclones tropicales con categoría 1 es de 12,234 Km², con una frecuencia alta de 20,271 Km² y una muy alta de 7,031 Km² (Figura 327).

En la Tabla 147 se exponen los municipios con mayor área en donde se presenta la ocurrencia de ciclones tropicales con categoría 2, así como el grado de frecuencia en cada región. El resto de los municipios también presentan un grado de repetición, sin embargo, el área expuesta es menor al valor mínimo de esta tabla.

El área expuesta en el Estado, respecto a los ciclones tropicales de categoría 2, es de 33,711 Km² clasificada con una frecuencia media y con una alta de 5,825 Km² (Figura 328).

En la Tabla 148 se exponen los municipios con mayor área en donde se presenta la ocurrencia de ciclones tropicales de categoría 3 y el grado de repetición en cada polígona marcado. El resto de los municipios también presentan un grado de frecuencia, sin embargo, el área expuesta es menor al valor mínimo de esta tabla.

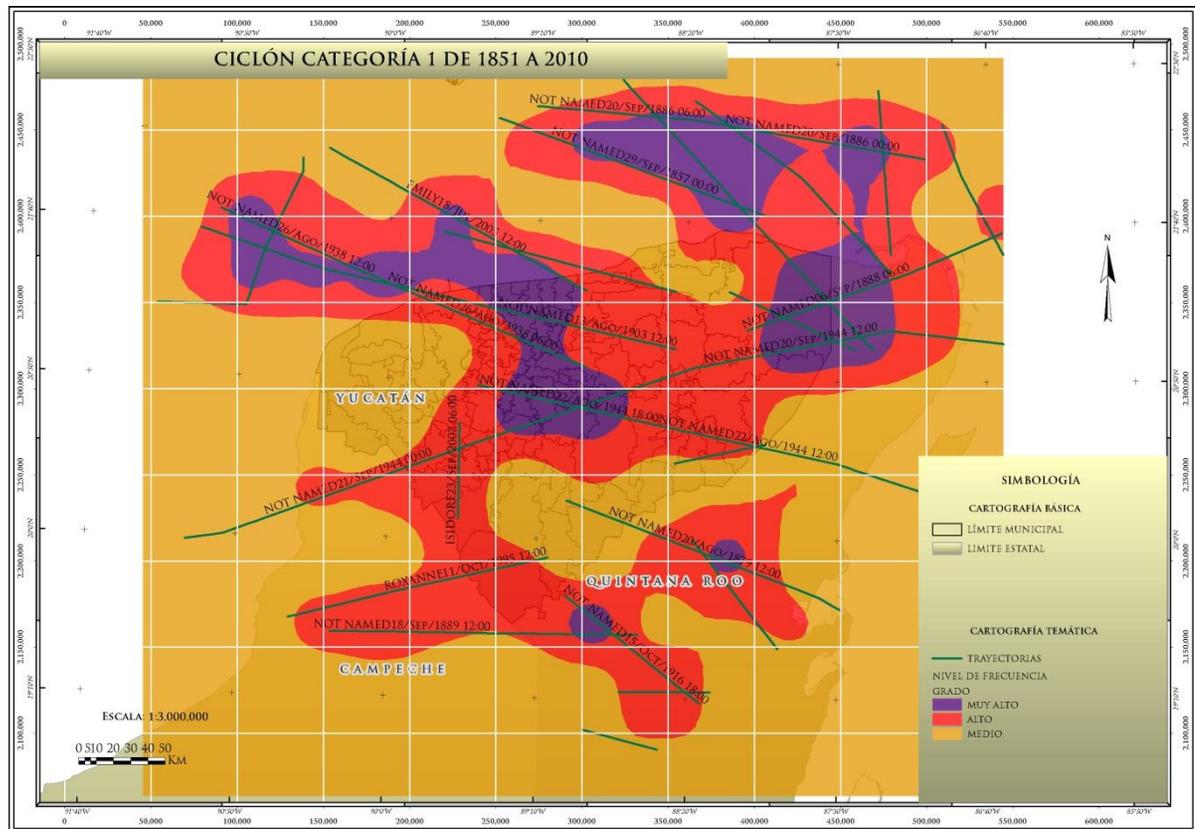


Figura 327. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales de categoría 1 que han cruzado el área de análisis en el periodo que comprende de 1851 al 2010.

Tabla 147. Área de ocurrencia por ciclones tropicales de categoría 2, por municipio y por grado de frecuencia.

NOMBRE DEL MUNICIPIO	GRADO DE FRECUENCIA	ÁREA [Km ²]
Tekax	Media	2,770.16
Tizimín		2,275.36
Yaxcabá	Media	1,474.30
Chemax	Alta	1,217.29
Peto	Media	1,055.15
Maxcanú		912.42
Mérida		884.34
Oxkutzcab		863.72
Hunucmá		840.97
Tzucacab	Alta	765.85
Valladolid	Alta	758.88
Panabá	Media	665.05
Buctzotz		654.29
Espita		639.23
Temozón	Alta	626.47
Celestún	Media	598.13
Halachó		587.47
Sotuta		546.09
Cenotillo		542.47
Santa Elena		514.44
Dzilam González		506.48
Tixcacalcupul		502.21

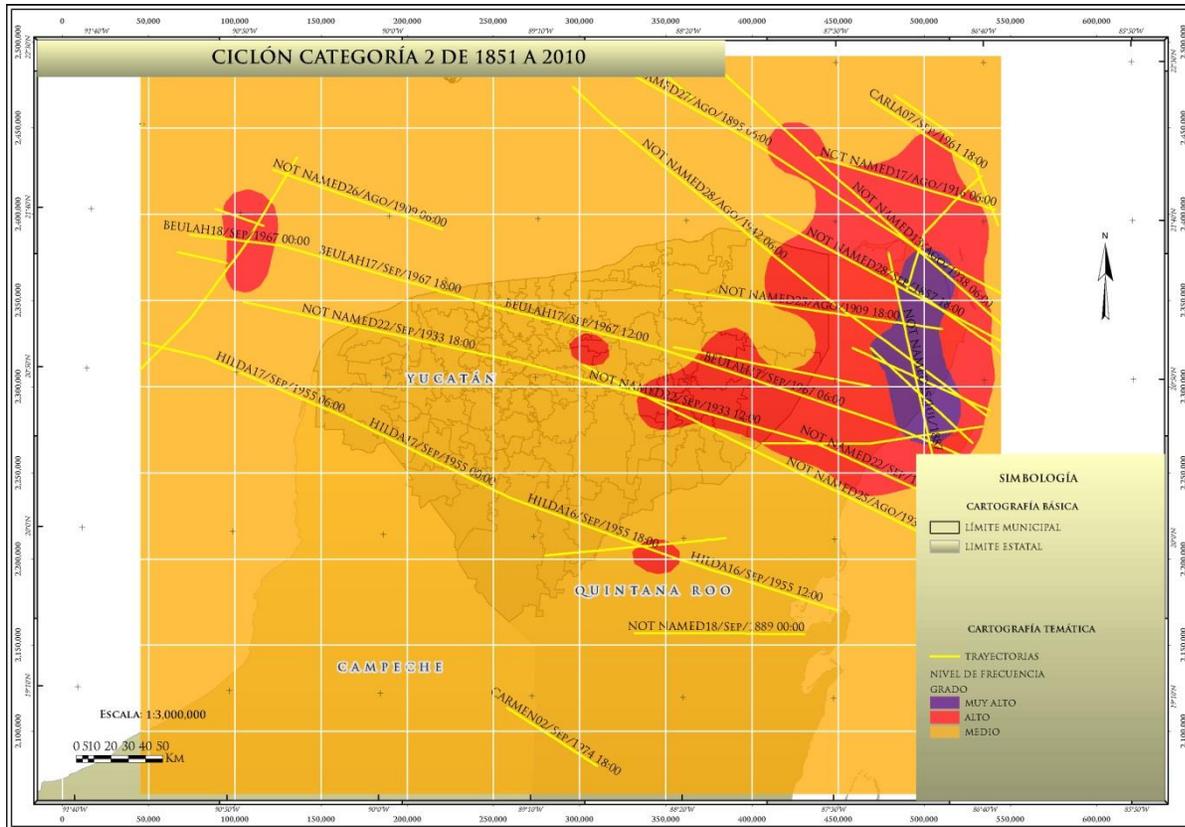


Figura 328. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales de categoría 2 que han cruzado el área de análisis en el periodo que comprende de 1851 al 2010.

Tabla 148. Área de ocurrencia por ciclones tropicales de categoría 3, por municipio y por grado de frecuencia.

NOMBRE DEL MUNICIPIO	GRADO DE FRECUENCIA	ÁREA [Km ²]
Tizimín	Media	3,882.51
Tekax		2,770.16
Yaxcabá		1,474.30
Chemax		1,397.52
Valladolid		1,077.73
Peto		1,055.15
Maxcanú		912.42
Mérida		884.34
Oxkutzcab		863.72
Tzucacab		765.85
Espita		735.05
Temozón		706.21
Panabá		665.05
Hunucmá		660.40
Buctzotz		654.29
Celestún		598.13
Halachó		587.47
Sotuta		546.09
Cenotillo		542.47
Santa Elena		514.44
Dzilam González	506.48	
Tixcacalcupul	502.21	

Del análisis realizado se tiene una ocurrencia media que abarca prácticamente todo el Estado, esto por la ubicación geográfica en la que se encuentra el estado de Yucatán cuya zona es de tránsito constante de estos eventos meteorológicos; sin embargo, en esta categoría se obtuvo una frecuencia alta que abarca 280 Km² que la constituyen porciones de los municipios de Hunucmá, Progreso y Ucú (Figura 329).

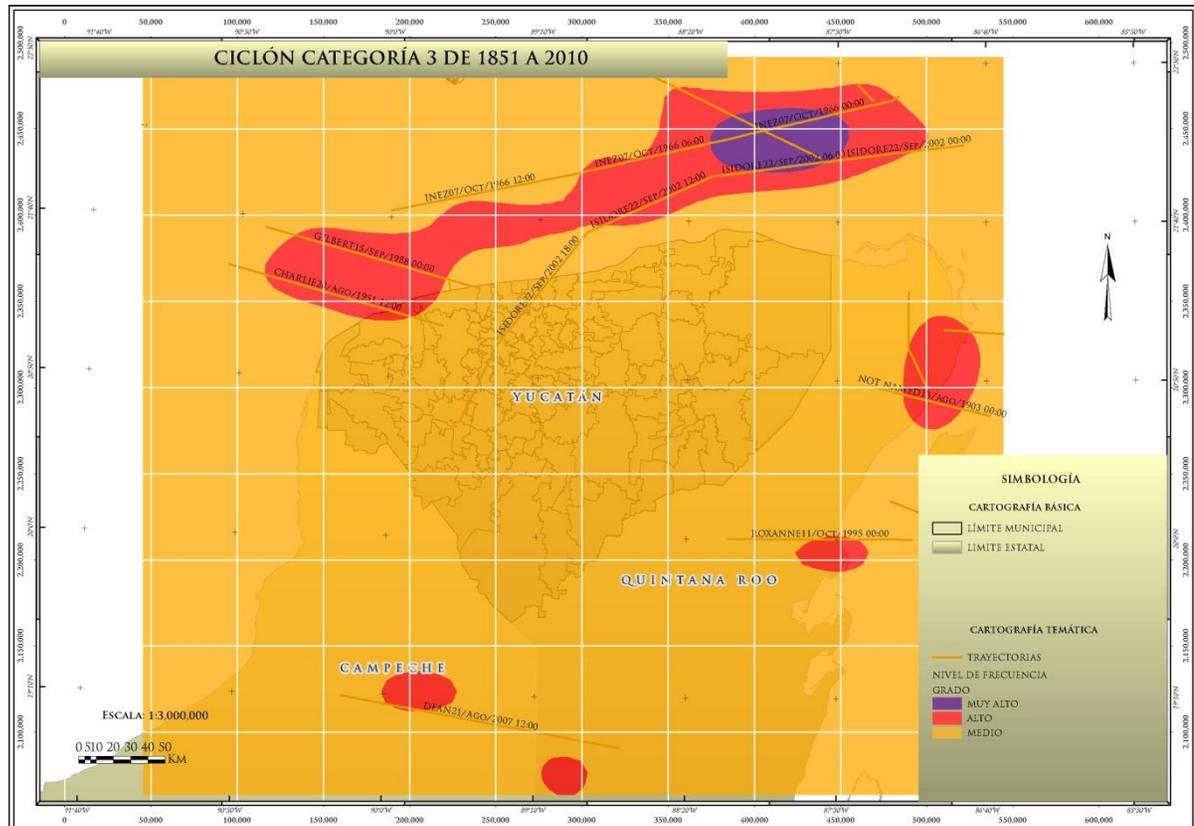


Figura 329. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales de categoría 3 que han cruzado el área de análisis en el periodo que comprende de 1851 al 2010.

En la Tabla 149 se exponen los municipios con mayor área en donde se presenta la ocurrencia de ciclones tropicales con categoría 4 en la zona de análisis, así como el grado de periodicidad en cada región. El resto de los municipios también presentan un grado de frecuencia, sin embargo, el área expuesta es menor al valor mínimo de esta tabla.

Tabla 149. Área de ocurrencia por ciclones tropicales de categoría 4, por municipio y por grado de frecuencia.

NOMBRE DEL MUNICIPIO	GRADO DE FRECUENCIA	ÁREA [Km ²]
Tizimín	Media	3,404.17
Tekax		2,770.16
Yaxcabá		1,101.04
Peto		1,055.15
Chemax	Alta	989.94
Maxcanú	Media	912.42
Oxkutzcab		863.72
Hunucmá		840.97
Tzucacab		765.85
Mérida		762.90
Espita	Muy alta	679.06

.....Continuación de Tabla 149.

NOMBRE DEL MUNICIPIO	GRADO DE FRECUENCIA	ÁREA [Km ²]
Panabá	Media	657.59
Celestún		598.13
Halachó		587.47
Valladolid	Alta	518.01
	Muy alta	516.59
Santa Elena	Media	514.44
Cenotillo	Muy alta	503.90

El área expuesta en el Estado, referente a los ciclones tropicales de categoría 4, es de 25,755 Km² clasificada con una frecuencia media, 9,614 Km² con una frecuencia alta y con una frecuencia muy alta 3,167 Km² (Figura 330).

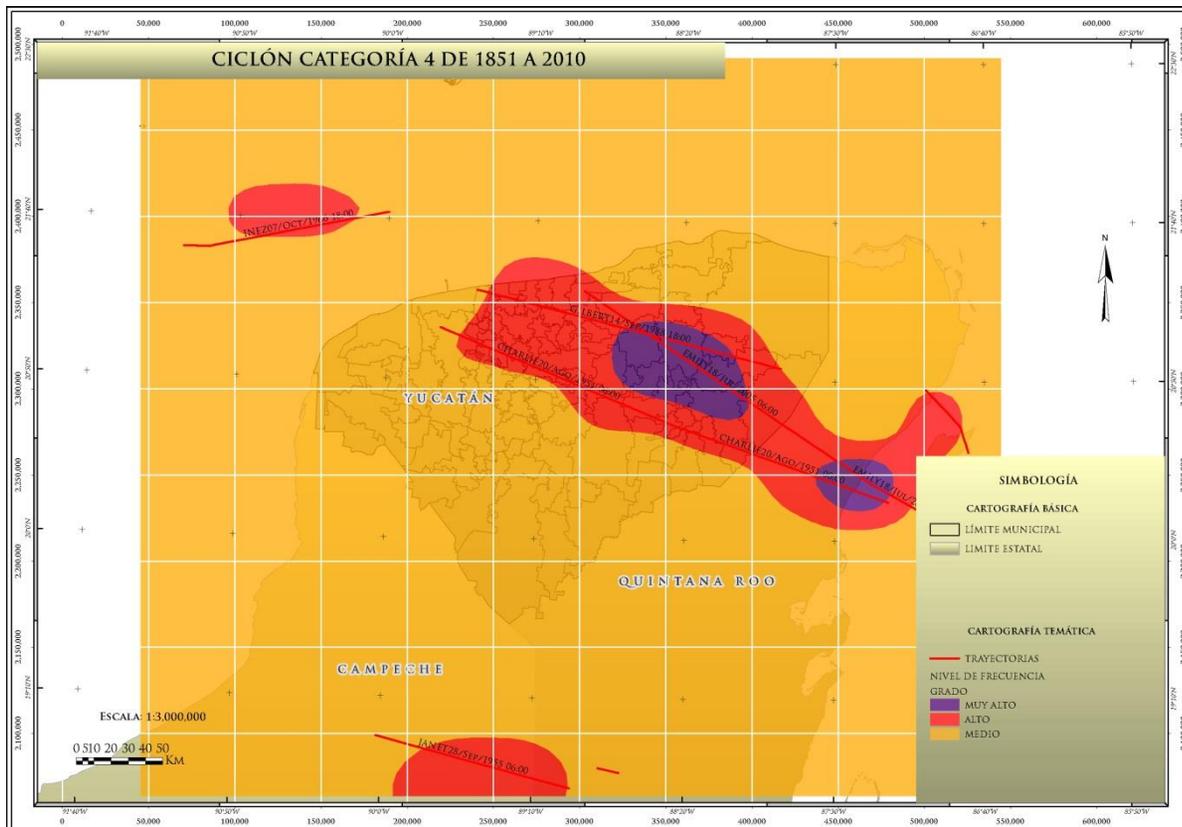


Figura 330. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales de categoría 4 que han cruzado el área de análisis en el periodo que comprende de 1851 al 2010.

En la Tabla 150 se exponen los municipios con mayor área en donde se presenta la ocurrencia de ciclones tropicales con categoría 5 en la zona delimitada, así como el grado de repetición en cada región. El resto de los municipios también presentan un grado de frecuencia, sin embargo el área expuesta es menor al valor mínimo de esta tabla.

Tabla 150. Área de ocurrencia por ciclones tropicales de categoría 5, por municipio y por grado de frecuencia.

NOMBRE DEL MUNICIPIO	GRADO DE FRECUENCIA	ÁREA [Km ²]
Tizimín	Media	3350.50
Tekax		2770.16
Yaxcabá		1474.30
Valladolid		1077.73
Peto		1055.15
Chemax		918.65
Maxcanú		912.42
Mérida		884.34
Oxkutzcab		863.72
Hunucmá		840.97
Tzucacab		765.85
Espita		735.05
Panabá		665.05
Temozón		656.90
Buctzotz		654.29
Celestún		598.13
Halachó		587.47
Sotuta		546.09
Cenotillo		542.47
Tizimín	Alta	532.02

En lo que refiere a ciclones de categoría cinco no ha cruzado ninguna trayectoria del registro base en el Estado, sin embargo, se tiene una ocurrencia media que abarca prácticamente todo el Estado, esto por la ubicación geográfica en la que se encuentra el estado de Yucatán cuya zona es de tránsito constante de estos eventos meteorológicos; del análisis se obtuvo una frecuencia alta de 1,060 Km² que constituyen porciones de los municipios de Tizimín, Chemax y Temozón (Figura 331).

A continuación se muestran los mapas de frecuencia realizados por década, para los cuales, se tomaron en cuenta únicamente los periodos de tiempo en donde existieron más eventos ciclónicos (Tabla 151). En cada período mostrado, se consideran todas las categorías ocurridas en ese intervalo de tiempo en la zona de análisis. Sin embargo, cabe mencionar que en cada caso, el resto de los municipios también presentan un grado de frecuencia, sin embargo, el área expuesta es menor al valor mínimo de cada una de las tablas mostradas.

En la Tabla 152 se observa el área en donde se presentó la ocurrencia de ciclones tropicales en la década que comprende el periodo de 1881 a 1890 y el grado de frecuencia en cada municipio que la conforma.

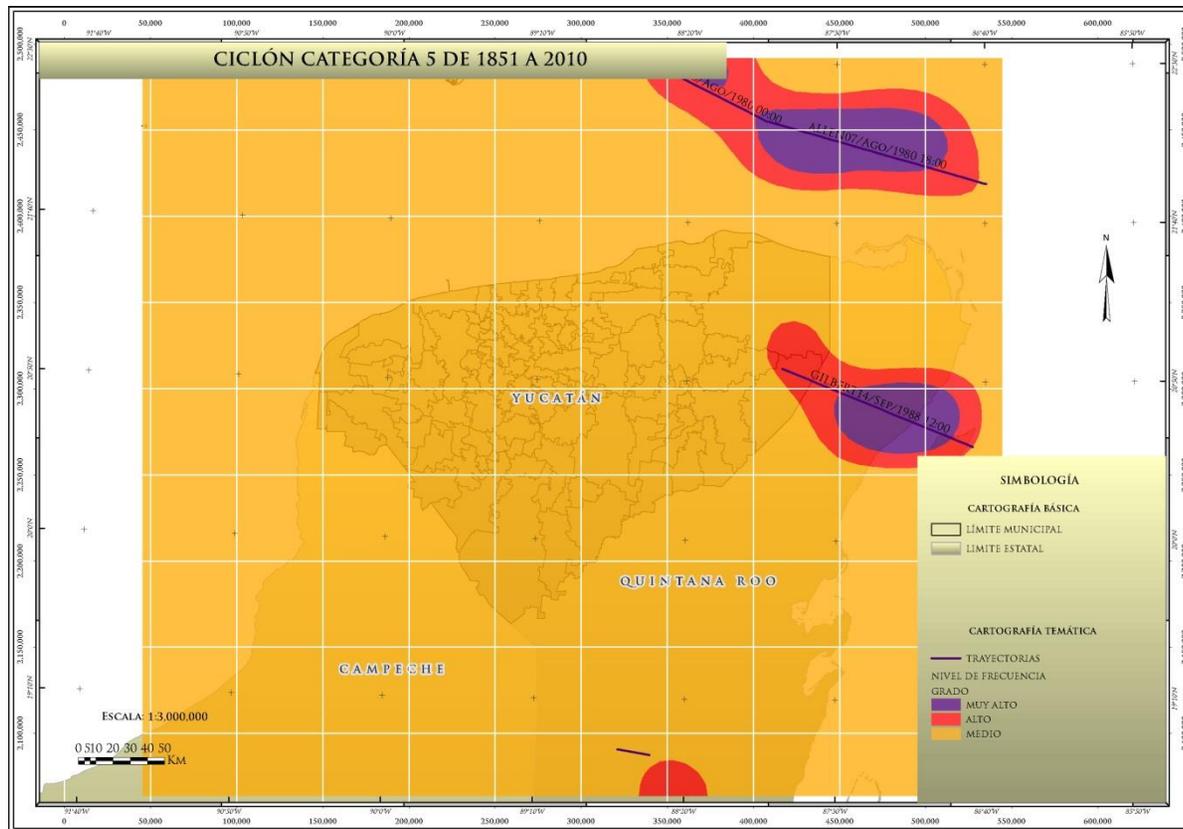


Figura 331. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales de categoría 5 que han cruzado el área de análisis en el periodo que comprende de 1851 al 2010.

Tabla 151. Periodos por década en los que se presentaron más eventos ciclónicos en la región analizada.

DÉCADA	DEPRESIÓN TROPICAL	TORMENTA TROPICAL	HURACÁN TIPO 1	HURACÁN TIPO 2	HURACÁN TIPO 3	HURACÁN TIPO 4	HURACÁN TIPO 5	TOTAL DE TRAYECTORIAS
1881-1890		3	2	3				8
1891-1900	2	3	1	1				7
1931-1940		12		3				15
1951-1960	1	3		1		2		7
1961-1970	4	1		2		1	1	9
1971-1980	4	3	1				1	9
1991-2000	2	3	1	1				7
2001-2010	4	4			1	2	1	12

Tabla 152. Área de ocurrencia por ciclones tropicales en el periodo que comprende la década de 1881 a 1890, por municipio y por grado de frecuencia.

NOMBRE DEL MUNICIPIO	GRADO DE FRECUENCIA	ÁREA [Km ²]
Tizimin	Media	3412.60
Tekax	Alta	1583.14
Yaxcabá	Media	1474.30
Chemax		1397.52
Tekax		1187.02
Valladolid		1077.73
Peto		1055.15
Mérida		878.07
Oxkutzcab		855.14

.....Continuación de Tabla 152.

NOMBRE DEL MUNICIPIO	GRADO DE FRECUENCIA	ÁREA [Km ²]
Hunucmá	Media	840.97
Maxcanú		701.15
Panabá		665.05
Buctzotz	Alta	654.29
Espita		610.40
Tzucacab	Media	609.61
Celestún		598.13
Halachó		587.47
Temozón		547.11
Sotuta		541.45
Santa Elena		514.44
Dzilam González	506.48	
Tixcacalcupul	502.21	

En la década que comprende el período de 1881 a 1890, el área clasificada con una frecuencia media fue de 33,866 Km² y con una alta 5,670 Km²; la cual se presentó en la porción sur-oriente del Estado, como se muestra en la Figura 332.

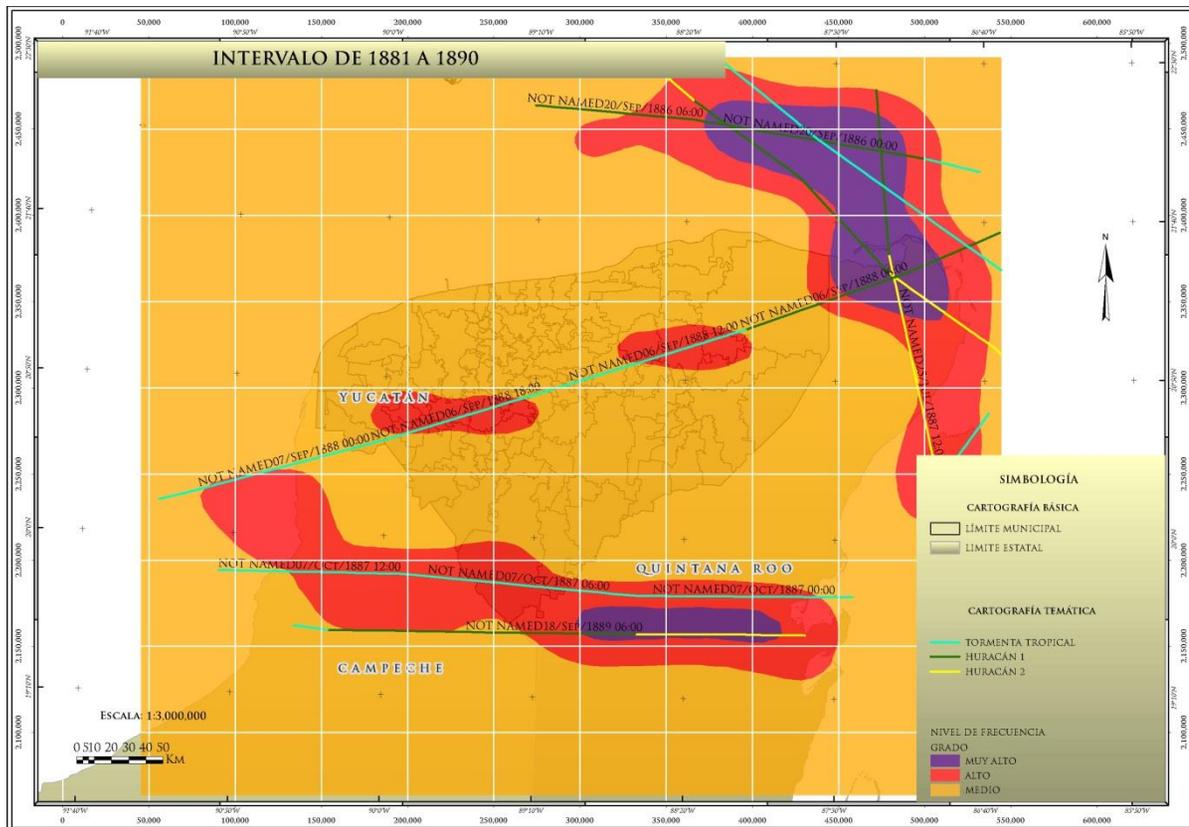


Figura 332. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales presentada en el periodo que comprende de 1881 a 1890, en el estado de Yucatán.

En la Tabla 153 se muestra el área en donde se presentó la ocurrencia de ciclones tropicales en la década que comprende el periodo de 1891 a 1900 y el grado de frecuencia en cada municipio.

Tabla 153. Área de ocurrencia por ciclones tropicales en la década comprendida entre 1891 y 1900, por municipio y por grado de frecuencia.

NOMBRE DEL MUNICIPIO	GRADO DE FRECUENCIA	ÁREA [Km ²]
Tizimín	Media	2997.39
Tekax		2357.06
Peto		1055.15
Chemax		1052.53
Maxcanú		912.42
Tizimín	Alta	885.12
Mérida	Media	884.34
Oxkutzcab		863.72
Yaxcabá		852.66
Hunucmá		840.97
Valladolid		805.10
Tzucacab		765.85
Espita		656.33
Yaxcabá	Alta	621.64
Celestún	Media	598.13
Halachó		587.47
Cenotillo		540.17
Santa Elena		514.44

En la década que comprende el periodo del 1891 a 1900, la superficie clasificada con una frecuencia media fue de 28,357 Km², con una frecuencia alta de 11,024 Km² y una muy alta de 155 Km²; estas dos últimas se presentó en la porción norte, centro y sur del estado, como se muestra en la Figura 333.

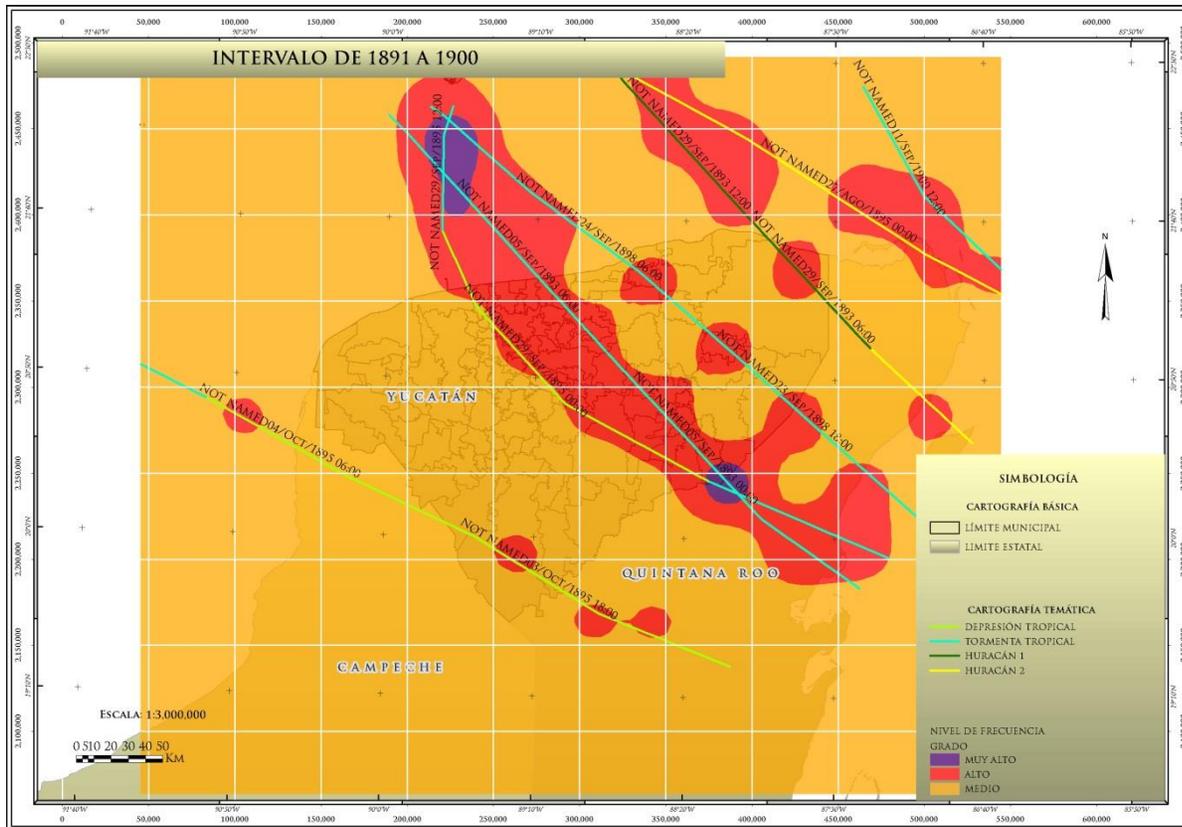


Figura 333. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales presentada en el periodo que comprende el intervalo de 1891 a 1900, en el estado de Yucatán.

En la Tabla 154 se muestra el área en donde se presentó la ocurrencia de ciclones tropicales en el periodo que comprende de 1931 a 1940, y el grado de frecuencia en cada uno de los municipios que la conforman.

Tabla 154. Área de ocurrencia por ciclones tropicales en el periodo que comprende la década de 1931 a 1940.

NOMBRE DEL MUNICIPIO	GRADO DE FRECUENCIA	ÁREA [Km ²]
Tizimín	Media	3882.51
Tekax	Alta	1469.91
Yaxcabá		1464.29
Tekax	Muy alta	1300.25
Chemax	Media	1034.91
Valladolid	Alta	848.65
Hunucmá		823.75
Oxkutzcab	Muy alta	814.01
Peto	Media	749.20
Espita		735.05
Temozón		688.24
Panabá		665.05
Maxcanú		660.76
Buctzotz		654.29
Mérida		552.37
Tzucacab	Alta	531.32
Santa Elena	Muy alta	514.44
Dzilam González	Media	506.48

En la década que comprende el periodo de 1931 a 1940, el área clasificada con una frecuencia media fue de 15,807 Km², con una periodicidad alta de 18,535 Km² y con una muy alta de 5,194 Km²; la cual se presentó en la porción sur-oriente del Estado, como se muestra en la figura 29.

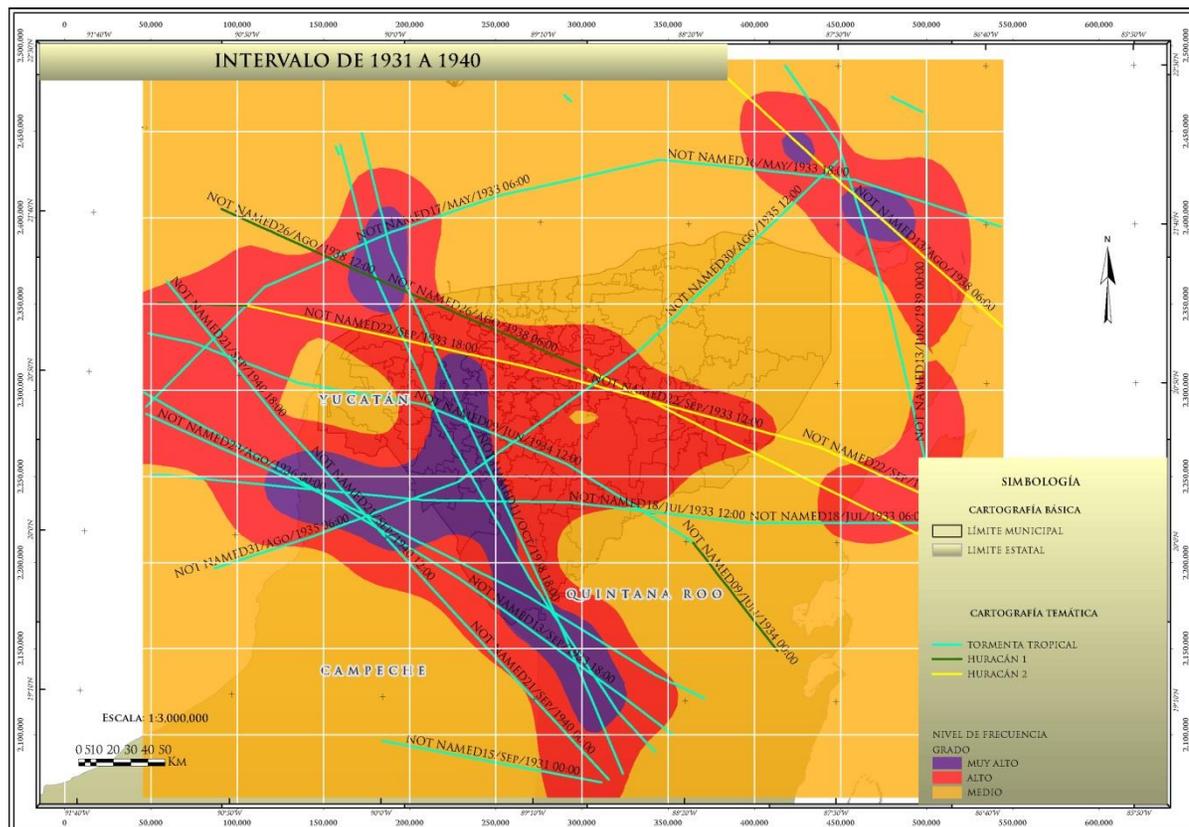


Figura 334. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales presentada en el periodo que comprende de 1931 a 1940.

En la tabla 155 se observa el área en donde se presentó la ocurrencia de ciclones tropicales en la década que comprende el periodo de 1951 a 1960 y el grado de frecuencia en cada municipio que la conforma.

Tabla 155. Área de ocurrencia por ciclones tropicales en la década comprendida entre 1951 y 1960, por municipio y por grado de frecuencia.

NOMBRE DEL MUNICIPIO	GRADO DE FRECUENCIA	ÁREA [Km ²]
Tizimín	Media	3882.51
Tekax		2167.99
Chemax		1397.52
Yaxcabá	Alta	1016.85
Valladolid	Media	965.79
Hunucmá		840.97
Peto	Alta	801.15
Espita	Media	735.05
Temozón		706.21
Panabá		665.05
Buctzotz		654.29
Mérida	Alta	647.58
Maxcanú		619.17
Tekax		602.17
Celestún	Media	598.13
Tzucacab	Alta	546.53
Sotuta		546.09
Cenotillo	Media	542.47
Dzilam González		506.48
Tixcacalcupul		502.21

En la década que comprende el periodo del 1951 a 1960, la superficie clasificada con una frecuencia media fue de 25,712 Km², con una repetición alta 12,894 Km² y con una periodicidad muy alta 929 Km²; estas dos últimas se presentó en la porción norte, centro y sur del Estado, como se muestra en la Figura 335.

En la Tabla 156 se observa el área en donde se presentó la ocurrencia de ciclones tropicales en la década que comprende el periodo de 1961 a 1970 y el grado de frecuencia en cada municipio que la conforma.

En la década que comprende el periodo del 1961 a 1970, la superficie clasificada con una frecuencia media fue de 19,124 Km², con una periodicidad alta 17,298 Km² y con una frecuencia muy alta 3,114 Km²; la cual se presentó en la porción centro norte del Estado, como se muestra en la Figura 336.

En la Tabla 157 se observa el área en donde se presentó la ocurrencia de ciclones tropicales en la década que comprende el periodo de 1971 a 1980 y el grado de frecuencia en cada municipio que la conforma.

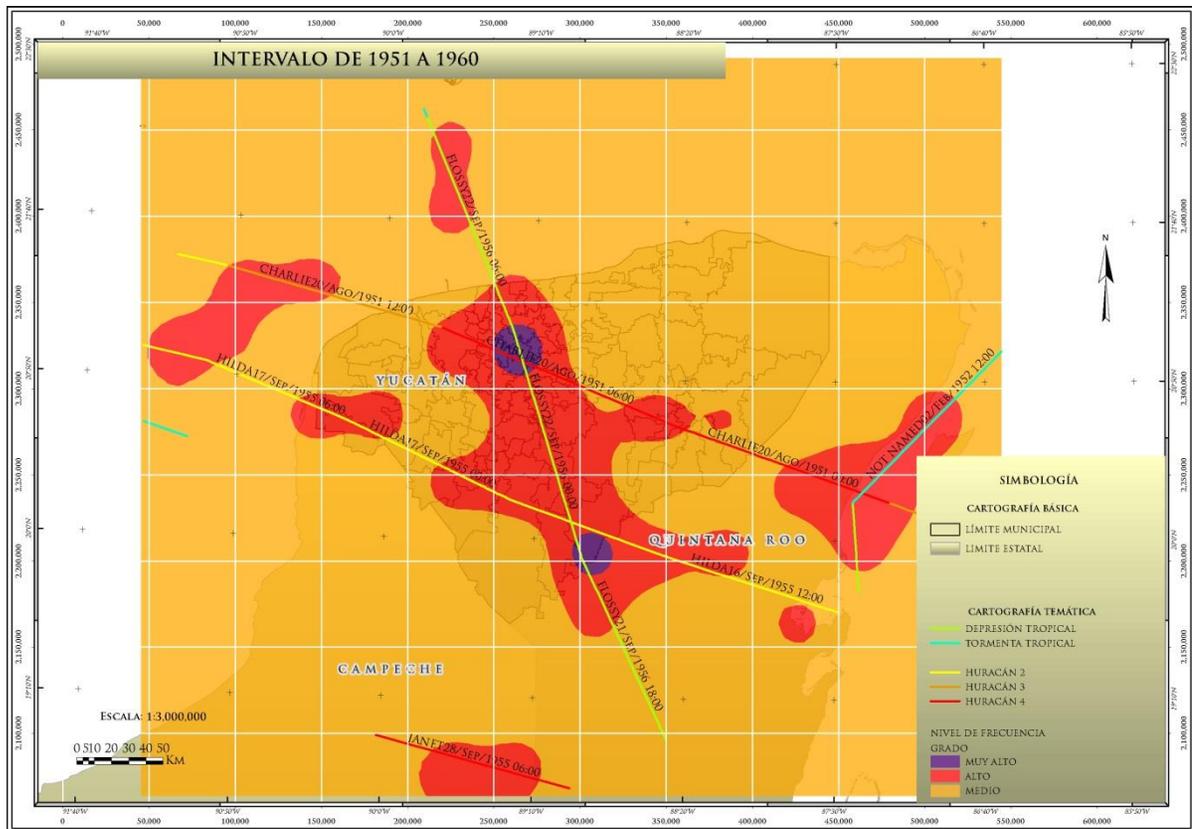


Figura 335. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales presentada en el periodo que comprende el intervalo de 1951 a 1960, en el estado de Yucatán.

Tabla 156. Área de ocurrencia por ciclones tropicales en la década comprendida entre 1961 y 1970, por municipio y por grado de frecuencia.

NOMBRE DEL MUNICIPIO	GRADO DE FRECUENCIA	ÁREA [Km ²]
Tizimín	Alta	3714.33
Tekax	Media	2770.16
Yaxcabá		1339.92
Chemax	Alta	1090.53
Peto	Media	1055.15
Maxcanú		912.42
Valladolid		911.38
Oxkutzcab		863.72
Hunucmá	Alta	840.97
Tzucacab	Media	765.85
Espita	Alta	735.05
Mérida		677.21
Temozón		673.55
Panabá		665.05
Buctzotz	Media	630.86
Halachó		587.47
Sotuta		543.86
Cenotillo	Alta	531.09
Santa Elena	Media	514.44

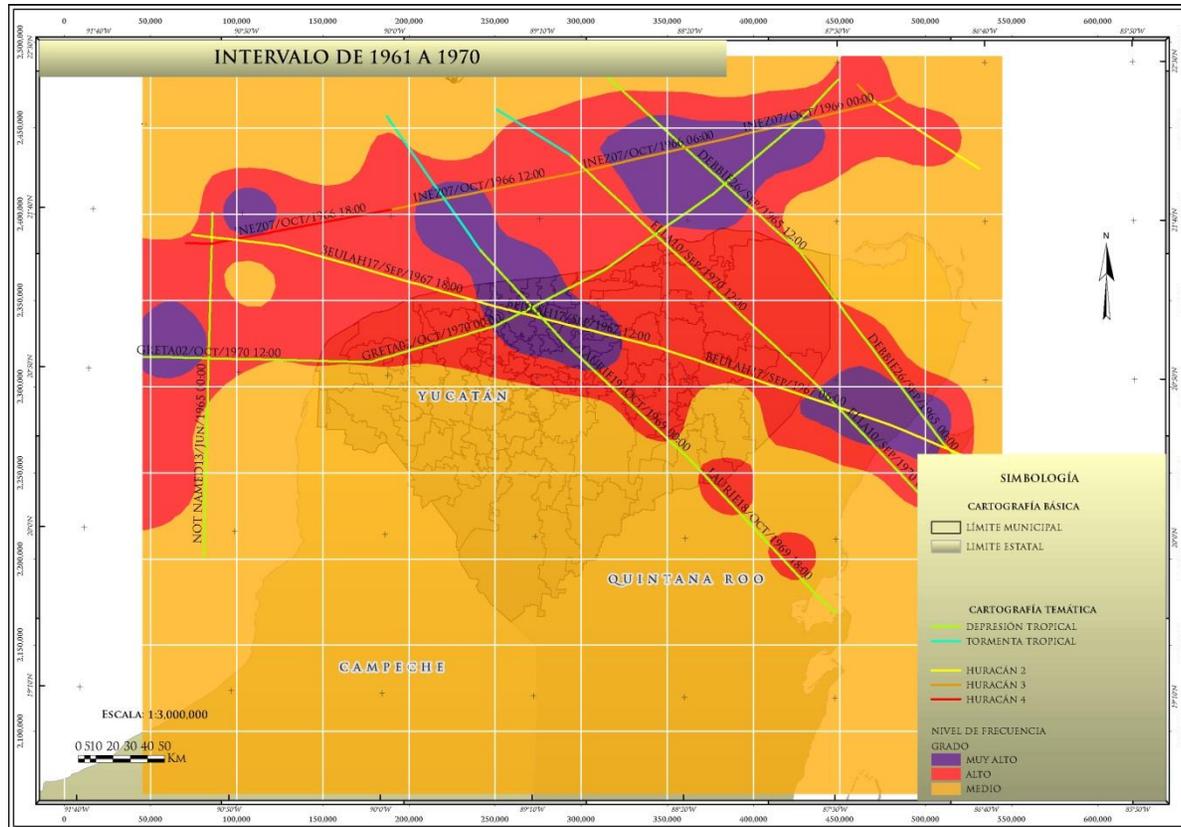


Figura 336. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales presentada en el periodo que comprende el intervalo de 1961 a 1970, en el estado de Yucatán.

Tabla 157. Área de ocurrencia por ciclones tropicales en la década comprendida entre 1971 y 1980, por municipio y por grado de frecuencia.

NOMBRE DEL MUNICIPIO	GRADO DE FRECUENCIA	ÁREA [Km ²]
Tekax	Media	2770.16
Tizimín	Alta	1996.21
Yaxcabá		1886.30
Chemax		1474.30
Valladolid		1397.52
Peto		1077.73
Maxcanú		1055.15
Mérida		912.42
Oxkutzcab		884.34
Hunucmá		863.72
Tzucacab		840.97
Espita		765.85
Temozón		735.05
Panabá		706.21
Buctzotz		665.05
Celestún		654.29
Halachí		598.13
Sotuta		587.47
Cenotillo		546.09
Santa Elena		542.47
Dzilam González		514.44
Tixcacalcupul		506.48
	Media	502.21

En la década que comprende el periodo del 1971 a 1980, la superficie clasificada con una frecuencia media fue de 37,527 Km² y con una alta 2,009 Km²; la cual se presentó en los municipios de Tizimín y Río Lagartos, como se muestra en la Figura 337.

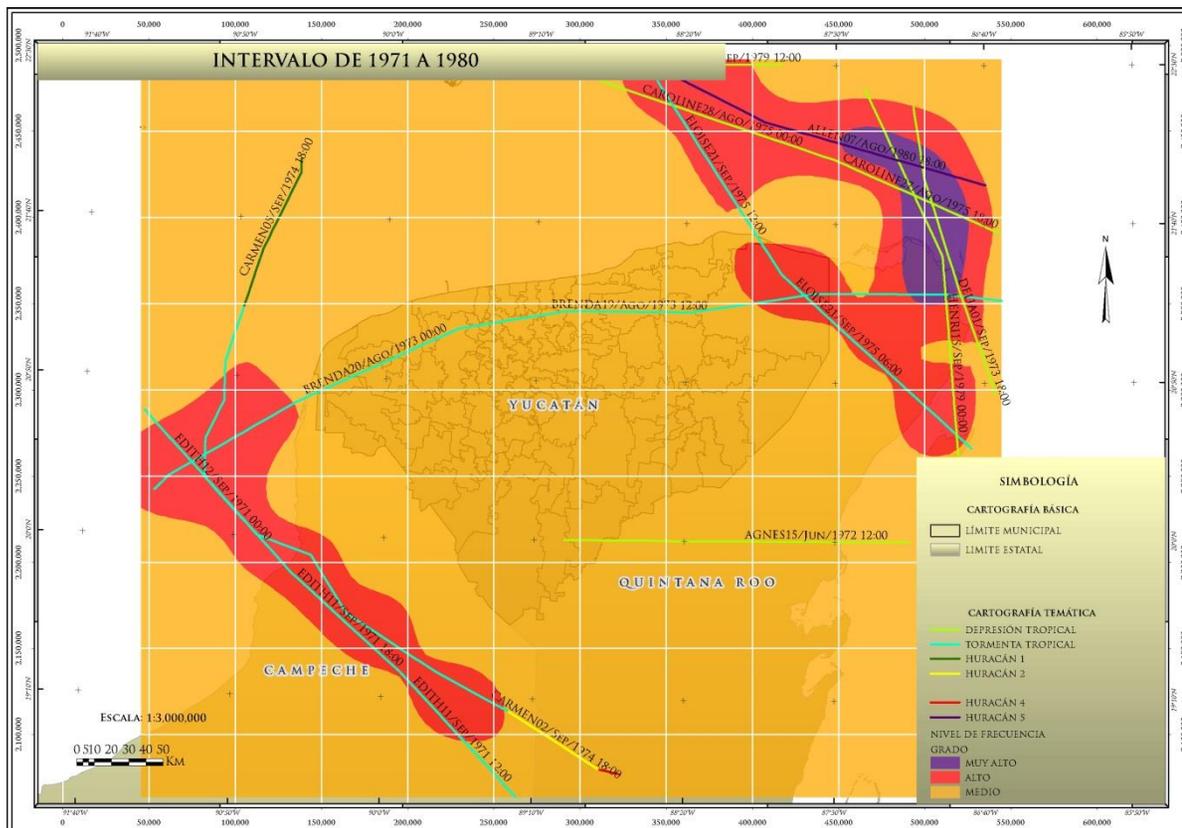


Figura 337. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales presentada en el periodo que comprende el intervalo de 1971 a 1980, en el estado de Yucatán.

En la Tabla 158 se observa el área en donde se presentó la ocurrencia de ciclones tropicales en la década que comprende el periodo de 1991 a 2000 y el grado de frecuencia en cada municipio que la conforma.

Tabla 158. Área de ocurrencia por ciclones tropicales en la década comprendida entre 1991 y 2000, por municipio y por grado de frecuencia.

NOMBRE DEL MUNICIPIO	GRADO DE FRECUENCIA	ÁREA [Km ²]
Tizimín	Media	3424.84
Yaxcabá		1474.30
Tekax	Muy alta	1387.04
Chemax	Media	1189.73
Valladolid		1068.52
Mérida	Alta	884.34
Tekax		869.77
Hunucmá	Media	836.00
Espita	Alta	714.15
Maxcanú	Media	656.64
Celestún		598.13
Peto		591.64
Sotuta	Alta	546.09
Santa Elena		514.44
Tekax	Media	513.35
Tixcacalcupul		502.21

En la década que comprende el periodo del 1991 a 2000, la superficie clasificada con una frecuencia media fue de 21,708 Km², con una alta de 13,773 Km² y con una muy alta de 4,055 Km²; esta última se presentó en la porción nororiental y surponiente del Estado, como se muestra en la Figura 338.

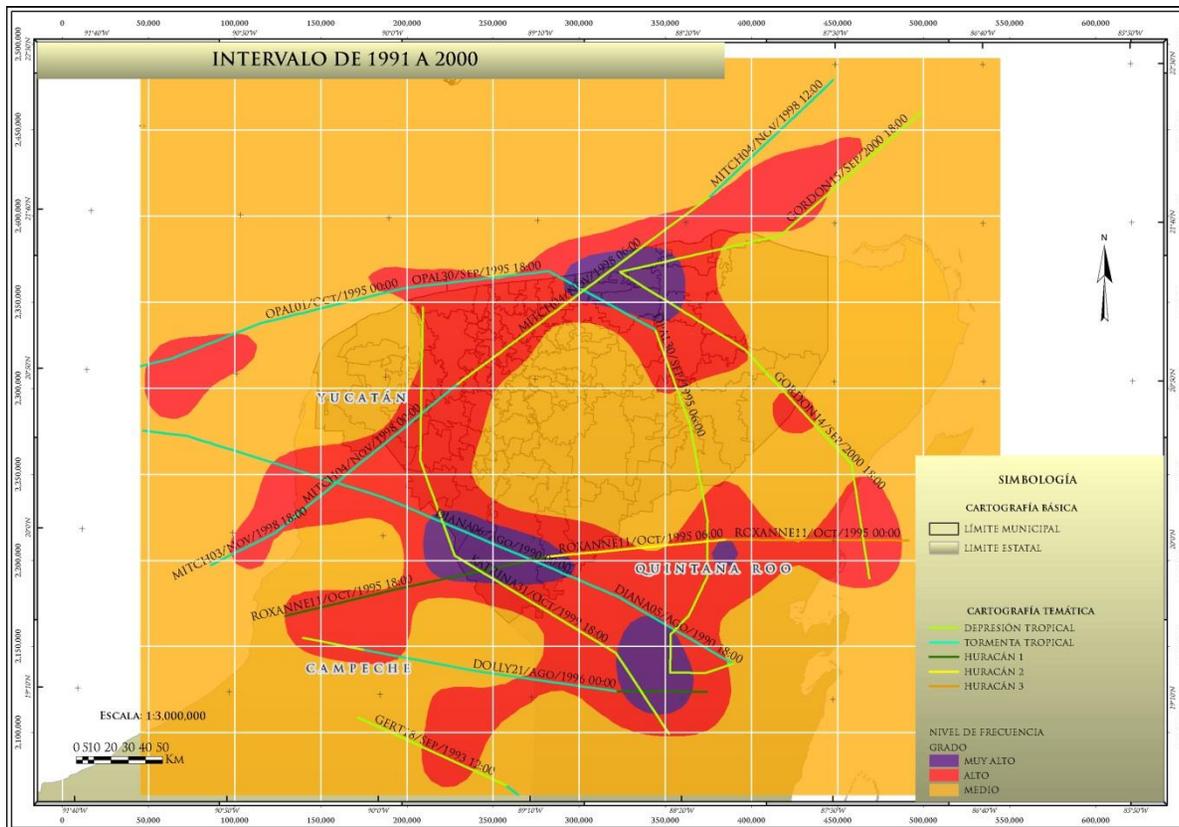


Figura 338. Mapa de frecuencia y trayectorias de ciclones tropicales presentada en el periodo que comprende el intervalo de 1991 al 2000, en el estado de Yucatán.

En la Tabla 159 se muestra el área en donde se presentó la ocurrencia de ciclones tropicales en la década que comprende del 2001 al 2010 y el grado de frecuencia en cada municipio que la conforma.

Tabla 159. Área de ocurrencia por ciclones tropicales en la década comprendida entre 2001 y 2010, por municipio y por grado de frecuencia.

NOMBRE DEL MUNICIPIO	GRADO DE FRECUENCIA	ÁREA [Km ²]
Tizimín	Alta	2043.38
	Media	1839.13
Tekax		
Chemax		1397.52
Yaxcabá	Alta	1350.40
Peto	Media	984.39
Tekax	Alta	893.11
Valladolid	Media	857.51
Mérida	Muy alta	799.70
Maxcanú	Media	754.80
Temozón		687.16
Espita	Alta	683.09

Determinación de Periodos Retorno

Como se mencionó en el apartado del método de trabajo de este nivel de información se procedió a determinar los periodos de retorno de cuatro zonas urbanas, Mérida, Tizimín, Valladolid y Oxkutzcab de acuerdo a la metodología proporcionada por el CENAPRED, utilizando para ellos los mapas de probabilidad por la presencia de ciclones tropicales y uno de eventos totales de estos fenómenos, ambos para todo el país.

A continuación se presentan los mapas resultantes de la interpolación de probabilidad de ocurrencia, de acuerdo a la clasificación Saffir-Simpson de ciclones tropicales, así como el mapa del número total de ciclones tropicales para el Estado (figuras 340 a la 347).

En las Figura 340 a la 347, el detalle del mapa para la Probabilidad de ocurrencia de las depresiones tropicales en México. Para el caso de las figura 35, estadísticamente se ilustra que es más alta la probabilidad de ocurrencia hacia el estado de Campeche con un valor de 0.60, contra un 0.40 hacia el litoral de Q. Roo. Esto se debe a que la estadística y registros que utilizó el CENAPRED sitúa con más peso la zona de muerte del fenómeno que las zonas de paso como es la Península de Yucatán. Difícilmente existiría una probabilidad para la creación en las costas de Q. Roo y Yucatán de un Ciclón Tropical.

Para los mapas de categorías 1 a la 5, se dio que la estadística se rigió por un proceso mas normalizado por el registro de incidencia y trayectoria ya que los mayores registros se dan en el Mar Caribe y menos hacia las zonas continentales de México entrando por el Golfo de México.

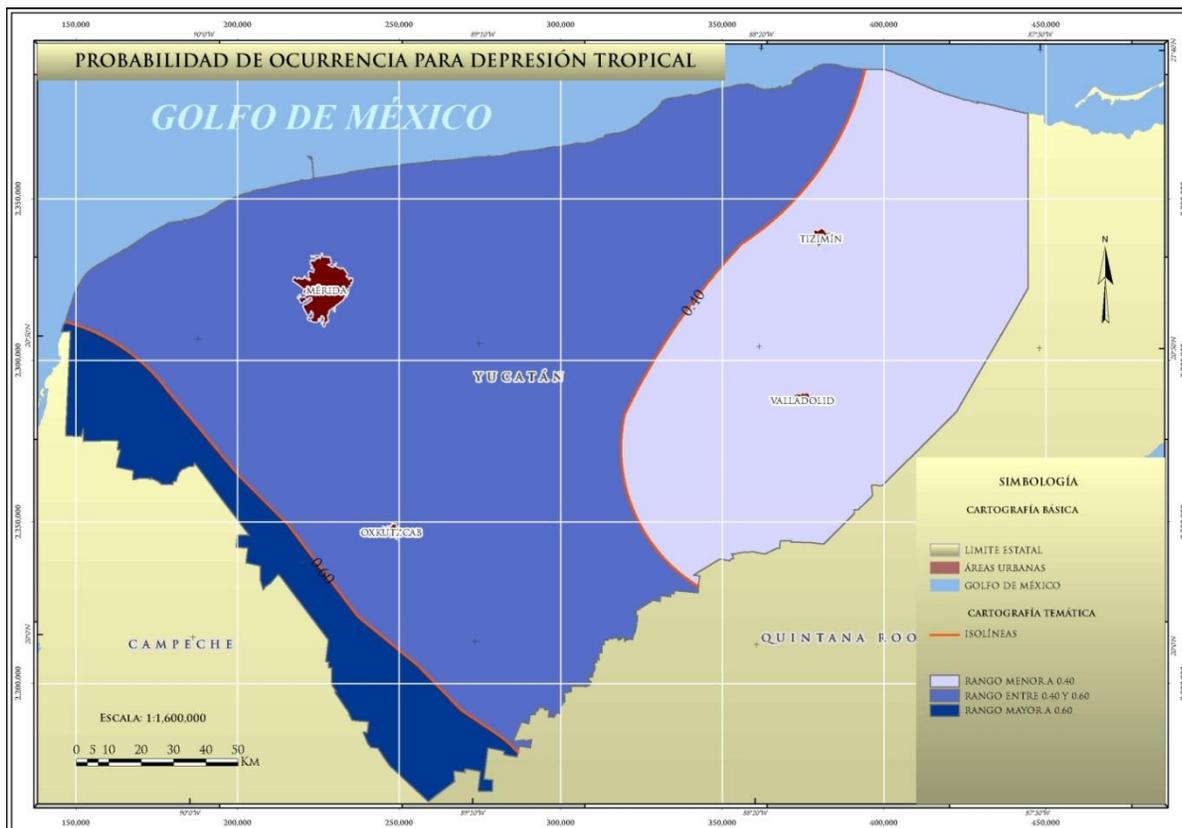


Figura 340. Mapa de probabilidad de ocurrencia para depresión tropical en el estado de Yucatán.

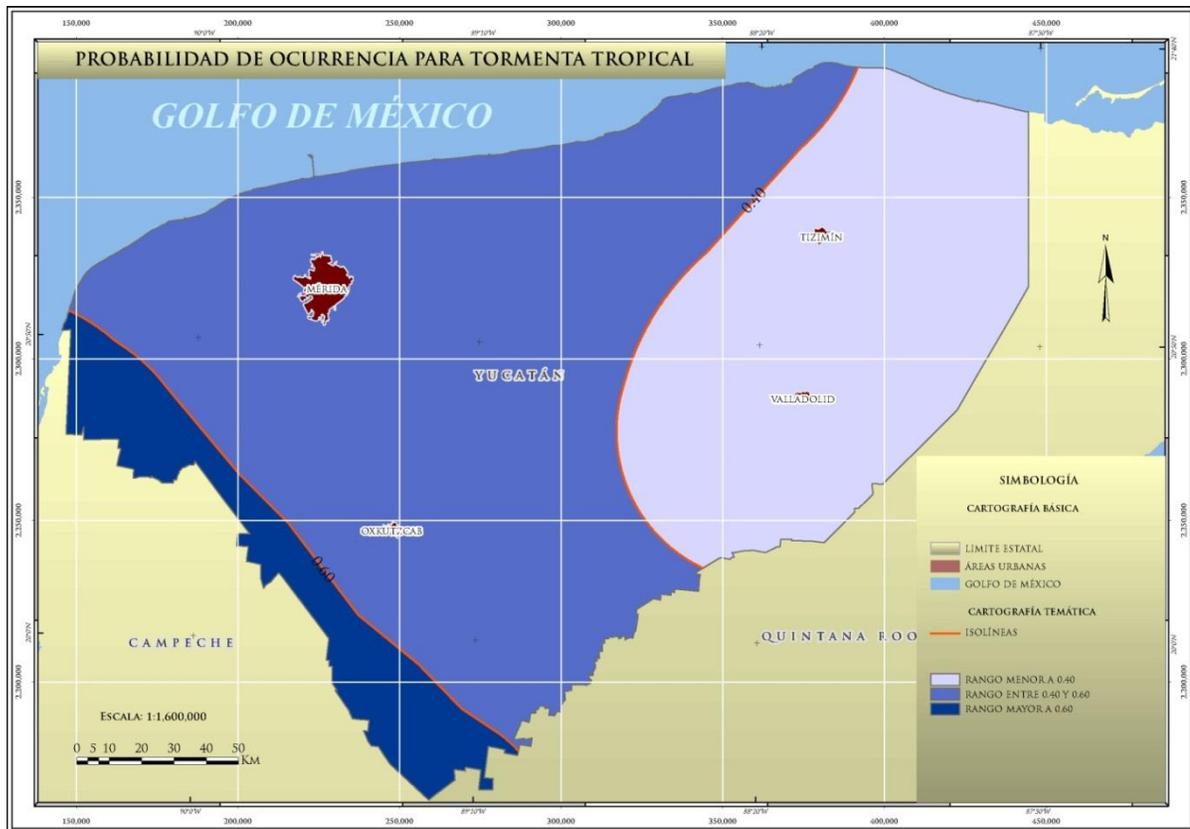


Figura 341. Mapa de probabilidad de ocurrencia para tormenta tropical en el estado de Yucatán.

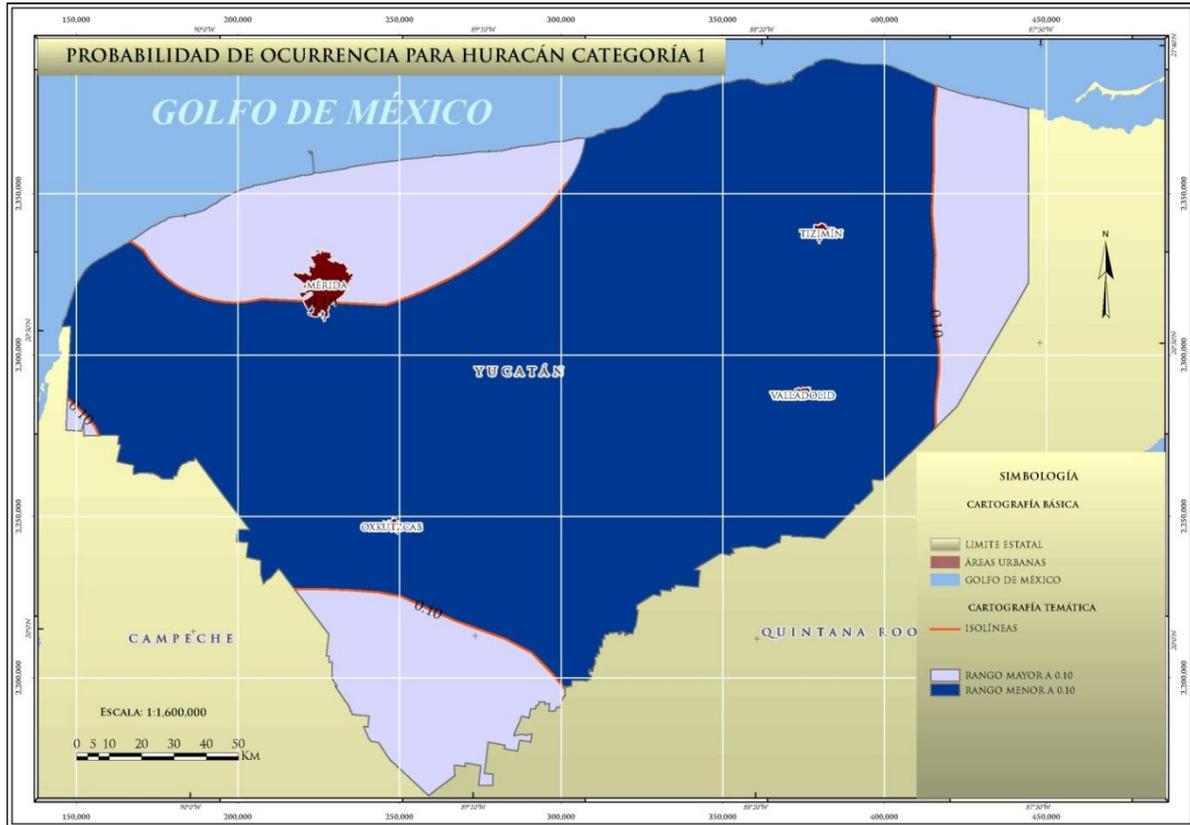


Figura 342. Mapa de probabilidad de ocurrencia para huracanes categoría 1 en el estado de Yucatán.

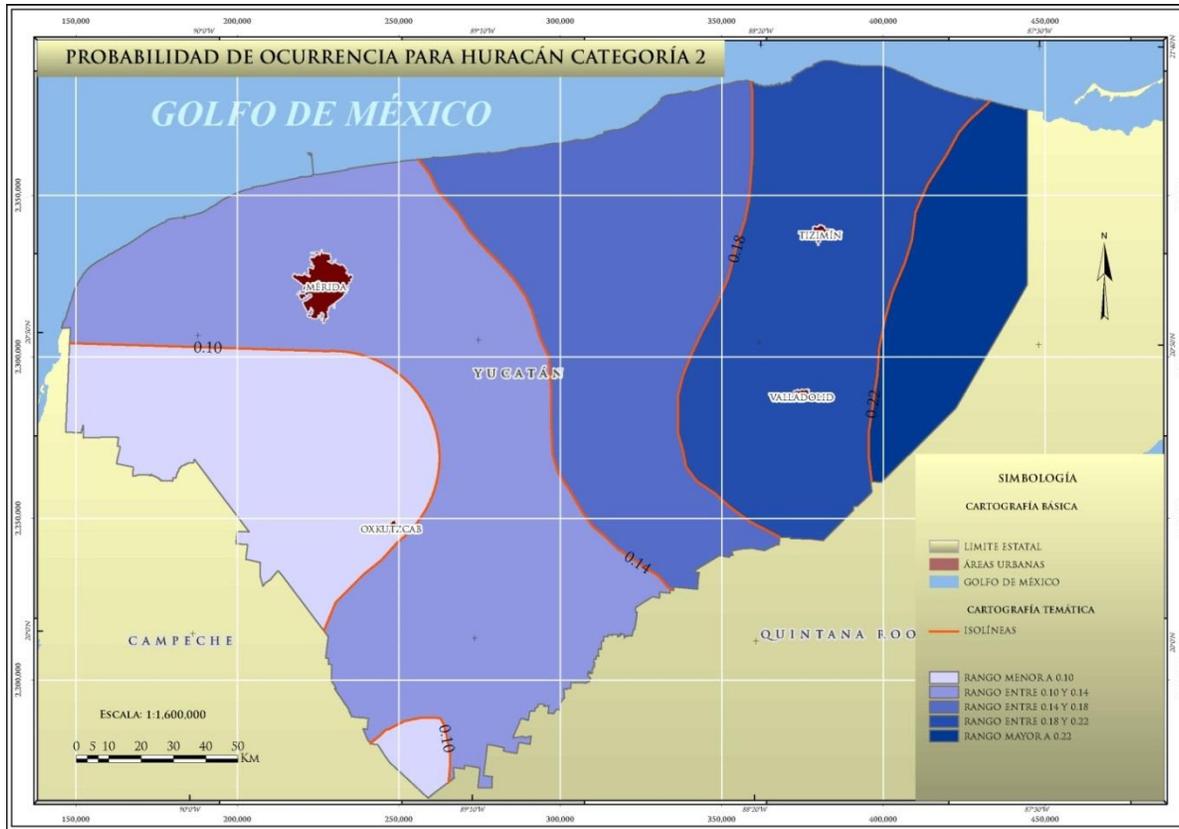


Figura 343. Mapa de probabilidad de ocurrencia de huracanes categoría 2 en el estado de Yucatán.

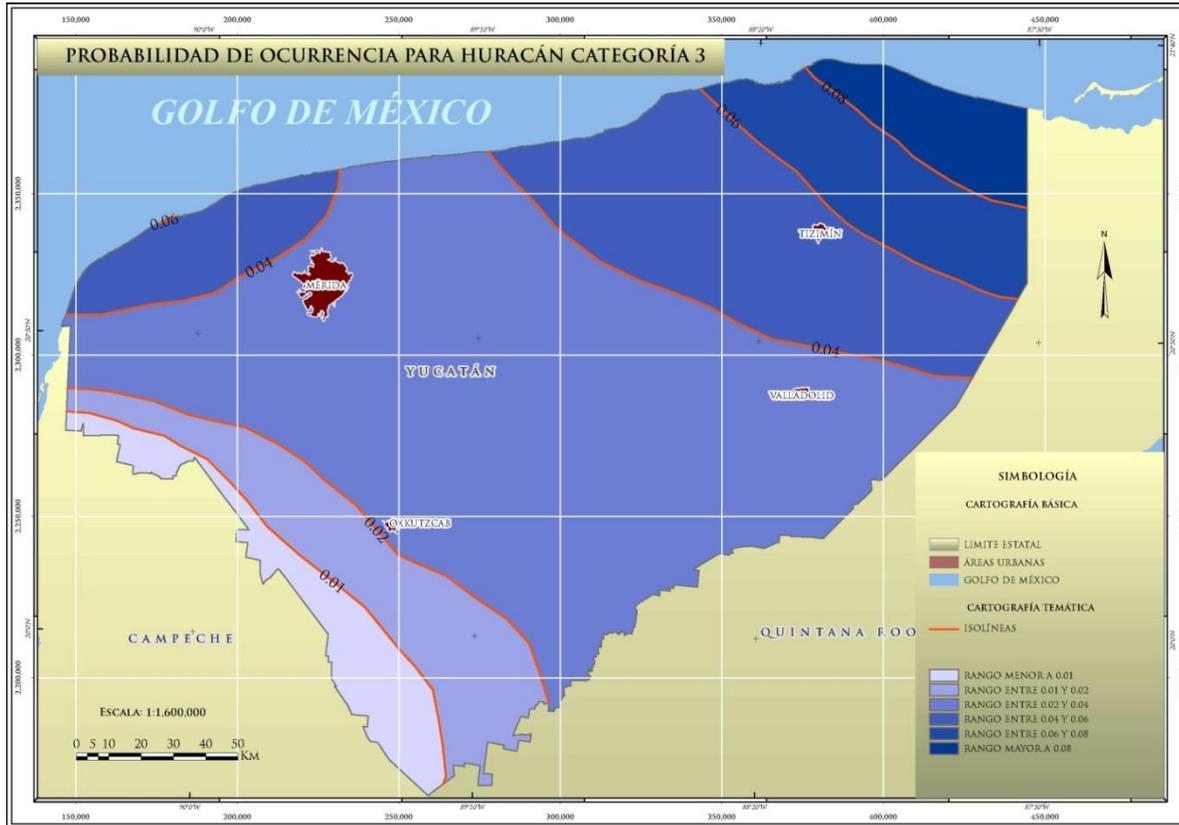


Figura 344. Mapa de probabilidad de ocurrencia para huracanes categoría 3 en el estado de Yucatán.

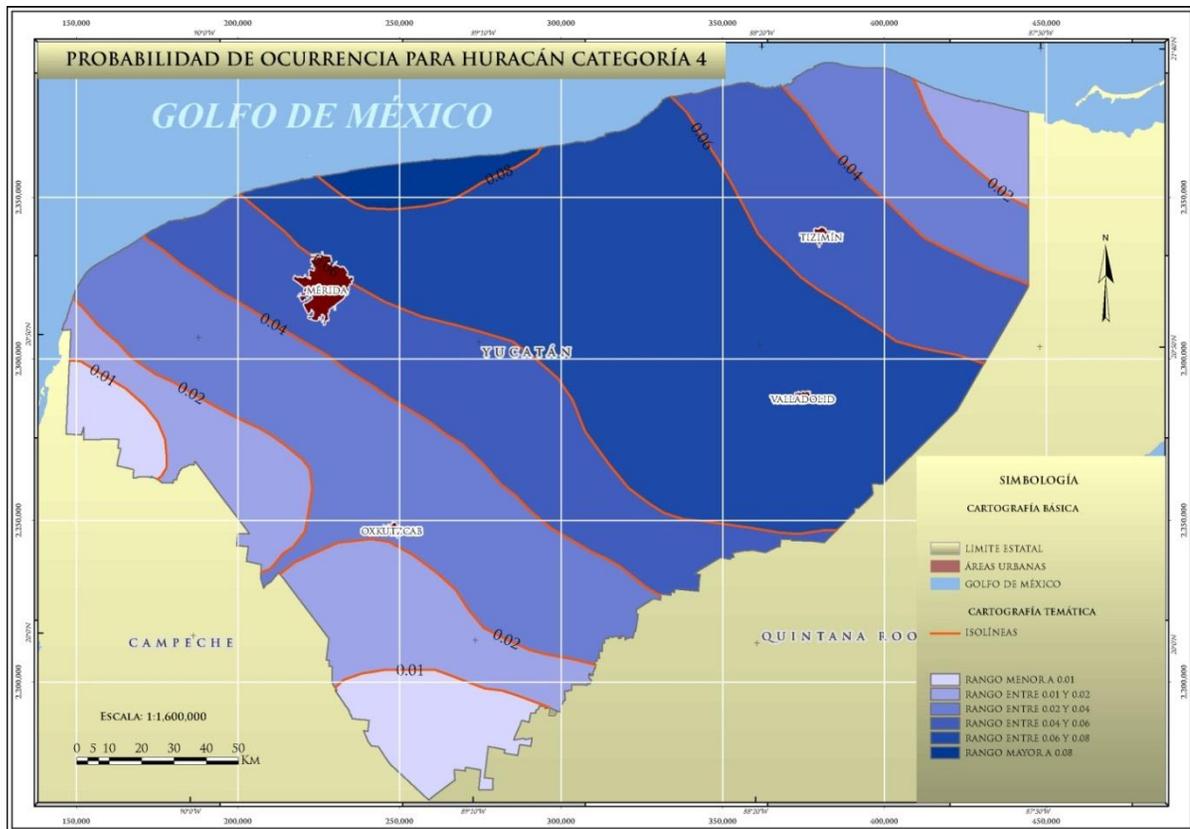


Figura 345. Mapa de probabilidad de ocurrencia para huracanes categoría 4 en el estado de Yucatán.

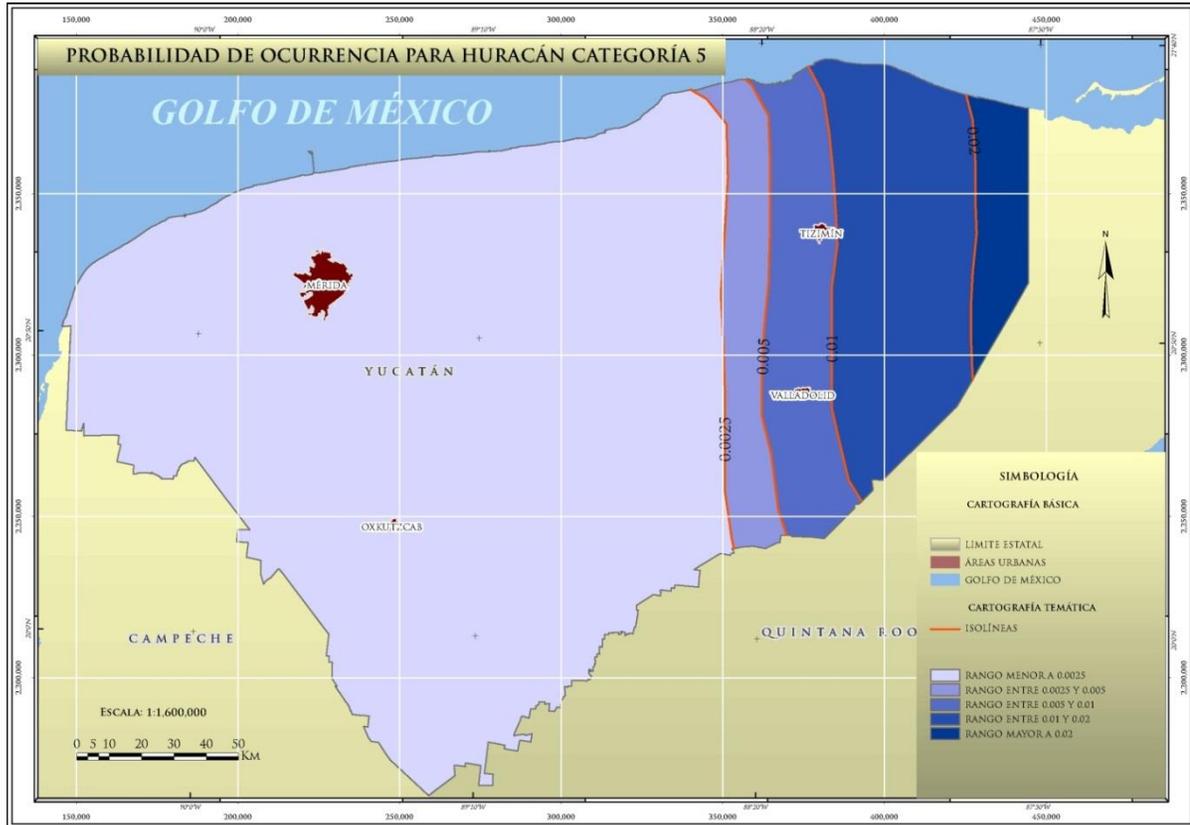


Figura 346. Mapa de probabilidad de ocurrencia para huracanes categoría 5 en el estado de Yucatán.

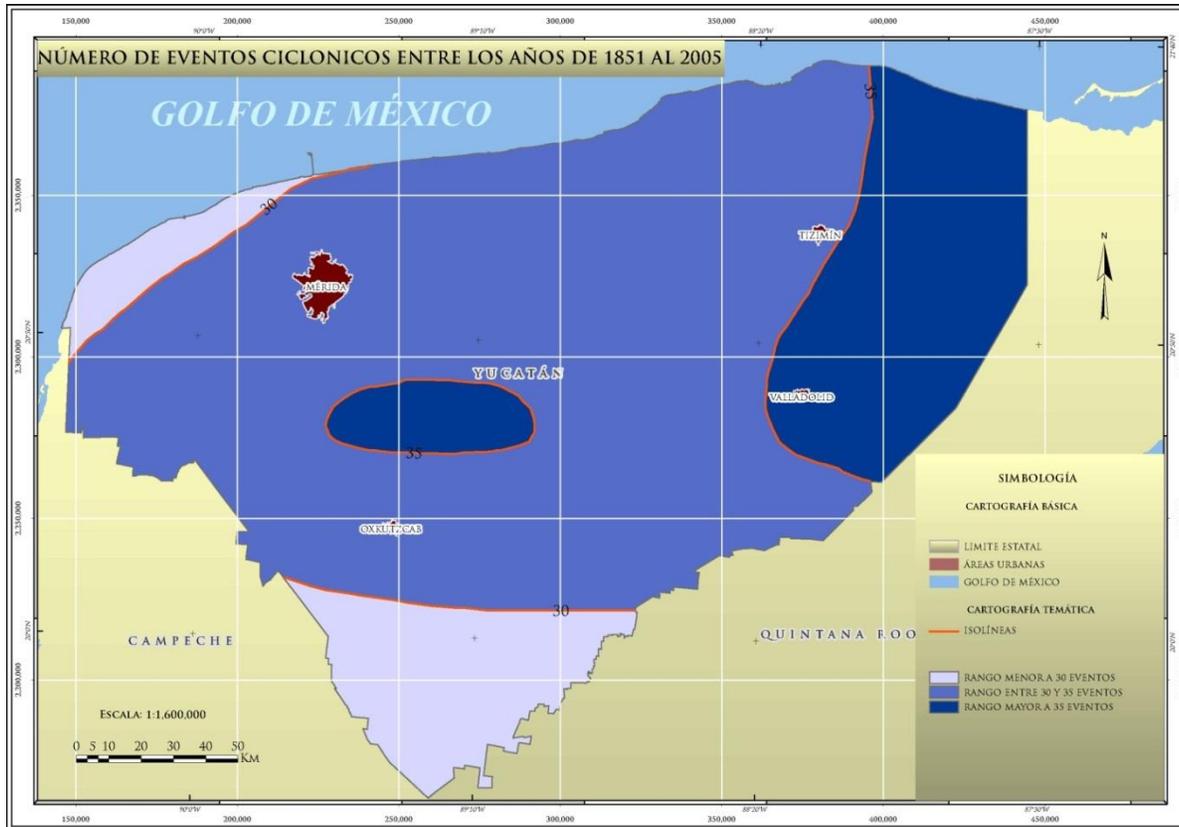


Figura 347. Mapa de número de eventos ciclónicos en el periodo que comprende los años de 1851 al 2005, en el estado de Yucatán.

De los datos obtenidos en los mapas anteriores se procedió a utilizar el programa de Excel “Cálculo T_r Ciclones 2005 V2.2”, proporcionado por el CENAPRED, con la finalidad de obtener los periodos de retorno de las ciudades Mérida, Tizimín, Valladolid y Oxkutzcab., los valores utilizados corresponde a los resultados obtenidos de las interpolaciones resultantes en cada zona urbana (tablas 160 a 163).

Tabla 160. Cálculo del periodo de retorno para ciclones tropicales en la zona urbana de Mérida

TIPO	INTENSIDAD	P(I) INTER.	P(I) AJUSTADA	P(I) ACUM.	EVENTOS POR TIPO	μ (I) TOTAL	μ (I) ANUAL	TR(I)
DT	1	0.535	0.384	0.3843	12.30	32.00	0.2065	4.84
TT	2	0.53	0.381	0.7651	12.18	19.70	0.1271	7.87
H1	3	0.125	0.090	0.4705	2.87	7.52	0.0485	20.62
H2	4	0.115	0.083	0.1724	2.64	4.64	0.0300	33.38
H3	5	0.036	0.026	0.1085	0.83	2.00	0.0129	77.50
H4	6	0.051	0.037	0.0625	1.17	1.17	0.0076	132.21
H5	7	0	0.000		0.00	-	-	-
-	8	0	0		0.00	0.00	-	-
	SUMA	1.392		-	32			
	Número Total de ciclones	32	Años del periodo	155		Grado de confianza de la estimación de probabilidad		
						BUENO		

Tabla 161. Cálculo del periodo de retorno para ciclones tropicales en la zona urbana de Tizimín.

TIPO	INTENSIDAD	P(I) INTER.	P(I) AJUSTADA	P(I) ACUM.	EVENTOS POR TIPO	μ (I) TOTAL	μ (I) ANUAL	TR(I)
DT	1	0.395	0.328	0.3279	11.47	35.00	0.2258	4.43
TT	2	0.39	0.324	0.6516	11.33	23.53	0.1518	6.59
H1	3	0.083	0.069	0.3926	2.41	12.20	0.0787	12.71
H2	4	0.22	0.183	0.2515	6.39	9.78	0.0631	15.84
H3	5	0.058	0.048	0.2307	1.68	3.39	0.0219	45.68
H4	6	0.053	0.044	0.0921	1.54	1.71	0.0110	90.74
H5	7	0.0058	0.005	0.0488	0.17	0.17	0.0011	155.00
-	8	0	0		0.00	0.00	-	-
	SUMA	1.2048		-	35			
	Número Total de ciclones	35	Años del periodo	155		Grado de confianza de la estimación de probabilidad		
						BUENO		

Tabla 162. Cálculo del periodo de retorno para ciclones tropicales en la zona urbana de Valladolid.

TIPO	INTENSIDAD	P(I) INTER.	P(I) AJUSTADA	P(I) ACUM.	EVENTOS POR TIPO	μ (I) TOTAL	μ (I) ANUAL	TR(I)
DT	1	0.4	0.340	0.3397	12.23	36.00	0.2323	4.31
TT	2	0.385	0.327	0.6667	11.77	23.77	0.1534	6.52
H1	3	0.08	0.068	0.3949	2.45	12.00	0.0774	12.92
H2	4	0.201	0.171	0.2386	6.15	9.55	0.0616	16.22
H3	5	0.038	0.032	0.2030	1.16	3.41	0.0220	45.47
H4	6	0.068	0.058	0.0900	2.08	2.25	0.0145	68.98
H5	7	0.0055	0.005	0.0624	0.17	0.17	0.0011	155.00
-	8	0	0		0.00	0.00	-	-
	SUMA	1.1775		-	36			
	Número Total de ciclones	36	Años del periodo	155		Grado de confianza de la estimación de probabilidad		
						BUENO		

Tabla 163. Cálculo del periodo de retorno para ciclones tropicales en la zona urbana de Oxtutzcab.

TIPO	INTENSIDAD	P(I) INTER.	P(I) AJUSTADA	P(I) ACUM.	EVENTOS POR TIPO	μ (I) TOTAL	μ (I) ANUAL	TR(I)
DT	1	0.575	0.414	0.4138	13.24	32.00	0.2065	4.84
TT	2	0.577	0.415	0.8291	13.29	18.76	0.1210	8.26
H1	3	0.0876	0.063	0.4783	2.02	5.47	0.0353	28.35
H2	4	0.0998	0.072	0.1349	2.30	3.45	0.0223	44.93
H3	5	0.023	0.017	0.0884	0.53	1.15	0.0074	134.60
H4	6	0.027	0.019	0.0360	0.62	0.62	0.0040	155.00
H5	7	0	0.000		0.00	-	-	-
-	8	0	0		0.00	0.00	-	-
	SUMA	1.3894		-	32			
	Número Total de ciclones	32	Años del periodo	155		Grado de confianza de la estimación de probabilidad		
						BUENO		

En la siguiente tabla se muestra una tabla resumen de los resultados de periodos de retorno obtenidos en las zonas urbanas analizadas.

Tabla 164. Resumen de los periodos de retorno para ciclones tropicales en las zonas urbanas analizadas pertenecientes al estado de Yucatán.

TIPO	INTENSIDAD	MÉRIDA	OXKUTZCAB	TIZIMÍN	VALLADOLID
DT	1	4.84	4.84	4.43	4.31
TT	2	7.87	8.26	6.59	6.52
H1	3	20.62	28.35	12.71	12.92
H2	4	33.38	44.93	15.84	16.22
H3	5	77.50	134.60	45.68	45.47
H4	6	132.21	155.00	90.74	68.98
H5	7	-	-	155.00	155.00

Como se puede observar, para los eventos de depresión y tormenta tropical los resultados son muy similares, mientras que los valores obtenidos para los eventos de huracán categoría 1 y 2 para las zonas urbanas localizadas en la porción occidente (Mérida y Oxkutzcab) difieren en promedio 10 años, mientras que en las otras dos zonas urbanas (Tizimín y Valladolid) los resultados son prácticamente iguales incluyendo los resultados para los huracanes categoría 3.

Por otra parte, los periodos de retorno de huracán categoría 4, tanto en las regiones del occidente (Mérida y Oxkutzcab) y las del oriente (Tizimín y Valladolid) la variación difiere prácticamente en 20 años, mientras que para los periodos de retorno de los huracanes categoría 5, sólo se presentan en la región oriente (Tizimín y Valladolid), esto debido a que el mapa de probabilidad indica eventos de esa categoría solamente en esa zona.

VIII.5.5. Análisis de Peligro y Riesgo por Presencia de Ciclones Tropicales

De acuerdo a la metodología de CENAPRED “Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos de los fenómenos hidrometeorológicos”, en el anexo 1 página 281 “Calculo de peligro y riesgo por presencia de ciclones tropicales”, y con base al número de trayectorias de los ciclones tropicales que pasaron dentro del área analizada, se determinó el cálculo de peligro y riesgo.

Dentro del área analizada existen diferentes trayectorias, muchas de las cuales, están conformadas por diferentes intensidades, por lo cual y para el análisis se tomó exclusivamente la ruta de mayor intensidad de cada trayecto, por ejemplo si un recorrido tiene 3 intensidades: depresión tropical, tormenta tropical, y huracán categoría 1, entonces dentro del conteo sólo se consideraba un evento como huracán categoría 1.

En la Tabla 165, se muestra la estadística de la cantidad de excedencias de velocidad de vientos ocurridos durante el periodo de 1852 al 2010 (158 años) en el estado de Yucatán clasificados por su intensidad.

Tabla 165. Conteo de eventos por categoría de acuerdo a la escala Saffir-Simpson en el área analizada del estado en el periodo que comprende de 1852 al 2010.

CATEGORÍA	NÚMERO DE EVENTOS (M _i)	INTENSIDAD (I)
Depresión tropical	20	U1
Tormenta Tropical	47	U2
Huracán Tipo 1	12	U3
Huracán Tipo 2	18	U4
Huracán Tipo 3	2	U5
Huracán Tipo 4	5	U6
Huracán Tipo 5	3	U7
Total	107	

Donde M_i es el número de eventos de intensidad i máxima alcanzada por un evento, para este caso es el viento máximo sostenido (VMS) de cada categoría.

Tasa de Excedencia

A partir de la tabla 25 se calculó la tasa de excedencia de intensidad $u(i)$, la cual registra todos los niveles de intensidad i excedidos durante un evento, es decir, si se llegó a un VMS de intensidad i (M_i), se registran los niveles de intensidad menores rebasados durante el mismo evento.

Por ejemplo, si se tiene un VMS de intensidad 7 (H5, M_i) se registra también la ocurrencia del mismo evento para las intensidades inferiores, es decir, si se tienen 47 eventos con intensidad 2, y 20 con intensidad 1 (Tabla 25), entonces conforme a la tasa de excedencia se tuvieron 67 casos de intensidad 1, y 47 de intensidad 2.

Para obtener la tasa de excedencia por medio de registros como el de la tabla 26, se usa la siguiente expresión:

$$v(i) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{N-i} (M_{N-j}) \\ 0 \text{ otro caso} \end{cases}$$

Donde N es nivel máximo de intensidad i que se puede alcanzar. Conforme a la tabla 25, se tiene que:

$$v(1) = \sum_{j=0}^6 (M_{7-j}) = M_7 + M_6 + M_5 + M_4 + M_3 + M_2 + M_1 = 3 + 5 + 2 + 18 + 12 + 47 + 20 = 107$$

$$v(2) = \sum_{j=0}^5 (M_{7-j}) = M_7 + M_6 + M_5 + M_4 + M_3 + M_2 = 3 + 5 + 2 + 18 + 12 + 47 = 87$$

$$v(3) = \sum_{j=0}^4 (M_{7-j}) = M_7 + M_6 + M_5 + M_4 + M_3 = 3 + 5 + 2 + 18 + 12 = 40$$

$$v(4) = \sum_{j=0}^3 (M_{7-j}) = M_7 + M_6 + M_5 + M_4 = 3 + 5 + 2 + 18 = 28$$

$$v(5) = \sum_{j=0}^2 (M_{7-j}) = M_7 + M_6 + M_5 = 3 + 5 + 2 = 10$$

$$v(6) = \sum_{j=0}^1 (M_{7-j}) = M_7 + M_6 = 3 + 5 = 8$$

$$v(7) = \sum_{j=0}^0 (M_{7-j}) = M_7 = 3 = 3$$

Los resultados anteriores corresponden a un periodo de 158 años; por lo que se maneja una tasa de excedencia anual, y se procede a dividir entre 158 los resultados se muestran en la Tabla 166. La tasa de disponibilidad queda de la siguiente manera:

Tabla 166. Resultados de la tasa de excedencia.

CATEGORÍA	INTENSIDAD	NIVEL MÁXIMO DE INTENSIDAD	DURACIÓN EN AÑOS	TASA DE EXCEDENCIA (UI)
Depresión tropical	U1	107	158	0.677
Tormenta Tropical	U2	87	158	0.551
Huracán Tipo 1	U3	40	158	0.253
Huracán Tipo 2	U4	28	158	0.177
Huracán Tipo 3	U5	10	158	0.063
Huracán Tipo 4	U6	8	158	0.051
Huracán Tipo 5	U7	3	158	0.019
	U8	0	158	0.000

En la tabla anterior se incluyó una intensidad adicional $i = 8$ con el fin de utilizar correctamente la definición de función de peligro.

Como se puede observar en la Figura 348 $U(i)$ es decreciente con la intensidad.

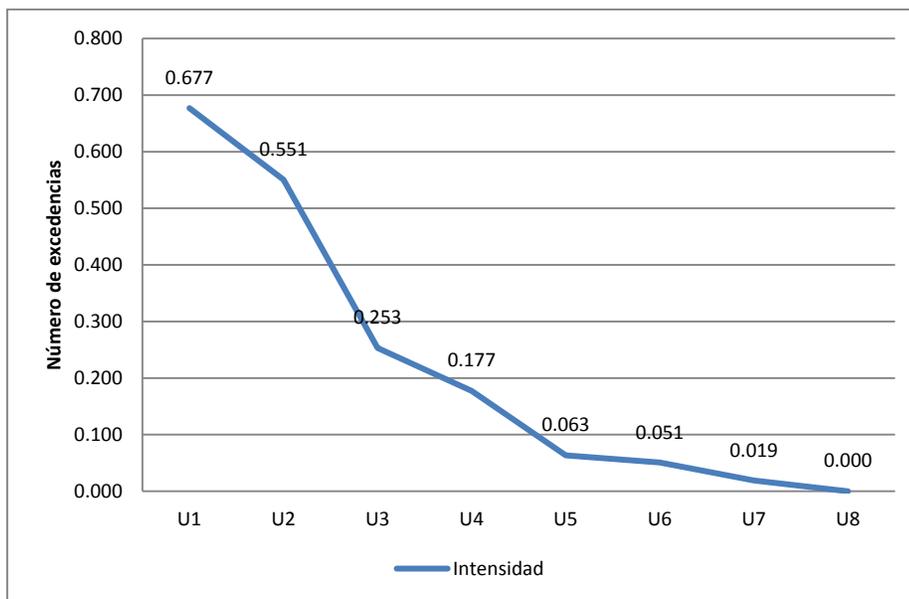


Figura 348. Tasa de excedencia de los ciclones en el área delimitada.

Ahora se procederá a calcular el peligro y los periodos de retorno por intensidad

Calculo de Peligro

La densidad de probabilidades de las intensidad, $p(i)$, puede obtenerse derivando $u(i)$ de derecha a izquierda y normalizando posteriormente:

$$p(i) = -k \frac{du(i)}{di}$$

Donde la constante k es tal que $p(i)$ integra 1. Nótese que $du(i)/di$ es proporcional al número de eventos con intensidad igual a i o, más rigurosamente, con intensidad entre i e $i+di$.

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(i) di = -k \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dv(i)}{di} di$$

$$1 = -k \int_1^{v(8)} \frac{dv(i)}{di} di$$

$$1 = -k[v(i)]_1^8$$

$$1 = -k[v(8) - v(1)]$$

$$1 = -k[0 - 0.677]$$

$$k = -1 / -0.677$$

$$k = 1.477$$

La función de peligro queda de la siguiente forma:

$$p(i) = -\frac{1}{0.677} \frac{dv(i)}{di}$$

La probabilidad de que se presente un evento que exceda la intensidad i , sin que avance al siguiente nivel está dado por:

$$P(i) = -\frac{1}{0.677} \int_i^{i+1} \frac{dv(i)}{di} di$$

En base a la Tabla 167 se tiene que el peligro queda de la siguiente manera:

Tabla 167. Resultados de excedencia de intensidad.

CATEGORÍA	PROBABILIDAD QUE EXCEDA LA INTENSIDAD i $P(i) = K \cdot U_n \cdot U_{n-1}$
Depresión tropical	0.186915888
Tormenta Tropical	0.439252336
Huracán Tipo 1	0.112149533
Huracán Tipo 2	0.168224299
Huracán Tipo 3	0.018691589
Huracán Tipo 4	0.046728972
Huracán Tipo 5	0.028037383
	Suma=1

El periodo de retorno se define como el promedio de tiempo en que vuelve a ocurrir la excedencia de cierta intensidad i . Se obtiene este promedio a través del cálculo del recíproco de la tasa de excedencia, entonces:

De la tabla 168 se tiene que:

Tabla 168. Resultados de periodos de retorno en base a la categoría del ciclón.

CATEGORÍA	PERIODO DE RETORNO [AÑOS] $T_r (i)=1/U_i$
Depresión tropical	1.5
Tormenta Tropical	1.8
Huracán Tipo 1	4.0
Huracán Tipo 2	5.6
Huracán Tipo 3	15.8
Huracán Tipo 4	19.8
Huracán Tipo 5	52.7

Desde el punto de vista de pérdida, el riesgo es la combinación de tres factores importantes: el costo o valor de los bienes expuestos a un evento, por su nivel de vulnerabilidad o daño ante el evento en acción, por la probabilidad de que el evento ocurra. De lo anterior, es posible expresar al riesgo como:

$$R = C P V$$

Donde **C** = Valor de los bienes expuestos, **P** = Peligro, y **V** = Vulnerabilidad

Con la expresión se obtiene el riesgo ante la ocurrencia de un evento con cierta intensidad, sin embargo, para medir el riesgo será preferente tomar el promedio de daños esperados cuando ocurra un evento, es decir, obtener el riesgo ante el próximo evento.

El valor de los bienes expuestos y la vulnerabilidad

Se entiende por valor de los bienes expuestos (C de la ecuación anterior) a la cuantía de lo que es susceptible de afectarse durante la ocurrencia de un fenómeno perturbador. En muchos casos C tiene unidades monetarias, sin embargo, habrá ocasiones en que se necesite expresar C de otra forma, por ejemplo si lo susceptible de afectarse son vidas humanas, sus unidades serán el número de vidas.

La vulnerabilidad es una medida de qué tan susceptible es un bien expuesto a la ocurrencia de un fenómeno perturbador. De dos bienes expuestos uno es más sensible sí, ante la ocurrencia de fenómenos perturbadores con la misma intensidad, sufre mayores daños. La vulnerabilidad suele expresarse como un número entre 0 y 1, donde 0 implica que el daño sufrido ante un evento de cierta intensidad es nulo, y 1 implica que este daño es igual al valor del bien expuesto. La fragilidad puede representarse con una función matemática o en forma de una tabla llamada matriz de vulnerabilidad.

Cálculo del riesgo

De acuerdo a la guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos por fenómenos hidrometeorológicos (CENAPRED 2006) en el capítulo 1.3 Criterios de evaluación de la vulnerabilidad física está publicado las gráficas (p.62) que ayudaron a determinar la matriz de vulnerabilidad en el Estado de acuerdo al tipo de vivienda basándose en el menaje de las mismas.

Cabe destacar que estas gráficas están generadas de acuerdo al tirante ocasionado por la marea de tormenta, sin embargo, se parte de la hipótesis de que a mayor intensidad de ciclón tropical mayor altura de marea de tormenta. Esto también puede aplicar a daños por viento y a oleaje, pero no a precipitación.

De lo anterior se determino los valores de vulnerabilidad $V(i)$, con los cuales el riesgo se podrá calcular como se describe a continuación (Tabla 169).

Tabla 169. Matriz de Vulnerabilidad (i) por tipo de vivienda.

INTENSIDAD i	VIVIENDA TIPO 1	VIVIENDA TIPO 2	VIVIENDA TIPO 3	VIVIENDA TIPO 4	VIVIENDA TIPO 5
1 (DT)	0.08	0.04	0.03	0.02	0.01
2 (TT)	0.18	0.1	0.08	0.07	0.07
3 (H1)	0.75	0.74	0.71	0.56	0.56
4 (H2)	0.92	0.9	0.8	0.59	0.59
5 (H3)	0.94	0.94	0.94	0.65	0.65
6 (H4)	0.96	0.95	0.95	0.66	0.66
7 (H5)	1	1	1	0.67	0.67

El riesgo ante el próximo evento

El riesgo ante el próximo evento es la suma de los asociados a los diferentes niveles de intensidad. De la ecuación: $R=CPV$ se suman los riesgos para cada intensidad, de acuerdo a cada tipo de vivienda, y se llega a:

$$R_p = C \sum_{i=1}^n P(i)V(i)$$

Sí $C=\$1.00$, se tiene que (Tabla 170)

Tabla 170. Riesgo ante el próximo evento.

INTENSIDAD i	P (i)	VULNERABILIDAD [V(i)] POR TIPO DE VIVIENDA					RIESGO (Rp) POR TIPO DE VIVIENDA				
		VIVIENDA TIPO 1	VIVIENDA TIPO 2	VIVIENDA TIPO 3	VIVIENDA TIPO 4	VIVIENDA TIPO 5	VIVIENDA TIPO 1	VIVIENDA TIPO 2	VIVIENDA TIPO 3	VIVIENDA TIPO 4	VIVIENDA TIPO 5
1 (DT)	0.186915888	0.08	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01495	0.00748	0.00561	0.00374	0.00187
2 (TT)	0.439252336	0.18	0.1	0.08	0.07	0.07	0.07907	0.04393	0.03514	0.03075	0.03075
3 (H1)	0.112149533	0.75	0.74	0.71	0.56	0.56	0.08411	0.08299	0.07963	0.06280	0.06280
4 (H2)	0.168224299	0.92	0.9	0.8	0.59	0.59	0.15477	0.15140	0.13458	0.09925	0.09925
5 (H3)	0.018691589	0.94	0.94	0.94	0.65	0.65	0.01757	0.01757	0.01757	0.01215	0.01215
6 (H4)	0.046728972	0.96	0.95	0.95	0.66	0.66	0.04486	0.04439	0.04439	0.03084	0.03084
7 (H5)	0.028037383	1	1	1	0.67	0.67	0.02804	0.02804	0.02804	0.01879	0.01879
	SUM=1						0.42336	0.37579	0.34495	0.25832	0.25645

Los resultados anteriores significan que para un evento cualquiera, el valor del riesgo para las viviendas tipo 3 en el Estado será de $\$0.34495$ por cada unidad monetaria de los bienes expuestos ante el fenómeno analizado. Por ejemplo, sí el valor total de la edificación vale 500 mil pesos, el riesgo ante un evento cualquiera será de $RP= 500,000 \times 0.34495= \$172,475$.

El riesgo anual

Ahora bien, si se desea obtener el riesgo anual, se deberá multiplicar la ecuación de riesgo por el valor esperado de huracanes que ocurren al año por tipo de vivienda (Tabla 171).

$$Ra = U1(Rp) = U1 \left[C \sum_{i=1}^n P(i)V(i) \right]$$

Tabla 171. Riesgo anual

TIPO DE VIVIENDA	U1	RIESGO (Rp)	RIESGO ANUAL (Ra)
Vivienda Tipo 1	0.677	0.42336	0.28662
Vivienda Tipo 2		0.37579	0.25441
Vivienda Tipo 3		0.34495	0.23353
Vivienda Tipo 4		0.25832	0.17488
Vivienda Tipo 5		0.25645	0.17362

Suponiendo que se tiene una vivienda del tipo 2 con valor de \$500,000 en la zona geográfica analizada anteriormente, entonces la pérdida promedio por la ocurrencia de un ciclón tropical es $0.25441 * 500,000 = \$127,205$.

Análisis Poblacional y de Vivienda

De acuerdo al análisis realizado y por las condiciones geográficas en las que se encuentra el estado de Yucatán, se presenta el número de viviendas y habitantes que posiblemente se encuentren afectados al presentarse un ciclón tropical, esto de acuerdo a la tipología de vivienda y recuento poblacional INEGI, 2010; sin embargo, esto dependerá de las características del ciclón tropical, así como de la trayectoria que cruce en el Estado, cabe destacar que en la zona costera es donde mayores consecuencias pueden existir, esto debido a la coexistencia de varios fenómenos derivados de los ciclones tropicales, como fuertes vientos, elevación de marea, inundaciones e impacto de fuerte oleaje, en cambio, en la zona continental, no menos importante, los fuertes vientos y las inundaciones afectarían a la población e infraestructura del Estado.

Las siguientes tablas (172 a 176) muestran los municipios con mayor población de acuerdo a la tipología de vivienda en el Estado. La tabla completa se localiza en el apartado de anexos del presente trabajo.

Tabla 172. Posibles municipios, número de viviendas tipo I y habitantes afectados en caso de presentarse un ciclón tropical.

TIPOLOGÍA DE VIVIENDA I		
MUNICIPIO	NÚMERO DE HABITANTES	NÚMERO DE VIVIENDAS
Progreso	4,702	5,463
Telchac Puerto	1,783	1,726
Tizimín	692	1,458
Chemax	553	2,263
Valladolid	460	1,630
Sinanché	432	563
Tekax	338	808
Yobaín	335	317
Dzemul	320	123
Dzidzantún	258	71

Tabla 173. Posibles, municipios, número de viviendas tipo II y habitantes afectados en caso de presentarse un ciclón tropical.

TIPOLOGÍA DE VIVIENDA II		
MUNICIPIO	NÚMERO DE HABITANTES	NÚMERO DE VIVIENDAS
Valladolid	22,611	72,381
Tizimín	21,565	70,032
Progreso	19,386	47,721
Hunucmá	9,122	30,477
Mérida	8,175	28,469
Chemax	7,632	31,227
Peto	7,013	23,826
Halachó	5,598	18,572
Espita	4,113	15,168
Temozón	3,976	14,579

Tabla 174. Posibles municipios, número de viviendas tipo III y habitantes afectados en caso de presentarse un ciclón tropical.

TIPOLOGÍA DE VIVIENDA III		
MUNICIPIO	NÚMERO DE HABITANTES	NÚMERO DE VIVIENDAS
Mérida	278,943	800,858
Kanasín	28,649	77,964
Umán	12,577	43,237
Ticul	10,358	37,543
Motul	7,878	24,252
Tekax	7,597	27,076
Oxkutzcab	7,099	23,235
Izamal	5,282	16,195
Tixkokob	4,432	15,270
Acanceh	3,641	13,633

Tabla 175. Posibles municipios número de viviendas tipo IV y habitantes afectados en caso de presentarse un ciclón tropical.

TIPOLOGÍA DE VIVIENDA IV		
MUNICIPIO	NÚMERO DE HABITANTES	NÚMERO DE VIVIENDAS
Mérida	388	1,007
Motul	4	11
Valladolid	3	14

Tabla 176. Posible número de viviendas tipo V y habitantes afectados en caso de presentarse un ciclón tropical.

TIPOLOGÍA DE VIVIENDA V		
MUNICIPIO	NÚMERO DE HABITANTES	NÚMERO DE VIVIENDAS
Mérida	11	40

VIII.6. Marea de Tormenta.

La marea de tormenta es a escala mundial, la principal causa de pérdidas de vidas humanas asociadas a los huracanes; Los daños por la marea de tormenta que se presentan cerca de la línea de costa se deben principalmente a la inundación y al impacto del oleaje. Ellos pueden reducirse, si se predice la marea de tormenta que causaría un ciclón de acuerdo con su trayectoria de desplazamiento y si se toman las medidas de protección pertinente; en México, venturosamente no tiene la importancia que adquiere en otros países como Estados Unidos de Norteamérica (CENAPRED/SEGOB, 2013), (Tabla 177).

Tabla 177. Rangos de tirante de la marea de tormenta de acuerdo a categoría de ciclón.

CATEGORÍA DEL CICLÓN	VIENTOS SOSTENIDOS (KM/H)	PRESIÓN ATMOSFÉRICA EN EL OJO (MILIBARES)	TIRANTE DE LA MAREA DE TORMENTA (M)	NIVEL DE DAÑO
1	119- 153	980	1,2- 1,5	Bajo
2	154- 177	965 - 979	1,8-2,4	Moderado
3	179 - 209	945 - 964	2,7 - 3,7	Extenso
4	211 - 249	920 - 944	4,0 - 5,5	Extremo
5	< 249	< 920	> 5,5	Catastrófico

Adaptado de Oliver, J. y Fairbridge, R., 1987.

La población de las costas del mundo y el valor de las propiedades costeras han crecido a un ritmo mucho mayor que la población mundial y el valor de las propiedades en conjunto; por lo tanto es inevitable que aumenten con el tiempo los efectos de este fenómeno sobre la humanidad.

En México, este fenómeno se presenta con mayor frecuencia en las costas de Pacífico, esto debido a las trayectorias que toman los eventos ciclónicos, como por ejemplo el ocurrido en el periodo comprendido entre el 21 y 27 de octubre del 2002 con el huracán Kenna, el día jueves 24 se convirtió en huracán categoría 5, localizándose a 355 Km al suroeste de Cabo Corrientes, Jalisco, moviéndose con una velocidad de 18 Km/h al no-noreste con vientos máximos de 260 Km/h y rachas de 315 Km/h, afectando también a localidades como Compostela, Puerto Vallarta y San Blas en Nayarit. En Puerto Vallarta la marea de tormenta que se generó fue del orden de 3.5 m.

En la Península de Yucatán, el estado que sufre mayor afectación por este fenómeno es Quintana Roo, en 1988 la marea de tormenta y oleaje del huracán Gilberto ocasionaron la erosión de las playas de Cancún; en épocas recientes en el estado de Yucatán, los eventos que tuvieron relevancia en relación a marea de tormenta han sido los huracanes Emily y Wilma, ambos en el año 2005. El oleaje generado por Emily se debió principalmente a los vientos, la altura de las olas alcanzó un promedio de 1.5 m. En tanto que, la marea de tormenta registrada en Progreso fue de medio metro. El oleaje generado por los vientos del huracán "Wilma" tuvo una altura del orden de los 1.5 m. En tanto que, la marea de tormenta registrada en la costa de río Lagartos fue aproximadamente de un metro de altura; afortunadamente, por su magnitud no provocaron daños de consideración (CENAPRED, Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2005, 2006).

VIII.6.1. Conceptos Básicos

La marea de tormenta es el ascenso del nivel medio del mar debido a la acción de los vientos de los ciclones tropicales sobre una región del océano. Este levantamiento tiene la apariencia de un domo de agua, agregado a la superficie habitual del mar. Esta marea dura de 12 h a 3 días, puede causar inundaciones en las zonas bajas del continente, colindantes a la costa, y oleaje que impacte sobre las estructuras y construcciones cercanas al mar, así como la remoción de la arena de las playas por las corrientes de agua que inducen las olas. Cuando al ascenso del nivel del mar (pleamar), correspondiente a la marea ordinaria (astronómica) se combina con la marea de tormenta, provoca una sobreelevación más alta (CENAPRED / SEGOB, 2006) Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (Fenómenos Hidrometeorológicos).

Los aspectos destructivos de los ciclones tropicales, que marcan su intensidad, se deben principalmente a cuatro aspectos: viento, oleaje, marea de tormenta y lluvia; en el caso de la marea de

tormenta es el efecto menos conocido entre la población y aun a nivel técnico en nuestro país, es la marea de tormenta o sobreelevación del nivel medio del mar (puede ser de más de 1 metro) cuando un ciclón tropical se acerca a la costa. La marea se agrega al oleaje que físicamente se está produciendo en el momento que se aproxima el huracán y por esta razón no es tan obvio percatarse de la existencia de dicha sobreelevación por lo que simplemente se reportan olas que tienen mayores alcances tierra adentro. El principal efecto de la marea de tormenta es la inundación de las zonas costeras con agua de mar que, dependiendo de la topografía, puede llegar a cubrir franjas de varios kilómetros.

La superficie del mar no varía sólo por el oleaje sino también por otros fenómenos que alteran su nivel medio; el más regular es el de las mareas astronómicas que se deben a las fuerzas de atracción entre la Tierra y la Luna o la Tierra y el Sol. Otras se deben a fenómenos extraordinarios como los ciclones tropicales ocasionando la marea de tormenta y otras tormentas marinas, en la parte de la costa en la que los vientos soplan desde el mar hacia la Tierra en forma casi perpendicular.

La elevación del nivel del mar produce una invasión de las aguas marinas sobre la costa, la cual se desarrolla en tiempos relativamente breves, de pocas horas. El tamaño de la elevación depende de la intensidad de los vientos, pero también del perfil del fondo submarino en las inmediaciones de la costa (batimetría de la plataforma continental) y del ángulo de incidencia de la tormenta sobre la costa. Otro estimado es que por cada 100 milibares (mb) que baje en la presión barométrica, se espera una elevación de un 1 m del nivel del mar.

VIII.6.2. Antecedentes

El mapa que publicó el CENAPRED, 2006, presenta áreas afectadas por el fenómeno de marea de tormenta en la península de Yucatán, (figura 349).

Comisión Nacional del Agua en el 2010, edito un plano de zonas vulnerables de inundación en el cual se destacando las zonas de inundación de la península de Yucatán determinadas por precipitaciones, por desbordamiento de ríos y por marea de tormenta (figura 350).

Sin embargo, para ambos casos se desconoce el método de trabajo o parámetros utilizados para la generación de estos mapas.

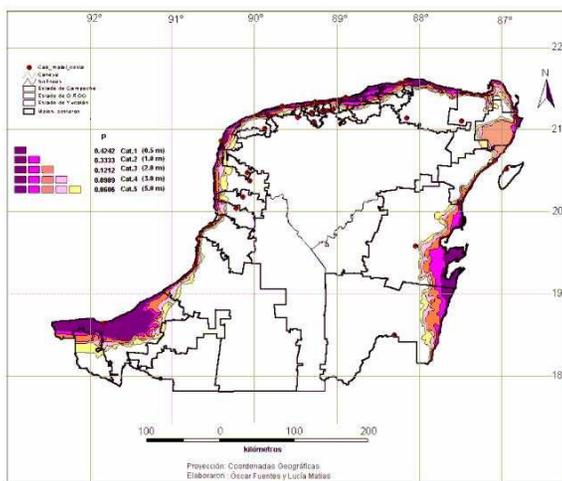


Figura 349. Zonificación de marea de tormenta del estado de Yucatán realizado por el CENAPRED, 2006.

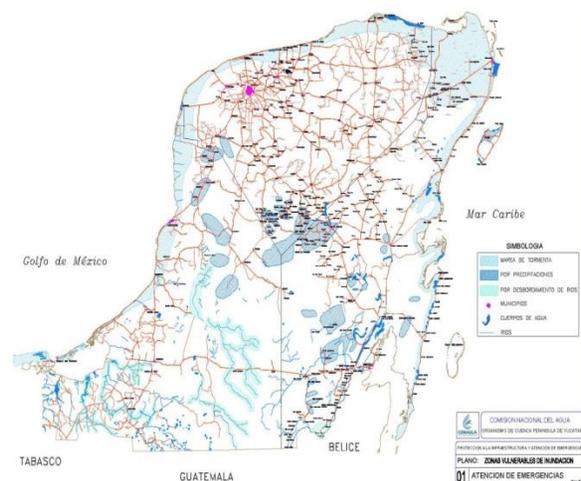


Figura 350. Zonificación de zonas vulnerables de inundación de la península de Yucatán realizado por CONAGUA, 2010.

VIII.6.3. Método de Trabajo

De acuerdo a la Guía básica Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, fenómenos hidrometeorológicos de la serie Atlas Nacional de Riesgos, editada por CENAPRED en el 2006, se presenta una metodología con el objetivo de determinar un mapa de peligro por marea de tormenta para lo cual se consideraron los siguientes procesos:

- Preparación de los planos de trabajo
- Datos y cálculos auxiliares
- Determinación de la altura de marea de tormenta y las áreas de inundación
- Asignación de probabilidades a cada área inundada

Sin embargo, para la obtención de probabilidades en cada área inundada es necesario contar con topografía a detalle, al no contar con esta información, en el presente informe sólo se determinará la altura de marea de tormenta para las zonas urbanas localizadas en la costa del estado de Yucatán, en la figura 3 se muestra el método de trabajo utilizado en este apartado.

Para el presente estudio y de acuerdo al a zona de peligro resultante se determinó realizar el análisis puntual, con el objetivo de determinar la posible altura de marea que se alcanzaría, las zonas urbanas son: Río Lagartos, Dzilam de Bravo, Telchac Puerto, Chuburná, Chelem, Progreso, Chicxulub, Chelem, Chuburná, Celestún; y dos localidades: Sisal y El Cuyo. Para determinar la altura de marea de tormenta se utilizó el programa de Excel proporcionado por el CENAPRED, en el que se alimentan los siguientes parámetros: presión barométrica de los ciclones tropicales de acuerdo a la categoría, la latitud de las zonas urbanas a analizar, ángulo α que se forma entre el rumbo de desplazamiento de los ciclones tropicales y la línea de costa, velocidad de desplazamiento de los ciclones tropicales que ayuda a determinar la velocidad de los vientos sostenidos, el radio máximo de viento y un factor de corrección, el cual se explicará posteriormente con mayor detalle la forma de obtenerlo.

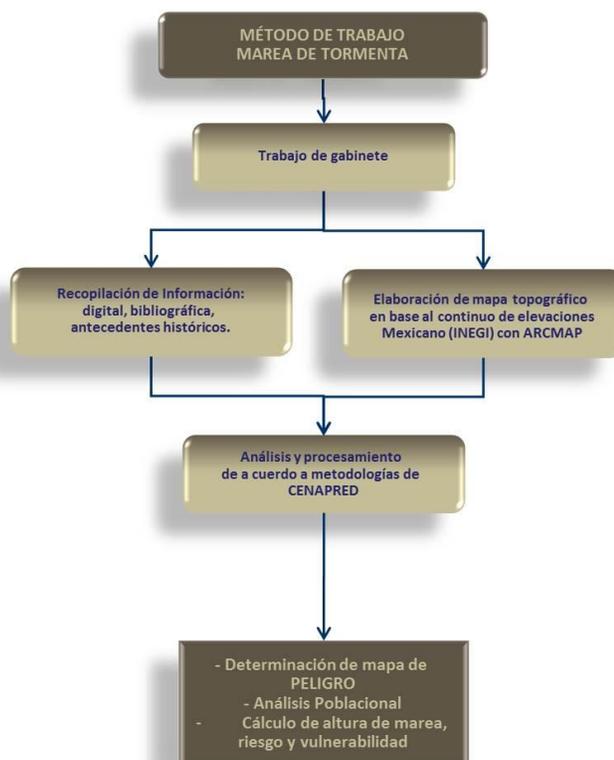


Figura 351. Método de trabajo general para la determinación de Peligro y altura por Marea de tormenta.

VIII.6.4. Análisis de Información y Generación de Mapa Base.

Para elaborar mapas de peligro y riesgo de inundaciones por marea de tormenta, se requiere de un plano topográfico que contenga a la zona de interés, de preferencia, que sea tres veces mayor que la zona en estudio, tratando que ella se localice en el centro del mismo.

El plano topográfico debe contar con curvas de nivel a cada metro o menos, entre las elevaciones 0 y 10 m. Éste puede construirse a partir de las cartas topográficas o los modelos digitales de terreno del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

El plano con curvas de nivel es indispensable para dibujar las áreas de inundación con agua marina. Ellas se forman por el ingreso de agua desde el océano, debido al ascenso del nivel medio del mar durante la ocurrencia de la marea de tormenta.

Debido a que este trabajo es a nivel estatal se delimito el área de peligro de acuerdo al mapa obtenido del modelo digital de elevación, con el cual, se elaboraron curvas de nivel a un metro hasta la cota 10; sin embargo, como se puede observar en la Figura 352, al ser un terreno con escasa pendiente, la distancia que se presenta hasta esa cota dentro del continente abarca desde 3.5 Km en la porción oriental hasta 55 Km en la sección poniente del Estado, por lo que se descartan estas áreas como peligro debido a las áreas tan amplias que se cubren; adicionalmente esto también se justifica por la prospección realizada con base en las fichas levantadas en las localidades de la costa y tierra dentro.

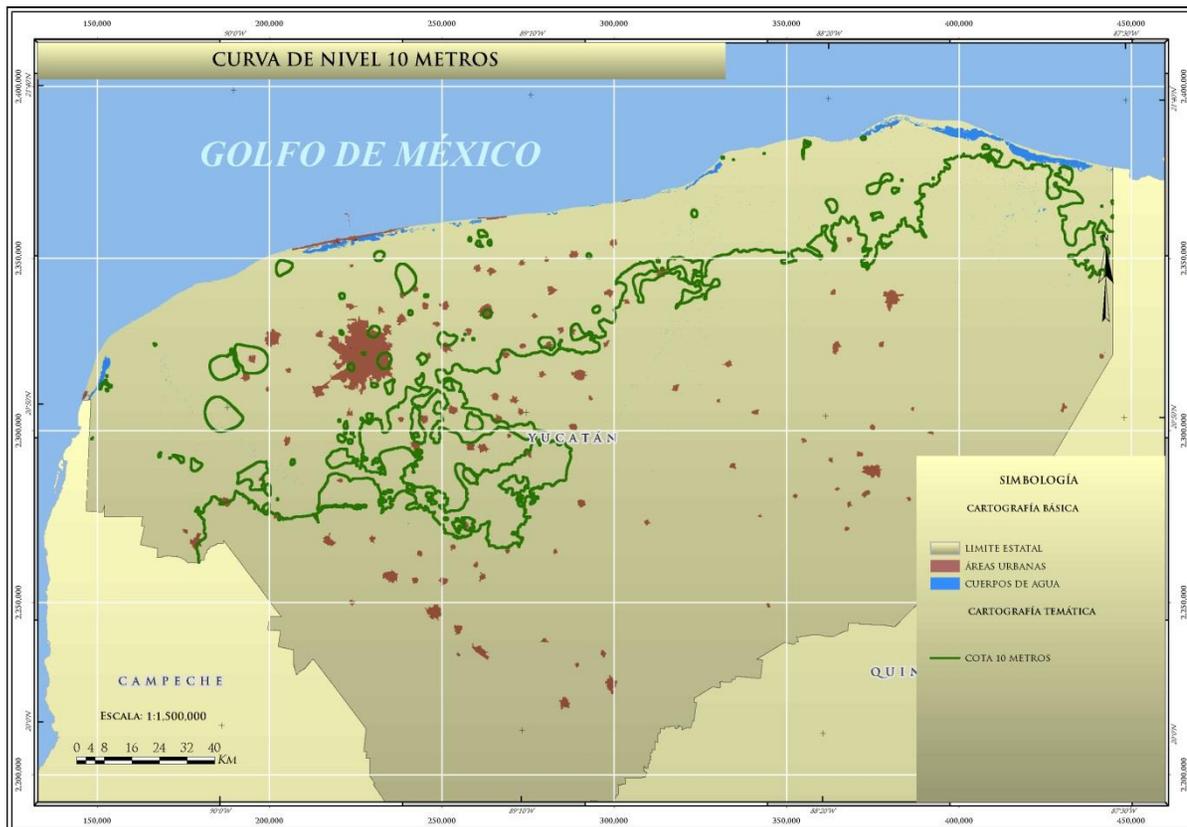


Figura 352. Curva de nivel 10 metros, determinada con el modelo digital de elevación.

De acuerdo a lo anterior, así como por los antecedentes históricos proporcionada por los pobladores de las localidades prospectadas y del análisis realizado sobre los procesos de disolución en calizas y su relación con el fenómeno de hundimientos sobre la intrusión salina durante la trasgresión que genera la marea de tormenta que afecta a las localidades presentes en la línea de

costa, se determinó que el área de peligro será el delimitado entre la línea de costa y la cota uno obtenida del modelo digital de elevación; esto durante y exclusivamente en el lapso en el cual se presenta el fenómeno de la marea de tormenta, las consecuencias de inundación después del meteoro se analizan en el apartado de inundaciones de este trabajo (Figura 353).

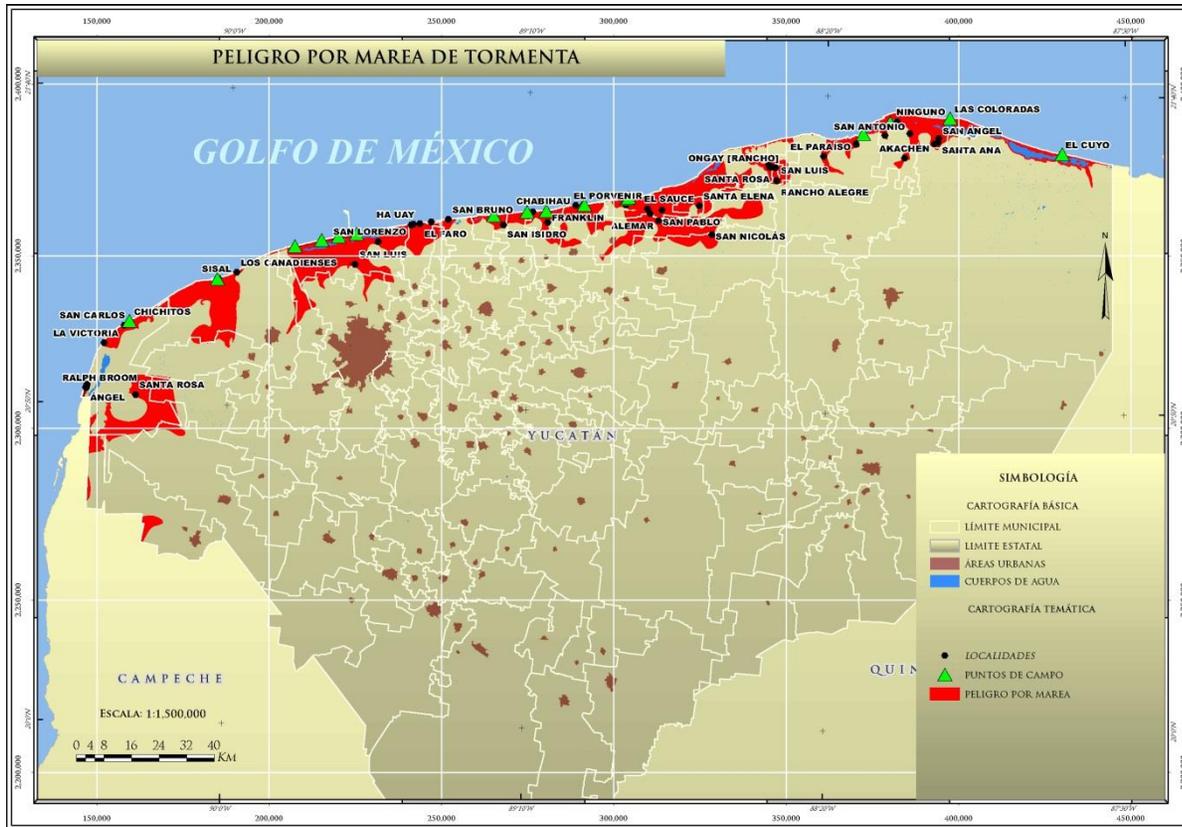


Figura 353. Mapa de peligro por el fenómeno de marea de tormenta.

Estimación de la altura máxima de la marea de tormenta

La elevación h (en m) más grande que alcanza a ascender el nivel medio del mar por la marea de tormenta (amplitud de la marea de tormenta), puede ser calculada a partir de la velocidad V del viento sostenido (Km/h) y del radio de máximo viento R (en Km). Con base en el análisis de mediciones sobre elevaciones de la marea de tormenta de algunos ciclones tropicales, y de expresiones empíricas propuestas en Estados Unidos y en Japón, se obtuvo una expresión para conocer la amplitud máxima de la marea de tormenta debida a un ciclón tropical:

$$h = (0.03R + 0.000119V^2 - 1.4421) * F$$

Dónde:

h es elevación (en metros) más alta que alcanza la marea de tormenta en el mar cerca de la costa.

R es el radio de máximo viento (en Km), el cual se obtiene a partir de la presión central del ciclón tropical, radio de máximo viento, latitud del centro del ciclón tropical y la velocidad de traslación de acuerdo a la expresión $R = 0.0007e^{0.01156 p_0}$, donde p_0 es la presión central y e es la base del logaritmo natural ($e = 2.71828$).

V es la velocidad máxima del viento sostenido (en Km/h)

F es un factor correctivo por dirección del viento.

De lo anterior se desprende el análisis de estas áreas urbanas Río Lagartos, Dzilam de Bravo, Telchac Puerto, Chuburná, Chelem, Progreso, Chicxulub, Chelen, Chuburná, Celestún; y dos localidades: Sisal y El Cuyo; en estas regiones se realizó el cálculo en base a valores de tablas para determinar los parámetros necesarios y utilizar las expresiones anteriormente descritas para finalmente obtener la altura de la marea de tormenta.

El factor correctivo (F), se determina a partir del ángulo α que forma la dirección de desplazamiento del ciclón tropical con respecto a la línea de costa próxima al sitio de interés, este factor se determina mediante la siguiente expresión:

$$F = \begin{cases} 0.6(1 + \text{sen}\alpha) & \text{si } 0^\circ < \alpha < 180^\circ \\ 0.6 & \text{en otros casos} \end{cases}$$

En la Figura 354 se muestra el ángulo α que existe en la trayectoria del ciclón tropical y la línea de costa, cuyo comportamiento general en el estado de Yucatán se presenta como en el croquis mostrado.

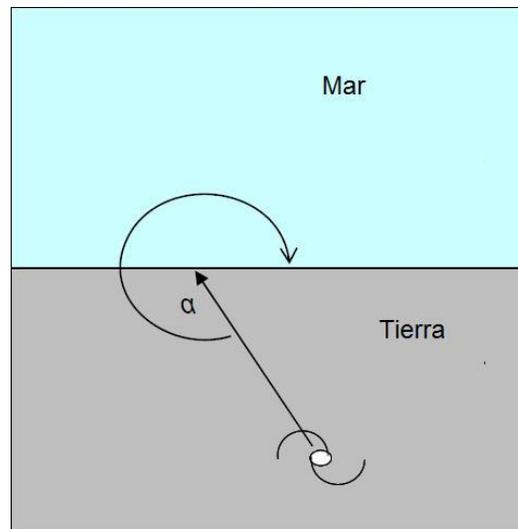


Figura 354. Croquis esquemático del ángulo α para la obtención del valor correspondiente al factor correctivo.

Finalmente y de acuerdo a las características de las zonas de interés se determino que el factor correctivo es igual a 0.6 para todos los casos analizados, esto debido a que el ángulo α es mayor de 180° .

Para determinar el dato de la velocidad de desplazamiento o translación, (que a priori se utilizara para obtener la máxima velocidad de los vientos sostenidos) se utilizó el mapa “máxima velocidad de translación de los ciclones tropicales en el atlántico”, que se localiza en la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (Fenómenos Hidrometeorológicos) del CENAPRED, cuyos valores fueron interpolados para obtener el resultado en las áreas analizadas (Figura 355).

En los siguientes mapas (figuras 356-362) se observa gráficamente los parámetros utilizados para el cálculo de la altura máxima de la marea de tormenta en caso de presentarse un ciclón tropical en las zonas urbanas analizadas, se muestra la dirección y variabilidad de desplazamiento de los ciclones tropicales en esa región, la línea de costa de la área urbana a analizar y el ángulo α , el cual se genera a partir de trayectoria y la línea de costa virtual.

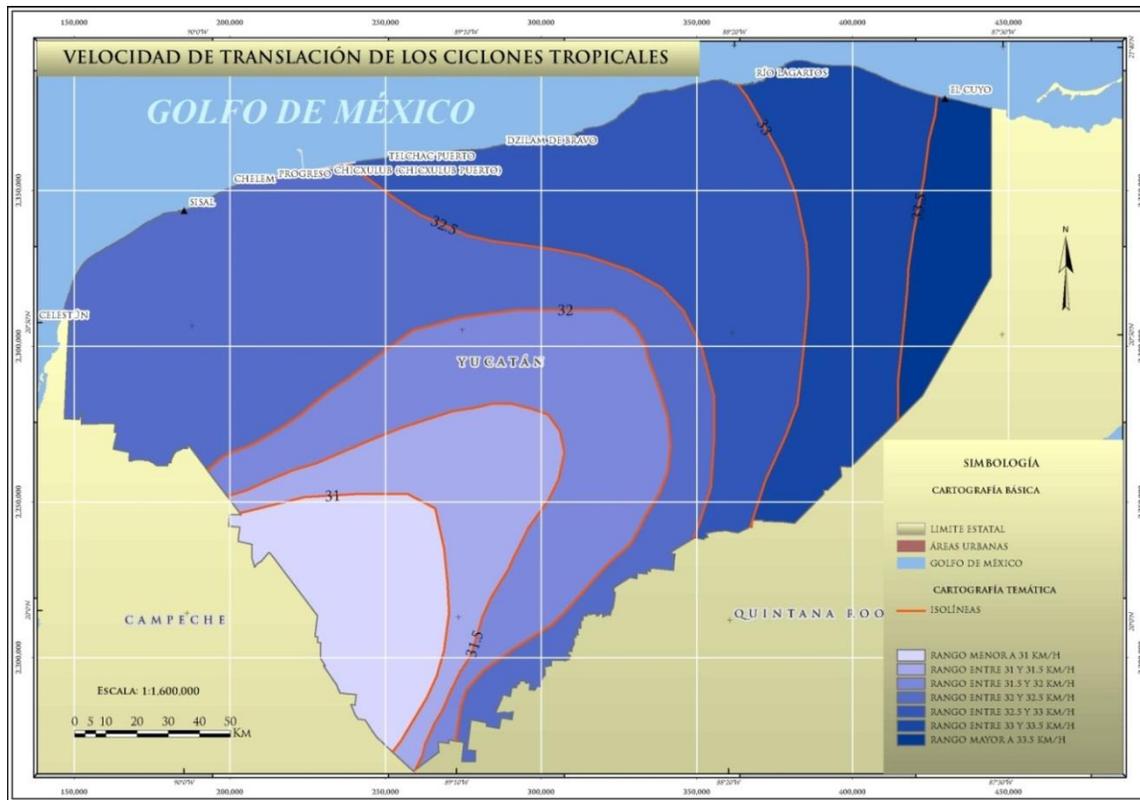


Figura 355. Velocidad de desplazamiento o translación de los ciclones tropicales en el Estado.

Zona urbana de Celestún.

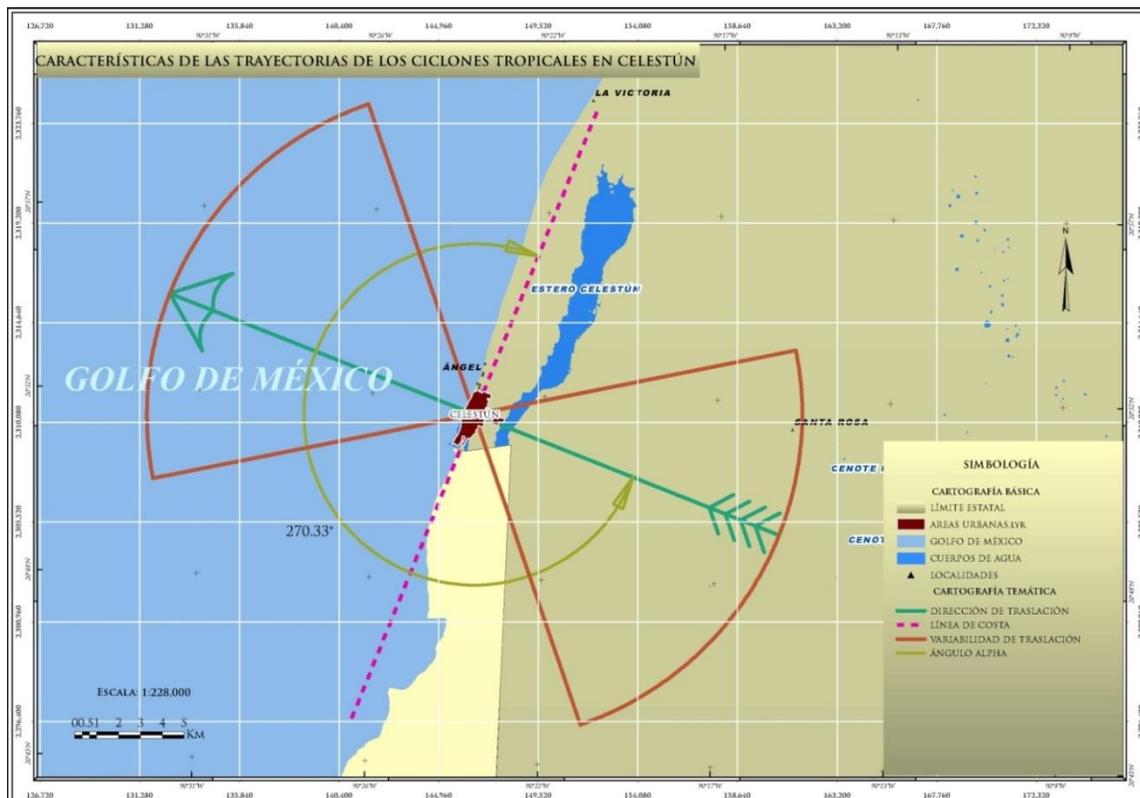


Figura 356. Características de rumbo y variación de desplazamiento de los ciclones tropicales, ángulo α y línea de costa en la zona urbana de Celestún.

A continuación se muestra la tabla con los parámetros y cálculos resultantes para determinar la altura máxima de marea de tormenta, esto de acuerdo a la categoría del ciclón tropical en la zona urbana de Celestún.

Tabla 178. Resultados de la posible altura de marea de tormenta en la zona urbana de Celestún.

TIPO	Po (mb)	LATITUD (Φ)	ALFA (α)	VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO (KM/H)	RADIO DE MÁXIMO VIENTO (R)	VELOCIDAD MÁXIMA DE VIENTO SOSTENIDO (KM/H)	FACTOR CORRECTIVO F	ALTURA DE MAREA DE TORMENTA (M)
TT	985	21.341828	270.33	32.2	61.6929571	117.022157	0.6	1.2
H1	980	21.341828	270.33	32.2	58.2282002	126.502264	0.6	1.3
H2	965	21.341828	270.33	32.2	48.9583422	151.275457	0.6	1.6
H3	945	21.341828	270.33	32.2	38.8523971	178.798309	0.6	2.1
H4	920	21.341828	270.33	32.2	29.1009197	207.967388	0.6	2.7
H5	882	21.341828	270.33	32.2	18.7555513	245.323051	0.6	3.8

Localidad Sisal

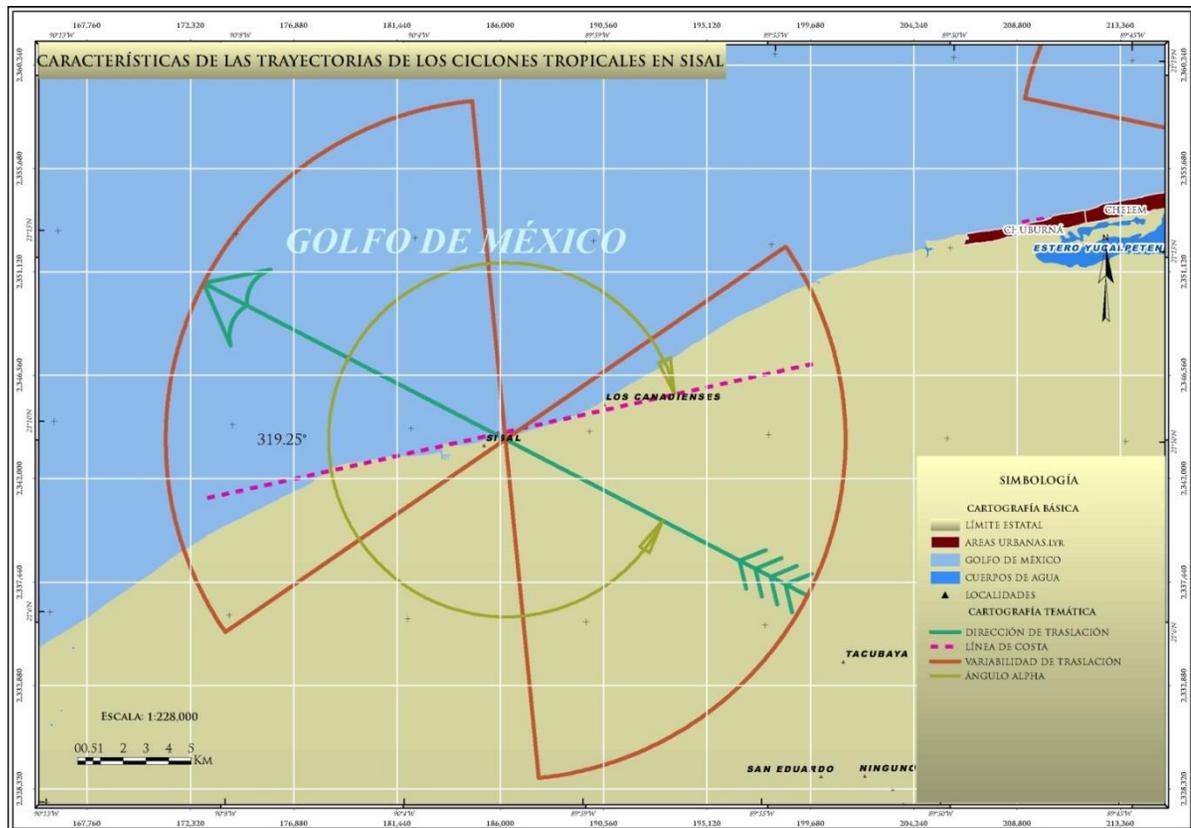


Figura 357. Características de rumbo y variación de desplazamiento de los ciclones tropicales, ángulo α y línea de costa en la localidad de Sisal.

En la siguiente tabla se presentan los parámetros y cálculos resultantes para determinar la altura máxima de marea de tormenta, esto de acuerdo a la categoría del ciclón tropical en la localidad de Sisal.

Tabla 179. Resultados de la posible altura de marea de tormenta en la localidad de Sisal, en el estado de Yucatán.

TIPO	Po (mb)	LATITUD (Φ)	ALFA (α)	VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO (KM/H)	RADIO DE MÁXIMO VIENTO (R)	VELOCIDAD MÁXIMA DE VIENTO SOSTENIDO (KM/H)	FACTOR CORRECTIVO F	ALTURA DE MAREA DE TORMENTA (M)
TT	985	21.167917	319.25	32.35	61.6929571	117.1428456	0.6	1.2
H1	980	21.167917	319.25	32.35	58.2282002	126.620387	0.6	1.3
H2	965	21.167917	319.25	32.35	48.9583421	151.3867146	0.6	1.7
H3	945	21.167917	319.25	32.35	38.8523971	178.9020819	0.6	2.1
H4	920	21.167917	319.25	32.35	29.1009196	208.0639395	0.6	2.7
H5	882	21.167917	319.25	32.35	18.7555512	245.4119407	0.6	3.8

Zona urbana de Chuburná, Chelem, Progreso y Chicxulub Puerto

Para esta zona en particular se tomó como referencia la localidad de Progreso, se considera que las áreas urbanas Chuburná, Chelem y Chicxulub Puerto tendrían características similares, difiriendo solamente con la latitud, valor que no afectaría en el resultado debido a la proximidad de todas estas zonas urbanas.

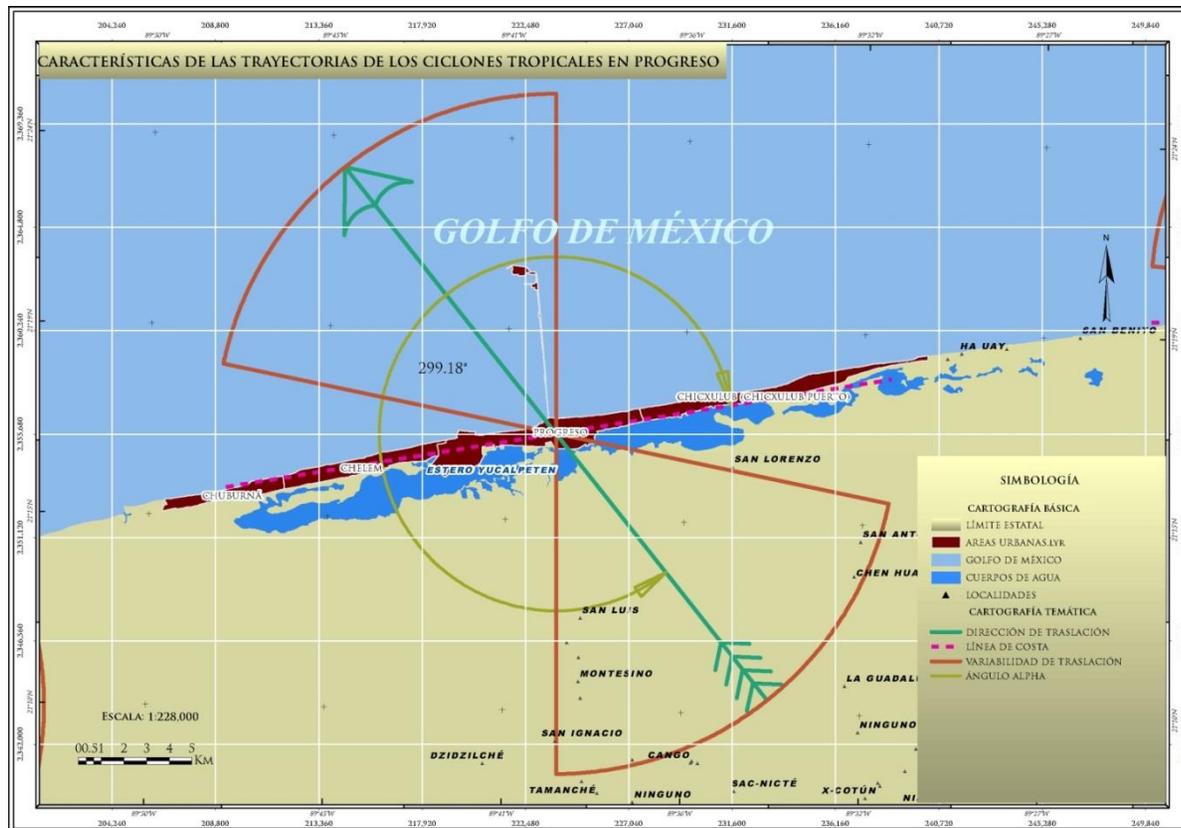


Figura 358. Características de rumbo y variación de desplazamiento de los ciclones tropicales, ángulo α y línea de costa en la zona urbana de la zona comprendida por las áreas urbanas de Chuburná, Chelem, Progreso y Chicxulub Puerto.

A continuación se muestra en la tabla 180 los parámetros y cálculos resultantes para determinar la altura máxima de marea de tormenta, esto de acuerdo a la categoría del ciclón tropical en la zona urbana de Progreso.

Tabla 180. Resultados de la posible altura de marea de tormenta en la zona urbana de Progreso, en el estado de Yucatán.

TIPO	Po (mb)	LATITUD (Φ)	ALFA (α)	VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO (KM/H)	RADIO DE MÁXIMO VIENTO (R)	VELOCIDAD MÁXIMA DE VIENTO SOSTENIDO (KM/H)	FACTOR CORRECTIVO F	ALTURA DE MAREA DE TORMENTA (M)
TT	985	21.281904	299.18	32.4	61.6929571	117.137894	0.6	1.2
H1	980	21.281904	299.18	32.4	58.2282002	126.617117	0.6	1.3
H2	965	21.281904	299.18	32.4	48.9583422	151.387945	0.6	1.7
H3	945	21.281904	299.18	32.4	38.8523971	178.908219	0.6	2.1
H4	920	21.281904	299.18	32.4	29.1009197	208.074811	0.6	2.7
H5	882	21.281904	299.18	32.4	18.7555513	245.427835	0.6	3.8

Zona urbana de Telchac Puerto

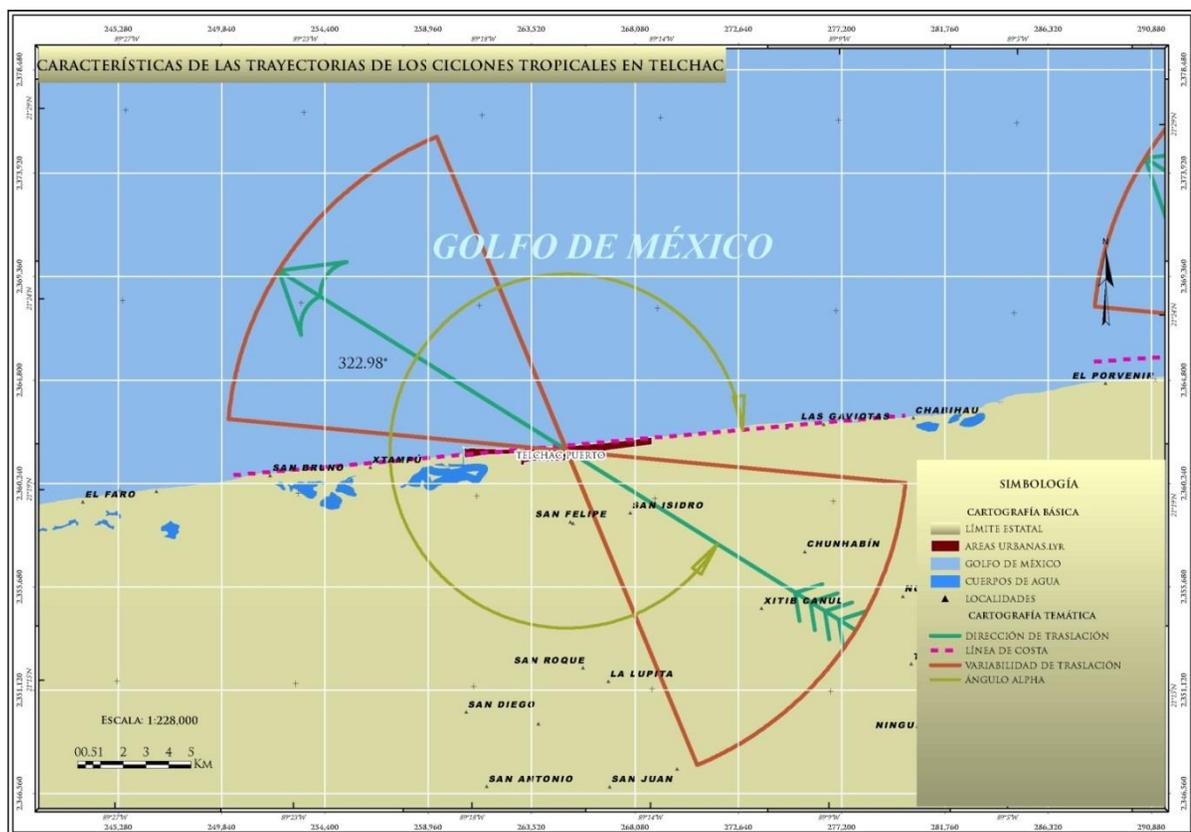


Figura 359. Características de rumbo y variación de desplazamiento de los ciclones tropicales, ángulo α y línea de costa en la zona urbana de Telchac Puerto.

A continuación se muestra la tabla con los parámetros y cálculos resultantes para determinar la altura máxima de marea de tormenta, esto de acuerdo a la categoría del ciclón tropical en la zona urbana de Telchac Puerto.

Tabla 181. Resultados de la posible altura de marea de tormenta en la zona urbana de Telchac Puerto.

TIPO	Po (mb)	LATITUD (Φ)	ALFA (α)	VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO (KM/H)	RADIO DE MÁXIMO VIENTO (R)	VELOCIDAD MÁXIMA DE VIENTO SOSTENIDO (KM/H)	FACTOR CORRECTIVO F	ALTURA DE MAREA DE TORMENTA (M)
TT	985	21.341828	322.98	32.6	61.6929571	117.222157	0.6	1.2
H1	980	21.341828	322.98	32.6	58.2282002	126.702264	0.6	1.3
H2	965	21.341828	322.98	32.6	48.9583422	151.475457	0.6	1.7
H3	945	21.341828	322.98	32.6	38.8523971	178.998309	0.6	2.1
H4	920	21.341828	322.98	32.6	29.1009197	208.167388	0.6	2.8
H5	882	21.341828	322.98	32.6	18.7555513	245.523051	0.6	3.8

Zona urbana de Dzilam de Bravo

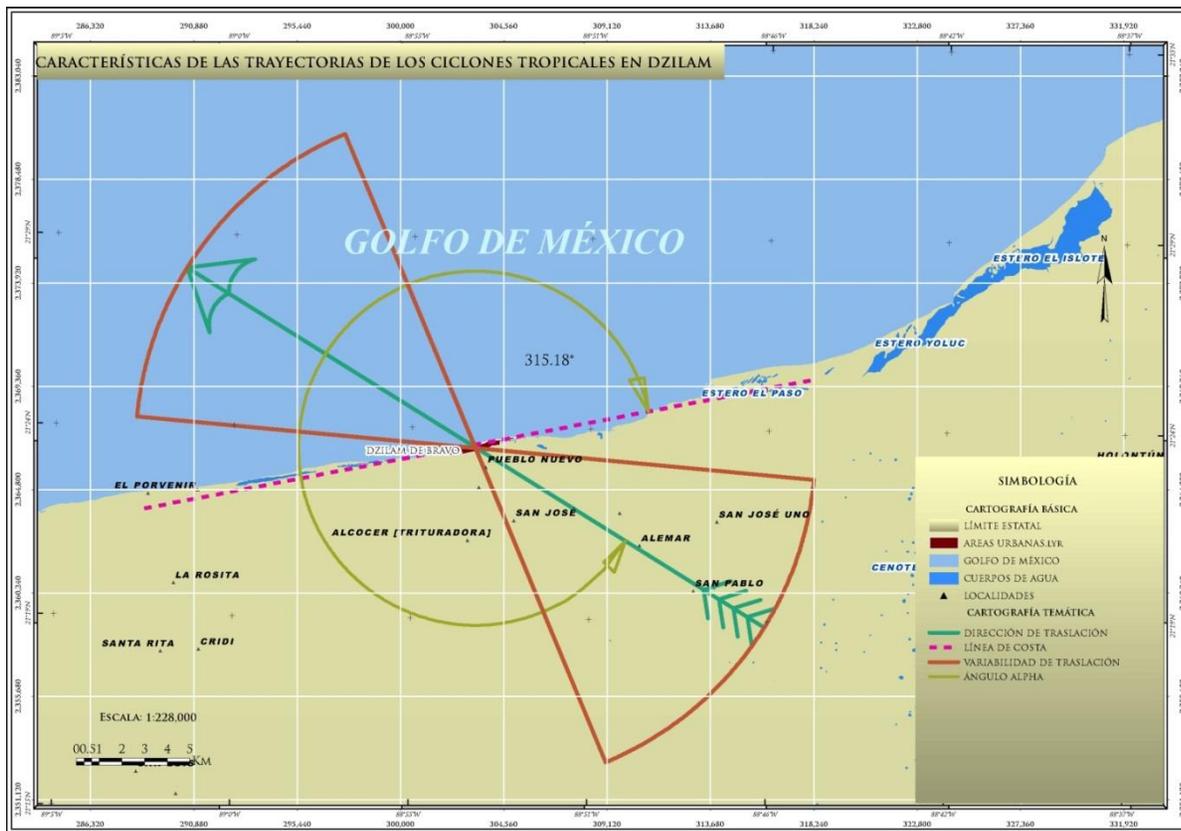


Figura 360. Características de rumbo y variación de desplazamiento de los ciclones tropicales, ángulo α y línea de costa en la zona urbana a de Dzilam de Bravo.

En la siguiente tabla se presentan los parámetros y cálculos resultantes para determinar la altura máxima de marea de tormenta, esto de acuerdo a la categoría del ciclón tropical en el área urbana de Dzilam de Bravo.

Tabla 182. Resultados de la posible altura de marea de tormenta en la zona urbana de Dzilam de Bravo.

TIPO	Po (mb)	LATITUD (Φ)	ALFA (α)	VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO (KM/H)	RADIO DE MÁXIMO VIENTO (R)	VELOCIDAD MÁXIMA DE VIENTO SOSTENIDO (KM/H)	FACTOR CORRECTIVO F	ALTURA DE MAREA DE TORMENTA (M)
TT	985	21.391129	315.18	32.7	61.6929571	117.259215	0.6	1.2
H1	980	21.391129	315.18	32.7	58.2282002	126.740049	0.6	1.3
H2	965	21.391129	315.18	32.7	48.9583422	151.515186	0.6	1.7
H3	945	21.391129	315.18	32.7	38.8523971	179.040158	0.6	2.1
H4	920	21.391129	315.18	32.7	29.1009197	208.211283	0.6	2.8
H5	882	21.391129	315.18	32.7	18.7555513	245.569116	0.6	3.8

Zona urbana de Río Lagartos



Figura 361. Características de rumbo y variación de desplazamiento de los ciclones tropicales, ángulo α y línea de costa en la zona urbana de Río Lagartos.

A continuación se muestra la tabla con los parámetros y cálculos resultantes para determinar la altura máxima de marea de tormenta, esto de acuerdo a la categoría del ciclón tropical en la zona urbana de Río Lagartos.

Tabla 183. Resultados de la posible altura de marea de tormenta en la zona urbana de Río Lagartos.

TIPO	Po (mb)	LATITUD (Φ)	ALFA (α)	VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO (KM/H)	RADIO DE MÁXIMO VIENTO (R)	VELOCIDAD MÁXIMA DE VIENTO SOSTENIDO (KM/H)	FACTOR CORRECTIVO F	ALTURA DE MAREA DE TORMENTA (M)
TT	985	21.594225	290.12	33.1	61.6929571	117.405945	0.6	1.2
H1	980	21.594225	290.12	33.1	58.2282002	126.889771	0.6	1.3
H2	965	21.594225	290.12	33.1	48.9583422	151.672913	0.6	1.7
H3	945	21.594225	290.12	33.1	38.8523971	179.20661	0.6	2.1
H4	920	21.594225	290.12	33.1	29.1009197	208.386156	0.6	2.8
H5	882	21.594225	290.12	33.1	18.7555513	245.752921	0.6	3.8

Localidad El Cuyo



Figura 362. Características de rumbo y variación de desplazamiento de los ciclones tropicales, ángulo α y línea de costa en la localidad de El Cuyo.

En la siguiente tabla se presentan los parámetros y cálculos resultantes para determinar la altura máxima de marea de tormenta, esto de acuerdo a la categoría del ciclón tropical en la localidad de El Cuyo.

Tabla 184. Resultados de la posible altura de marea de tormenta en la localidad de El Cuyo, en el estado de Yucatán.

TIPO	Po (mb)	LATITUD (Φ)	ALFA (α)	VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO (KM/H)	RADIO DE MÁXIMO VIENTO (R)	VELOCIDAD MÁXIMA DE VIENTO SOSTENIDO (KM/H)	FACTOR CORRECTIVO F	ALTURA DE MAREA DE TORMENTA (M)
TT	985	21.5149 22	328.61	33.5	61.6929571	117.626737	0.6	1.2
H1	980	21.5149 22	328.61	33.5	58.2282002	127.109395	0.6	1.3
H2	965	21.5149 22	328.61	33.5	48.9583422	151.889412	0.6	1.7
H3	945	21.5149 22	328.61	33.5	38.8523971	179.419704	0.6	2.1
H4	920	21.5149 22	328.61	33.5	29.1009197	208.595963	0.6	2.8
H5	882	21.5149 22	328.61	33.5	18.7555513	245.959242	0.6	3.8

A continuación en la tabla 185, se presenta un resumen de los resultados de la altura máxima de marea de tormenta de acuerdo a la intensidad de ciclones tropicales de cada una de las áreas urbanas y localidades analizadas, esto con la finalidad de hacer una comparativa de los valores obtenidos.

Tabla 185. Tabla resumen de la altura máxima en metros de marea de tormenta de las áreas urbanas y localidades analizadas del estado de Yucatán.

TIPO	CELESTÚN	SISAL	CHUBURNA, CHELEM, PROGRESO, CHICXULUB PUERTO	TELCHAC PUERTO	DZILAM DE BRAVO	RÍO LAGARTOS	EL CUYO
TT	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
H1	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
H2	1.6	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
H3	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
H4	2.7	2.7	2.7	2.8	2.8	2.8	2.8
H5	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8

De acuerdo a los cálculos realizados la posible altura máxima de marea de tormenta en las áreas analizadas varía de 1.2 metros para la tormenta tropical hasta 3.8 metros en un huracán categoría 5; los resultados obtenidos en las diferentes zonas urbanas y localidades prácticamente son iguales para todas las categorías de ciclones tropicales, esto debido a que los datos de los parámetros utilizados son muy similares.

VIII.6.5. Análisis de Peligro por Marea de Tormenta

De acuerdo al análisis presentado en este trabajo, las áreas urbanas que posiblemente se encuentran afectadas por el fenómeno de marea de tormenta son Río Lagartos, Dzilam de Bravo, Telchac Puerto, Progreso, Chicxulub, Chelem, Chuburná, Celestún y San Felipe, adicionalmente se tiene registradas 48 sitios entre localidades y rancherías que están dentro de zonificación señalada con algún tipo de peligro, sin embargo, sólo 24 se localizan en el área marcada entre la línea de costa y 3 kilómetros tierra adentro (Ángel, Casita de Piedra, Celeste Vida, Chabihau, Chichitos, El Cuyo, El Faro, El Porvenir, El Salvador, El Sauce, Ha Uay, La Mano Poderosa, La Victoria, Las Coloradas, Las Gaviotas, Los Canadienses, Ongay, Perlita Tampico, Playa Gaviota, Pueblo Nuevo, Ralph Broom, Rancho Alegre, San Ángel, San Antonio, San Antonio Xux, San Benito, San Bruno, San Carlos, San Crisanto, San Esteban, San Francisco, San Isidro, San José, San José Uno, San Lorenzo, San Luis, San Pablo, Santa Ana, Santa Clara, Santa Elena, Santa Rita, Santa Rosa y Sisal).

De acuerdo a lo anterior, se seleccionaron varios sitios para ser verificados en campo, levantándose así 16 fichas de localidades afectadas, siendo estas: Dzilam De Bravo (2), Santa Clara, Telchac Puerto, San Crisanto, Chabihau, El Cuyo, Las Coloradas, Río Lagartos, San Felipe, Chichitos, Barrio Los Gatos (Sisal), Nuevo Yucalpetén, Chuburná, Chelem y Chicxulub.

Análisis poblacional de las áreas urbanas y localidades ubicadas en zona de peligro

El crecimiento poblacional en las zonas costeras, presiona al ambiente marino principalmente a través de la construcción de infraestructura, la sobreexplotación de sus recursos y por la disposición de los residuos municipales sin tratamiento en sus aguas (SEMARNAT, 2013), sin embargo, otro aspecto importante que provoca daños severos por los decesos existentes y por pérdidas económicas son los peligros que enfrenta esas áreas en relación a fenómenos hidrometeorológicos y que con el aumento de la tasa poblacional se incrementa el riesgo y en consecuencia mayor infraestructura que provoca el aumento de la vulnerabilidad.

En la siguiente tabla, se presenta el aumento en porcentaje de la población de las áreas urbanas que se localizan en la zona costera del estado de Yucatán en el rango que comprende el intervalo de 1990 al 2010, de acuerdo a la información tomada de INEGI (Tabla 186).

El porcentaje de crecimiento se obtuvo con la siguiente expresión:

$$\frac{(P2010 - P1990)}{P1990} \times 100$$

Dónde:

P2010= Población total Censo 2010

P1990= Población total Censo 1990

Tabla 186. Porcentaje de crecimiento poblacional en las áreas urbanas de la costa del estado de Yucatán en el periodo comprendido entre 1990 y 2010.

NOMBRE DE LA LOCALIDAD	POBLACIÓN TOTAL CENSO 1990	POBLACIÓN TOTAL CENSO 2010	PORCENTAJE DE CRECIMIENTO
Progreso	35,280	37,369	6%
Celestún	4,293	6,810	59%
Chicxulub Pueblo	2,942	4,080	39%
Dzilam de Bravo	1,941	2,374	22%
Río Lagartos	1,690	2,218	31%
San Felipe	1,254	1,789	43%
Telchac Puerto	1,113	1,722	55%

La población en estas áreas urbanas ha aumentado considerablemente en veinte años, por lo que se debe poner más atención en los planes de crecimiento urbano para evitar en lo posible daños a esta población, recordando que este tipo de fenómenos difícilmente se pueden mitigar y son los que provocan daños devastadores en las zonas costeras alrededor del mundo.

En la siguiente tabla, se exponen las posibles localidades, número habitantes y viviendas de acuerdo a su tipología, en caso de presentarse una marea de tormenta, esto de acuerdo a la zonificación resultante y de acuerdo a los datos de tipología de vivienda, número de habitantes y vivienda de acuerdo al censo poblacional INEGI, 2010 (Tabla 187).

Tabla 187. Municipio, localidades, número de habitantes y viviendas, así como su tipología de vivienda, localizadas en el polígono de peligro resultante.

MUNICIPIO	LOCALIDAD	NÚMERO DE HABITANTES	NÚMERO DE VIVIENDAS	TIPOLOGIA
Buctzotz	San Nicolás	1	1	Tipo I
		526	327	
Celestún	Celestún	4,393	1,405	Tipo II
		965	296	Tipo III
	Santa Rosa	1	1	Tipo I
	Celeste Vida	3	1	
	Ralph Broom	3	1	
	Casita de Piedra	3	2	
Ángel	2	1		

.....Continuación tabla 187

MUNICIPIO	LOCALIDAD	NÚMERO DE HABITANTES	NÚMERO DE VIVIENDAS	TIPOLOGIA	
Ceslestún	Perlita Tampico	4	1	Tipo I	
	Playa Gaviota	1	1		
	La Victoria	1	1		
	San Carlos	2	1		
	Chichitos	1	1		
Dzemul	San Benito	61	221		
	San Bruno	45	75		
Dzidzantún	El Porvenir	4	26		
	Santa Clara	45	223		
Dzilam de Bravo	Dzilam de Bravo	2,374	790		Tipo II
	Alemar	4	3	Tipo I	
	San José Uno	1	1		
	El Sauce	4	1		
	Dzilam de Bravo [unidad habitacional]	3	51		
	Pueblo Nuevo	58	36		
	Ongay [rancho]	1	1		
	San Esteban [rancho]	1	1		
	Santa Rosa	2	1		
	La Mano Poderosa	2	1		
Dzilam González	Dzilam González	54	20	Tipo II	
	San Pablo	6	1	Tipo I	
	Santa Elena	2	1	Tipo I	
Hunucmá	Sisal	1,837	1,174	Tipo II	
	Los Canadienses	3	6		
Ixil	El Salvador	10	1	Tipo I	
	El Faro	39	52		
Panabá	Rancho Alegre	2	1		
	San Luis	2	1		
Progreso	Chuburná	1,929	1,470		
	Chicxulub (Chicxulub puerto)	6,010	3,903		
	Chelem	3,509	3,188		
	Campestre Flamboyanes	4,027	1,490		
	Progreso	37,369	13,834		Tipo II
	San Luis	3	1		
	San Lorenzo	1	1	Tipo I	
Ha Uay	12	38			
Río Lagartos	Río Lagartos	58	32	Tipo II	
		677	230	Tipo II	
		528	163	Tipo III	
		34	14	Tipo IV	
	Akachén	2	1	Tipo I	
	San Antonio Xux	2	1		
	Santa Ana	1	1		
	San Ángel	1	1		
	San Francisco	1	1		
	San Antonio	2	1		
Ninguno	1	1			
Las Coloradas	1,151	354	Tipo III		
San Felipe	San Felipe	27	17	Tipo I	
		248	110	Tipo II	
	El Paraiso	1	1	Tipo I	
Santa Rita	1	1			
Sinanché	San Crisanto	551	428	Tipo I	
Telchac Puerto	Telchac Puerto	1,722	1,779	Tipo I	
	San Isidro	1	1		
Tizimin	El Cuyo	1,567	733	Tipo II	
Yobain	Franklin	4	1	Tipo I	
	Las Gaviotas	4	2		
	Chabihau	292	326		

VIII.7. Sequía

La sequía se considera como una condición del clima que ocurre o puede ocurrir en todas las zonas climáticas, pero variando sus características significativamente de una región a otra. Definiéndose de manera general como un conjunto de condiciones ambientales atmosféricas de muy poca humedad que se extienden durante un periodo suficientemente prolongado como para que la falta de lluvias cause un grave desequilibrio hidrológico y ecológico.

A lo largo del tiempo, si la ausencia de lluvias aumenta, la sequía tiende a agudizarse, cambiando de una sequía incipiente, a una moderada, severa, crítica y hasta catastrófica. Los factores climáticos como las altas temperaturas, los vientos fuertes y una baja humedad relativa están frecuentemente asociados con la sequía. Aun cuando el clima es el principal elemento de la sequía, otros factores como los cambios en el uso del suelo (la deforestación, agricultura, zonas urbanas), la quema de combustibles fósiles, las manchas solares, la ocurrencia del fenómeno climático erráticamente cíclico denominado El Niño y otras anomalías, afectan las características hidrológicas de cualquier Cuenca. Debido a que las regiones están interconectadas por sistemas hidrológicos, el impacto de la sequía puede extenderse más allá de las fronteras del área con deficiente precipitación.

Las principales causas de las sequías están relacionadas con cambios de las presiones atmosféricas y alteraciones en la circulación general de la atmósfera, generados por modificaciones en el albedo superficial, la existencia de una espesa capa de polvo en la atmósfera, cambios en la temperatura de la superficie de los océanos y mares e incrementos en las concentraciones de bióxido de carbono, ocasionan variaciones espacio-temporales de las precipitaciones (CENAPRED, 2013).

No hay que confundir la sequía con aridez, la primera es una anomalía temporal y la segunda es una condición que prevalece en zonas con bajas precipitaciones muy estrechamente ligada al tipo de clima. La sequía es un agente perjudicial que caracterizado por falta de agua en el suelo y consecuente deshidratación en las plantas ya que estas pierden agua debido a la evapotranspiración, en algunos lugares, el sobrepastoreo y la deforestación pueden participar en el problema.

Mundialmente se han presentado situaciones donde la falta de agua por largos periodos de tiempo provocó impactos negativos, no sólo en las actividades productivas del campo, como la agricultura y la ganadería, sino también a la salud de los habitantes, actividades industriales básicas de las comunidades rurales y urbanas; si además influyen algunos factores, como la escasez de humedad, altas o bajas temperaturas, vientos, entre otros, la situación se agrava.

Es difícil establecer en qué momento se está hablando de una sequía, debido a que se manifiesta de manera tácita no es tan evidente como un terremoto o un huracán por ejemplo y deberá pasar cierto tiempo hasta que pueda determinarse de manera cuantitativa una declaratoria formal.

Los desastres naturales, tales como la sequía en su fase más crítica, constituyen detonadores de situaciones sociales, económicas y políticas preexistentes. En el momento de la emergencia afloran conflictos, relaciones y situaciones que no aparecen con tanta claridad cuando la vida no es alterada por la ausencia o escasez de agua. Por otra parte, a partir de varias investigaciones se reconoció que el cambio climático aumentaría la frecuencia y severidad de las sequías, con efectos mayores en las zonas áridas.

En los últimos años, la sequía ha adquirido una gran relevancia por los daños que ocasiona, que con frecuencia superan en magnitud a los ocasionados por otros fenómenos hidrometeorológicos, tornándose más amenazador por el calentamiento atmosférico asociado al cambio global, entre cuyas secuelas el aumento en la frecuencia de sequías en determinadas zonas del planeta, es uno de los más serios problemas que enfrenta la humanidad, en especial los países ubicados en las zonas subtropicales, donde los altos niveles de radiación solar y evaporación se combinan con escasas precipitaciones y favorecen la recurrencia de periodos prolongados de sequía en áreas extensas (Gay, 2000).

En el Estado la vegetación está clasificada como selva baja caducifolia, llamada también selva seca yucateca, el promedio de precipitación en este tipo de comunidades es de 700 a 900 milímetros. En México las selvas secas constituyen el 40 % y presentan una alta estacionalidad, cambian de apariencia de acuerdo a la época del año y pueden presentar hasta tres meses de sequía con no más de 25 milímetros al mes. Dada la naturaleza de este tipo de vegetación, aunado a la evapotranspiración, a procesos meteorológicos extremos de calor y la consecuente deshidratación puede convertirse en combustible, lo cual es propicio para aumentar la probabilidad de incendios forestales, además de los escombros dejados por el paso de ciclones que como bien se sabe son ruta de paso en la Península de Yucatán.

VIII.6.1. Conceptos Básicos.

Algunos organismos o instituciones, tiene su propia definición para este fenómeno. La Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1992), en su Vocabulario Meteorológico Internacional, define a la sequía como: “Un periodo de tiempo con condiciones meteorológicas anormalmente secas, suficientemente prolongado como para que la falta de precipitación cause un grave desequilibrio hidrológico”. Por su parte, la Organización de las Naciones Unidas, en su documento de la Convención de Lucha Contra la Desertificación (ONU, 1994) define la sequía como: “fenómeno que se produce naturalmente cuando las lluvias han sido considerablemente inferiores a los niveles normales registrados, causando un agudo desequilibrio hídrico que perjudica los sistemas de producción de recursos de tierras”, mientras que para la SAGARPA (SIAP, 2012), la sequia se define como un desbalance temporal de la disponibilidad hídrica con una precipitación persistente menor que el promedio y una frecuencia, duración y severidad inciertas.

Según Crespo (2008), en las definiciones se observan algunos aspectos comunes y otros diferentes; un denominador común en ellas es la “escasez de precipitación”, con respecto a un comportamiento “normal” de la misma, considerando “comportamiento normal” a valores promedio de una serie de tiempo histórica. Las diferencias en el concepto de sequía estriban en la forma e intensidad como impacta y sus efectos en diferentes ambientes naturales, lo que ha llevado a desarrollar otras definiciones más de sequía, algunas de ellas enfatizan la identificación de los límites de inicio y fin del fenómeno, su severidad y frecuencia; otras se enfocan más a la búsqueda y claridad del concepto sequía. Las primeras se han clasificado como definiciones operacionales y las segundas como conceptuales, por ejemplo, Wilhite y Glantz (1985) en su trabajo “*Understanding and Defining Drought*” definen cuatro tipos de sequía, atendiendo a su origen y sus efectos, y son:

- **Meteorológica:** está referida al grado de desviación de la precipitación en comparación a un comportamiento “normal”, de una serie de tiempo preestablecida. Sin embargo la magnitud de la desviación y del tiempo no son fijos, más bien dependen de la forma como regionalmente evalúan el fenómeno, por ejemplo: para los Estados Unidos en 1942 se consideró sequía si la precipitación es menor que 2.5 milímetros en 48 horas; para Gran Bretaña en 1936 se propuso el criterio de sequía 15 días consecutivos con una precipitación total acumulada menor que 0.25 mm.; Libia en 1964, cuando un precipitación anual sea menor que 180 mm.; y para la India cuando la precipitación estacional sea menor del doble de la desviación media (Crespo, *op. cit*). Sin embargo, hay coincidencia al señalar a la sequía meteorológica como la primera indicadora del fenómeno de sequía.

- **Agrícola:** está muy relacionada con la sequía meteorológica y su impacto en los cultivos, considera el proceso en términos de balance de humedad, es decir evalúa la evapotranspiración real, potencial, el déficit de agua en el suelo que a su vez depende de características físicas del mismo, los niveles de reserva de agua, y considera la especificidad del cultivo en cuanto a sus requerimientos de humedad, en función de la etapa de crecimiento y la biología de la planta, y plantea que este tipo de sequía puede presentarse posterior a la presencia de una sequía de tipo meteorológica (Crespo, *op. cit*).

- **Hidrológica:** Está referida a los efectos de periodos de precipitación relativamente cortos, es decir a los escurrimientos a nivel de superficie y subsuelo, su impacto se ve reflejado en la recarga de

acuíferos, lagos, presas y su impacto es de largo plazo, es decir, en tanto la sequía agrícola presenta un efecto inmediato en los cultivos, la sequía hidrológica puede afectar la producción agrícola de varios años, la producción hidroeléctrica o la extracción de agua del subsuelo (Crespo, *op cit*).

• **Socioeconómica:** Se plantea en términos de suministro de agua y demanda por grupos humanos, por lo tanto está muy relacionada con los efectos de corto y largo plazo de los otros tipos de sequía. La sequía ocurre cuando la demanda de agua de un grupo social, en un lugar determinado excede el suministro, es decir: es una combinación entre disminución de la precipitación y el crecimiento de las necesidades de la población o de las actividades productivas, de la eficiencia en el uso del agua y de la tecnología (Crespo, *op. cit*).

Las siguientes definiciones permiten tener un criterio más sólido que coadyuve a distinguir conceptos que si bien en algún momento se traslapan es necesario acotar.

▪ **Sequía:** Condición natural, casual (aleatoria) y temporal de reducción importante en la precipitación y en la disponibilidad de agua con respecto a los valores normales abarcando un período significativo y afectando a una región amplia.

▪ **Aridez:** Condición climática natural y permanente con una precipitación media anual o estacional muy baja.

▪ **Déficit hídrico:** Se asocia directamente con la evaporación, la temperatura es factor determinante para que se lleve a cabo este proceso en combinación con los vientos y la presión atmosférica, existe un equilibrio entre la humedad del ambiente y la del entorno, trátase de plantas, suelo y cuerpos de agua, pero lo cierto es que para cada situación particular, según como interactúen todos esos factores, habrá una cantidad de agua que puede ser evaporada, a la que se llama evaporación potencial. Luego entonces se habla de déficit hídrico cuando hay menos cantidad de agua disponible de la que podría evaporarse si estuviera presente.

▪ **Escases de agua:** Indica una condición permanente de desequilibrio entre los recursos hídricos y las demandas de agua en una región o en un sistema de abastecimiento de agua, caracterizada por un clima árido o un aumento rápido en la demanda de agua, asociado al crecimiento de una población, ampliación de agricultura bajo regadío, industria cervecera, refresquera y de agua purificada, etc.

▪ **Desertificación:** la degradación del suelo en zonas áridas, semiáridas u otras que tengan una estación seca, causada principalmente por la sobreexplotación o uso inapropiado del suelo en interacción con la variabilidad climática.

VIII.6.2. Antecedentes

En México para el año de 2012 se han erogado más de 14 mil millones de pesos en el combate y consecuencias de la sequía. En el último trimestre de 2011, el Gobierno Federal ha destinado más de tres mil 179 millones de pesos para mantener las capacidades productivas, manejo adecuado de agua y uso sustentable de recursos naturales, activación de esquemas de aseguramiento, apoyo al empleo en zonas afectadas y acciones complementarias en 19 estados que fueron afectados por la sequía. La presencia de una sequía extrema en Chihuahua, Coahuila, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas, y una sequía severa en otros 14 estados (Aguascalientes, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán, Nayarit, Nuevo León, Querétaro, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán), el Gobierno Federal instrumentó desde septiembre de 2011 un programa con medidas oportunas para contener sus efectos y ofrecer soluciones de largo plazo (SAGARPA, 2012).

En México, de 2004 a 2011 se reportaron mil 54 contingencias. De los nueve fenómenos con mayor prevalencia en el territorio, los hidrometeorológicos representaron tres de cada cuatro, mientras que la sequía significó uno de cada cinco eventos (Figura 363).



Figura 363. Afectación por contingencias climatológicas, 2004-2011 en México (Fuente: SIAP, 2012).

Durante los últimos ocho años, la zona que comprende los estados de Durango, Zacatecas, San Luis Potosí y Guanajuato, así como la Península de Yucatán, es donde la prevalencia de sequía ha sido mayor, mientras que los efectos del agua han tenido mayor presencia en el Centro y Sureste del país. El Estado que más reportes de afectación tuvo durante el lapso fue Tlaxcala, el municipio de Tlaxco reportó de 2004 a 2011, 29 contingencias (SIAP, 2012) (Figura 364).

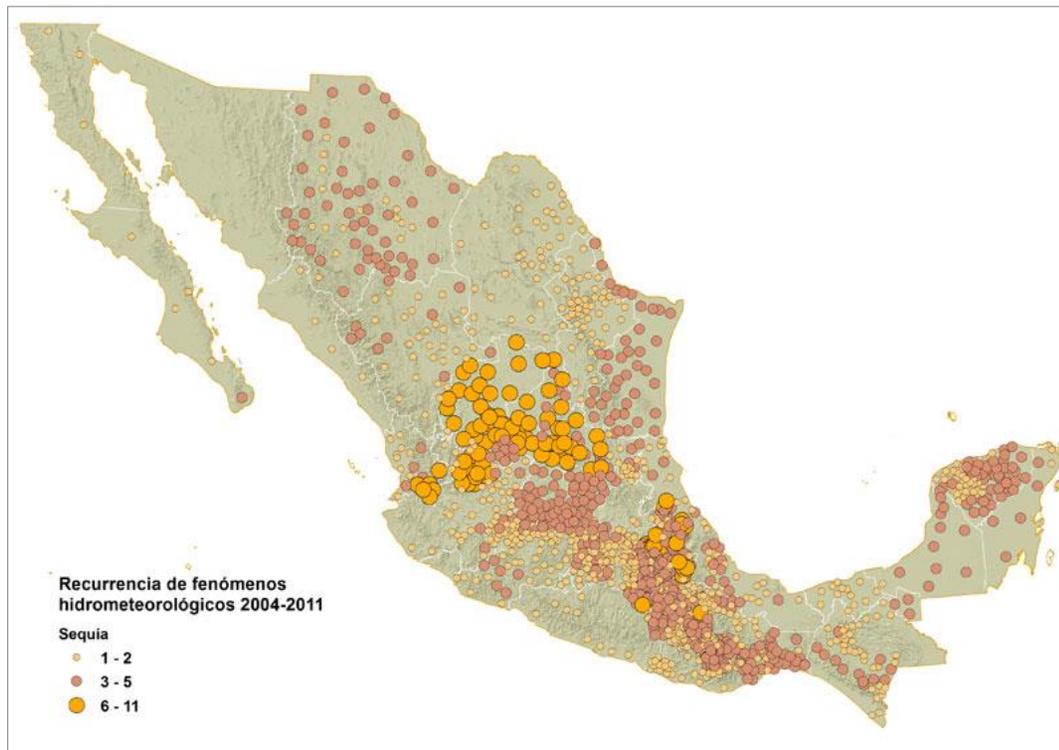


Figura 364. Manifestación de fenómenos hidrometeorológicos a nivel global en la República Mexicana, (SIAP, 2012).

Los efectos y consecuencias de este proceso meteorológico no son nuevos en la historia del planeta y México no podría ser la excepción. Se atribuyen al cambio climático por el calentamiento

global, fenómenos como El Niño y La Niña que comparten la responsabilidad a esta clase de calamidad, con ciclos de amplio rango y bien pudiera tratarse de períodos de retorno a nivel mundial.

En contraposición a lo anterior la teoría del caos indica que la razón ahora pudiera ser incertidumbre, es decir ahora las cosas se han tornado cada vez más impredecibles. Los gobiernos deben hacer frente al problema y adoptar metodologías vigentes como en los países europeos donde se han implementado Guías de Gestión de la Sequía las cuales forman parte de una política en acción y han sido desarrolladas dentro de un proyecto de planificación para anticiparse a la sequía y la mitigación de sus impactos.

Se tiene la sospecha de que la enigmática desaparición de la cultura maya fue consecuencia de intensas sequías causadas en parte por el uso excesivo de recursos forestales, esto pudo provocar cambios en los ciclos naturales de lluvia, influenciados además por procesos naturales cíclicos de temperaturas extremas y sus consecuentes efectos en el medio natural y recursos intrínsecamente ligados a éste. Esta teoría se justifica por la fabricación de cal producida al quemar la roca caliza, usada como cementante en la construcción de las pirámides y viviendas de esta cultura.

En la región yucateca la distribución de lluvias se caracteriza por un intenso periodo de sequía que se ha calculado en un periodo de retorno de cada cuatro años en promedio Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo para el Manejo Local de Riesgos en la Península de Yucatán, en esta región inciden las sequías estacionales en la época de estiaje, y las sequías contingentes en cualquier periodo del año cuando hay carencia de lluvias, muy común en la canícula (Seige, 2012).

Por otra parte, el CENAPRED, propone un mapa de la República Mexicana (Figura 365), ponderando el grado de peligro por sequía en base al déficit de lluvia donde se clasifican 5 categorías que van de muy bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy alto. Nótese que para el estado de Yucatán según el mapa de la figura sólo estaría impactado por los niveles Bajo y Medio.

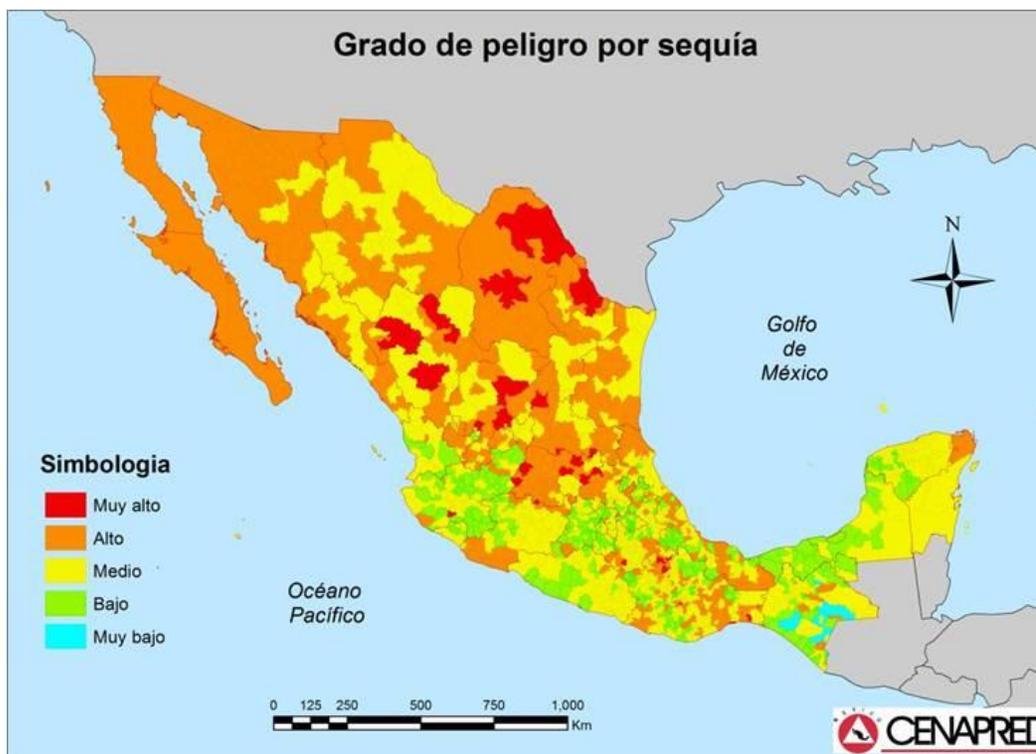


Figura 365. Clasificación de Peligro por sequía a escala municipal de CENAPRED (2012).

Los principales daños por concepto de fenómenos climáticos en el planeta, corresponden al déficit de lluvia, en México en particular, se han alcanzado pérdidas en la agricultura y ganadería por el orden de \$ 15,420 millones de pesos. Entre el mes de mayo del 2011 y el 9 de febrero del 2012

según estimaciones de la SAGARPA, se considera que se dio la sequía más intensa que ha azotado al país en los últimos 72 años.

Actualmente en Yucatán los daños derivados por la disminución de lluvia se han reflejado sobre todo en la agricultura y ganadería, no impactando directamente al abasto en asentamientos humanos ya que hay disponibilidad de agua en el subsuelo, sin embargo, el equipamiento para extraer el agua es una limitante.

La Tabla 188, detalla algunas cuestiones adversas que pueden estar asociadas a las sequías.

Tabla 188. Impacto de la sequía en: economía, ambiente y sectores sociales.

ECONOMÍA	AMBIENTE	SOCIAL
Pérdida de producción agrícola Pérdida de cultivos anuales y perennes. Daño a la calidad del cultivo. Reducción de la productividad de la tierra cultivable. Plagas de insectos. Enfermedades en las plantas.	Daño a especies animales y vegetales en estado natural. Deficiencia de alimento y agua potable. Enfermedades. Incremento de la vulnerabilidad a la depredación. Migraciones y concentraciones. Incremento del estrés. Daño a las plantas.	Hambruna. Desnutrición. Pérdida de vidas humanas. Estrés mental y físico. Incremento de enfermedades respiratorias. Incremento de conflictos.
Pérdida en la producción lechera y ganadera Reducción en la productividad de la tierra. Limitación de las tierras para pastar. Falta de agua para el ganado. Incremento en el índice de mortalidad en el ganado. Retraso en la crianza. Incremento en la depredación.	Incremento en la intensidad y número de incendios. Pérdida de tierras húmedas. Impacto en estuarios (cambios en la salinidad).	Perturbaciones en las creencias culturales. Reevaluación de valores sociales (prioridades, necesidades, derecho). Reducción o modificación de las actividades recreativas. Disgusto público con los gobernantes. Desigualdad de la distribución de bienes para el alivio de la sequía.
Alcance de incendios Pérdida de producción maderera. Incendio de zonas naturales. Enfermedad en árboles. Plagas de insectos. Deterioro en la productividad de bosques.	Pérdida de biodiversidad. Erosión eólica.	Desigualdad en los impactos de la sequía con base en: grupos socioeconómicos, grupos étnicos, edad, género, antigüedad. Pérdida de valores estéticos.
Pérdida en la producción pesquera/aves de corral Pérdida de ingresos y quiebra de empresas dedicadas a esta actividad. Desempleo. Incremento en la demanda y déficit energético. Disminución en la producción de alimentos. Interrupción en el abastecimiento de agua. Tensión en instituciones financieras. Costo en el transporte de agua. Agotamiento del agua corriente.	Agotamiento de reservorios y disminución del nivel de los lagos. Reducción del flujo de manantiales y ríos. Efectos en la calidad del agua. Efectos en la calidad de la tierra. Deterioro en la imagen del paisaje.	Reducción en la calidad de vida, cambio en el estilo de vida. Incremento de la pobreza en áreas rurales y urbanas. Migración de la población rural a zonas urbanas y otras regiones. Incremento en la necesidad de información y coordinación de actividades diseminadas.

Fuente: Modificado de Narajan, 2003, (Galván Ortiz, 2007).

Según datos de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1978, en el Siglo XIX se desarrollaron sequías muy severas en la Península de Yucatán y de acuerdo a Florescano las sequías regionales mas importantes se presentaron en los años 1822-1823 y 1834-1835. (Galván Ortiz, 2007).

VIII.6.3. Método de Trabajo

Es necesario puntualizar que el fenómeno de sequía, como objeto de análisis puede tener diferentes acepciones según su impacto negativo y enfoque hacia los siguientes rubros: agrícola, hidrológico, meteorológico, biológico, ambiental, urbano y social; cada uno de ellos asume una clase de sequía de acuerdo a su origen, intensidad y sus efectos en cada ambiente natural. En el presente trabajo, de acuerdo al tipo de información con la que se cuenta y los fines que se persiguen, se analiza la sequía principalmente desde el punto de vista meteorológico.

Para el tema de sequía, existen diversos índices y métodos encaminados a su análisis o monitoreo, que han permitido entender su comportamiento, entre ellos destacan en términos generales, el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI), el Índice Z, que se utiliza para cuantificar anomalías de humedad en el suelo y es utilizado por agrónomos. Deciles técnica estadística basada en las frecuencias acumuladas, Anomalías anuales de la Precipitación respecto a la moda e Índice Estandarizado de Precipitación (SPI), que expresa el número de desviaciones estándar que cada registro varía del promedio histórico (Galván Ortiz, 2007).

De acuerdo a lo anterior y tomando en cuenta que no existe una metodología específica para el estudio y análisis del tema de sequías, el SGM de acuerdo a las características del Estado, los antecedentes existentes sobre el tema y la información posible de conseguir y generar, desarrolló un método de trabajo (Figura 366) tomando como base la metodología propuesta en el libro “Análisis de Sequías” de Sandoval y Reyes (2004), de la que se tomó el procedimiento para la obtención de periodos de retorno y la manera de cuantificar el número de sequías que han ocurrido en el lapso de tiempo analizado y otra de la Dra. Hernández Cerda, investigadora del Instituto de Geografía de la UNAM como complemento.

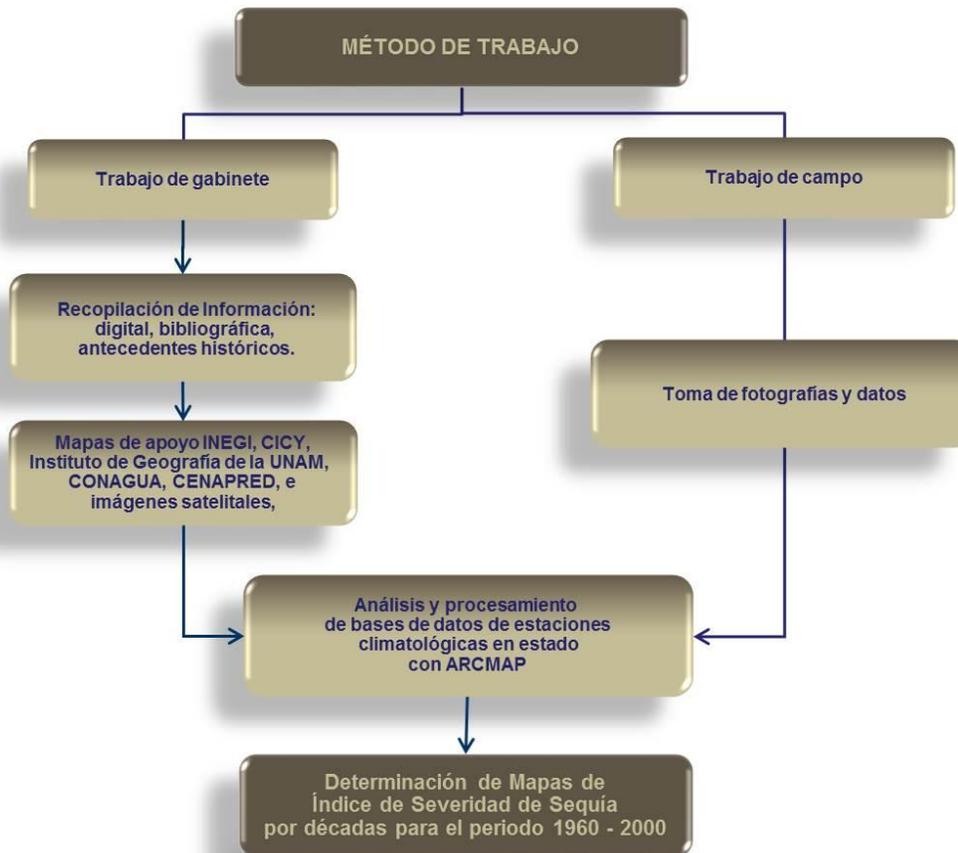


Figura 366. Diagrama de método de trabajo para el tema de sequía.

Para la realización del tema, se utilizaron bases de datos de la Comisión Nacional del Agua, (series 1960 a 1990 y 1960 a 2003), y estaciones meteorológicas correspondientes a los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo (Figura 367).

Procesando estos datos por medio de un análisis estadístico descriptivo, se obtuvieron los mapas representativos que comprenden a todo el estado de Yucatán. El criterio para tomar esas series de años fue que los datos presentaban mejor continuidad, además de identificar una comparativa entre las dos series de años para observar el comportamiento o variaciones significativas.

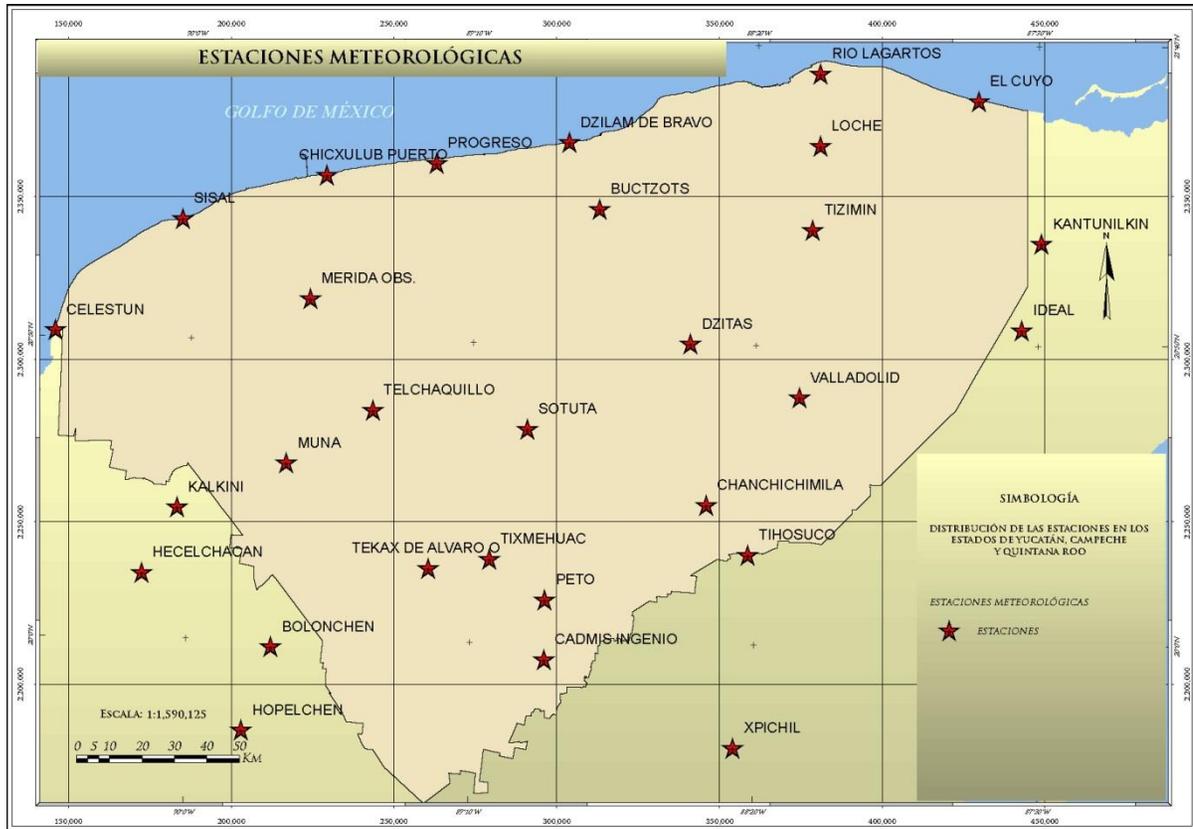


Figura 367. Estaciones climatológicas en el estado de Yucatán.

El análisis realizado se llevó a cabo, utilizando los valores de precipitación así como el promedio de éstos y en base a la asesoría de la Dra. Hernández Cerda (IG UNAM), se clasificó el Índice de Severidad de la Sequía en siete grados, tal como se expresa en la Tabla 189.

Tabla 189. Niveles del Índice de Severidad de la Sequía.

GRADO DE I.S.	VALOR
Extremadamente Severo	> 0.80
Muy Severo	0.60 - 0.80
Severo	0.50 - 0.60
Muy Fuerte	0.40 - 0.50
Fuerte	0.35 - 0.40
Leve	0.20 - 0.35
Ausente	< 0.20

Los valores obtenidos del Índice de Severidad (I.S.) para cada una de las estaciones seleccionadas se utilizaron para la generación de los mapas, aplicando el método estadístico de interpolación denominado Ponderación de Distancia Inversa (IDW) con el software Arc/Map versión 10 de ESRI. Esta técnica de estimación utiliza directamente los valores muestreados y confiere pesos de acuerdo a las distancias entre los puntos, sin tomar en cuenta la continuidad espacial de los datos disponibles.

La fórmula del Índice de Severidad es:
$$I.S. = \frac{(\sum Y - \sum X)}{\sum X}$$

Dónde: Y = Precipitación mensual registrada

X = Precipitación mensual normal (períodos 1960-1990 y 1960-2003)

Un ejemplo del cálculo del I.S. con los valores de precipitación correspondientes a la estación Observatorio Mérida (31019), ubicada en el municipio del mismo nombre, se consideraron los datos del año 2000; el acumulado mensual (Y), y los valores de la media (X) del período 1980-2000 (Tabla 190) de la hoja de cálculo asociada al ejemplo.

Tabla 190. Valores de precipitación Observatorio Mérida (31019), año 1960.

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Y	8.50	1.20	2.00	12.70	50.50	209.60	138.40	298.50	163.60	133.80	8.70	12.60
X	30.60	26.10	20.90	23.2	72.70	150.50	145.90	157.10	181.50	104.20	39.80	34.50

El valor de $\sum Y$ se obtiene de la suma de los datos del renglón "Y" si son menores que su respectiva media mensual normal de la línea "X". Para $\sum X$, los datos que se suman son las medias mensuales del renglón "X" que fueron mayores para aquellos valores de la línea "Y". Sustituyendo en la fórmula de (I.S) el valor de $\sum Y$ y $\sum X$ se obtiene lo siguiente.

$$\begin{aligned} \sum Y &= 398.20 \\ \sum X &= 575.20 \\ I.S &= - 0.30 \end{aligned}$$

Por último, se toma el promedio de los índices de severidad de cada estación y con las coordenadas de estos se grafica con el software creándose un mapa de puntos a los que se les aplica el IDW.

Otro método utilizado para definir, monitorear, e incluso diagnosticar el fenómeno de sequía, es el SPI o índice de precipitación estandarizado, es útil para detectar periodos atípicamente lluviosos, donde los registros de precipitación superiores al promedio histórico del periodo de tiempo correspondiente dan valores de SPI positivos lo cual expresa condiciones de humedad y los registros de precipitación inferiores al promedio histórico en un lapso de tiempo arrojan valores negativos, lo que indica un déficit en la cantidad de humedad (Galván, 2007). McKee utilizó la clasificación que indica la presencia de una sequía si se presentan valores menores o iguales a -1 (Tabla 191).

Tabla 191. Clasificación del SPI en periodos húmedos y secos (McKee, 1993)

SPI	CLASE
2.00 o más	Extremadamente húmedo
1.50 a 1.99	Muy húmedo
1.00 a 1.49	Moderadamente húmedo
- 0.99 a 0.99	Humedad cercana a la normal
-1.00 a -1.49	Moderadamente seco
-1.50 a -1.99	Severamente seco
-2.00 o menos	Extremadamente seco

Se consultó en la página de IRI los índices de Precipitación Estandarizado para dos periodos de tiempo, mismos que arrojaron gráficas con las anomalías de precipitación y cuyos valores que caen por debajo del Umbral de -1 se consideran como periodos secos y adecuando a los valores de la Tabla anterior se interpretan los valores y periodos de sequía.

VIII.6.1. Análisis de Información y Generación de Mapas Base

Para la realización de este tema, se procesaron datos de precipitación media mensual de 31 estaciones meteorológicas distribuidas en el Estado y su periferia, siendo 23 en Yucatán, 4 en Campeche y 4 en Quintana Roo, para el estado de Yucatán se detectaron niveles de sequía meteorológica que abarcan los grados de fuerte, muy fuerte y severo. En la tabla 192, se muestran los datos de las estaciones climatológicas con los rangos de tiempo considerados y su índice de severidad (I.S).

Tabla 192. Distribución por estado de las estaciones climatológicas incluidas en el I.S.

ESTADO	ESTACIÓN	AÑO INICIAL	AÑO FINAL	I.S. TOTAL	
Yucatán	Buctzotz	1954	2008	0.37	
	Catmis Ingenio	1955	2006	0.42	
	Celestun	1951	2008	0.46	
	Chanchichimila	1949		0.39	
	Chicxulub	1963		0.55	
	Dzilam de bravo	1960		0.56	
	Dzitas	1949		0.41	
	El Cuyo	1930		0.43	
	Loche	1958		0.47	
	Mérida	1921		2009	0.42
	Mococha	1977		2008	0.43
	Muna	1958			0.44
	Peto	1960	0.40		
	Progreso	1919	2003	0.58	
	Río Lagartos	1960	2008	0.55	
	Sisal	1944	2004	0.56	
	Sotuta	1943	2008	0.41	
	Tekax	1949		0.48	
Telchac	1951	0.53			
Telchaquillo	1950	0.46			
Yucatán	Tixmehuac	1962		0.39	
	Tizimin	1950		0.40	
	Valladolid	1921	2003	0.40	
	Quintana Roo	Ideal	1960	2007	0.37
		Kantunilkin	1949		0.44
Tihosuco		1950	0.40		
Xpichil		1957	0.39		
Campeche	Bolonchen	1950		0.41	
	Calkini	1951		0.37	
	Hechelchakan	1948		0.42	
	Hopelchen	1949		0.39	

Es importante comentar que en este trabajo no se analizaron los procesos causales de las anomalías en la precipitación debido a que se utilizó información de las bases de datos de la CONAGUA, a partir de los cuales se obtuvieron mapas base sin necesidad de llegar a utilizar modelos de cambio climático, lo cual no forma parte del objetivo de este trabajo, por lo tanto sólo se procesaron los datos de estaciones hidrometeorológicas, los resultados expresados en los mapas del índice de severidad por sequía meteorológica. Por otra parte, estos mapas se compararon con otros obtenidos de diversas fuentes tales como; Climas en la República Mexicana (García E., 1989), Índice de Sequía de la República Mexicana Instituto de Geografía (Hernández, 2007), clima por INEGI, (2006) específicamente para el estado de Yucatán; sequía intraestival (Orellana y Espadas, 2010). Precipitación media anual, déficit hídrico, temperaturas extremas y promedio anual, esta comparación fue concordante con los mapas obtenidos en este estudio.

Tomando en consideración diversos mapas que muestran el comportamiento en cuanto a la disponibilidad o presencia de humedad en el Estado, como el mapa de climas del INEGI, el generado por la Dra. Hernández así como el desarrollado por el CICY para el déficit hídrico se hizo una comparación de sus resultados observándose que tienen una configuración similar. A continuación se hace una breve descripción de los mencionados mapas, donde se observan y describen dichas similitudes.

En el mapa de INEGI de la Figura 368, se observa que en la zona norte y sobre todo la nororiente se concentran las zonas con clima semiseco muy cálido y clima seco muy cálido respectivamente, por lo cual se estima que esa zona debe ser similar a lo esperado al realizar una comparación de éste contra los que se generan.

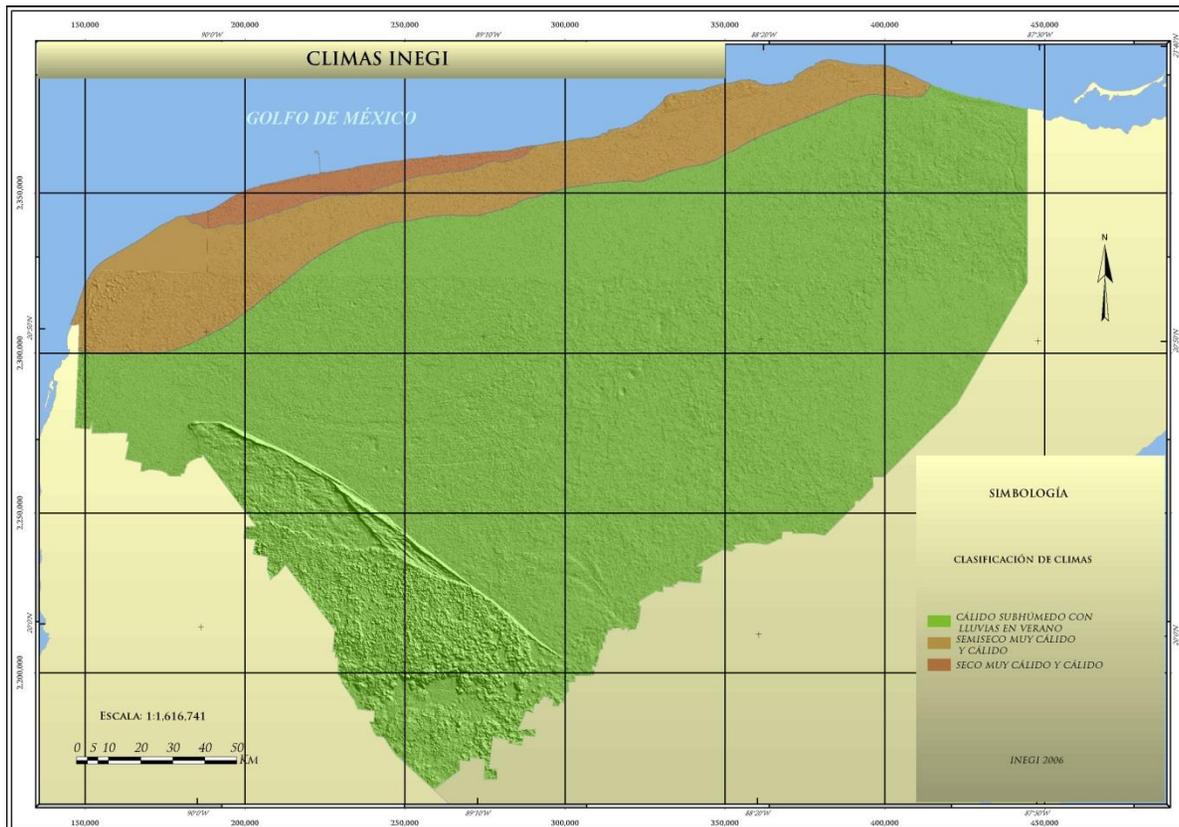


Figura 368. Mapa del (INEGI, 2006), donde se observa la relación que existe entre el clima y el desarrollo de la sequía.

En el mapa a nivel República Mexicana del Índice de Sequía, en el área correspondiente al estado de Yucatán, puede notarse que hay coincidencia en la configuración de los climas que marcan de seco a semiseco la zona noroeste, con un índice de sequía mayor en esta zona del Estado (Figura 369)

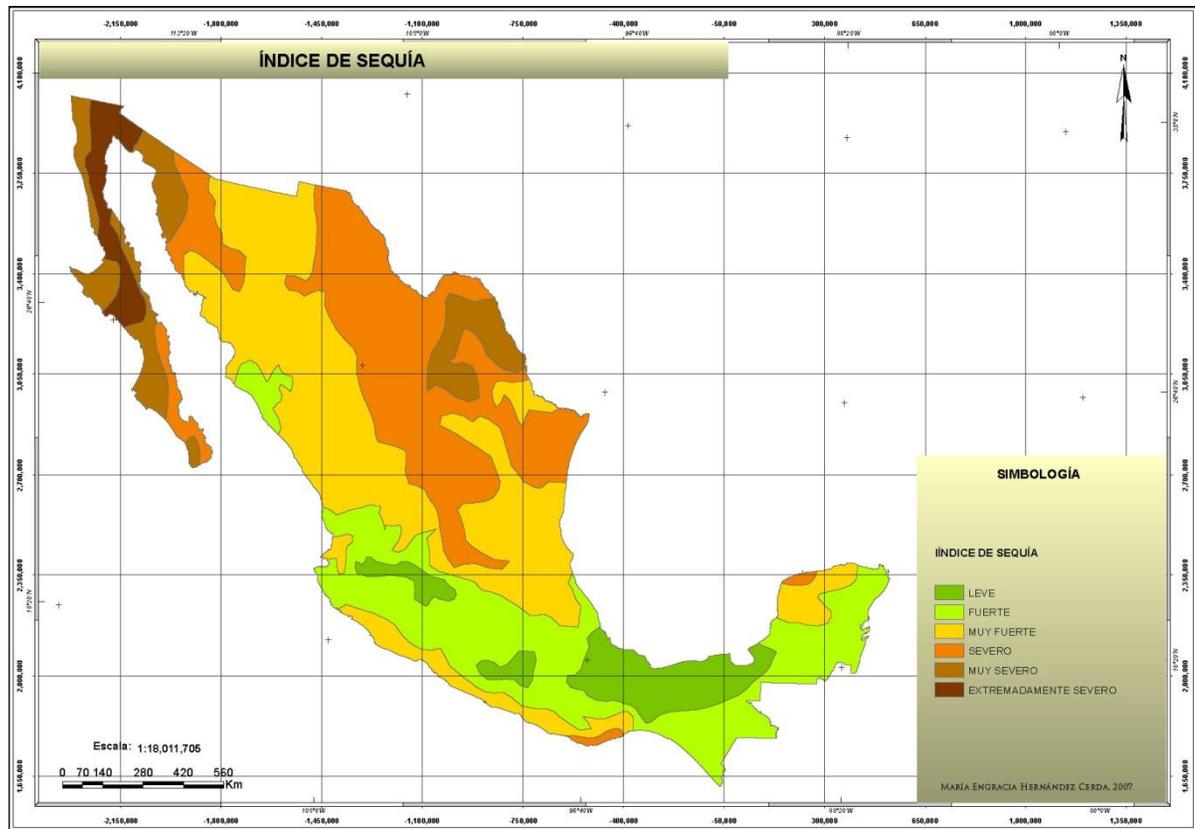


Figura 369. Mapa del índice de severidad de sequía meteorológica de la República Mexicana (Hernández, 2007).

Uno más de los mapas que nos hace notar la similitud entre los resultados es el que expresa el déficit hídrico como una condición de escasa humedad, desarrollado por el CICY (Figura 370), muy correlacionable con los mapas de índice de sequía. La figura es una expresión del desequilibrio que existe entre la humedad atmosférica y la presente en la zona geográfica, donde la deshidratación en tierra y vegetación es causada tanto por la baja precipitación en la zona como por la temperatura que incide de manera más intensa hacia el norte del Estado. Para esta mapa las zonas clasificadas comprenden: segundo, tercero y cuarto lugar, mostrado en el mapa con diversos achurados, en verde hacia la parte norte del Estado y hacia el Cono Sur del Estado indican un mayor déficit hídrico y se clasifican en el 2° lugar, el 3er lugar ocupa la mayor parte de Yucatán y el 4to son manchones distribuidos al centro del territorio.

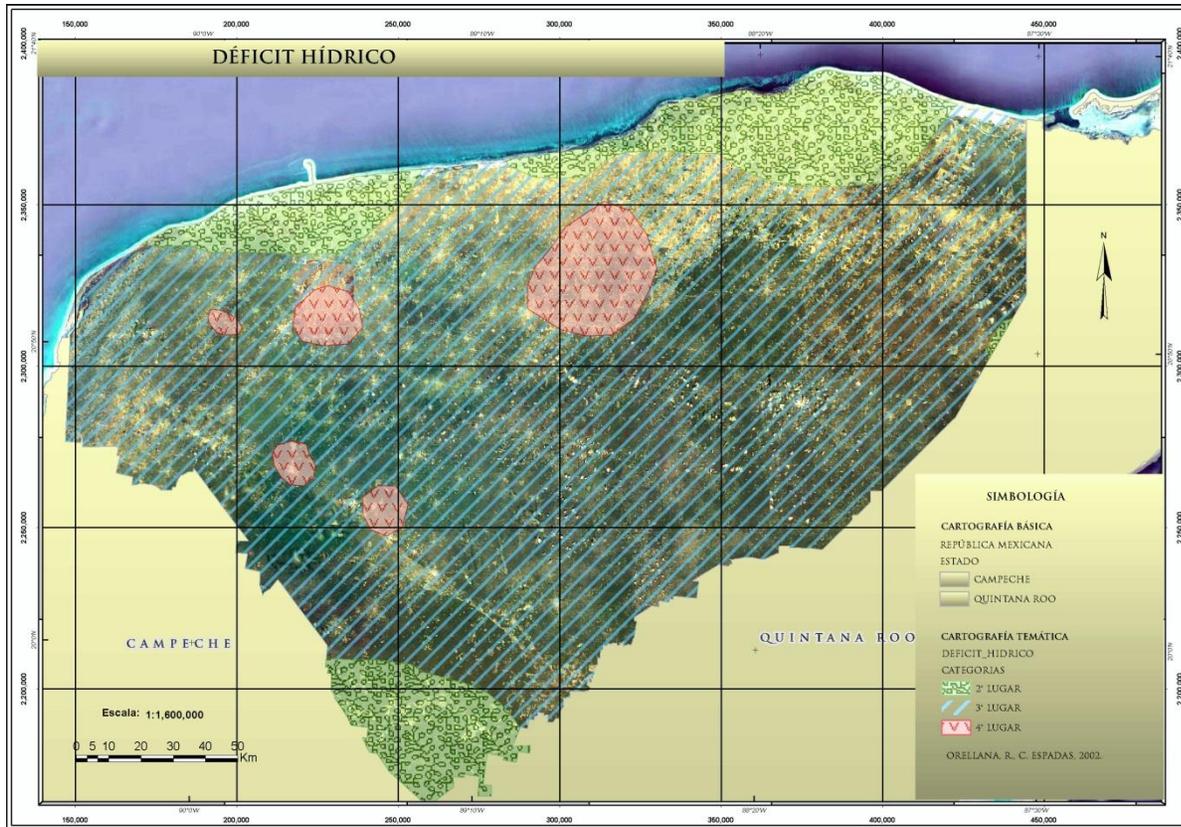


Figura 370. Mapa de déficit Hídrico (R. Orellana, C. Espadas, 2002).

Por otra parte, de acuerdo con el análisis de los datos de las estaciones correspondientes a los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo, se generaron los modelos y áreas de afectación del índice de severidad de sequía para los periodos 1960 a 1990 y 1960 a 2003 con el método IDW. (Figuras 371 y 372).

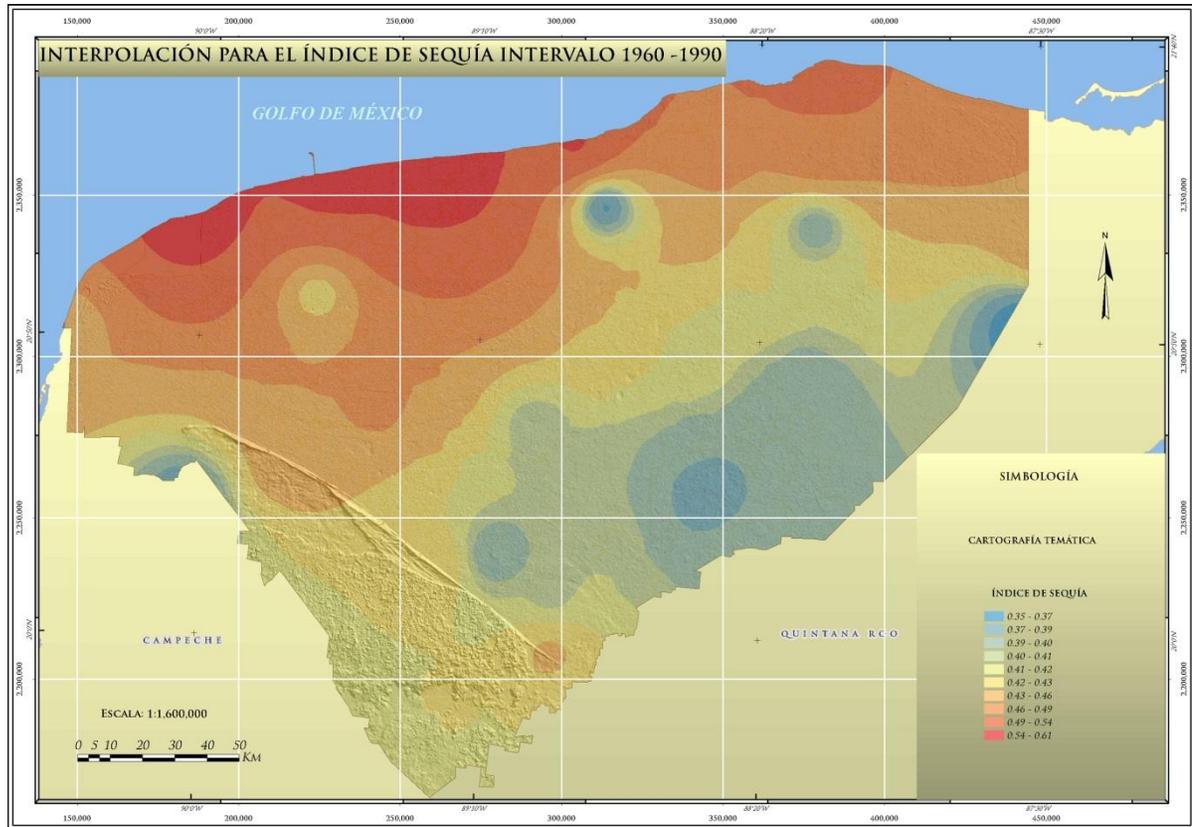


Figura 371. Estimativo del comportamiento del índice de severidad de sequía, periodo 1960 - 1990 por el método IDW.

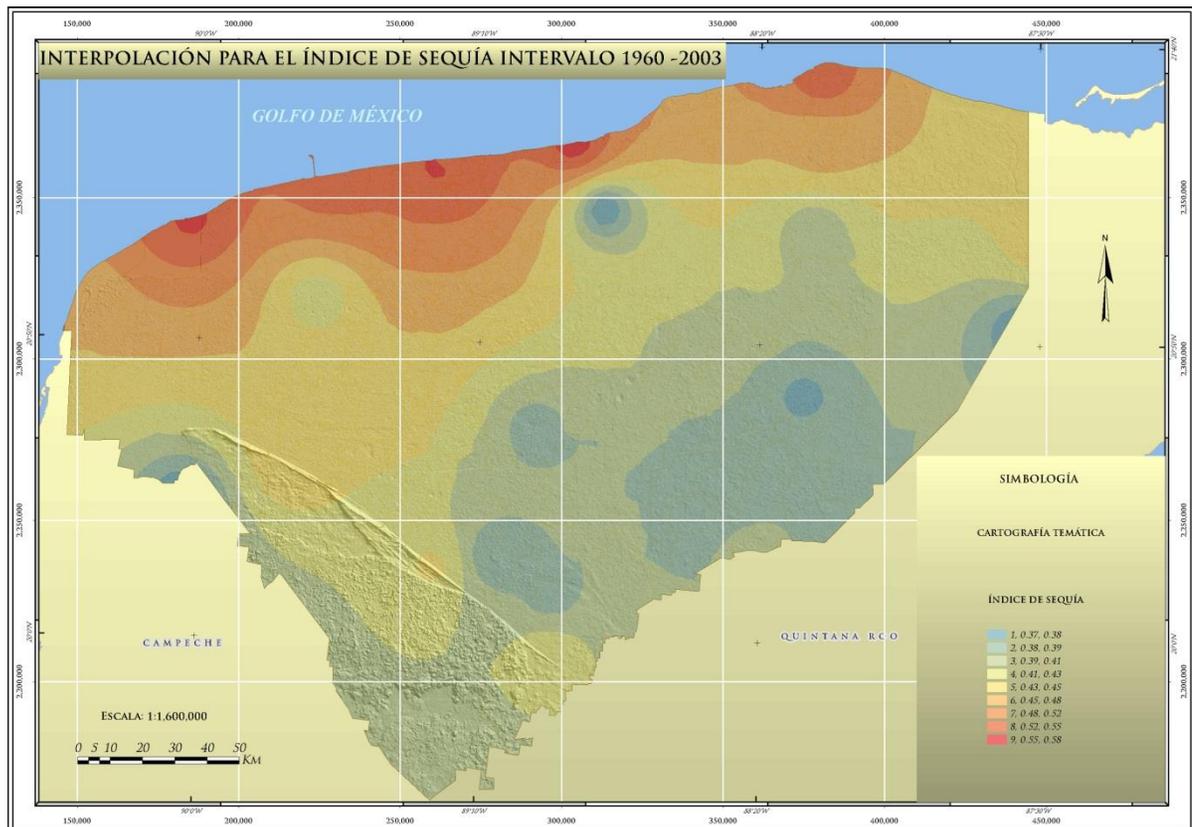


Figura 372. Estimativo del comportamiento del índice de severidad de sequía, periodo 1960 - 2003 por método IDW.

De acuerdo a los valores de las tablas 193 y 194, se hace evidente que la concentración de sequía para el periodo 1960-1990, se ubica hacia el norte y noroeste del Estado, disminuyendo esta hacia el sur y sureste.

Tabla 193. Valores asociados al modelo para el periodo 1960-1990.

VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO	ÁREA Km ²	PORCENTAJE	GRADO I.S.
0.35	0.40	4,753.84	12.02	Fuerte
0.40	0.49	29,753.96	75.25	Muy Fuerte
0.49	0.61	5,028.96	12.71	Severo

Tabla 194. Valores asociados al modelo para el periodo 1960-2003.

VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO	ÁREA Km ²	PORCENTAJE	GRADO I.S.
0.37	0.39	5,291.85	13.38	Fuerte
0.39	0.52	32,476.04	82.14	Muy Fuerte
0.52	0.58	1,768.49	4.47	Severo

Por otra parte, también se generaron dos mapas complementarios del índice de severidad referidos al mismo fenómeno, pero en los cuales se simplificó el rango de valores para adaptarlos a la clasificación utilizada por la doctora Hernández Cerda (Figuras 373, 374, Tabla 195).

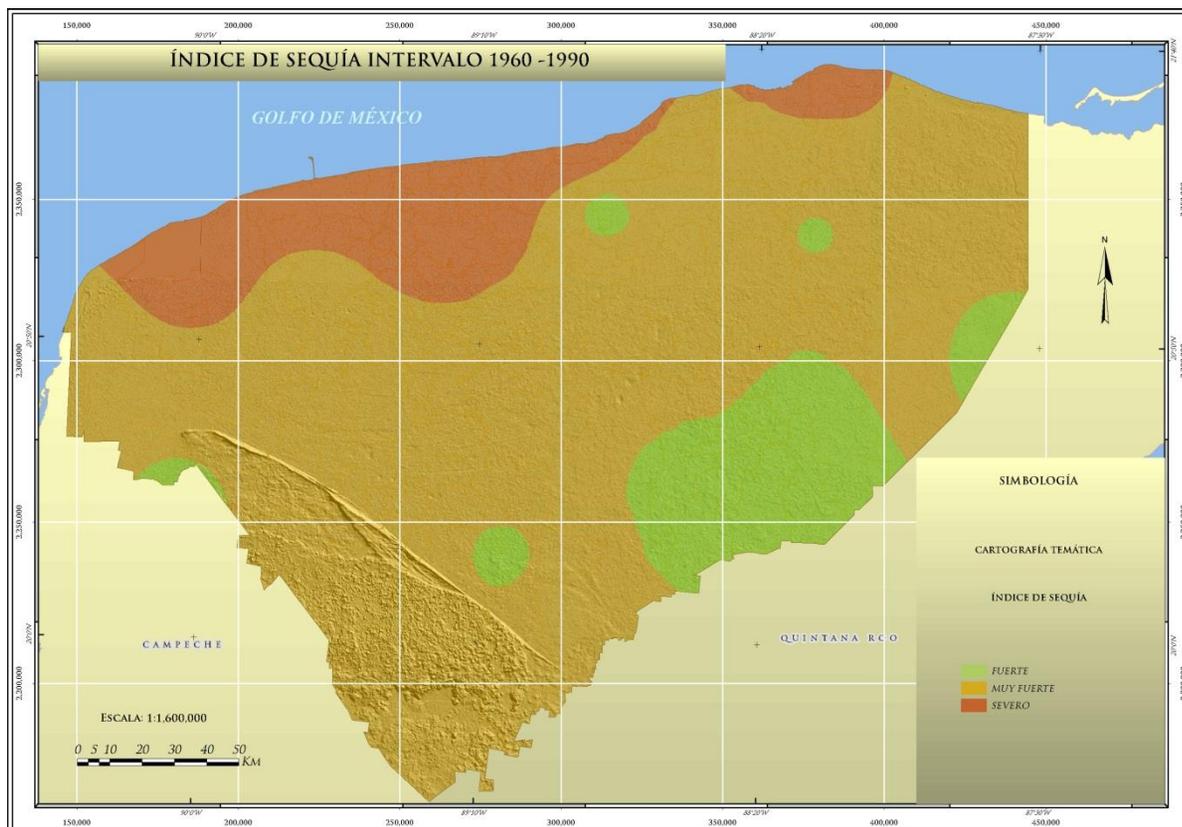


Figura 373. Comportamiento del índice de severidad de sequía, periodo 1960 - 1990, simplificado de IDW.

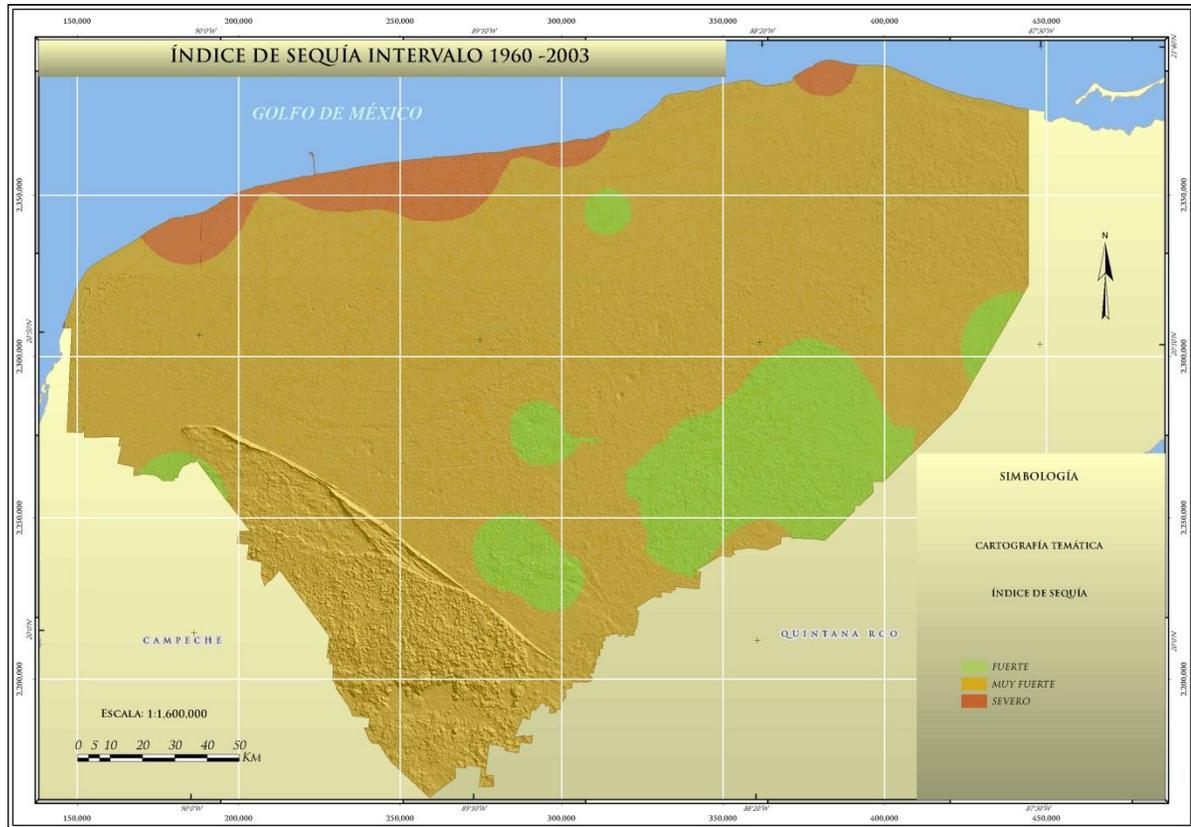


Figura 374. Comportamiento del índice de severidad de sequía, periodo 1960 - 2003, simplificado de IDW.

Tabla 195. Porcentaje de superficie expuesta a sequía meteorológica.

GRADO DE SEQUÍA METEOROLÓGICA	ÁREA EXPUESTA (%)	
	PERÍODO (1960-1990)	PERÍODO (1960-2003)
Fuerte	12.02	13.38
Muy Fuerte	75.25	82.14
Severo	12.71	4.47
TOTAL	100.00	100.00

Para un análisis un poco más detallado, se realizaron los mapas de cuatro décadas consecutivas, 1960-1970, 1970-1980, 1980-1990 y 1990-2000 (figuras 375, 376, 377 y 378), en los cuales puede constatare la tendencia a una disminución de la severidad en cuanto a déficit de precipitación, que es un reflejo de la variabilidad climática.

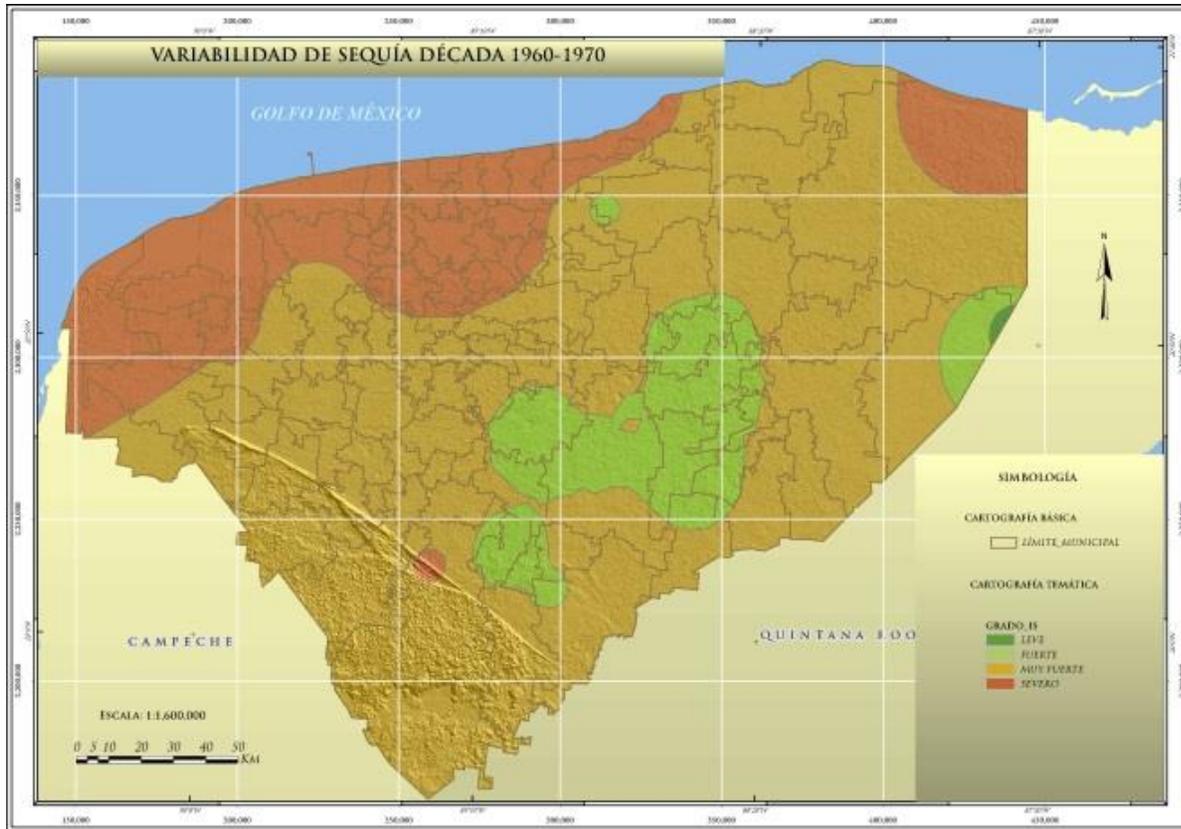


Figura 375. Severidad de sequía en cuanto a déficit de precipitación, década 1960-1970.

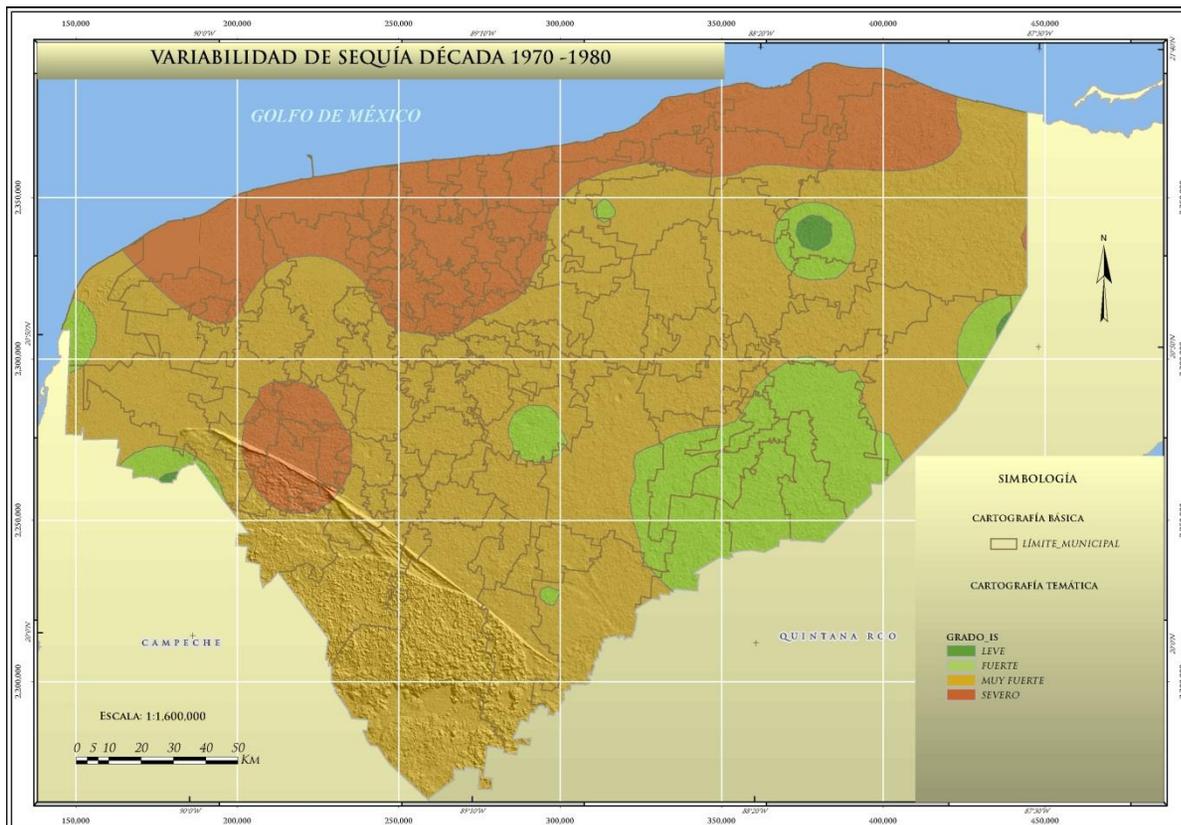


Figura 376. Severidad de sequía en cuanto a déficit de precipitación, década 1970-1980.

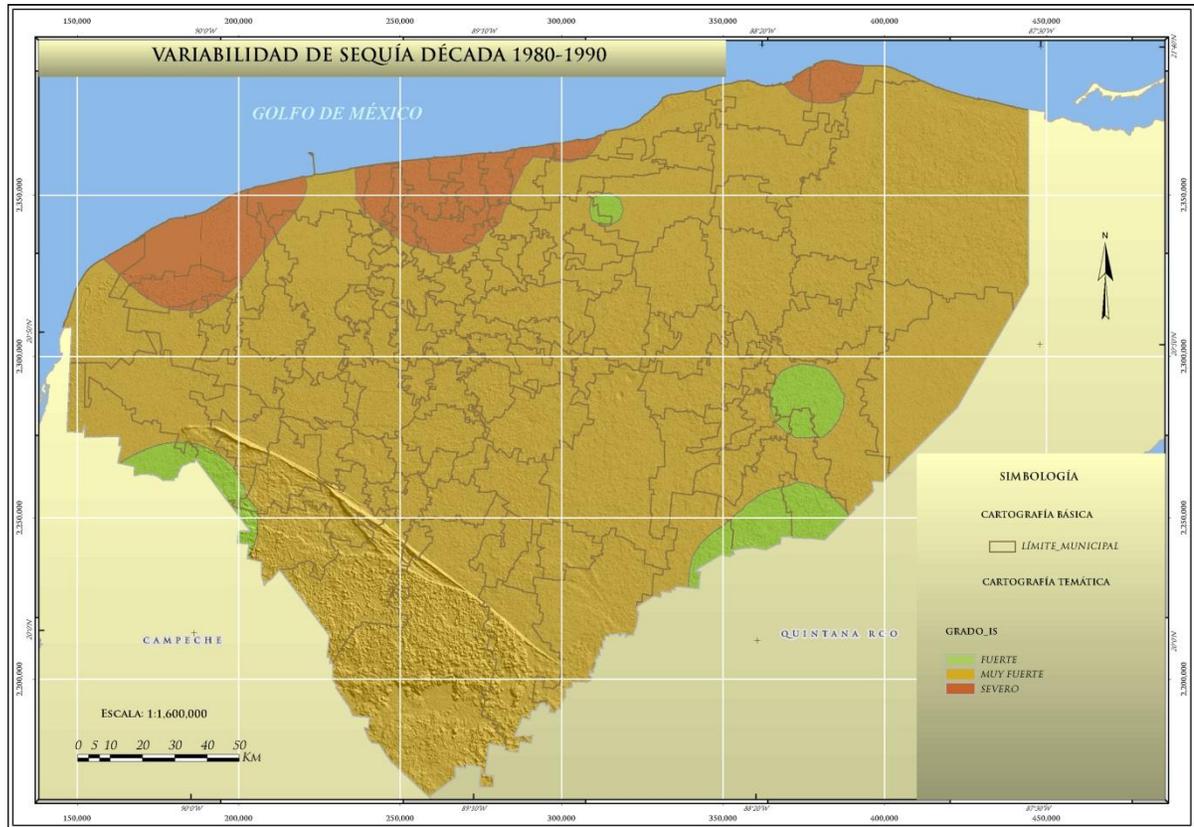


Figura 377. Severidad de sequía en cuanto a déficit de precipitación. década 1980-1990.

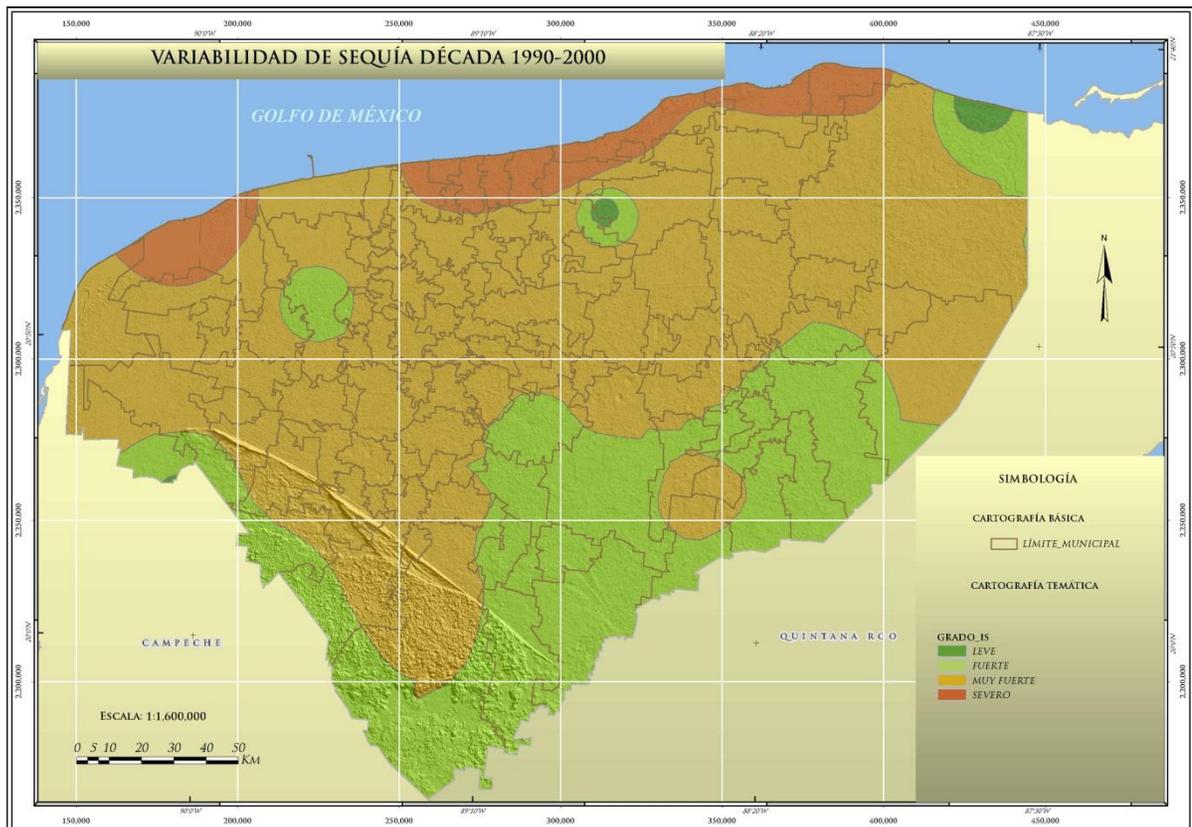


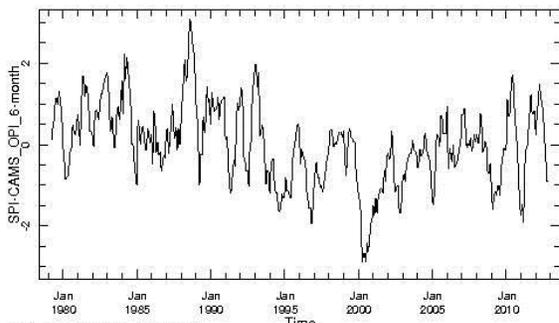
Figura 378. Severidad de sequía en cuanto a déficit de precipitación. década 1990-2000.

En la Tabla 196 se muestra la Variabilidad de sequía para la década 1960 a 1970 (Figura 13) y los municipios del estado de Yucatán afectados con el nivel de sequía meteorológica Severo, que es el grado mayor que abarca el Estado y que se encuentra en la zona Norte, Noroeste y Noreste, los niveles Leve, Fuerte y Muy Fuerte, se incluyen en la tabla completa de los anexos. Para las 3 figuras restantes se incluyen de la misma manera, éstas tablas donde figuran la totalidad de los municipios así como el grado de sequía o la variabilidad de la precipitación.

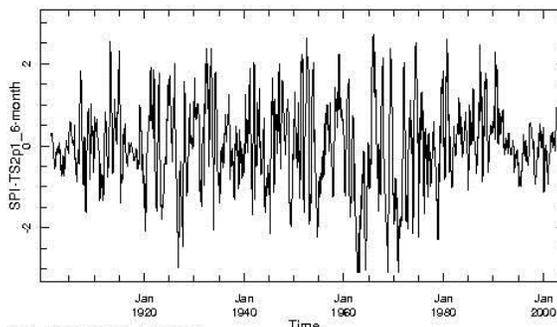
Tabla 196. Municipios afectados con índice de sequía Severa, década 1960-1970.

NOMBRE DEL MUNICIPIO	ÁREA Km ²	NOMBRE DEL MUNICIPIO	ÁREA Km ²
Akil	2.9	Muxupip	71.7
Baca	108.6	Progreso	430.7
Bokobá	71.7	Río Lagartos	12.4
Cacalchén	101.5	Samahil	158.7
Cansahcab	128.9	Seyé	14.5
Celestún	598.1	Sinanché	134.3
Chicxulub Pueblo	44.3	Suma	87.9
Chocholá	38.0	Tahmek	45.3
Conkal	63.4	Tekantó	75.5
Dzemul	174.2	Tekax	78.6
Dzidzantún	207.6	Telchac Pueblo	58.0
Dzilam De Bravo	280.1	Telchac Puerto	65.2
Dzilam González	214.8	Temax	37.8
Halachó	247.8	Tepakán	76.2
Hoctún	20.6	Tetiz	337.4
Hunucmá	841.0	Teya	72.6
Ixil	136.9	Tixkokob	170.7
Izamal	31.8	Tixpéhual	58.1
Kanasín	0.2	Tizimín	1094.1
Kinchil	356.5	Ucú	117.8
Maxcanú	368.1	Umán	55.0
Mérida	386.5	Yaxkukul	49.5
Mocochá	47.3	Yobaín	131.8
Motul	320.8		

Respecto los Índices de Precipitación Estandarizada (SPI) se presentan 2 gráficas obtenidas de la página del Instituto Internacional de Investigación de Clima y Sociedad (International Research Institute IRI, por sus siglas en inglés) para el estado de Yucatán, la primera comprende un rango de tiempo del año 1980 al año 2012 (Figura 379), la segunda para un periodo de tiempo largo, que va del año 1920 al 2000 (Figura 380).



Longitud 88.75W Latitude 21.25N
Figura 379. SPI periodo 1980-2012.



Longitud 88.75W Latitude 21.25N
Figura 380. SPI periodo 1920-2000

De acuerdo a las gráficas y a las configuraciones que en ellas se aprecian, se puede notar que entre los años 2005 y el 2008 hay una recuperación ascendente y ensanchamiento de la curva, descendiendo drásticamente durante el 2009, a finales de este mismo año se pone de manifiesto una tendencia positiva reiterándose la influencia de ciclones y tormentas tropicales relacionados con ondas del Este, en las áreas de mayor actividad o influencia de estas ondas se puede producir entre un 20 y 30% más de precipitación que en la Península de Yucatán se presentan entre Mayo y Noviembre (Figura 379).

Con lo que respecta a la gráfica de la figura 380, se puede observar que en el pasado, en las décadas que van de 1920 a 1980 hubo valores aún más críticos negativos, sin embargo, es clara una tendencia positiva a partir de 1980.

Una manera local de representar los Índices de Precipitación Estandarizada, se presenta en las gráficas de las figuras 381, 382 y 383 que pertenecen en particular a estaciones climatológicas de 3 municipios del estado de Yucatán: Mérida, Progreso y Valladolid respectivamente (Galván Ortiz, 2007).

En dichas gráficas pueden apreciarse los periodos secos, que corresponden a aquellos valores por debajo del umbral de -1. Para el municipio de Mérida se detecta un periodo seco en el año de 1944 aproximadamente, en Progreso se detectan dos periodos secos muy marcados para los años 1962 y 1970, y para el municipio de Valladolid se presenta un periodo marcado en el año de 1942 donde el nivel de SPI marca un valor de -4; clasificándose estos periodos como extremadamente secos.

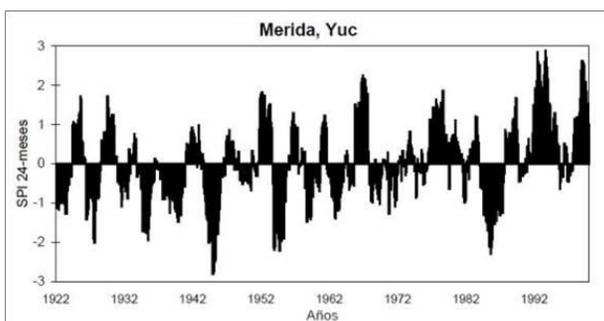


Figura 381. SPI estación Mérida Yuc.

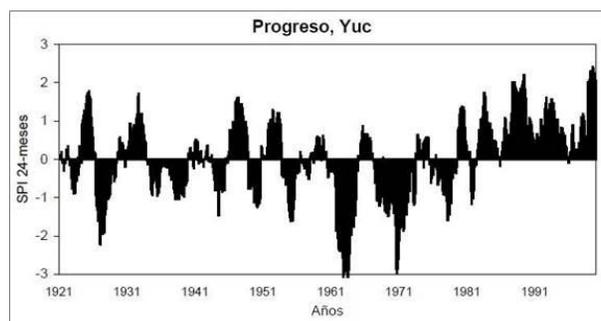


Figura 382. SPI estación Progreso, Yuc.

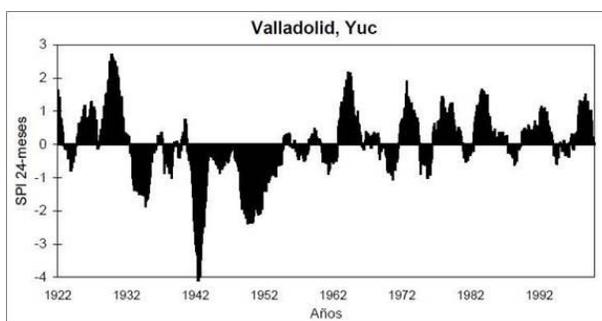


Figura 383. SPI estación Valladolid, Yuc.

De manera complementaria se muestra una secuencia de mapas obtenidos mediante una aplicación de la página web del *International Research Institute for Climate and Society* 2012, los cuales representan el comportamiento o análisis de la sequía con datos del SPI en la Península de Yucatán. Particularmente se seleccionaron los meses de Enero (Figura 384), Marzo (Figura 385), Junio (Figura 386), Septiembre (Figura 387) y Diciembre (Figura 388), con la finalidad de observar la evolución durante el año del 2012 pero incluso se tiene acceso a la secuencia completa mes por mes.

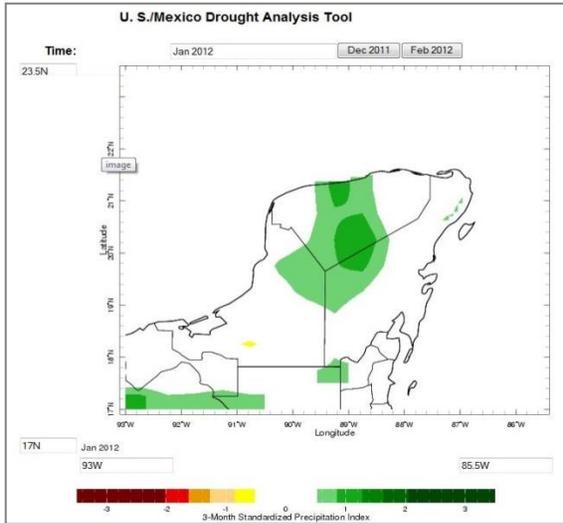


Figura 384. Mapa de SPI, Enero de 2012.

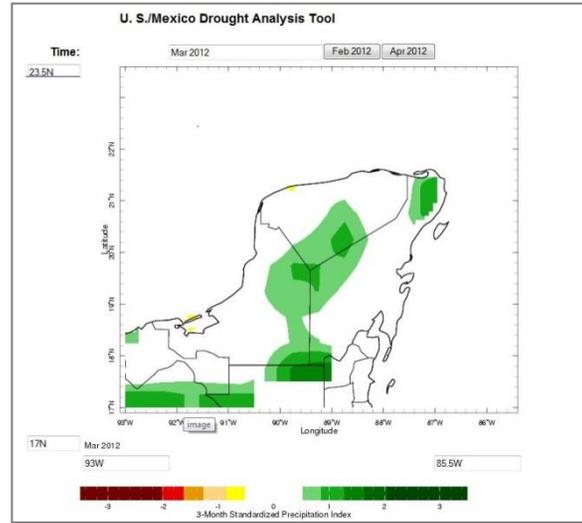


Figura 385. Mapa de SPI, Marzo de 2012.

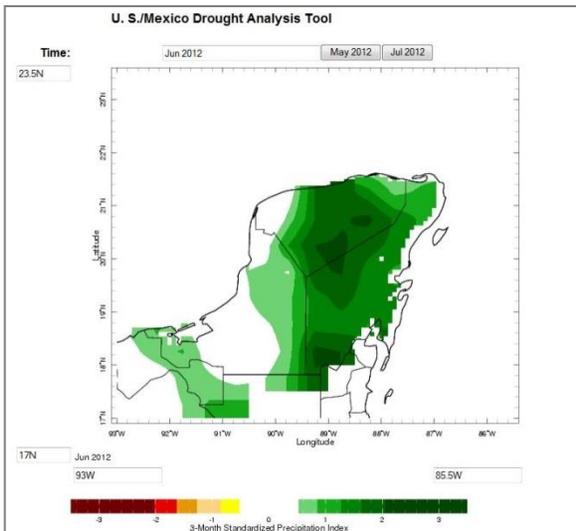


Figura 386. Mapa de SPI, Junio de 2012.

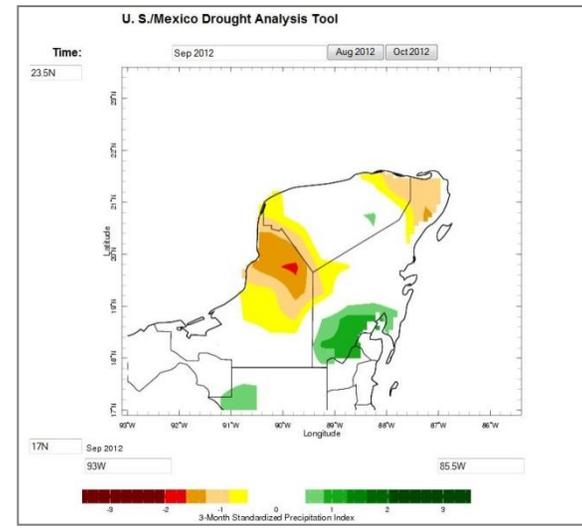


Figura 387. Mapa de SPI, Septiembre de 2012.

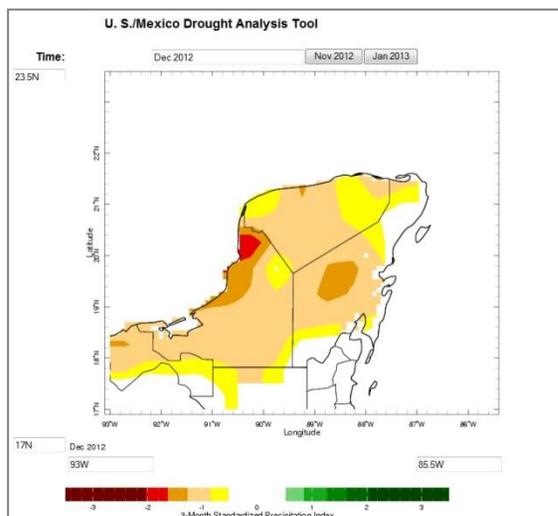


Figura 388. Mapa de SPI, Diciembre de 2012.

De la misma página mencionada en el párrafo anterior, se extrajo la gráfica que representa el SPI para el estado de Yucatán a partir del año 1979 hasta el 2012 (Figura 389), donde para este índice el Umbral o nivel de truncamiento de la sequía es de -1 y donde el 0 (cero) corresponde al valor medio del mismo, aplica tanto a climas secos como húmedos ya que se encuentra normalizado y fue diseñado para utilizarse en diversas escalas de tiempo, (Escalante, 2004). En la gráfica también es evidente apreciar la presencia o ausencia de precipitaciones, en determinados períodos de años, lo que nos permite hacer un análisis más detallado tomando como referencia lo observado el libro Análisis de Sequías de Sandoval y Reyes.

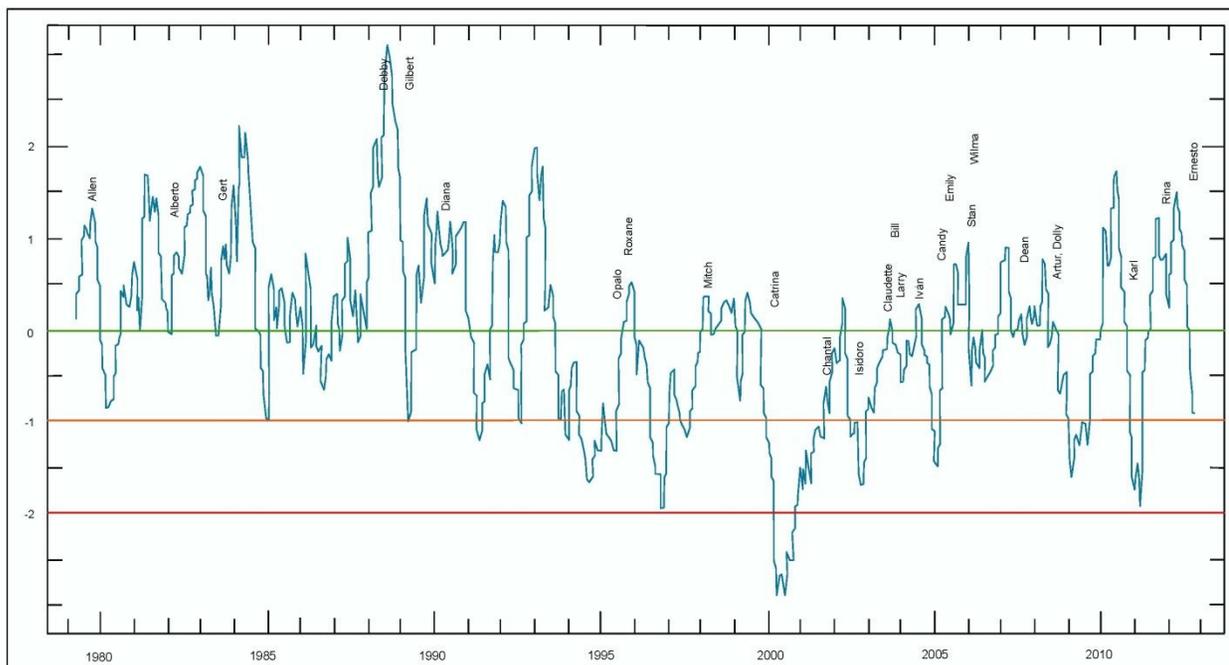


Figura 389. Gráfica a nivel estatal del SPI abarcando los años de 1979 al 2012.

Nótese que los valores positivos indican un superávit en el régimen de precipitación, a éste respecto, existe una relación evidente con procesos asociados a ciclones y tormentas tropicales, a partir de 1991 hasta el 2000 la tendencia de manera general es hacia menor humedad, sin embargo a partir de

este último año la precipitación comienza a recuperarse a consecuencia del evento meteorológico Chantal.

Según nota periodística en El Excelsior (2011), la Comisión Nacional del Agua delegación de Yucatán, reportó que entre noviembre del 2010 y mayo del 2011 sólo se registraron 126.8 milímetros de lluvia contra los 351.9 del mismo período anterior así, por lo que se observa, el comportamiento de la curva es marcadamente en ascenso, datos que cuadran muy acertadamente con la citada gráfica.

La Tabla 197, resume los datos aportados en la gráfica de SPI, por lo general los años en que no se presentaron sequías hubo algún meteoro o bien las precipitaciones registradas superaron a la precipitación media, cabe mencionar que se presentaron años secos, pero que no afectaron la temporada de lluvias o estacionalidad, solamente a las correspondientes a ese período de tiempo, incluso hubo eventos extraordinarios de precipitación en años con sequía.

Tabla 197. Resumen de los eventos registrados en la gráfica de SPI a nivel estatal.

ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADA (ISP)	PERIODO DEL EVENTO	DURACIÓN APROXIMADA	MES DE MÁXIMA SEQUÍA	ESTACIONALIDAD AFECTADA	EVENTO METEOROLÓGICO
-1	Nov 1984-ene 1985	3 meses	Nov-1984	No	
	Año 1986				Lluvias sobre la media
	Año 1987				Lluvias sobre la media
	Año 1988				Debby, Gilbert Y Keith
-1	Mzo. 1989	1 mes	May-1989		
	Año 1990				Diana
-1.2	Mzo. 1991-jul 1991	5 meses	Jun-1991	Si	
-1.1	Jun. 1992-jul-1992	2 meses	Ago-1992		
-1	Ago. Sep 1993		Ago-1993		
-1.2	Nov. Dic 1993		Nov-1993	No	Gert sep 1993
-1.6	Jun. 1994-feb-1995	9 meses	Ago-1994	Si	
-1.55	Abr. Jul-1995	4 meses	Jul-1995		Opal, Roxane oct 1995
-1.9	Jun. 1996-ene-1997	8 meses	Sep-1996		
-1.3	May.-sep. 1997	5 meses	Ago-1997		
	Año 1998			No	Mitch
	Año 1999				D. T. Katrina nov 1999
-2.9	Ene.-dic. 2000	12 meses	Marzo y julio 2000	Si	
-1.7	Ene.-jun. 2001	6 meses de intermitencia	Ene 2001		
-1.65	Jun.- sep. 2001	4 meses	Jun-2001		
-1.7	May.-nov. 2002	7 meses	Sep-2002		Isidoro nov 2002
	Año 2003			No	Bill, Claudette y Larry
	Año 2004				Ivan
	Año 2005				Cindy, Emily y Wilma, Stan
-1.5	Ene. 2005	1 mes	Ene-2005		
	Año 2006				Lluvias sobre la media
	Año 2007				Dean, Olga
	Año 2008				Artur y Dolly
-1.6	Ene. Sep 2009	9 meses	Ene-2009	Si	
	Año 2010			No	Karl sep 2010
-1.9	Nov. 2010-mzo. 2011	6 meses	Feb-2011		Rina oct 2011
	Año 2012				Ernesto ago 2012

Período de retorno.

En lo concerniente al período de retorno, según la frecuencia observada en la gráfica de la Figura 389, se infiere que éste es de 1.92 años que bien puede aproximarse a 2 años, es importante destacar

que la frecuencia no ha alcanzado dimensiones catastróficas para el estado de Yucatán. Para obtener el valor de 1.92 años se consideraron las sequías registradas en la gráfica, a partir del año 1980 al 2010 hubo la presencia de 15 sequías, la suma de la diferencia entre cada año que hubo sequía es de 29 años entre 15 da el resultado de 1.92 años. Se cuantificaron las 15 sequías a partir del valor -1 que es el umbral para el Índice de Precipitación Estandarizado, es decir los picos negativos de la gráfica.

Sin embargo, en la Comisión Nacional del Agua (CNA) para un periodo de 1941 a 1996 marcan la presencia de 12 sequías con una frecuencia de 4.7 años (SEIGE, 2012).

Sequía Intraestival o Canícula

En cuanto al tema de sequía intraestival, conocida también como sequía de medio verano o canícula, se tiene un escenario para el estado de Yucatán de acuerdo a los datos procesados en el año 2009 por el Dr. Roger Orellana Lanza con un escenario base de 1961 – 1990 (Figura 390). El evento, de acuerdo al investigador, tiene relación con una alteración en la actividad de los vientos alisios, expresado en el siguiente mapa que representa las zonas con los porcentajes de sequía intraestival.

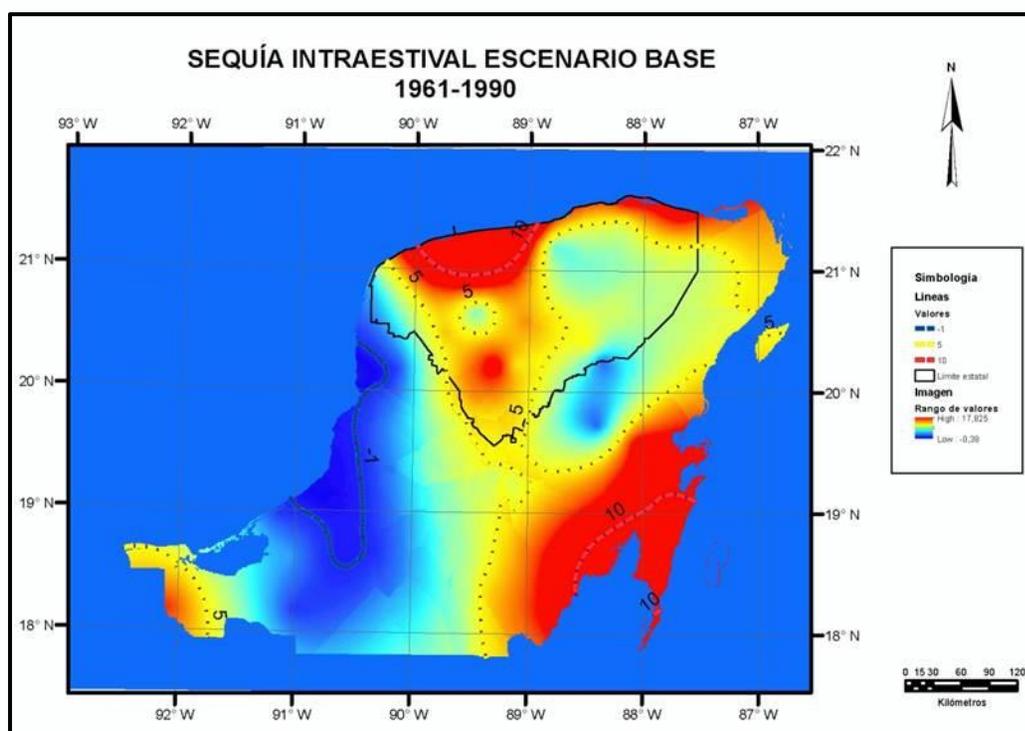


Figura 390. Sequía de medio verano o canícula, comprende un período entre 1961 y 1990. Tomado y modificado del Atlas, Escenarios de Cambio Climático en la Península de Yucatán, 2009.

La presencia de este fenómeno puede ubicarse entre el 15 de julio y el 15 de agosto sin dejar de causar estragos en los procesos productivos, en los ecosistemas y en el aspecto hidrológico.

Efectos en la salud por altas temperaturas

Durante los períodos que registran altas temperaturas y canícula severa se pueden presentar muertes por hipertermia, conocida como "**golpe de calor**". Los adultos mayores, niños muy pequeños, enfermos y obesos, son la población de más alto riesgo para las enfermedades derivadas de una ola de

calor. Las canículas son los más letales tipos de fenómenos meteorológicos. Entre 1992 y 2001, las muertes por excesivo calor, acompañado de la obesidad, mataron en EE.UU. a 2.190 habitantes, comparado con las 880 muertes por inundación y 150 de los huracanes.

Por definición el golpe de calor o GC, es una condición física del cuerpo humano en que la temperatura excede los 41 °C, debido a que los mecanismos homeostáticos no entran en función, lo cual significa que los procesos biológicos que regulan la temperatura fallan, siendo incapaces de disipar la acumulación del calor corporal desencadenando en casos extremos la muerte del individuo, por tanto el GC es considerado como una urgencia médica. Un evento en que la temperatura ambiental llega a valores de 39 a 40°C o superiores a estos, y las condiciones de salud no son las idóneas para soportar dicho evento, existe la posibilidad de que un individuo sea candidato a sucumbir ante estas circunstancias, exponiéndose a valores elevados de temperatura. Una persona que se somete a una actividad física intensa, caso de atletas o personas con empleos que implican esfuerzo físico a la intemperie, por ejemplo albañiles, individuos que se dedican a faenas del campo, trabajadores de fundiciones, vidrieras, tortillerías, son proclives a caer ante una situación adversa que expone su vida de manera definitiva.

Los Servicios de Salud de Yucatán en sus reportes que van del 2000 al 2008, no refieren al GC como causa de morbilidad, tampoco figura en las principales causas de mortalidad, sin embargo al parecer este tipo de eventos son silenciosos o se les otorga poca difusión en los registros no obstante el fenómeno ocurre, en el año de 1998 se publicó el estudio y análisis de un caso clínico, en el cual un joven de 20 años pereció a consecuencia de un GC después de participar en un evento de atletismo. El día 4 de mayo del 2012 al norte del estado de Yucatán, en Telchac Pueblo, pierde la vida un anciano agricultor de 72 años de edad, por un infarto al corazón, derivado de un GC, cuando se encontraba laborando en el campo sin tener la oportunidad de recibir atención médica debido a que no había quién lo auxiliara. El no figurar en las estadísticas este tipo de infortunios, hace pensar que se trata de casos aislados, sin embargo, en lugares remotos sin acceso a transporte ni comunicación pueden ser escenarios de más incidentes que en última instancia no han sido objeto de registro oficial o nota periodística.

De acuerdo con datos del Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica SINAVE que depende de la Secretaría de Salud, para la temporada de calor 2011-2012, no figura un solo dato por decesos provocados por golpe de calor o de agotamiento por calor en el estado de Yucatán, como puede observarse en la Tabla 198, debiera estar al menos uno, el caso de Telchac Pueblo.

Tabla 198. Cuadro comparativo de defunciones por temperaturas extremas, Temporadas de Calor 2011-2012.

ENTIDAD	GOLPE DE CALOR		AGOTAMIENTO POR CALOR		TOTAL	
	2011	2012	2011	2012	2011	2012
	DEFUNCIONES	DEFUNCIONES	DEFUNCIONES	DEFUNCIONES	DEFUNCIONES	DEFUNCIONES
Baja California	0	3	0	0	0	3
Chihuahua	0	1	0	0	0	1
San Luis Potosí	2	1	1	0	3	1
Sonora	0	9	0	1	0	10
Yucatán	0	0	0	0	0	0
NACIONAL	2	14	1	1	3	15

Para la temporada de calor 2012, el SINAVE reporta dos casos de golpe de calor y uno por quemadura solar, (Tabla 199), a nivel nacional se tiene la siguiente distribución de casos, 208 casos de agotamiento por calor que corresponde al 68.9%, 88 casos por golpe de calor que es el 29.1% y 6 casos por quemadura solar que representa el 2.0%.

Tabla 199. Casos notificados del 29 de Marzo al 11 de Octubre de 2012.

ENTIDAD	GOLPE DE CALOR	AGOTAMIENTO POR CALOR	QUEMADURA SOLAR	TOTAL
Baja California	18	4	0	22
Coahuila	1	0	0	1
Chihuahua	6	5	5	16
Hidalgo	1	0	0	1
San Luis Potosí	1	6	0	7
Sonora	58	191	0	249
Tamaulipas	0	2	0	2
Veracruz	1	0	0	1
Yucatán	2	0	1	3
NACIONAL	88	208	6	302

Debido a que en toda la extensión geográfica del estado de Yucatán alcanza valores de temperatura superiores a los 40 °C, llegando hasta los 46.5°C, por tanto hay un amplio margen de posibilidades de que se presenten daños severos a personas e incluso la muerte si no son atendidos oportunamente. Existe muy poca difusión y la información es escasa respecto al GC tanto en los medios locales como de las fuentes oficiales, probablemente por ser muy esporádica la presencia de éste.

VIII.2.7. Descripción e interpretación de datos tomados en campo

Para poder complementar y corroborar un poco más la información sobre este tema, de manera general, se hizo la prospección de campo, con la finalidad de poder observar algún elemento que pusiera de manifiesto los efectos de sequía en el Estado, ya que en los mapas realizados con lo que respecta a sequía meteorológica se muestra evidencia del fenómeno en las porciones norte y noreste del Estado. De acuerdo a lo observado en campo, este fenómeno no es tan evidente, probablemente porque el déficit de lluvia no ha sido tan intenso y recuérdese que los efectos son en un principio imperceptibles. Cabe señalar, que buena parte de la región norte ha perdido su condición natural de selva baja principalmente debido a modificaciones antrópicas asociadas a la agricultura, la cual es básicamente de temporal (Fotografías 237,238 y 239).



Fotografía 237. Vista aérea que muestra evidencia sobre la deforestación.



Fotografía 238. Preparación de suelo con fines agrícolas.



Fotografía 239. Agricultura de temporal.

Por otra parte, el decrecimiento de la producción se debe fundamentalmente al deterioro del suelo aunado a que en esa zona se encuentran los suelos menos profundos, además la deforestación como es sabido provoca que disminuya la evapotranspiración y por lo tanto las precipitaciones, afectando el balance hídrico, desencadenando en consecuencia un aumento en el déficit hídrico. (Fotografía 240).



Fotografía 240. Suelo con poco espesor.

VIII.8. Incendios Forestales

Los incendios forestales van a la alza en todo el planeta. Los efectos del cambio climático global, están implicando en diversas regiones sequías más severas y duraderas, condiciones que incrementan la probabilidad de incendio. (Rodríguez *et al*, 2011) Los ecosistemas forestales en México son afectados por varios factores sin embargo, existe uno que provoca cambios a nivel ecológico, social, político y económico, en un tiempo muy corto. Este factor es el fuego y debe entenderse como un elemento más de los ecosistemas forestales (Flores, 2009). el fuego también es un factor ecológico crucial para mantener la composición, estructura y otros procesos en una gran cantidad de ecosistemas forestales nacionales. De 32 tipos de vegetación señalados para México, 16 presentan un régimen de incendios de frecuentes y superficiales, poco intensos a relativamente frecuentes e intensos de copas. Asimismo, 40% de la superficie con vegetación en el país, corresponde con este tipo de ecosistemas que requieren el fuego. Tal es el caso de pinares, encinares, pastizales, muchos matorrales, sabanas, tulares y popales. La otra mitad de tipos de vegetación incluye tipos sensibles al fuego o influenciados por éste, incluso independientes, comprendiendo selvas altas, medianas y bajas, bosques de galería y de oyamel, así como otros matorrales (Rodríguez, 2008 en Rodríguez *et al*, 2011).

Los incendios forestales son un fenómeno importante ya que en poco tiempo pueden afectar a grandes extensiones de bosque (Flores y Benavides, 1994 en Flores, 2009) causando pérdidas económicas de biodiversidad y en ocasiones, humanas. Ocurren más frecuentemente durante los meses de verano que es cuando la maleza está seca y las llamas pueden moverse descontroladamente por toda el área forestal. En México al menos el 80% de la superficie cubierta por bosques es sometida a incendios periódicos provocados por el hombre (Rodríguez y Fulé, 2003 en Flores, 2009). Asimismo, datos obtenidos en 1994, establecen que entre 1970 y 1994 ocurrieron en promedio, 6083 incendios que afectaron a una superficie de 197,296 ha, en promedio (CONAFOR en Flores 2009)

Se sabe que muchos incendios forestales son causados intencionalmente bajo condiciones controladas, esa medida se hace con objetos silvícolas o para disminuir el riesgo de incendios sin control. De todas formas se estima que la mayoría de los incendios forestales son causados por el hombre ya sea de forma directa o indirecta. Solamente un 10% de los incendios forestales son naturales, causados por relámpagos y rayos.

Predecir y hacer un seguimiento del comportamiento de los incendios forestales es una actividad importante para identificar las áreas que pueden verse afectadas, teniendo así un buen manejo del fuego, pudiendo así determinar la susceptibilidad, peligro o riesgo relacionado a incendios forestales.

VIII.8.1. Conceptos Básicos

El inicio de un incendio forestal está condicionado a la presencia de una fuente de ignición, ya sea esta natural o antrópica. Diversos factores ambientales condicionan la ocurrencia de un incendio: las características de la vegetación, la meteorología, como así también la topografía, serán factores determinantes del posterior comportamiento del fuego.

Al referirse a incendios forestales, es necesario tomar en cuenta algunos conceptos básicos, así como los factores que influyen en el comportamiento de este fenómeno.

Por su magnitud y destructividad los incendios se pueden clasificar en:

- a) **Fuego:** Reacción química que consiste en la oxidación violenta de la materia combustible; se manifiesta con desprendimientos de luz, calor, humos y gases en grandes cantidades.
- b) **Incendio:** Fuego no controlado de grandes proporciones, que puede presentarse en

forma súbita, gradual o instantánea, al que le siguen daños materiales que posiblemente interrumpen el proceso de producción, ocasionen lesiones o pérdidas de vidas humanas y deterioren el ambiente.

- c) **Incendio Urbano:** Siniestro en el cual ocurre la destrucción total o parcial de instalaciones, casas o edificios, en los cuales existe una concentración de asentamientos humanos, ya sea dentro de ellos o en sus alrededores.
- d) **Incendio Forestal:** Siniestro que se presenta en aquellas áreas cubiertas de vegetación (árboles, pastizales, malezas, matorrales) y en general, en cualesquiera de los diferentes tipos de asociaciones vegetales, principalmente con suficiente material combustible y una fuente de calor para iniciar el fenómeno.
- e) **Combustión espontánea:** Es producto de la transformación y/o descomposición orgánica de algunos compuestos químicos, es una reacción exotérmica o bien un sobre calentamiento gradual, que tiene como consecuencia la aparición del fuego.

El incendio forestal se produce cuando el fuego (calor) afecta los combustibles vegetales naturales, cuya quema no estaba prevista, lo que obliga a intentar su extinción. Por lo tanto, para que se genere un incendio se necesitan 3 elementos: calor, oxígeno y combustibles, que constituyen el llamado triángulo del fuego (Figura 391).

1. Oxígeno (agente oxidante)
2. Calor (agente catalítico) Que puede propagarse por conducción, convección y radiación
3. Combustible (agente reductos) Que puede ser de tipo vegetal, químico o cualquier otro, susceptible de encenderse.



Figura 391. Triángulo del fuego.

Combustión: Es la reacción química que surge de un proceso al combinar combustibles, oxígeno y una temperatura de ignición. La reacción modifica la composición del material, consume el oxígeno y genera altas temperaturas, que encienden nuevos materiales.

Ignición: Es el efecto de iniciar la combustión en un cuerpo.

VII.1.1.1. Factores que intervienen en el comportamiento del fuego

Una vez que un incendio forestal se ha iniciado, el comportamiento del fuego está determinado por tres factores: topografía, tiempo atmosférico (meteorología) y combustibles. A estos tres factores se les conoce como la gran triada. (Figura 392).

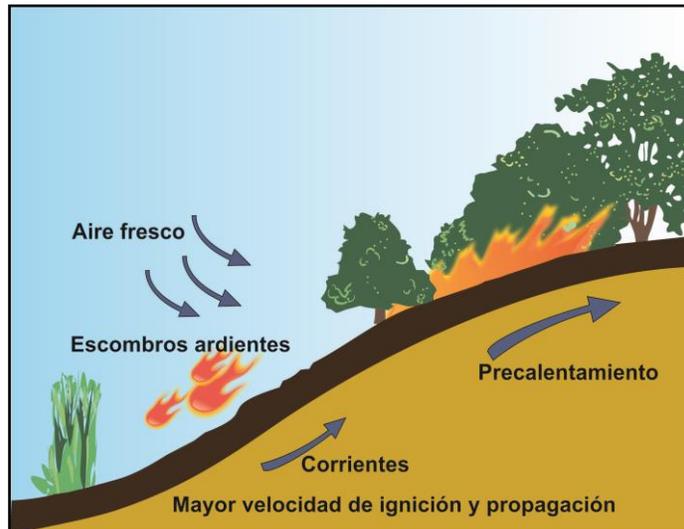


Figura 392. La gran triada de incendios.

Topografía

Se le define como la configuración de la superficie terrestre.

Analizar la topografía es sumamente importante por su capacidad de modificar a los otros 2 componentes de la gran triada. Los factores topográficos que influyen en el comportamiento de los incendios son:

a) *Pendiente o inclinación del terreno.* Afecta directamente la propagación del incendio de la manera siguiente:

- La propagación se acelera por estar los combustibles más cerca de las llamas; la fase de precalentamiento incrementa la tasa de combustión y por lo tanto se acelera la velocidad de avance del fuego.
- La forma que adopta el incendio es influida por la pendiente. Ejerce una forma similar a la del viento.
- Las pavesas rodantes son más frecuentes en las pendientes mayores; así se pueden originar incendios secundarios.

b) *Altitud o elevación.* Afecta también el comportamiento de los incendios. Un incendio en una montaña u otra prominencia define 3 zonas, en cada una de las cuales la evolución del fuego muestra características distintas.

c) *Exposición.* Es la orientación de una ladera con respecto al sol. Puede ser hacia cualquiera de los puntos cardinales. Para el caso de México la exposición hacia el sur recibe mayor cantidad de luz y calor del sol; por lo tanto en esos flancos las temperaturas son las más altas, menor humedad relativa y los combustibles más ligeros y secos.

d) *Configuración.* Es el aspecto de la superficie del terreno (plano, ondulado o

escarpado); es importante porque afecta la propagación del fuego y por consiguiente la resistencia a su control.

Tiempo atmosférico

Es el factor más variable y de mayor influencia en el desarrollo de un incendio. Por tanto, es fundamental disponer de observaciones y efectuar pronósticos meteorológicos. Sus elementos son: temperatura, humedad relativa y viento.

a) *Temperatura*. El sol calienta los combustibles y las capas de aire inmediatas al suelo; el viento caliente extrae humedad de los combustibles y eleva la temperatura hasta el punto en que puede predisponer fácilmente a la ignición. Esta temperatura es la que un cuerpo requiere para iniciar su encendido y continuar ardiendo sin aplicar otra fuente de calor. Combustibles diferentes tienen diversas temperaturas de ignición.

b) *Humedad relativa*. Es la cantidad real de vapor de agua contenida en el aire; se expresa en porcentaje.

Los combustibles tienen la propiedad de absorber o de expeler humedad; por consiguiente, a mayor humedad relativa los combustibles están más húmedos y la propagación de los incendios se dificulta. En México se considera que cuando la humedad relativa en el ecosistema es menor a 30% es propicia para el desarrollo de los incendios forestales. Este porcentaje es medido por el personal combatiente de incendios, con estuches meteorológicos portátiles, ya sean manuales o electrónicos.

c) *Viento*. Este factor cambia más frecuente y violentamente, en cualquier dirección; puede propiciar emisión de pavesas que originen nuevos brotes de fuego.

El viento es aire en movimiento que obedece a cambios de temperatura (el aire caliente tiende a subir; el aire frío tiende a bajar). En áreas de combustibles homogéneos el viento rige la dirección del fuego y determina la configuración del incendio.

Combustibles

El combustible es el factor principal que determina si se inicia o no un incendio, la dificultad de controlarlo y la posibilidad de comportamiento extremo o irregular. Las características de los combustibles que determinan lo anterior son:

1. *Cantidad*. Mientras más combustible se tenga en un área forestal más fuerte es el incendio (*se mide en kg/m o en ton/ha*).
2. *Tamaño o textura*. Para evaluar la influencia del tamaño del combustible en el comportamiento del incendio, es importante saber la cantidad de masa existente en cada categoría según sus dimensiones:
 - *Finos o ligeros (menor a 5 mm de diámetro)*: hojarasca, pasto (hierbas, flores), capa en descomposición, acículas (agujas) de pino, etc.
 - *Regulares (de 5 a 25 mm de diámetro)*: ramitas, tallos pequeños (*arbustos y matorrales*).
 - *Medianos (de 25 a 75 mm de diámetro)*: ramas.
 - *Gruesos o pesados (mayor de 75 mm de diámetro)*: fustes, tocones, troncos, ramas gruesas, etc.
3. *Compactación*. Afecta la tasa de secamiento. Mientras haya más espacio o aire entre los combustibles, se secan más rápidamente y el incendio se propaga con mayor velocidad.
4. *Continuidad horizontal*. Es la distribución de los combustibles en la superficie, lateralmente; si están repartidos de manera uniforme, el fuego se propaga sin barreras, y viceversa.

5. *Continuidad vertical.* Se refiere a la distribución de los combustibles en el plano vertical; es decir, en escalera; ésta continuidad influye en la posibilidad de que un incendio superficial se convierta en uno de copa.
6. *Densidad de la madera.* Es muy importante analizar si la madera es suave, por ejemplo troncos y tocones podridos, que fácilmente se encienden y pueden producir pavesas que generen focos secundarios.
7. *Sustancias químicas.* Algunos combustibles tienen compuestos químicos como aceite, cera, resina, etc.; mientras más alto sea el contenido de estas materias, mayores son la intensidad del fuego y la velocidad de propagación, y en consecuencia se tienen mayores problemas para lograr el control de los incendios.
8. *Humedad.* Al evaluar los combustibles, éste es quizá el factor más importante, pues influye en la posibilidad de que se inicie o no un incendio y en su propagación.

En cualquier incendio forestal, es muy importante conocer la velocidad con que este se propaga y que se necesita para controlarlo (Tabla 200), por lo que es muy importante tener claros los siguientes conceptos:

a) Velocidad de propagación

Es la tasa de incremento de un incendio, se refiere a:

Propagación lineal. Se determina por el avance lineal en una sola dirección. Es importante conocerla porque permite estimar el tiempo que tardará el incendio en alcanzar recursos amenazados: casas, bosques y otros valores. Se expresa en metros por minuto o en kilómetros por hora.

Propagación perimetral. Significa el incremento del contorno del incendio. Se emplea para calcular la longitud de la brecha de control que se necesita abrir. Se determina también en metros por minuto, o en kilómetros por hora.

Propagación superficial. Es el área afectada, en hectáreas por hora; permite evaluar el ritmo del daño.

Tabla 200. Velocidades de propagación.

COMBUSTIBLE	BAJO (M/MIN)	MEDIO (M/MIN)	ALTO (M/MIN)
Pastizal Velocidad de viento Baja	0 - 10	10 - 25	25 -
Pastizal Velocidad de viento Alta	0 - 25	25 - 50	50 -
Desechos de Aprovechamiento Velocidad de viento Baja	0 - 5	5 - 7	7 -
Desechos de Aprovechamiento Velocidad de viento Alta	0 - 5	5 - 10	10 -
Promedio	0 - 11	11 - 23	23 -

Fuente CENAPRED, 2008

Formas de incendio controlado

Es un aspecto importante que debe considerarse al decidir la táctica y el método de combate por emplear.

- a) *Circular.* Ocurre en terreno plano, sin viento y con vegetación homogénea.
- b) *Elíptica.* Se presenta en terreno plano, con viento en una sola dirección o terreno inclinado, con o sin viento.
- c) *Compleja o irregular.* Es influida por viento errático, por topografía accidentada y con combustibles de diferentes tipos. (Figura 393).

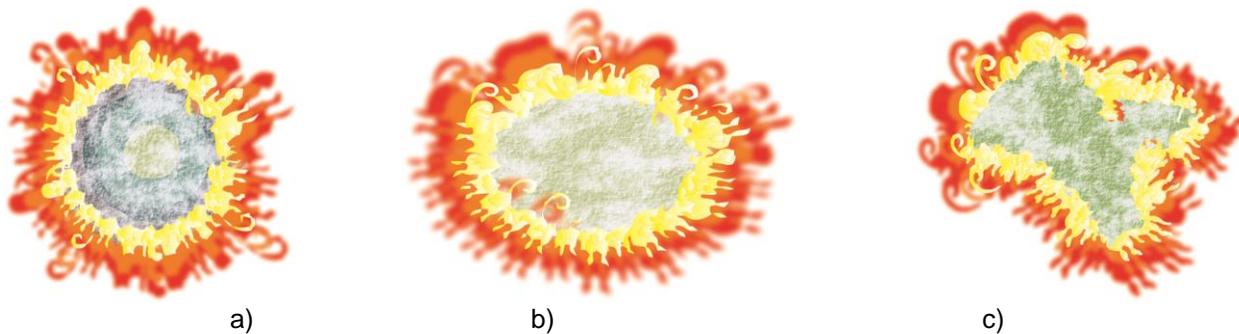


Figura 393. Formas de Incendio controlado

b) *Dinamismo de la columna de convección*

El grado de desarrollo de una columna convectiva es buen indicio para seleccionar tácticas y métodos de combate para lograr el control. En cada incendio emerge una de las dos columnas convectivas siguientes:

Columna plana o bidimensional. Es de poca altura. Se caracteriza porque la propagación es previsible si se conocen los vientos; normalmente no hay dificultad para lograr el control del incendio.

Columna volumétrica o tridimensional. De gran altura, la propagación es casi imprevisible y/o muy errática; debido a que la fuerza del incendio es mayor que la del viento, frecuentemente surgen remolinos, se emiten numerosas pavesas en varias direcciones; en consecuencia el control del incendio se torna crítico.

Es importante reconocer las características del terreno, pues el desarrollo de una columna tridimensional implica un incendio cuyas condiciones de propagación son graves y extremas.

c) *Resistencia al control*

Es la dificultad de evitar el avance de un incendio. La determinan las características de los combustibles: altitud, exposición, pendiente, viento, humedad y temperatura. A continuación se presenta una clasificación convencional de resistencia al control, según las circunstancias siguientes:

- *Baja.* Pastos en diversas condiciones de terreno, y viento en una sola dirección, de poca intensidad.
- *Mediana.* Pastos, viento fuerte, arbustos en terreno plano, plantaciones sujetas a un programa de manejo, y el incendio es del tipo superficial.
- *Alta.* Vegetación densa, arbustivo en terreno plano e inclinado, de pendiente mediana.
- *Extrema.* Se afectan desechos de aprovechamientos, con diversos tipos de combustibles, en pendientes pronunciadas y acción de vientos erráticos, muy fuertes y con mucha variación. (CENAPRED, 2008)

VII.1.1.2. Tipos de incendios

Están determinados básicamente por los combustibles. Se conocen tres tipos de incendios (Figura 394).

Incendio de copa, de corona o aéreo. Afecta gravemente a los ecosistemas, pues destruye a toda la vegetación y en grados diversos daña a la fauna silvestre.

Incendio superficial. Daña principalmente pastizales y vegetación herbácea que se encuentra entre la superficie terrestre y hasta 1.5 metros de altura. Deteriora en gran medida la regeneración natural y la reforestación. En México es el más frecuente (poco más del 90%).

Incendio subterráneo. Se propaga bajo la superficie del terreno; afecta las raíces y la materia orgánica acumulada en grandes afloramientos de roca. Se caracteriza por no generar llamas y por poco humo.

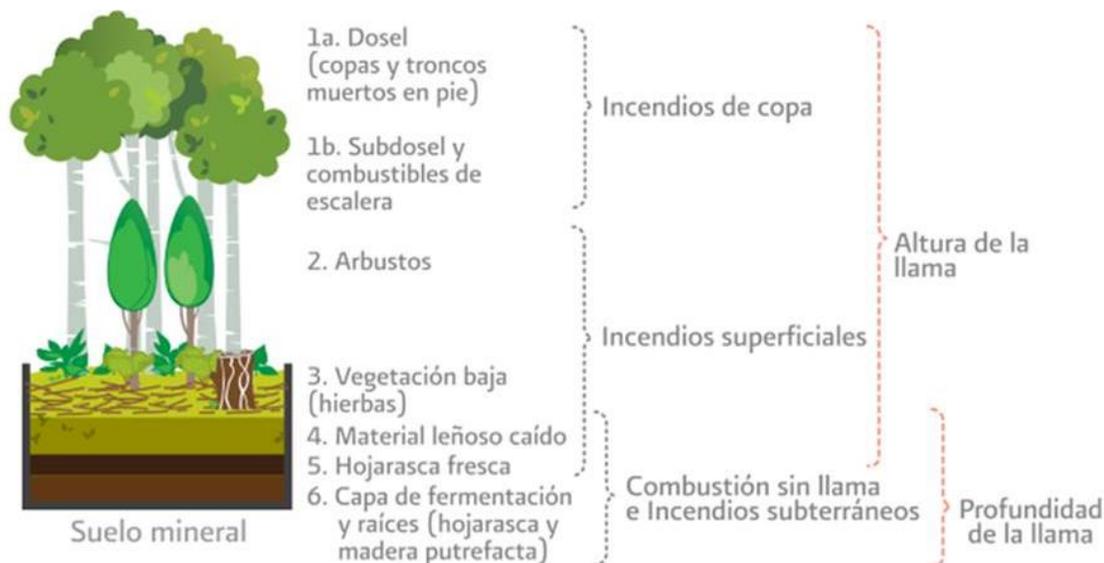


Figura 394. Tipos de incendios por tipo de combustible de comunidad vegetal (Morfin-Ríos et al., 2012).

Para el caso que nos ocupa en el estado de Yucatán abordaremos únicamente los superficiales, ya que por sus características de la región como planicie y selva tropical y las del entorno como son los vientos dominantes del este y las altas temperaturas son los que tienden a originarse tanto de forma natural como inducida por el ser humano. Dentro de los superficiales, se tiende a clasificar el evento como incendios de la Cobertura Vegetal ya que se entiende como cobertura a toda la vegetación de la Selva Tropical y Subtropical (Flores, 2009).

Los Incendios de la Cobertura Vegetal (IVC)

Pueden ser considerados como perturbaciones ecológicas de efectos discretos o difusos, graves o destructivos, producidos por fuego de origen natural o antrópico, cuya dinámica responde fundamentalmente a la concurrencia simultánea de tres o más condiciones en un mismo sitio (tipo de vegetación, cantidad de combustible, oxígeno, condiciones humanas, humedad, topografía entre otras), los cuales se desarrollan sin control ni límites preestablecidos sobre terrenos con alguna clase de cobertura vegetal (nativa, cultivada o inducida) utilizando como fuente de combustible la vegetación viva o muerta y, por el riesgo que presenta para los sistemas naturales o sociales, deben prevenirse o extinguirse (Parra, 2011).

Índice de Cobertura Vegetal (ICV)

Es una relación espacial en arquitectura de información que plantea reconocer y estructurar la representatividad de las coberturas vegetales y los cambios en la estructura y composición de las formaciones vegetales mediante el análisis espacial, como primera medida y/o herramienta de juicio para realizar posteriores análisis de conectividad entre las coberturas que permitan conocer áreas que puedan ser impactadas por incendios forestales.

El ICV no es un fenómeno nuevo en la historia de la tierra ni sus impactos siempre son negativos. El problema surge cuando su recurrencia supera la capacidad de resiliencia de los ecosistemas y altera de manera irreversible procesos naturales que sirven de base para la producción de bienes y servicios ambientales. Podría afirmarse que hoy el fenómeno es la expresión de la degradación de los regímenes naturales del fuego en la mayor parte de los ecosistemas terrestres. Infortunadamente, durante décadas prevaleció en el imaginario de los estados, los gobiernos y del público en general de los distintos países una visión basada en supuestos equivocados como los siguientes: a) considerar los incendios de la cobertura vegetal como un fenómeno de origen fundamental natural y de impactos locales restringidos a la vegetación, b) sobre dimensionar la capacidad de la naturaleza para restaurar los ecosistemas afectados hasta llevarlos de nuevo a sus

puntos de partida, y c) considerar que la conservación de las coberturas vegetales constituía una pérdida de oportunidades para el desarrollo frente a otras opciones como la ganadería y la agricultura. Sin embargo, el incremento de la problemática en frecuencia, magnitud e impacto a partir de los (ICV) afectan casi todas las ecorregiones de la tierra, y en los trópicos y subtrópicos se presentan con mayor frecuencia (OIMT, 1997; Cochrane, 2003) debido principalmente al descontrol del fuego usado con propósitos agrícolas y pecuarios por los productores y comunidades rurales en ambientes con condiciones meteorológicas favorables para su propagación.

El conocimiento del complejo de combustibles en los ecosistemas forestales es un aspecto de fundamental importancia para el éxito de las acciones de manejo del fuego y es importante también para la aplicación de medidas de mitigación del cambio climático y adaptación a este (Morfin-Ríos *et al.*, 2012).

Ahora bien, por su condición biológica, los combustibles pueden dividirse en

a) Vivos, es decir son hierbas, arbustos y árboles, o plantas que se encuentran por debajo de su dosel y la velocidad de propagación del fuego sobre plantas vivas depende de su humedad, con lo que pueden retardarla;

b) Muertos que comprende troncos, las ramas y las hojas que normalmente se encuentran sobre el suelo, su cantidad y posición generalmente determinan su inflamabilidad y qué tan fácil puede iniciarse y dispersarse el fuego. La hojarasca es la más importante ya que generalmente es muy inflamable porque en periodos secos su humedad desciende rápidamente muchos incendios superficiales comienzan por este combustible

La condición biológica determina la carga combustible. Esta es el peso seco total, llamado biomasa de combustible por unidad de área o superficie. La Carga de Combustible forestal es toda biomasa que potencialmente puede arder al ser expuesta a una fuente de calor, cuanto mayor sea la acumulación de combustibles en una zona, mayor cantidad de calor podrá desprenderse y el incendio podrá ser más intenso. Los combustibles pueden ser caracterizados por su carga; es decir, el peso de la biomasa por unidad de superficie

Modelos de Combustible

Los modelos de combustibles representan un complejo de materiales vegetales de variada índole que interaccionan y que, dependiendo de las condiciones ambientales prevalecientes, regulan los efectos del fuego en el desarrollo de un incendio forestal en fenómenos tales como la tasa de combustión, velocidad de propagación, monto de energía liberada, longitud de las llamas, dinamismo de la columna de convección y modalidad de transferencia del calor, por mencionar a los más importantes (Rothermel, 1974). La representación del modelo puede ser cartográfica, matemática, conceptual u holística y de ello se desprenden los modelos de predicción. Un modelo de predicción del comportamiento del fuego es un conjunto de ecuaciones (en ocasiones tablas y/o gráficos interconectados) que pronostican el desarrollo de un incendio en función de variables del medio referentes tanto a los combustibles como al tiempo atmosférico o la topografía del lugar.

Los modelos de combustibles son representativos de los distintos lechos de combustibles o estructuras de vegetación que existen en la naturaleza y que pueden propagar un fuego. A estas representaciones se les asocian unos valores medios de las variables de los combustibles que son necesarias para la aplicación de un modelo de comportamiento del fuego y que son difíciles de medir o estimar. De esta forma, si se quiere predecir el comportamiento del fuego en un determinado lugar no hay que medir esas variables sino seleccionar el modelo de combustible adecuado.

Puntos de calor (hot spots)

El punto de calor es el elemento espacial mínimo de la imagen (píxel) que reporta una temperatura elevada. El valor mínimo para considerar un píxel como punto de calor con imágenes nocturnas es de 25°C; para las imágenes diurnas la temperatura mínima considerada es de 42°C (CONABIO, 2012). Por lo tanto, un punto de calor es cualquier fuente de calor que tiene una emisión en el rango del espectro rojo-infrarrojo cercano, lo suficientemente fuerte como para ser detectada por el sensor. Esa fuente puede ser provocada por incendios, quemas agrícolas, suelos calentados por el sol, grandes chimeneas (llamas de gas en pozos petroleros), volcanes activos, etcétera. CONABIO elimina mediante cartografía temática y una evaluación estadística los puntos de calor con baja probabilidad de ser incendios

VIII.8.2. Antecedentes

El fuego ha sido un factor determinante en la evolución de la humanidad; sin embargo, ante los cambios ambientales y crecimiento poblacional que se ha registra en México, ejemplo de ello, es la utilización del fuego en las actividades económicas primarias ha llegado a constituir un riesgo para la población. Se estima que en últimos 35 años, el uso del fuego en las prácticas agropecuarias provoca entre 40 y 50 por ciento de los incendios forestales en México. En las últimas dos décadas se ha registrado un importante cambio en las condiciones ambientales, económicas y sociales que afectan los incendios forestales en México, por provocar un debilitamiento de la economía campesina y una elevación de los costos ambientales y sociales.

La (CONABIO) Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad implementó el programa “*Detección de Puntos de Calor Mediante Técnicas de Percepción Remota*” en el año de 1999, en respuesta a la situación de emergencia registrada por los incendios forestales de la temporada de 1998. En la cual se registraron 14,445 incendios forestales afectando 849,632 hectáreas en el territorio mexicano (CONAFOR, 2006). Sistema Nacional de Información Forestal.

Para el año 2000 el proceso del programa fue semi-automatizado y se mejoró sustancialmente la presentación de la información en el portal (v.2000). No obstante no fue hasta en octubre del año 2001, donde la CONABIO adquiere con el apoyo del FONDEN (Fondo Nacional para Desastres Naturales) y de la SEMARNAT, (Secretaría de Medio Ambiente y, Recursos) un sistema de recepción de imágenes de satélite MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), con la finalidad de contar con las imágenes en tiempo real y colaborar en la emergencia de desastres naturales, con el objetivo de ampliar el número de observaciones y mejorar la detección de incendios forestales.

De acuerdo con las estadísticas de la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, por medio de la Comisión Nacional Forestal (SEMARNAT-CONAFOR, 2012). En México se han registrado del periodo de 1998 a septiembre de 2012, un total de 7,066 incendios forestales, cuya afectación fue de 343,308 ha. Por su parte, el estado de Yucatán reporto en ese mismo lapso de tiempo 959 incendios con una superficie de afectación de 88,350 ha. (CONAFOR, 2012). Para tal efecto la CONAFOR ha presentado el Programa Nacional contra Incendios Forestales 2013 en el cual muestran el mapa de peligro por ocurrencia de incendios forestales (CONAFOR, 2013), (Figura 395).

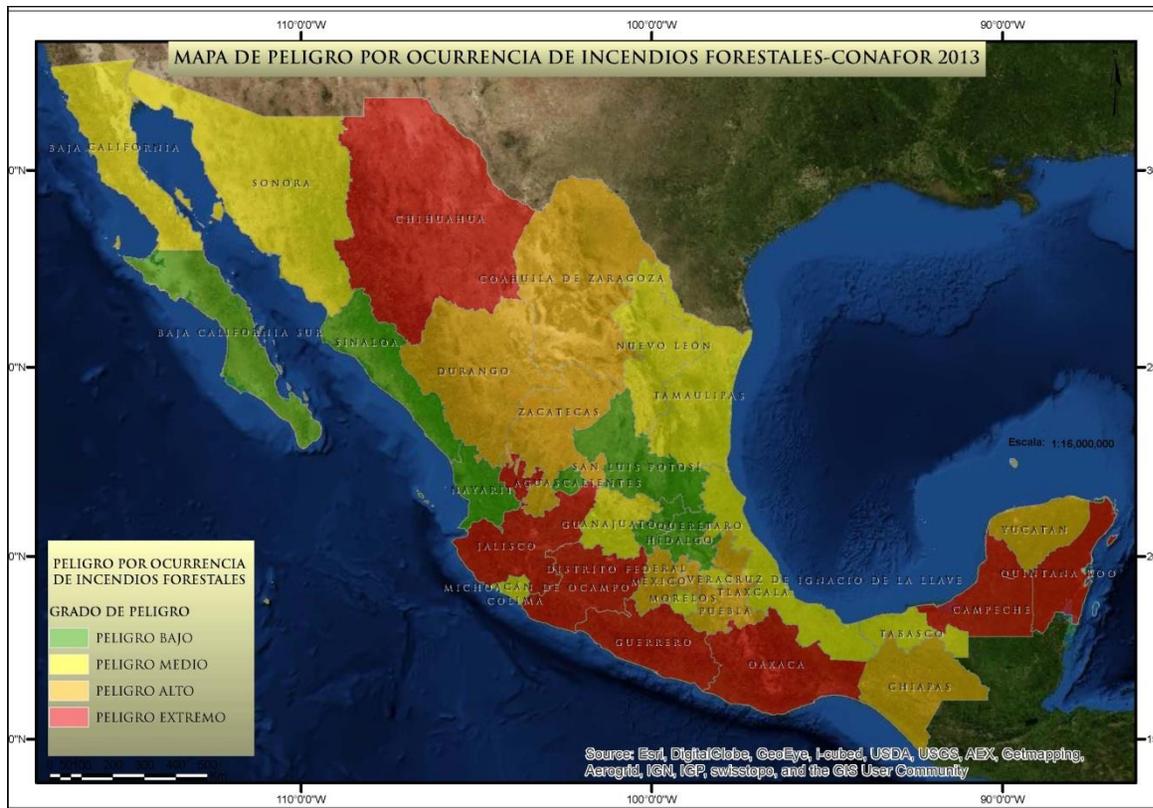


Figura 395. Mapa de peligro por ocurrencia de incendios forestales 2013 (Fuente CONAFOR, 2013).

Se sabe que en tiempos históricos los mayas utilizaban el fuego en su sistema de actividades agrícolas conocidas como roza-tumba y quema, que en ocasiones devenían en incendios forestales que arrasaban vastas extensiones de selvas tropicales (CENAPRED, 2008). En la actualidad las actividades agrícolas y pecuarias siguen siendo el sustento de muchas familias que habitan en el estado de Yucatán. El cambio de uso de suelo principalmente de forestal a pecuario o agrícola, es uno de los principales factores que provocan incendios cuando no se realizan quemas controladas con el apoyo de los técnicos forestales.

Los incendios forestales en el estado de Yucatán representan uno de los peligros de mayor impacto, anualmente se destruyen desde pequeñas comunidades vegetales hasta amplios ecosistemas. Con el fin de regular la quema agrícola (preparación de la tierra para la siembra), el Comité Estatal de Prevención y Combate de Incendios Agropecuarios y Forestales, (CEPCIAF) estableció un calendario anual en el que se autorizan las quemas únicamente durante un periodo específico y en lo posible de manera controlada. De acuerdo con la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), el 95% de los incendios son provocados por cazadores o por quemas no controladas.

Los ciclones y tormentas tropicales también son causa indirecta de incendios, por tanto afectan continuamente la Península dejando a su paso extensas áreas de selva muerta altamente vulnerable al fuego. Derivado de lo anterior uno de los incendios más impactantes, ocurrió en el año de 1998 a consecuencia del huracán “Gilberto”, dando origen a la pérdida de 150,000 ha, causando daños irreversibles a los frágiles ecosistemas tropicales (CEPCI, 2002). Consecutivamente tres años después, el paso del huracán “Isidore” en septiembre del 2002, provocó la generación de 235 incendios, lo que ocasionó la pérdida de 157,010.55 ha (CEPCI, 2002). Posteriormente en el año 2006, después de la temporada de huracanes, en la frontera entre Yucatán y Quintana Roo, 49 incendios consumieron cerca de 60,000 ha de bosque (Quequi, 2006). Finalmente en 2011 los incendios causaron importantes daños, afectando más de 15,000 ha de terreno, principalmente montes y cultivos (La Jornada, 2011).

Por otro lado, Oropeza y Enríquez (2003), reportan en un periodo de 12 años (de 1999 al 2002) un total de 24,368 ha siniestradas, lo que representa aproximadamente el 0.55% de la superficie total del Estado. De acuerdo con el análisis mencionado, la distribución de los incendios en el Estado refleja un patrón que coincide con el uso de suelo agropecuario y urbano, mostrando al municipio de Tizimín con los valores más altos, tanto en el número de incendios como en la superficie siniestrada (Oropeza y Enríquez, 2003). En total el área siniestrada contemplando reincidencias en áreas de regeneración selvática es superior a las 420,000 ha de 1999 a la fecha.

Los Incendio forestales en estado de Yucatán afectando 5.800 ha., en la costa caribeña de México, dañando las zonas arqueológicas de Chichén Itzá y Oxtankah. Los incendios también afectaron Oxtancah, la cuarta ciudad del mercado maya del siglo, en torno a 9 km de Chichén Itzá, dañando un edificio en la zona norte .Los incendios comenzaron en los estados de Yucatán y Quintana Roo en febrero. Las autoridades han registrado 22 grandes incendios en la Península de Yucatán. (*Xinhua*, 2006)

A pesar que existen distintas legislaciones y normas relacionadas con el manejo del fuego en las prácticas agropecuarias para prevenir los incendios forestales, esta problemática no registra un descenso significativo, por lo cual resulta necesario encontrar mecanismos efectivos que ayuden a mitigar las afectaciones a los recursos naturales y pobladores que en ellos habitan, derivadas de estas ancestrales prácticas productivas.

En 1997 se publicó la Norma Oficial Mexicana Nom-015-SEMARNAP/SAGAR-1997, que regula el uso del fuego en terrenos forestales, de aptitud forestal, en terrenos colindantes con predios forestales, así como los de uso agrícola y ganadero

En ese sentido en el año 2008 La CONAFOR y CENAPRED, instancias responsables de la coordinación de las acciones de prevención, combate y control de incendios forestales, quienes coadyuvan con los gobiernos estatales y municipales, motivan la participación de los sectores social y privado en materia de prevención y combate de incendios, como lo establece la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS) en su artículo 123. Sin embargo, la misma Ley señala que los poseedores y/o propietarios de los terrenos preferentemente forestales tienen la obligación de prevenir y combatir los incendios en sus terrenos (artículo124).

Para el estado de Yucatán a partir del 2006, se creó, la ley de combate y prevención de los incendios forestales, la cual en su artículo 7 fracción V alude, a compilar y procesar la información sobre uso del fuego y sus riesgos e impulsar el establecimiento de sistemas de información para la prevención de incendios, con la participación de la Federación y de los Municipios.

Actualmente los sistemas de información geográfica junto con otros modelos estadísticos nos permiten desarrollar mapas predictivos para determinar el grado de susceptibilidad, amenaza, peligro, vulnerabilidad y riesgo por incendios forestales, a continuación se muestran algunos trabajos que se han hecho tanto en México como en otras partes del mundo (Tabla 201).

Tabla 201. Diferentes tipos de modelos que se utilizan para determinar susceptibilidad, peligro, vulnerabilidad y riesgo de incendios forestales.

TIPO DE MODELO	DESCRIPCIÓN	ÁREA DE ESTUDIO	AUTOR
Probabilísticos			
Regresión Logística y Simulación	El modelo de mapas FSIM determina las probabilidades y distribuciones de comportamiento del fuego en la escala por píxel, son generadas artificialmente de las estaciones climatológicas, corrientes del tiempo y las ubicaciones de ignición y el uso de un algoritmo de mínimo tiempo. (Finney, 2002). Tiempo corrientes generados por la vinculación, análisis de series temporales de componente de liberación de energía (ERC) con distribuciones históricas de la velocidad del viento y dirección. La ubicación y la frecuencia de igniciones se generaron sobre la base de 1) un modelo de regresión logística que predice la probabilidad de que al menos un gran fuego, y 2) y la función de distribución empírica para predecir el número de grandes incendios dado se produce un incendio. Modelo utilizado para desarrollar un gran riesgo de incendios de un sistema de evaluación de los estados contiguos de tierra área de los Estados Unidos	EE.UU	Finney <i>et al</i> (2009)

.....Continuación de Tabla 201.

TIPO DE MODELO	DESCRIPCIÓN	ÁREA DE ESTUDIO	AUTOR
Regresión Logística y Simulación	El modelo de simulación de susceptibilidad Burn-P3 (Parisien <i>et al.</i> , 2005) y crecimiento del fuego del sub-modelo Prometheus (Tymstra <i>et al.</i> , 2009) identifica la probabilidad del paisaje que se quemarán que un píxel, dado varias ubicaciones de ignición y corrientes del tiempo. La estocasticidad es introducida a través de azar o sorteos de "días de propagación de eventos," número de incendios escapados y corrientes atmosféricas. Los Autores definen como índice de Susceptibilidad del Fuego (FSI) como la calificación relativa de la probabilidad de incendios. También se utiliza análisis de regresión logística para predecir la probabilidad de los valores FSI alto o extremo en un momento dado ubicación, utilizando un conjunto de variables explicativas relacionadas para disparar entorno y las características del régimen del fuego.	Alberta Canada	Beverly <i>et al</i> (2009)
Simulación	Simulación Múltiple FARSITE (Finney, 1998) se ejecuta, con fecha del calendario, longitud y latitud del incendio, la ubicación de ignición, datos climáticos y otros parámetros seleccionados al azar a partir de distribuciones conocidas. Distancia de la carretera utilizada como sustituto de probabilidad de ignición (80% de los encendidos se produjo dentro de un <i>buffer</i> alrededor de los caminos y senderos). Los mapas de distribución de fuego se crean a partir de simulaciones o superpuestos para identificar áreas de la frecuencia de incendios de alta y baja.	Israel	Carmel <i>et al</i> (2009)
Regresión Logística	La investigación de regresión logística de los factores humanos asociados con alto riesgo de incendio, Índice de peligro de ignición, utiliza como métrica para la "alta" o "baja" ocurrencia de incendios forestales. El Modelo de regresión logística es un acontecimiento predicho que considera de alta o baja probabilidad de los incendios forestales, en función de las variables explicativas relacionadas a la fragmentación del paisaje agrícola, abandono de la agricultura y de los procesos de desarrollo.	España	Martínez <i>et al.</i> (2009)
Regresión Logística	Los datos de los sensores remotos y las variables biofísicas y antropogénicas junto con el recuento del fuego, con estos datos utilizados se determina la causa subyacente de los incendios. Las variables explicativas incluidas como: topografía, la vegetación, el clima, los factores antropogénicos y accesibilidad. Modelo de regresión estima la probabilidad de la presencia de fuego.	India	Prasad <i>et al</i> (2007)
Regresión Logística	Los autores utilizaron técnicas de regresión logística, para generar 1-mes de antelación, para determinar el peligro en mapas de probabilidad en el oeste de Estados Unidos. Estos mapas espacialmente prevén probabilidades de incendio grande (> 400 acres), los eventos asignados a 1° lat. /log en la cuadrícula. Las variables explicativas incluidas son: temperatura mensual promedio y el índice de sequía de Palmer.	EE.UU	Preisler y Westerling (2007)
Simulación	Los modelos BEHAVE (Andrews, 1986) y FARSITE (Finney,1998) se utilizan para simular el comportamiento del fuego bajo diferentes condiciones climáticas y las ubicaciones de ignición. Evaluado el potencial de incendio en un reserva ecológica en las sabanas del centro de Brasil. Se identifican los problemas de modelado asociado con el comportamiento del fuego en las sabanas.	Brasil	Mistry y Berardi (2005)
Regresión Logística	La probabilidad de ocurrencia de un incendio fue cuantificada con el método multicriterio en función de la actividad humana y las causas de ignición, por medio de una regresión logística predictiva, el contenido: de combustible vegetal vivo y muerto, derivado de los datos de los sensores remotos y al propagación con el modelo BEHAVE (Andrews y Chase, 2010) Consideran los recursos incluyendo sus propiedades como: productos maderables, ingresos de caza, recursos turísticos y recreativos, reservas de carbono, suelo, condiciones de la vegetación y valor intrínseco del paisaje.	España	Chuvieco <i>et al</i> (2010)
Regresión Logística	Estimaron el peligro de incendios en áreas templadas de la Sierra Madre Oriental integraron las variables de carga de combustibles forestales, meteorológicas y antropogénicas utilizando un análisis espacial multicriterio,	México	Muñoz <i>et al</i> (2005)
Regresión Logística	El modelo de peligro de incendio forestal fue definido por un componente de riesgo, las variables que utilizaron fueron: Modelo de combustibles, uso de suelo y vegetación, puntos de calor por medio de una geoestadística de Krigado (<i>Kriging</i>)(Cressie, 1993;Ripley, 1981)	México	Rodríguez <i>et al</i> (2011)
Regresión Logística	La SEMARNAT y el Sistema Canadiense de Evaluación de Peligro de incendio Forestal <i>The Natural Resources</i> Canadá, desarrollaron un sistema de identificación de zonas con peligro de incendios para cada temporada, consistente en la utilización de cinco índices centrales para determinar las posibilidades de inicio de incendio forestal.	México	SEMARNAT(2002)
No probabilístico			
Lógica difusa y Proceso de análisis jerárquico	La Integración de SIG con la lógica difusa basada en la aplicación de AHP (Saaty, 1980). Los autores desarrollaron una jerarquía de factores biofísicos y socioeconómicos, pensamiento para influir en el riesgo de incendios, entonces se utiliza un enfoque de sistemas de expertos para asignar ponderaciones a criterios utilizando la teoría de conjuntos difusos. Medida aproximada del riesgo de incendio y cuantificar mediante mapas en el SIG.	India	Vadrevu <i>et al.</i> (2009)
Lógica difusa	El Desarrollo del modelo Amenaza Fuego para evaluar cuantitativamente la ocurrencia de incendios forestales, basado en datos de sensores remotos. El riesgo de ignición se cuantifica utilizando la lógica difusa como multicriterio espacial, en función de la proximidad a las principales carreteras, vías férreas, los asentamientos humanos, la cobertura vegetal y el uso del suelo.	Rusia	Loboda (2007)

.....Continuación de Tabla 201.

TIPO DE MODELO	DESCRIPCIÓN	ÁREA DE ESTUDIO	AUTOR
Lógica difusa	El modelo lógico utilizado para evaluar el peligro de incendio EMDS <i>Fuzzy Logic</i> (Reynolds <i>et al.</i> , 2003), utiliza el multicriterio en función de pertenencia difusa de peligro de incendio, el comportamiento del fuego, y el riesgo de ignición. El riesgo de incendio era una función de combustibles superficiales, combustibles dosel, y la clase del régimen de la condición del fuego; el comportamiento del fuego en función de la tasa de propagación, altura de la llama, la intensidad de la línea de fuego, el potencial de la corona fuego, y riesgo de ignición, en función del índice de severidad de la sequía Palmer, índice de vegetación (NDVI) y la probabilidad de un relámpago.	EE.UU	Hessburg <i>et al.</i> (2007)
La lógica difusa y red neural			
La lógica difusa y red neural	El desarrollo de esta herramienta de simulación, la cual utiliza en el sistema operativo de soporte de decisiones. Lógica difusa vinculada con redes neuronales para estimar la propagación del fuego en función de las características del terreno, tipo de vegetación y la densidad y las condiciones meteorológicas.	Grecia	Vakalis <i>et al.</i> (2004a, b)

VIII.8.3. Método de Trabajo

Actualmente en México no se tiene establecida una metodología para realizar mapas de susceptibilidad, peligro, vulnerabilidad y riesgo por incendios forestales. Solo existen propuestas, en base a la cuantificación de los tipos de combustible, análisis hidrometeorológico, actividades humanas y vías de comunicación (CENAPRED, 2005, 2008), por lo tanto, el presente trabajo propone una metodología alternativa (Figura 396) para identificar las zonas susceptibles y de peligro por incendios forestales, tomando en cuenta los tres componentes (biótico, meteorológico y socioeconómico) mediante el proceso de análisis jerárquico y la utilización del SIG (Muñoz *et al.*, 2005; Vadrevu *et al.*, 2009 y Chuvieco *et al.*, 2010)

El método de trabajo que se llevó a cabo para el desarrollo de este tema, fue dividido en dos etapas, 1) Trabajo de gabinete y 2) Recorridos de verificación en campo, que a continuación se describen:

Trabajo de Gabinete

Como punto de partida del presente estudio, se acopió, revisó y depuró todo tipo de información relacionadas con el tema impreso y en formato digital, como: libros, revistas, periódicos y artículos de investigación realizados en diversos países y México.

Como punto de partida del presente estudio, se ha recurrido a la información histórica de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), además de la base de datos del control sistematizado del programa "Detección de Puntos de Calor Mediante Técnicas de Percepción Remota" por medio de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), para el análisis de información temática se empleo la cartografía de Vegetación y Uso de Suelo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), y el Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio Costero del Estado de Yucatán (POETCY).

Para el análisis de información temática se emplearon 59 cartas topográficas digitales a escala 1:50,000, 7 cartas de Uso de Suelo Vegetación serie III, (2005) digitales a escala 1:250,000, las cuales cubren toda el área de estudio y el marco geoestadístico municipal (2010) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), así como el análisis de la imagen satelital SPOT RGB, 2011. Se recurrió a la información histórica de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2012), además de la base de datos de control sistematizado del programa "Detección de Puntos de Calor Mediante Técnicas de Percepción Remota" por medio de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2012).

Con las cartas topográficas digitales y el marco geoestadístico municipal, se generó el mapa base, para identificar el número de municipios, localidades y colindancias del área de estudio, se estableció la escala de trabajo y se hizo un análisis por medio de la técnica de teledetección de la imagen satelital para visualizar las zonas afectadas recientemente a causa de los incendios forestales.

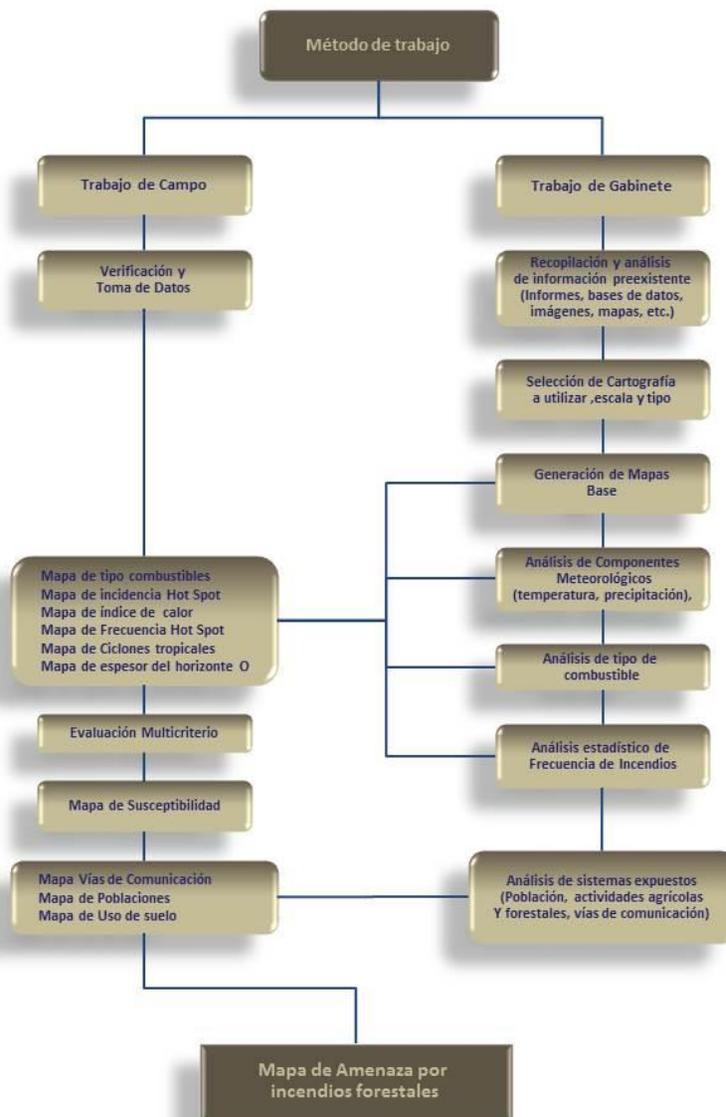


Figura 396. Método de trabajo generalizado para elaborar el estudio de incendios forestales.

Con base en el trabajo de (Anderson, 1982 y PRONATURA Península de Yucatán A.C, 2009), se realizó un análisis de las comunidades vegetales para identificar las superficies y tipos de vegetación que se pudieran en base sus características bióticas. Por otra parte, se realizó un análisis estadístico con los datos de CONAFOR de los años de 1991-2012, para obtener las superficies afectadas y el número de incendios por año. El mapa de tipo de combustibles se obtuvo a partir del mapa de uso de suelo y vegetación serie III, conforme a los criterios establecidos por (PRONATURA Península de Yucatán A.C, 2009 y Anderson, 1982), se editó la base de datos para otorgarle la clave correspondiente al tipo de comunidad vegetal. Con los datos de CONABIO (2012), se generaron los mapas de incidencia por puntos de calor y frecuencia de puntos de calor, para este fin se utilizó el Software Arc Gis v10.1, con la extensión *geoestatistical analyst*, se hizo un *kriging* (interpolación de los puntos) se vectoriza y se edita la base de datos para asignarle un valor y un rango de acuerdo a los criterios establecidos de bajo a muy alto. Con los datos obtenidos en campo se realizó el mapa de espesor de la capa superficial de suelo (Horizonte O) mediante el mismo proceso anterior. A partir del análisis e interpretación de datos se identificaron zonas, en donde la dinámica representa una susceptibilidad a incendios forestales, de las cuales se propusieron a ser visitadas.

Por otra parte se identificaron los factores de peligro asociados a la actividad humana y las variables que podían permitir su cuantificación y cartografía. Identificadas dichas variables, se utilizó el proceso de análisis jerárquico (Bojórquez-Tapia *et al*, 2004 y Vadrevu *et al.*, 2009) mediante una matriz se le otorgo el peso a cada variable de mayor a menor importancia y se cotejo con los valores procesados en la extensión para Arc Map 10 (AHP), posteriormente se hizo el análisis geoestadístico con Arc Map.10, para identificar espacialmente las áreas susceptibles a incendiarse. El resultado fue el mapa de susceptibilidad por incendios forestales.

Para generar el mapa de distancias de vías de comunicación, se tomó como base los datos vectoriales de INEGI, 2010, se completó y actualizó la red de infraestructura vial, esto se logro mediante el análisis de la imagen satelital SPOT RGB, 2011. También se generó el mapa de distancias de los asentamientos humanos, en ambos casos se consideró una distancia de 1 Km, con la suma de estos dos mapas se conformó el mapa de infraestructura y asentamientos.

El mapa de amenaza de incendios forestales fue el resultado de la suma del mapa de susceptibilidad y el mapa de infraestructura, se editó la base de datos para asignarle un valor y un rango de menor a mayor, lo cual significa bajo a muy alto.

Trabajo de campo

Con base al análisis de información de la frecuencia y reincidencia de puntos de calor (CONABIO, 2012), además de los registros de incendios estatales de los años 1995-2012 (CONAFOR, 2012) y municipal 2005-2013 (PCY, 2012) se establecieron dos tipos de prospección:

a) La primera vía aérea con el apoyo del Helicóptero EUROCOPTER AS350-B3 del SGM, se planeó la ruta de vuelo siguiendo una trayectoria norte-sur y sur-noreste, abarcando los municipios que registran altos índices de incendios. Se observaron las condiciones generales del uso actual de suelo y distribución de la vegetación; además se verificaron las áreas relacionadas con antecedentes de frecuencia y reincidencia de puntos de calor y algunos conatos de incendios.

b) La segunda vía terrestre, se empleó la ficha técnica de incendios forestales (Figura 397) en la cual se recopilaron principalmente datos como: Tipo de vegetación, uso actual de suelo, características físicas de la vegetación en función al modelo de combustible, distancia de poblaciones y carreteras respecto al uso de suelo, causa del incendio y superficie aproximada afectada. Con la información recabada en las actividades en campo se evaluaron las condiciones actuales de sitios con registros históricos de incendios; los cuales se han presentado principalmente en el noreste y suroeste del estado de Yucatán.

Son muchos los factores que intervienen en la generación de incendios forestales, tales como; propagación del fuego, el clima, tipo de vegetación, modelo de combustibles, carga total de combustibles, viento, suelos, presencia de fenómenos naturales e incluso la actividad antropogénica. Sin embargo, algunas son variables difíciles de estimar, ya que requieren de metodologías detalladas y análisis más complejos, tal es el caso de la carga de combustible en cada tipo de ecosistema.

ATLAS DE PELIGROS POR FENOMENOS NATURALES DEL ESTADO DE YUCATÁN

INCENDIOS FORESTALES

UBICACIÓN

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

PUNTO DE CONTROL YIF16

FECHA 13/05/2012

ESTADO YUCATAN **MUNICIPIO** TEKAX

LOCALIDAD SAN DIEGO BUENAVISTA

CARTA TOPOGRÁFICA BECANCHEN

CLAVE CARTA TOPOGRÁFICA E16-A13

ESCALA 1:50000 **REGIÓN** VII SUR

COORDENADAS UTM WGS84

LATITUD X 260363

LONGITUD Y 2197550

ELEVACIÓN Z 72

CARACTERÍSTICAS DEL SITIO

TIPO DE CLIMA CALIDO HUMEDO TROPICAL

TIPO DE VEGETACIÓN Y USO DE SUELO AGRICULTURA-TEMPORAL

CLASIFICACIÓN DE COMBUSTIBLE RAMAS GRUESAS Y TOCONES

MODELO DE COMBUSTIBLE FM1 AGRICULTURA-PASTIZAL

TIPO DE SUELO VERTISOL

GEOMORFOLOGÍA Y PENDIENTES 4-6 VALLE

USO ACTUAL DEL SUELO AGRICOLA

CAUSAS DE INCENDIOS QUEMA AGRICOLA

TIPO DE VIVIENDA I

TIPO DE VIA DE COMUNICACIÓN CARRETERA ESTATAL

DISTANCIA A POBLACIONES 530

DISTANCIA A VIAS DE COMUNICACIÓN 2

SUPERFICIE AFECTADA (HA) 0.04

REALIZO HERNAN HERNANDEZ A, ALBERTO HERNANDEZ M

Figura 397. Formato de Ficha de campo de Incendios Forestales

VIII.8.4. Análisis y Generación de Mapas Base

Tomando como referencia la información bibliográfica recopilada, se crearon varios mapas que en conjunto con otros datos y mapas generados en otros temas, se utilizaron para analizar y describir los factores y variables empleadas para los mapas de susceptibilidad y amenaza por incendios forestales.

A continuación se hace la descripción de la obtención de mapas y el análisis de las variables empleadas, para su utilización en el análisis jerárquico.

a) Índice de severidad de sequía

Este mapa es el resultado del análisis de las estaciones meteorológicas de los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo, entre los años 1990-2003, utilizando el método estadístico de interpolación distancia inversa ponderada (IDW) utilizando los valores del I.S. El criterio para tomar esas series de años fue que los datos presentaban continuidad aceptable. En el subcapítulo de Sequías, se hace una amplia explicación acerca del tema, para este caso solo se hace referencia como insumo base para la generación del mapa de susceptibilidad de incendios forestales.

b) Frecuencia de Ciclones Tropicales

La importancia que tiene los ciclones tropicales Debido a la ubicación Geográfica del Estado de Yucatán los registros Climatológicos reflejan una alta probabilidad de afectación de Ciclones Tropicales procedentes del Océano Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México, en donde se desarrollan intensos Huracanes, como se analizaron en el subcapítulo correspondiente

Para esta variable al igual que la anterior, solo se hace referencia como insumo para la generación del mapa susceptibilidad de incendios forestales.

c) Puntos de Calor

i) Distribución Anual : Para la identificación de zonas por emisión de Puntos de Calor en el Estado, se realizó un análisis estadístico de **12** años para el periodo de 2000–2012, obteniéndose un total de **551**, con temperaturas que fluctúan entre 42.05 °C y 99.55 °C (Tabla 202), observándose que este fenómeno se presentó con mayor frecuencia durante los años 2009, 2006 con 102 y 101 puntos respectivamente, mientras que los años con menor persistencia se concentraron en los años 2012, 2005 y 2003 con 2, 9 y 15 puntos detectados, que se pueden apreciar en la (Tabla 202202 y Figura 398. .

Tabla 202. Puntos de Calor en el estado de Yucatán.

AÑOS	PERIODO (2000-2012)
2000	22
2001	27
2002	31
2003	15
2004	43
2005	9
2006	101
2007	56
2008	28
2009	102
2010	48
2011	67
2012	2
TOTAL	551

Fuente: CONABIO 2012



Figura 398. Distribución Anual de Puntos de Calor durante el Periodo 2000-2012.

Derivado de la concentración de puntos de calor, se dividieron los **12** años de análisis, en tres periodos de cuatro años. Observándose que el último periodo constituido por datos del 2008 hasta el 2012, representa la mayor frecuencia con **247** sitios detectados y mostrados en la Tabla 203.

Tabla 203. Total de Puntos de Calor por Periodo.

PERIODO	TOTAL DE PUNTOS
2000 - 2003	95
2004 - 2007	209
2008 - 2012	247

Fuente: CONABIO 2012

En el primer periodo constituido a partir del 2000 hasta el 2003, la detección de puntos representó un total de 95 localizaciones, conformada principalmente hacia la parte noreste y franja sur del Estado, sobre la Sierra de Ticul. El análisis se dividió entre los años 2004 al 2007, y muestra un incremento potencial al detectarse 209, más del doble que el periodo anterior y conservándose la tendencia al incremento desde el 2008 al 2012. En el Estado, estos sitios muestran una distribución homogénea, cabe señalar que sigue una persistencia e uniformidad hacia la parte norte del municipio de Tizimín. Posteriormente, el periodo conformado del 2008 hasta el 2012, marca un incremento al ubicarse 247 sitios, considerado este análisis como el de mayor frecuencia (Figura 399.). Así mismo, la distribución no cambia considerablemente, se puede observar en la (Figura 400. 400), una evolución equitativa en toda la franja de la Sierra de Ticul y una distribución heterogénea hacia la parte noreste del Estado.

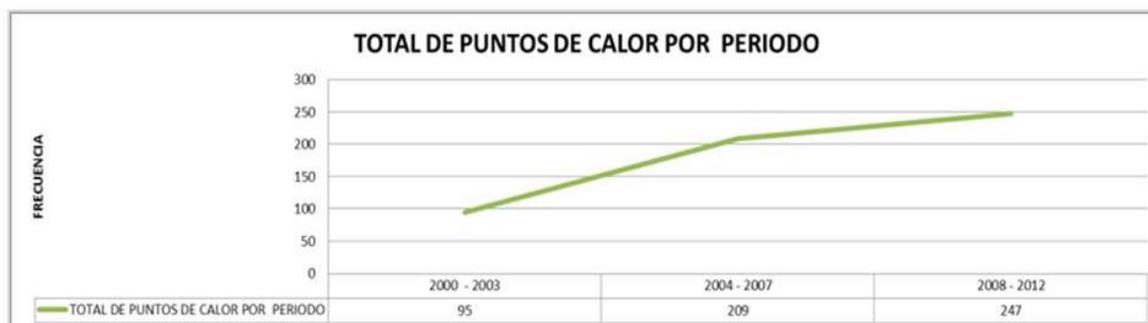


Figura 399. Distribución de Puntos de Calor por Periodo de Cuatro Años.

De lo anterior se desprende que la zona más vulnerable a causa de la presencia de puntos de calor con respecto al año de registro, se ubica hacia la porción Noreste, principalmente en el municipio de Tizimín, sin dejar de mencionar que en la parte Suroeste sobre la Sierra de Ticul también se registró un alto índice de datos. Este análisis se basa solamente en la representación e interpretación

de los puntos de calor con información de la CONAFOR (2012).

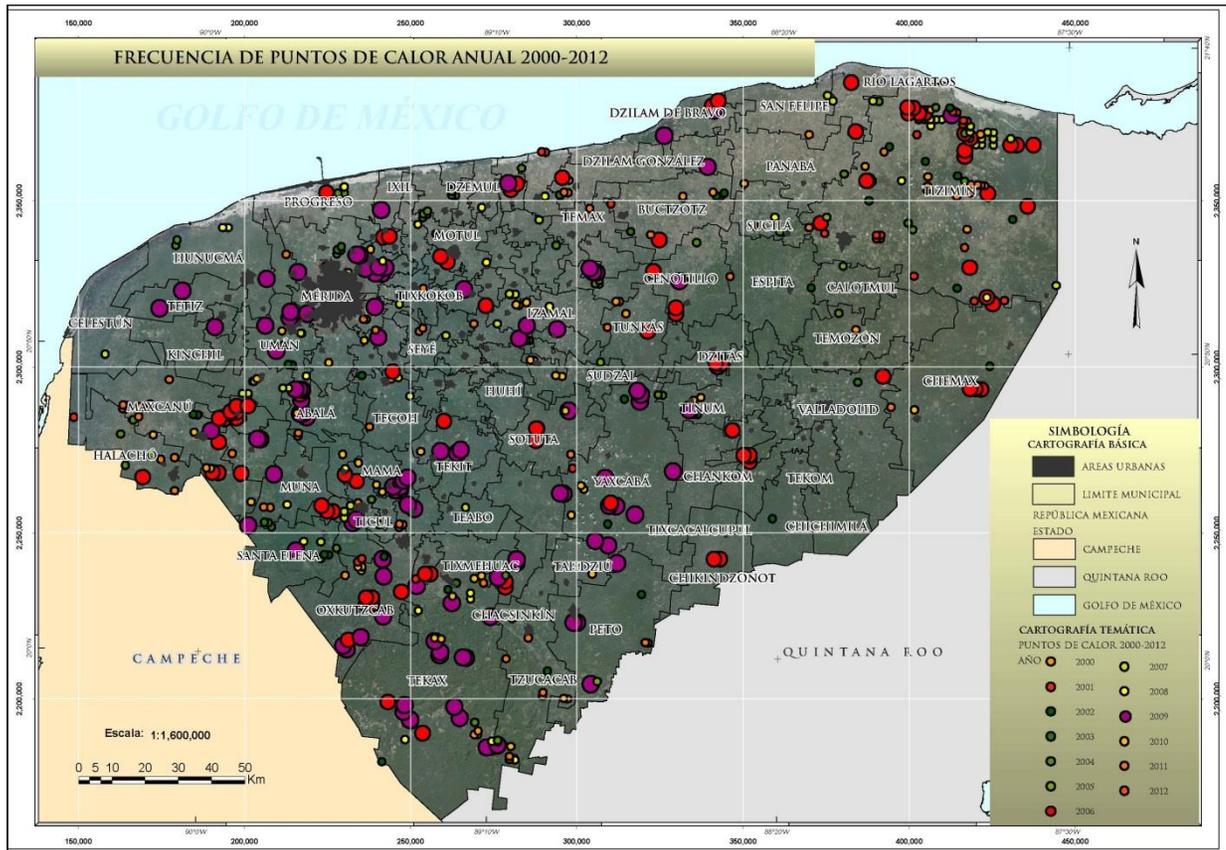


Figura 400. Distribución Anual de Puntos de Calor durante el Periodo 2000-2012.

ii) Distribución Mensual: En relación a los meses de mayor frecuencia por incidencia calorífica, destacan febrero, marzo, abril, mayo, con 70, 152, 99 y 60 detecciones respectivamente. En este cuatrimestre se ubicaron 381 sitios, lo que significa más de la mitad de los 551 puntos manifestados en el periodo 2000-2012 (Tabla 204).

Dentro de este análisis cuatrimestral, se puede observar que Marzo es el de mayor frecuencia con 152 detecciones al registrarse en nueve de los 12 años analizados, cabe señalar que el mayor número se originó en 2009 con 54 localizaciones.

Abril es el segundo mes de mayor frecuencia con 99 puntos, de los cuales 54 corresponden al año 2006, las variaciones en los siguientes años son significativas al puntualizar sitios con menos de 15 detecciones para un rango de seis años. El mes de febrero es el tercero en frecuencia, para este caso su acumulación de 70 detecciones en ocho años, con 28 sitios para el año 2009. Finalmente el mes de mayo, dentro de los meses más susceptibles a la generación de incendios forestales ocupa el último lugar con 60 puntos de calor distribuidos en siete años, ocasionalmente en 2007 se registró el mayor número de detecciones con 22 sitios.

Tabla 204. Distribución Mensual de Puntos de Calor en el Periodo (2000-2012).

MES	DISTRIBUCION MENSUAL DE PUNTOS DE CALOR													TOTAL
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	
Enero	6	7	1	7	12	5	1	3	2		2	8	2	56
Febrero			1	1	7		11	4		28	2	16		70
Marzo	3	12	2	4	6		11	22		54	31	7		152
Abril		8	12				54	1		2	7	15		99
Mayo	8		1				8	22	4	9		8		60
Junio	3			1	4		6	3		2		11		30

.....Continuación de Tabla 204

MES	DISTRIBUCION MENSUAL DE PUNTOS DE CALOR													TOTAL	
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012		
Julio	2			1	4				2	3					12
Agosto			7			1	3		7	1					19
Septiembre			5			1	2		4	1					13
Octubre			2		1					2	1	1			7
Noviembre				1	1		4					1			6
Diciembre				1	8	2	1	1	9		5				27
TOTAL	22	27	31	15	43	9	101	56	28	102	48	67	2	551	

Como se puede observar en la Figura 401, los meses de marzo y abril representan la mayor distribución geográfica al ubicarse de forma homogénea en todo el estado de Yucatán. Para el caso de febrero el comportamiento es similar a los meses antes descritos, sólo con una variación hacia la porción Sureste del Estado. Finalmente los puntos de calor en el mes de Mayo se concentran únicamente al Norte de Tizimín.

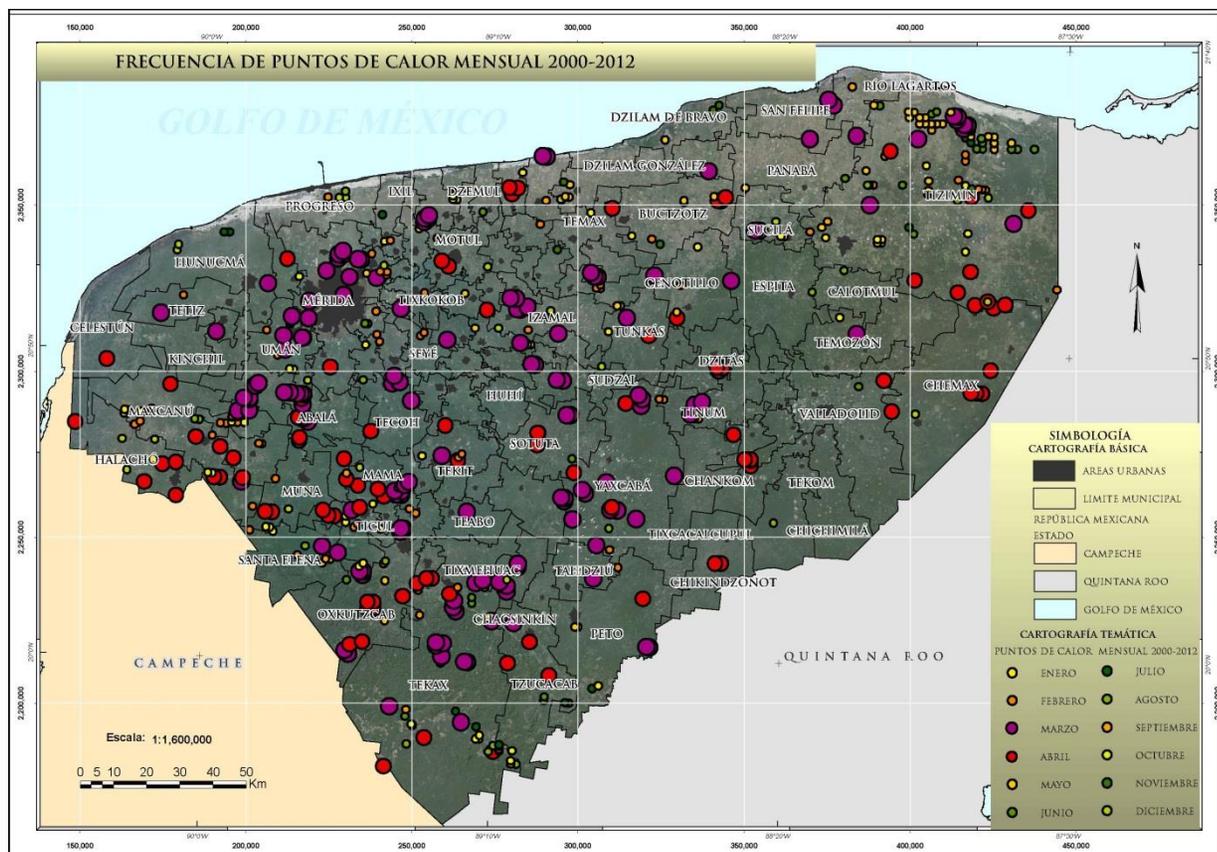


Figura 401. Distribución Mensual de Puntos de Calor Mediante cada cuatro años durante los años 2000-2012.

iii) Distribución Municipal de Puntos de Calor. El estado de Yucatán está conformado por 106 municipios, de los cuales 88 registraron al menos un punto de calor en el periodo 2000-2012 (Figura 402). El promedio por influencia calorífica corresponde a 20 municipios por año, como se puede observar en la Tabla 205, esta tendencia se registró en 2004, 2006, 2009, 2010 y 2011 con 24, 36, 45, 21 y 30 municipios.

Tabla 205. Distribución de Puntos de Calor por Municipio, en paréntesis se indican puntos de calor por año.

AÑO	NUMERO DE MUNICIPIOS	PUNTOS DE CALOR	REGISTRO DE PUNTOS DE CALOR POR MUNICIPIO
2000	12	22	Buctzotz (2), Dzilam González (1), Maxcanú (2), Oxkutzcab (1), Panabá (1), San Felipe (1), Tekal de Venegas (1), Tekax (3), Temozen (1), Tizimín (5), Tunkás (2) y Tzucacab (2)
2001	10	27	Akil (1), Buctzotz (1), Dzidzantún (2), Halache (1), Oxkutzcab (1), Sucilá (2), Ticul (1), Tizimín (16), Tzucacab (1) y Yaxcabá (1)
2002	16	31	Buctzotz (3), Chemax (1), Espita (1), Maxcanú (1), Oxkutzcab (1), Peto (1), Santa Elena (3), Tecoh (1), Tekax (2), Tinum (2), Tiixcacalcupul (1), Tizimín (7), Tzucacab (1), Umán (2) y Yaxcabá (3)
2003	9	15	Buctzotz (3), Dzilam González (1), Hochtún (3), Mérida (1), Muna (4), Tekax (1), Tizimín (1) y Valladolid (1)
2004	24	43	Cenotillo (1), Dzemul (4), Dzidzantún (1), Halache (3), Hunucmá (2), Mérida (2), Maxcanú (2), Motul (3), Progreso (2), Santa Elena (1), Sucilá (1), Tekal de Venegas (3), Tekax (2), Telchac Pueblo (1), Temax (1), Temozen (1), Ticul (1), Tinum (1), Tixméhuac (1), Tizimín (7), Umán (1) y Yaxcabá (1)
2005	6	9	Calotmut (1), Kopomá (3), Peto (1), Ticul (1), Tizimín (1) y Tunkás (2)
2006	36	101	Abalá (1), Bokobá (1), Buctzotz (1), Cenotillo (3), Chemax (6), Chicxulub Pueblo (1), Chikindzonot (2), Cuncunul (1), Dzilam de Bravo (2), Dzilam González (1), Dzitás (2), Halache (1), Homún (1), kua (4), Kopomá (10), Mérida (2), Maxcanú (4), Mochochá (1), Motul (2), Opichén (1), Oxkutzcab (7), Panabá (1), Progreso (1), Río Lagartos (1), Sacalum (2), Sotuta (3), Tecoh (1), Tekax (8), Ticul (3), Tixméhuac (2), Tizimín (20), Tunkás (1), Valladolid (1), Yaxcabá (1) y Yobaín (2)
2007	16	56	Cansahcab (1), Celestún (1), Chocoma (5), Cuzuma (1), Izamal (1), Mérida (3), San Felipe (2), Santa Elena (1), Tahmex (1), Teabo (1), Tecoh (1), Tekante (2), Ticul (3), Tixpéhuac (1), Tizimín (29) y Umán (3)
2008	19	28	Baca (19), Buctzotz (2), Dzidzantún (1), Hunucmá (2), Izamal (1), Mérida (1), Muna (1), Oxkutzcab (1), Progreso (1), Sacalum (1), Santa Elena (1), Sinanché (1), Sucilá (1), Suma (1), Tekax (7), Tizimín (3), Umán (3) y Yaxkukul (1)
2009	45	102	Abalá (4), Cacalchén (1), Cenotillo (1), Chapab (5), Chocoma (2), Conkal (4), Dzan (1), Dzilam de Bravo (2), Dzilam González (1), Dzitás (1), Dzoncauich (3), Hochtún (1), Hunucmá (1), Ixil (1), Izamal (1), Kanasín (1), Kinchil (1), Mérida (2), Mama (1), Maní (1), Maxcanú (1), Muna (1), Opichén (2), Oxkutzcab (7), Peto (3), Samahil (1), Santa Elena (2), Sotuta (1), Sudzal (1), Tahdziú (1), Tekax (15), Tekit (3), Tetiz (2), Ticul (2), Timucuy (1), Tinum (1), Tixméhuac (2), Tizimín (1), Ucu (1), Umán (4), Yaxcabá (12), Yaxkukul (1) y Yobaín (1)
2010	21	48	Abalá (1), Chapab (3), Chemax (1), Chocoma (3), Conkal (1), Halache (1), Izamal (3), Kanasín (1), Kantunil (4), Mérida (1), Maxcanú (5), Oxkutzcab (4), Sacalum (1), Sotuta (1), Tahdziú (1), Tekax (7), Tekit (2), Tinum (2), Umán (2) y Yaxcabá (4)
2011	30	67	Buctzotz (2), Cenotillo (1), Chapab (2), Chemax (1), Dzilam González (3), Halache (3), Hochtún (1), Izamal (1), Kanasín (5), Maxcanú (6), Muna (2), Opichén (2), Oxkutzcab (3), Peto (2), Sacalum (2), Seyé (2), Sotuta (2), Sucilá (1), Tecoh (2), Tekax (5), Temax (1), Ticul (1), Tixkokob (1), Tixméhuac (1), Tizimín (9), Tzucacab (6), Ucu (1) y Yaxkukul (1)
2012	2	2	Maxcanú (1) y Tizimín (1)

De acuerdo a la ocurrencia de sitios de calor en relación a su distribución municipal, se seleccionaron los municipios que tuvieron al menos un evento por año, tal es el caso de Tizimín, Tekax, Oxkutzcab, Maxcanú y Yaxcaba con 100, 50, 25, 23 y 22, respectivamente, posteriormente los municipios con esta preferencia pero con una menor frecuencia se presentan en Mérida, Umán, Kopomá y Ticul con 15, 13, 13 y 12, respectivamente.

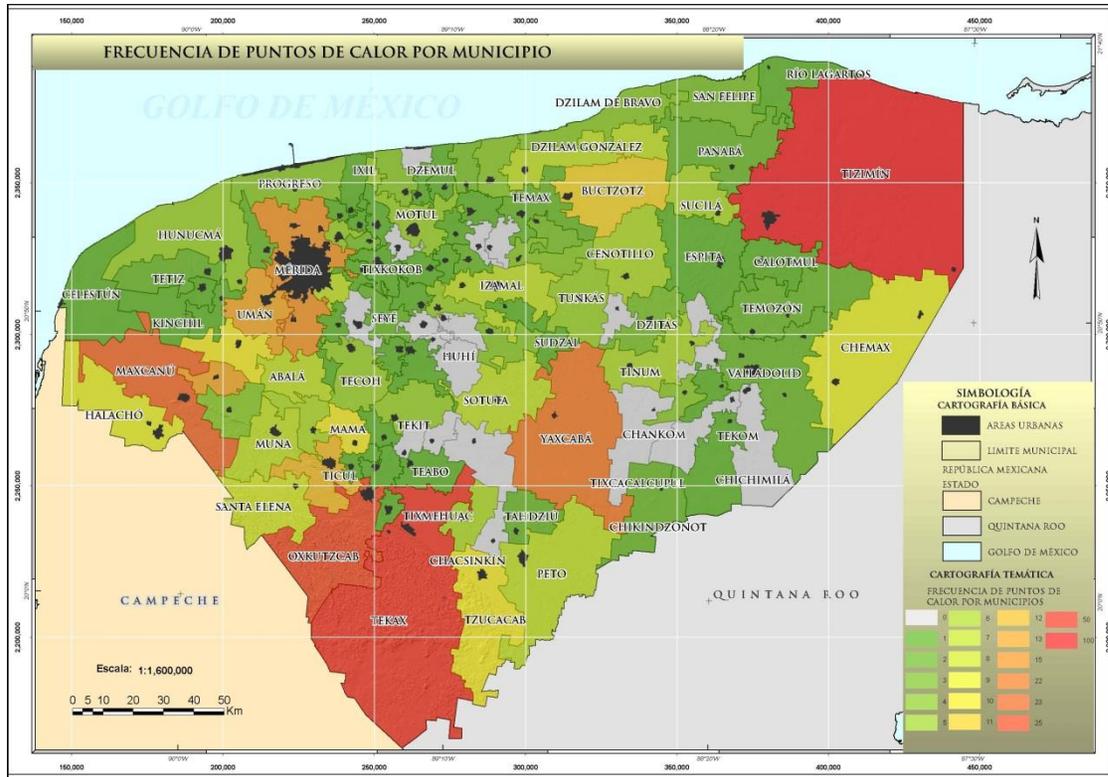


Figura 402. Distribución Municipal de Puntos de Calor durante el Periodo 2000-2012.

iv) **Distribución de la Frecuencia de los puntos de calor.** La frecuencia refiere al número de repeticiones de acontecimientos determinados por un intervalo de tiempo en diversos sitios. (Figura 403).

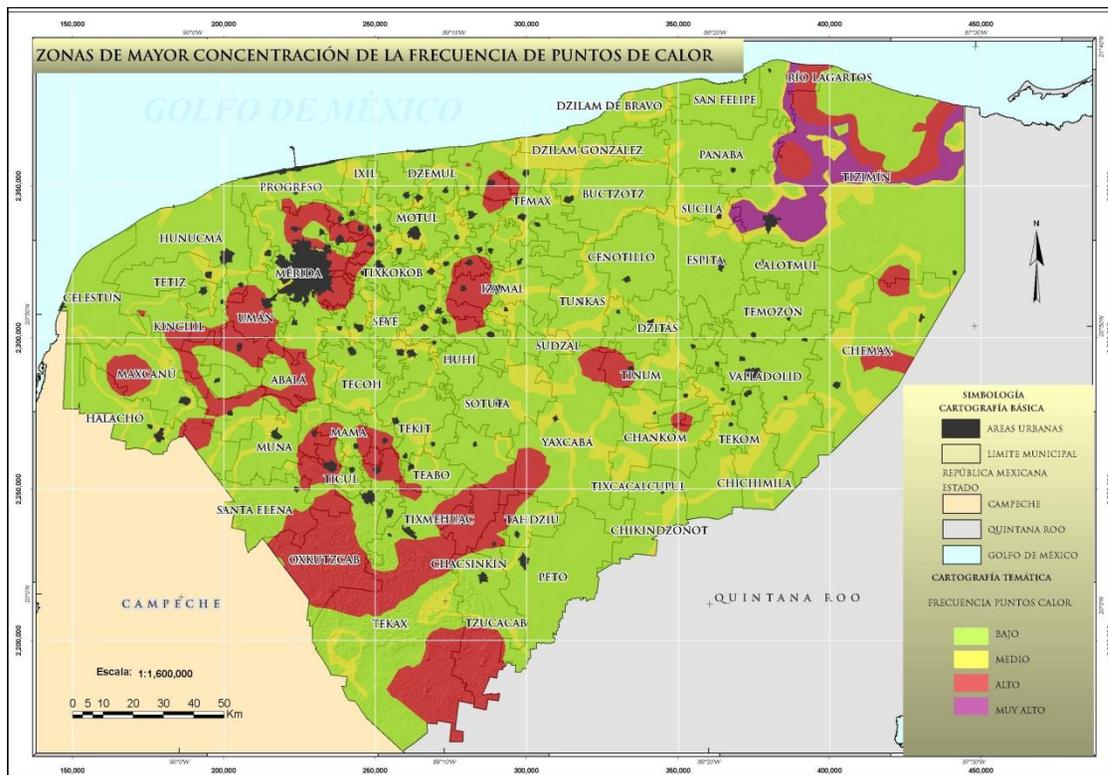


Figura 403. Ubicación espacial de la frecuencia de los puntos de calor.

vii) Reincidencia de Puntos de Calor. En este análisis se identificaron zonas en donde se repiten puntos de calor anualmente en un periodo del 2000 al 2012. En la Figura 404. se observa en color morado donde se presenta un gran número de repeticiones se le considera Muy alto y así sucesivamente, la primera porción Noreste en el municipio de Tizimín y Río Lagartos y las dos áreas restantes sobre la Sierra de Ticul en los municipios de Samahil, Chocholá, Kopomá, Abalá, Opichén y Oxkutzcab.

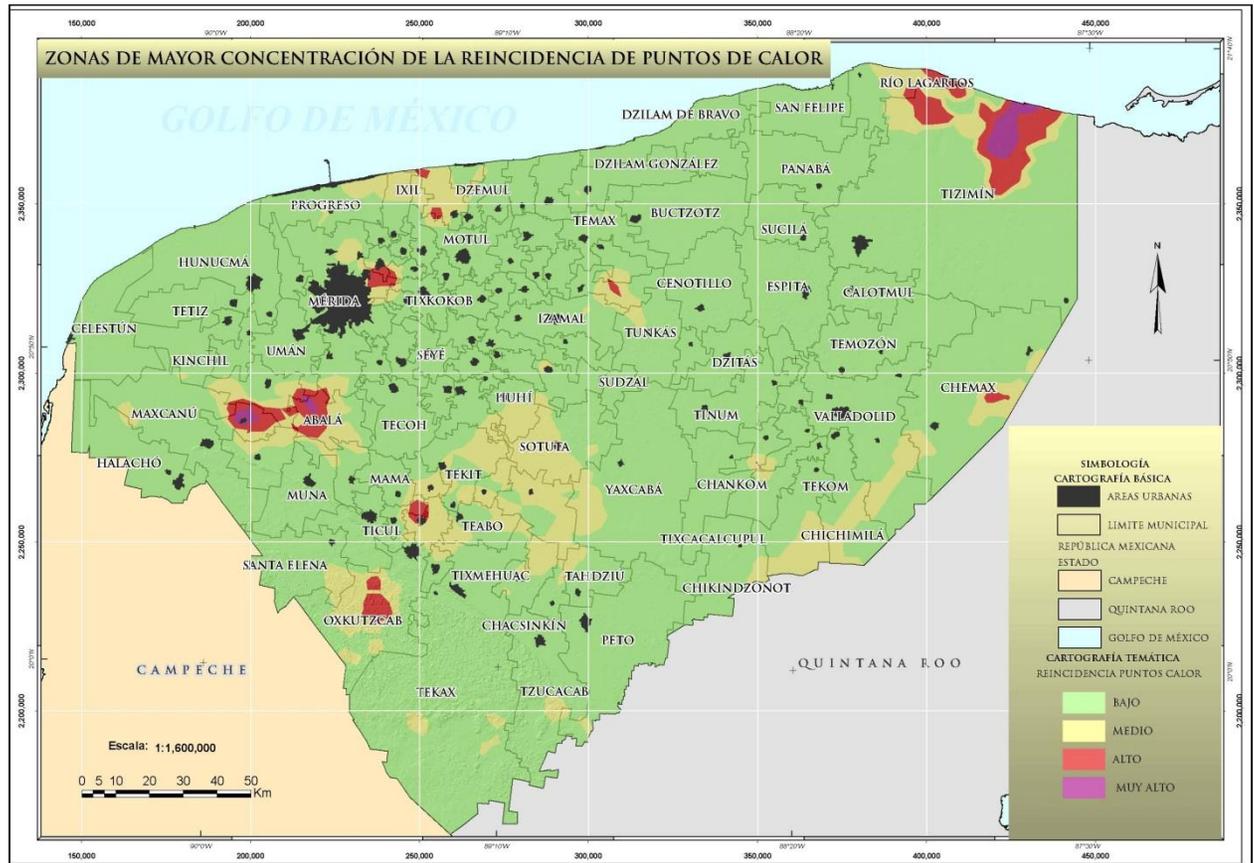


Figura 404. Reincidencia de Puntos de Calor.

d) Combustible por vegetación.

La metodología de procesar la cobertura de Cambio de Uso de Suelo del estado de Yucatán se obtuvo la Figura 405. , que ejemplifica y siguiendo la explicación de la Tabla 206, el modelo de combustible y que sirve de insumo para el mapa de susceptibilidad por incendios forestales. Este modelo se basó en la carta digital de uso de suelo y vegetación (INEGI, 2005) escala 1:250,000, la cual representa por su afinidad ecológica y composición florística, en dicho sistema se representan los diferentes tipos de vegetación en su estado original, inducido o el estado de la vegetación según el tamaño de las especies presentes en los estadios sesionales de la cubierta vegetal en recuperación después de la destrucción o modificación de la vegetación original. Esta es una herramienta que nos ayuda a clasificar y a estimar el comportamiento del fuego para cada tipo de ecosistema (Anderson, 1982).

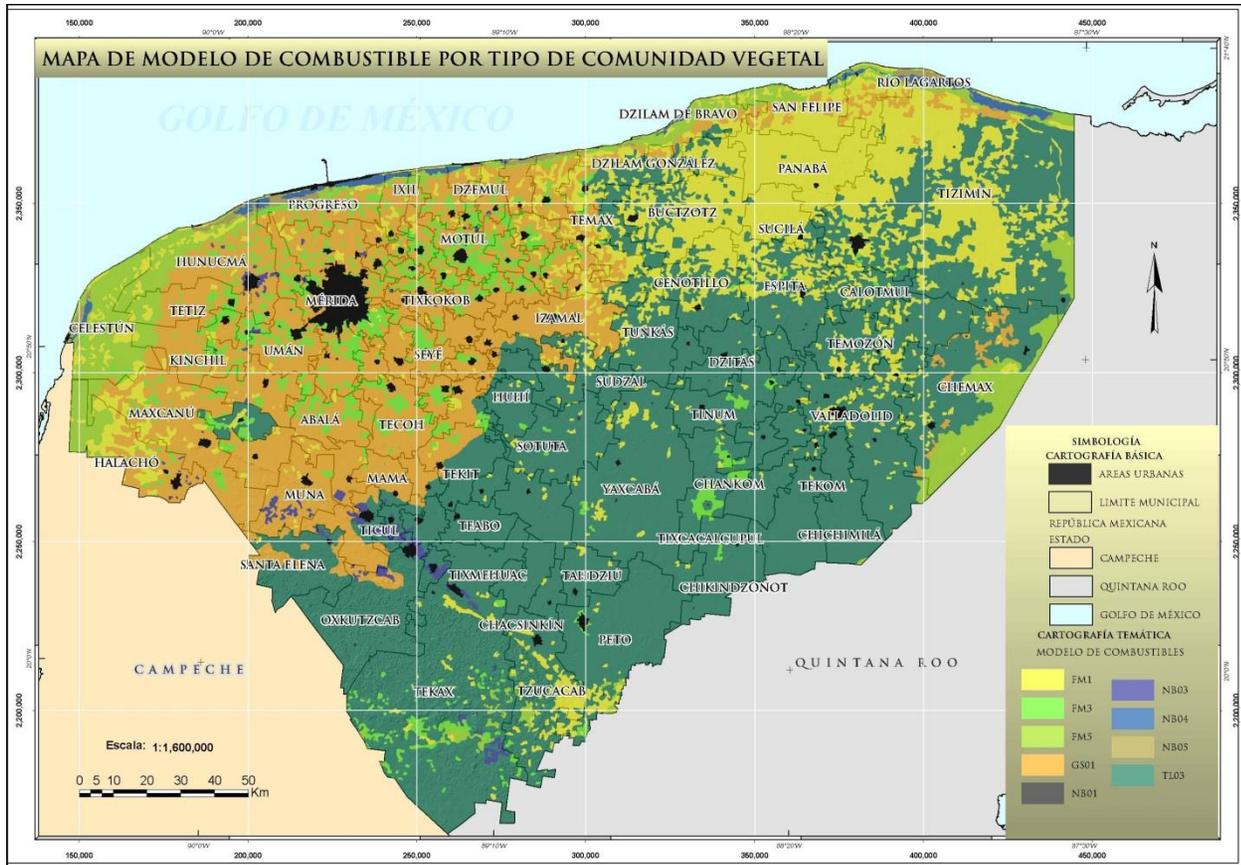


Figura 405. Mapa de combustible por comunidad vegetal.

Tabla 206. Clasificación de combustibles por tipos de vegetación.

ELEMENTOS MODELO COMBUSTIBLE	TIPOS DE VEGETACIÓN
FM 1	Pastizal cultivado
	Pastizal inducido
	Riego suspendido
	Sabana
	Vegetación de dunas costeras
FM 3	Pastizal y Tasistal
	Agricultura de temporal con cultivos anuales
	Agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes
GS01	Selva baja espinosa
	Selva baja espinosa con vegetación secundaria arbustiva y herbácea
	Selva baja caducifolia
TL03	Selva mediana caducifolia y subcaducifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea
FM 5	Selva baja subcaducifolia
	Manglar
	Petén
	Selva baja Subperennifolia
	Selva baja Subperennifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea
	Selva alta y mediana Subperennifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea
FM 6	Selva alta y mediana perennifolia
	Selva alta y mediana perennifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea
FM 7	Palmar
NB01	Asentamientos humanos

.....Continuación de Tabla 206

ELEMENTOS MODELO COMBUSTIBLE	TIPOS DE VEGETACIÓN
NB03	Agricultura de humedad
	Agricultura de riego (incluye riego eventual)
	Agricultura
	Agricultura mecanizada
NB04	Cuerpo de agua
NB05	Áreas sin vegetación aparente

e) Espesor del horizonte O

Estos son estratos o capas dominadas por material orgánico que consiste de desechos frescos y parcialmente descompuestos, como hojas, ramas, musgos y líquenes, que se han acumulado sobre la superficie; se pueden encontrar sobre suelos minerales u orgánicos. Este parámetro se tomó de la captura de datos obtenidos en campo, para el muestreo de suelos, el cual consiste en el espesor de la materia orgánica al contacto con la primera capa de suelo (Horizonte A). (Figura 406).

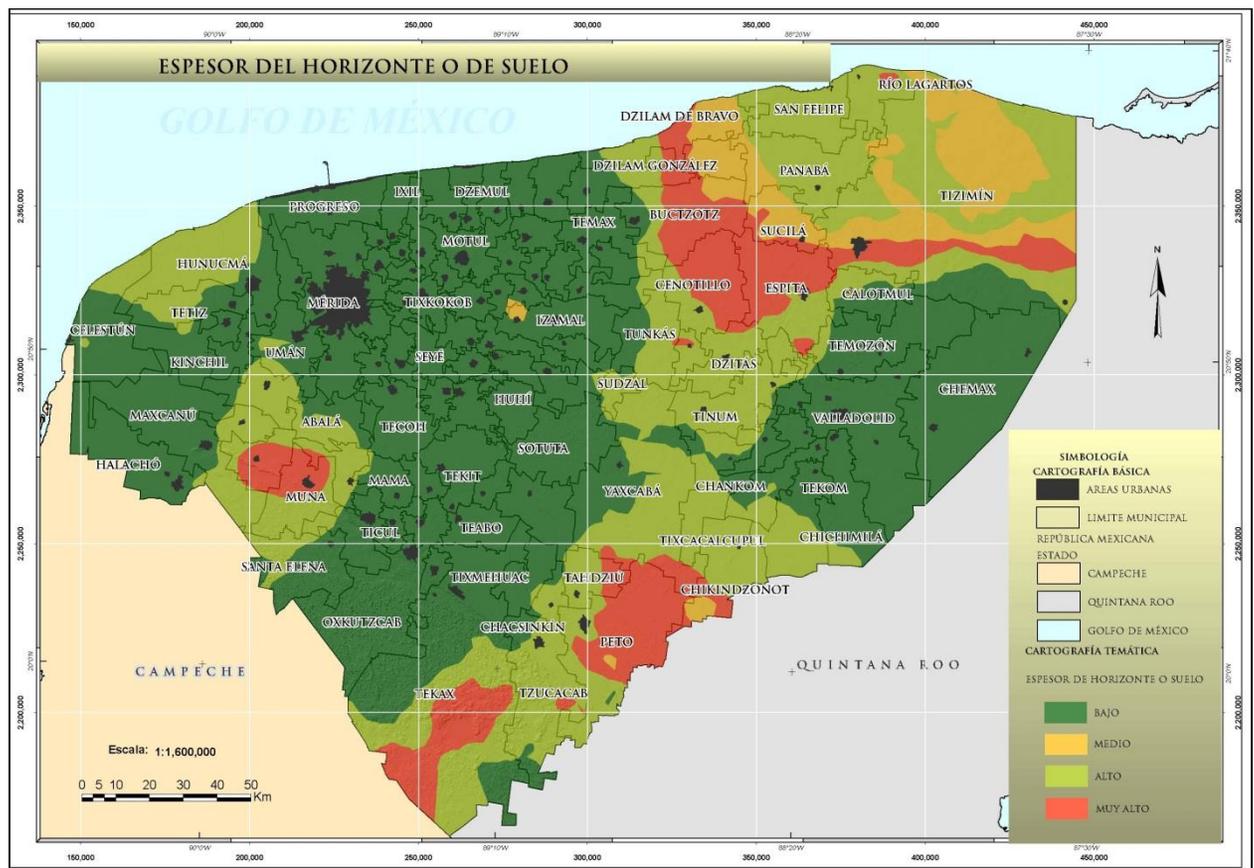


Figura 406. Mapa de espesor del horizonte O de suelo.

f) Información Estadística

Los datos proceden de los registros estadísticos de la SEMARNAT y de la CONAFOR, dentro del margen de la República Mexicana. De manera intrínseca en el estado de Yucatán y durante el periodo 1991-2013. Los datos de apoyo fueron: el número de incendios por año y por mes, así como la pérdida de las superficies quemadas en (has) y del tipo de vegetación.

El registro de estos datos dependió de la precisión con la que la CONAFOR determino el área dañada.

La distribución de los incendios por año, indica que después del paso de los huracanes Mitch (1998), Isidoro (2002) e Iván (2004), la frecuencia de incendios se incrementó notablemente en la región. (Registro histórico de incendios (1998-2006), (Figura 407.).

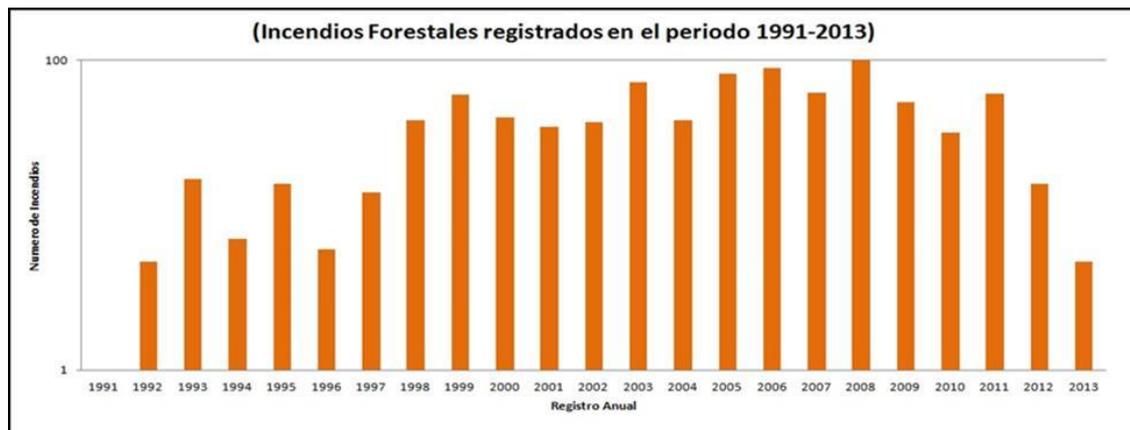


Figura 407. Número de Incendios registrados entre 1991-2013 el estado de Yucatán.

En cada año de registro se observan los incrementos de estos incendios, de esta forma en el periodo del 2006 al 2009 se obtuvieron un total de 305, el mayor número de ellos con un total de (100) igniciones se reporto en el año (2008) dentro del estado de Yucatán.

De la misma forma, se incrementó el área afectada de (21,055 ha). Los mayores daños se observan en la Figura 408, durante el periodo (2003-2009).

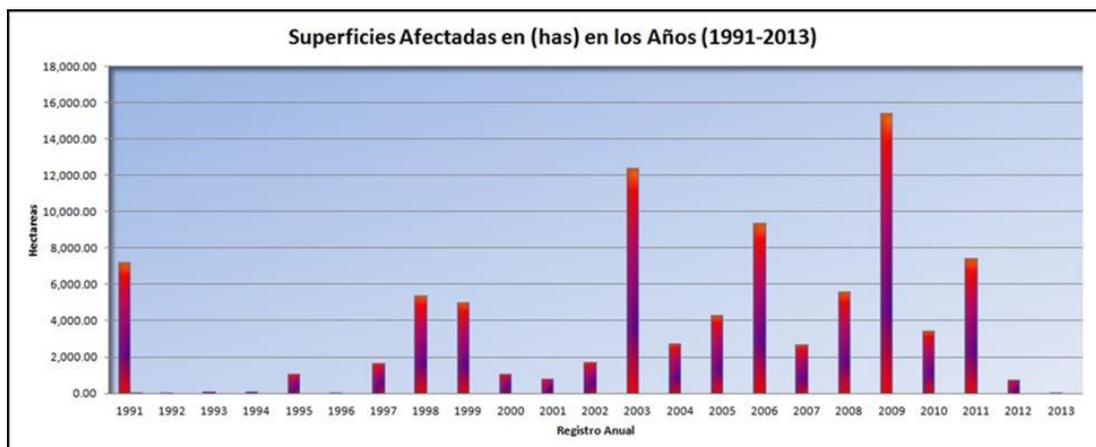


Figura 408. Número de superficies afectadas Fuente SEMARNAT, CONAFOR Febrero 2013.

En general se presentaron 902 incendios forestales en los años (1991-2013) afectando un total de 78,329 ha., de esta superficie el 79.97% correspondió a áreas arboladas, arbustos y matorrales y el 20.03% a pastos naturales y renuevos (Figura 409.).

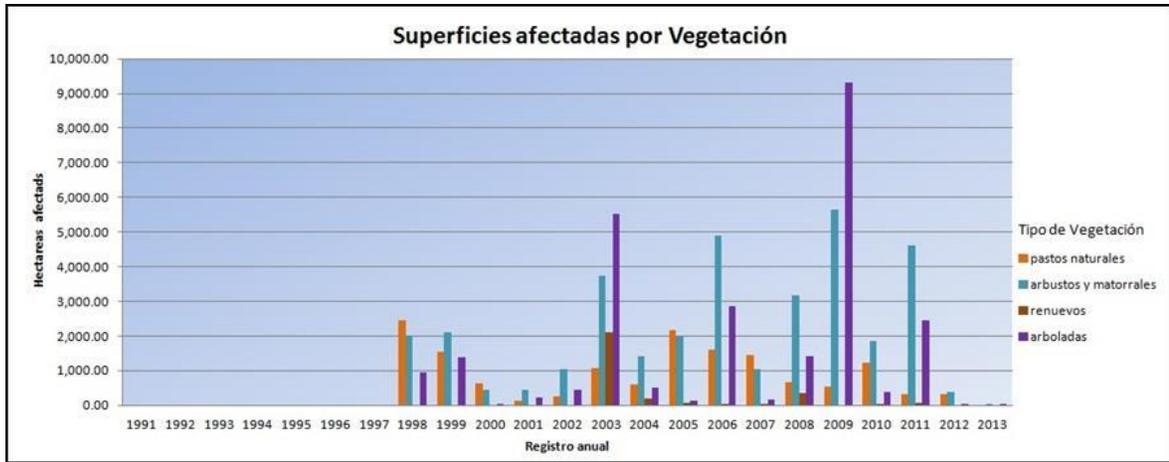


Figura 409. Número de superficies afectadas por vegetación. Fuente SEMARNAT, CONAFOR Febrero 2013.

Los años con mayor afectación fueron: 2003, 2006, 2009 y el 2011 que representan el 58% del registro total, lo que significa que en los últimos cuatro años el incremento de incendios forestales ha ido en aumento.

Número de incendios acumulados de enero a diciembre del 2004-2013.

Conforme a la base de datos de manera mensual (enero-diciembre) a partir de los años 2004-2013, se han registrado 544 incendios forestales en esta entidad federativa, afectando una superficie de 51,880 ha, de esta superficie el 81.5% correspondió a áreas con arboladas, arbustos y matorrales y el 18.5% a pastos naturales y renuevos. (Figura 410.).

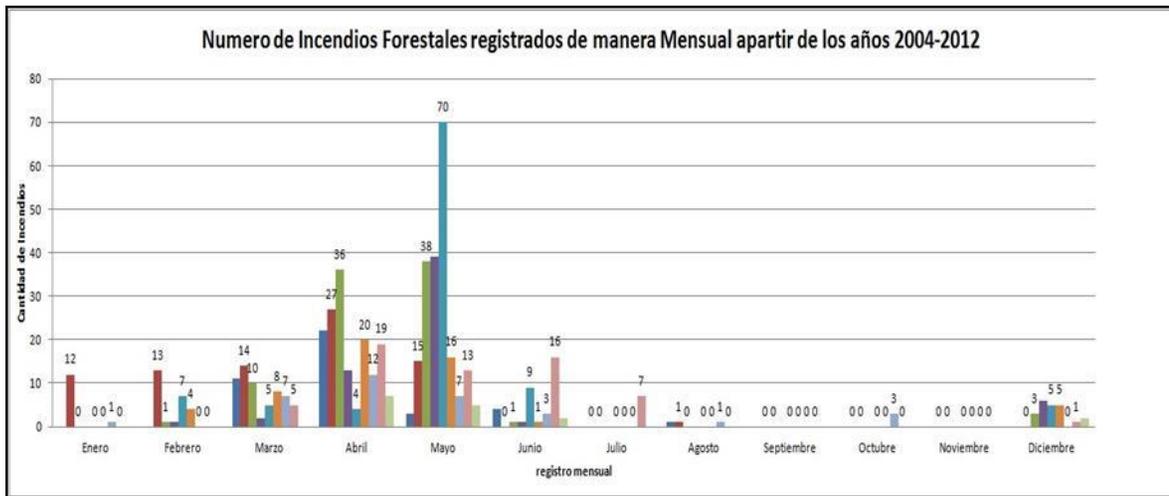


Figura 410. Número de Incendios registrados mensualmente Fuente SEMARNAT, CONAFOR Febrero 2013.

Dentro de la figura anterior, los meses con mayor número de incendios fueron: el mes de marzo, abril y mayo que representan el 78%. Así también, el mes con mayor número de incendios fue mayo ocupando el 38% total anual, lo que quiere decir que el 50% general de los incrementos de incendios forestales se presentan en este quinto mes del calendario anual.

Registro de incendios forestales por municipio 2005-2013

Conforme a los datos que han registrado Protección Civil y CONAFOR del estado de Yucatán, se realizó un análisis dentro del periodo de los años 2005 a 2013.

De los 106 municipios que tiene el estado, 78 de ellos presentaron algún tipo de incendio menor a 100 ha, 23 municipios registraron menos de 1000 ha y solo 28 superó las 1000 ha. Los municipios de mayor afectación fueron Mérida, Dzidzantún, Motul, Sinanché, Umán, Tekax, Tixkokob, Conkal, Izamal, Valladolid, Telchac Pueblo, Chemax y Tizimín, cuya superficie afectada osciló entre los 2500 y 33,863 ha respectivamente (Figura 411. y Tabla 207).

Debido a que para el año 2006 no se tenían datos, se realizó una simulación, en la cual el resultado fue de 9543 ha. Siendo uno de los años con mayor superficie siniestrada, al igual que en los años 2009 y 2011, se registraron 22149 ha y 14605 ha, respectivamente.

El registro de incendios de diciembre de 2012 a abril de 2013 se tiene 5279.43 ha. Los municipios más afectados en el presente año son: Chemax 225.68 ha, Motul 444.78 ha, Tekax 479.27 y Tizimín 710.50 ha.

La tendencia en Tizimín es cada año se incendian por aproximadamente 200 ha, solo para el año 2009 supero las 11,000 ha, para Valladolid y Chemax ese mismo año superaron las 1500 ha.

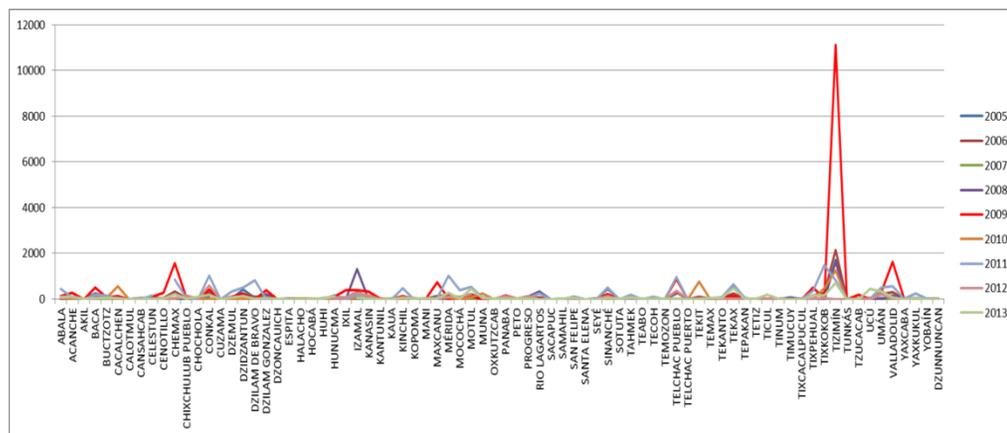


Figura 411. Registro de incendios forestales por municipio de los años 2005-2013.

Tabla 207. Registro de incendios forestales de los años 2005-2013.

NÚMERO	MUNICIPIO	AÑOS									TOTAL HA
		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
1	Abalá	0	99.85	0	0	142.87	48.86	452	88	67.04	898.62
2	Acanche	36.24	78.17	4.5	17.56	271.14	10.72	79.54	111.43	94.24	703.54
3	Akil	0	1.38	0	0	0	2	0	0	9	12.38
4	Baca	0	130.47	0	237.3	513.73	56.18	190.87	8.36	37.34	1174.25
5	Buctzotz	0	65.73	0	107	63.44	50.7	161.07	111.49	32.15	591.58
6	Cacalchén	0	95.91	0	0	140	575.24	0.04	0	51.96	863.15
7	Calotmul	0	0.13	0	0	0	0	0	0	1	1.13
8	Cansahcab	49.72	8.73	0	0	1.25	0	0	0.26	18.64	78.60
9	Celestún	0	42.91	0	71.5	97.12	0	157.48	0.4	16.8	386.21
10	Cenotillo	0	46.08	0	0	286.96	0	0	30.48	5.12	368.64
11	Chemax	0	343.76	14.5	25.1	1567.93	41.7	861.66	13.54	225.68	3093.87
12	Chichchulub Pueblo	0	56.68	42	0	106.29	63	71.48	167.8	2.9	510.15
13	Chocholá	0	20.92	50.5	0	0.52	0	0.25	21.91	94.17	188.27
14	Conkal	110.4	287.64	0	0	413	6.08	1013.79	580.14	177.7	2588.75
15	Cuzamá	0	0.17	0	0	0	1	0	0	0	1.17
16	Dzemul	3	76.37	0	43.58	108.64	0.6	331.45	62.76	60.91	687.31
17	Dzidzantún	413.24	190.71	0	89.2	244.51	20.25	506.55	118.23	133.71	1716.40
18	Dzilam De Bravo	43	108.71	0	0	0	0	818.66	0	8	978.37
19	Dzilam González	60	100.52	14	225.3	402.22	10.24	0	50.29	42.12	904.69
20	Dzoncauich	0	0.63	0	0	0	0	0	0	5	5.63
21	Espita	0	1.13	0	9	0	0	0	0	0	10.13
22	Halachó	0	2.24	0	0	0	12	1	0	0.46	15.70

.....Continuación de Tabla 207

NÚMERO	MUNICIPIO	AÑOS									TOTAL HA
		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
23	Hocabá	10.4	1.55	0	0	0	0	0	0	2	13.95
24	Huhí	0	15.41	0	0.2	23.88	20.66	49.12		14	123.27
25	Hunucmá	0	69.91	20.5	165	112.44	11.24	91.13	29.68	129.26	629.16
26	Ixil	27.6	75.60	0	0	403	3.24	9.6	85.77		604.81
27	Izamal	0	289.90	107.5	1299.75	380.41	48.72	178.06	259.96	44.8	2609.10
28	Kanasín	4	96.59	0	13.35	341.45	52.84	173.04	159.16	28.85	869.28
29	Kantunil		0.48	0	0	3	0	0	0	0.36	3.84
30	Kaua	0	0.50	0	4	0	0	0	0	0	4.50
31	Kinchil	0	104.90	34	114.9	135.1	8.94	464.06	22.36	59.81	944.07
32	Kopomá	0	6.10	0	0	0	42.8	0	0	6	54.90
33	Maní	0	5.00	0	0	0	0	0	0	40	45.00
34	Maxcanú	0	120.22	0	109.8	731.21	20.32	41.38	29.92	29.12	1081.97
35	Mérida	0	184.89	0	0	6.38	81.36	1024.96	89.38	277	1663.97
36	Mocochá	0	61.34	0	0	0	0	383	96.36	11.32	552.02
37	Motul	157.68	209.04	0	91.9	122.41	86.44	544.47	224.64	444.78	1881.36
38	Muna	0	58.11	0	30.82	0	237	83		55.98	464.91
39	Oxkutzcab	0	5.11	0	0	0	0	13.64	3	24.2	45.95
40	Panabá	0	63.17	121	38	152	6		116.16	9	505.33
41	Peto	0	3.68	5	0	6	0	8.2	8.67	1.55	33.10
42	Progreso	11.88	50.78	0	108.42	69.85	29.89	40.42	120.96	24.82	457.02
43	Río Lagartos	19	77.10	0	340	15.8	0	242	0	0	693.90
44	Sacapuc	0	0.03	0	0	0	0	0.2	0	0	0.23
45	Samahil	0	3.35	0	0	0	1	19.26	0	6.51	30.12
46	San Felipe	99.52	25.96	0	0	5	5.01	35.12	2	61	233.61
47	Santa Elena	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0.15	0.17
48	Seyé	11.4	1.48	0	0	0	0	0.4	0	0	13.28
49	Sinanché	120.6	188.64	50	436.32	217.81	11.86	503.62	133.64	35.3	1697.79
50	Sotuta	0	0.50	2	0	0	0	0	0	2	4.50
51	Tahmek	0.56	53.27	1	2.08	85.36	68.75	182.04	2.17	84.16	479.39
52	Teabo	0	1.56	0	0	0	0	0	0	12.45	14.01
53	Tecoh	15	21.89	0	13.12	0	0	97.88	29.98	19.1	196.97
54	Temozón	0	0.63	0	0	0	0	0	0	5	5.63
55	Telchac Pueblo	254.44	311.89	0	0	889.67	3.32	960.12	367.17	20.36	2806.97
56	Telchac Puerto		0.47	0	0	0	0.2	0	2	0.6	3.27
57	Tekit	0	94.90	0	2	0	755.7	0	0	1.5	854.10
58	Temax	0	9.96	0	0	0	0	30		39.71	79.67
59	Tekantó	0	31.32	0	0	79	14.72	81.79	16.6	58.47	281.90
60	Tekax	0	238.34	3	625	140	2	655	4.46	477.29	2145.09
61	Tepakán	0	12.53	0	30	23.67	2.4	15.57	13.2	15.42	112.79
62	Tetiz	0	0.34	0	0	0	0.32	0	0	2.42	3.08
63	Ticul	0	26.15	10.5	8.05	0	0	0	14.36	176.25	235.31
64	Tinum	0	2.94	0	0	7.98	0.48	0	0	15.06	26.46
65	Timucuy	61.56	7.70	0	0	0	0	0	0	0	69.26
66	Tixcacalpucl	0	0.19	0	1.5	0	0	0	0	0	1.69
67	Tixpéhual	0	147.20		0	509	0	355.39	2	163.98	1177.57
68	Tixkokob	0	273.04	0	0	15	467.5	1485.67	46.28	169.85	2457.34
69	Tizimín	1716	2155.29	0	1617	11125.25	1250.5	823.04	0	710.5	19397.58
70	Tunkás	0	0.50	0	0	0	0	4	0	0	4.50
71	Tzucacab	0	23.31	0	0	183.5	1.68	0	1.3	0	209.79
72	Ucú	0	58.13	0	0	0	0	15	0	450	523.13
73	Umán	46.24	225.59	0	0	307.48	371.84	505.31	229.01	344.81	2030.28
74	Valladolid	0	310.85	0	170.3	1639.34	36.55	563.7	8.34	68.59	2797.67
75	Yaxcabá	0	9.69	0	0	50.49	0	20	6.93	0.12	87.23
76	Yaxkukul	1.36	36.56	0	0	0	0	239	0.04	52.04	329.00
77	Yobaín	0	3.63	0	0	8	0	21	0	0	32.63
78	Dzunnuncan	0	1.69	13.5	0	0	0	0	0	0	15.19
TOTAL		3272.84	9543.64	493.5	6047.05	22149.1	4541.85	14605.03	3490.59	5279.43	67417.03

Causas que propician incendios forestales en porcentaje

De acuerdo a la información proporcionada por SEMARNAT y de la CONAFOR para el período de evaluación de las causas, que propiciaron los incendios forestales, en los años 2004 al 2011 fueron 800 de las cuales (322), fueron por actividades agropecuarias, (30) por actividades silvícolas, (21) de manera intencional, (88) por fogatas, (87) por fumadores (16) por derechos de vía, (223) por otras causas y (12) por otras actividades productivas (Figura 412.).

Por lo que con la información anterior el 41% lo ocupan las actividades agropecuarias, aunado a ello las fogatas y los fumadores, registran un 21.8% y al origen de otras causas ocupan 27.8% dando un total de 90.6 % y el 9.4% es para el restante a las causas ya mencionadas. Lo que indica que el 50% de afectación sobre estos incendios forestales lo ocupan las actividades agropecuarias.

La superficie afectada para el periodo anterior es de 51,107 ha., donde las superficies que tuvieron mayor número de incendios fueron: los arbustos y matorrales con un total de 24,595 ha y las arboladas con 17,7224 ha. En 2010 se presentaron un total de 6,125 incendios que afectaron una superficie de 114, 723.

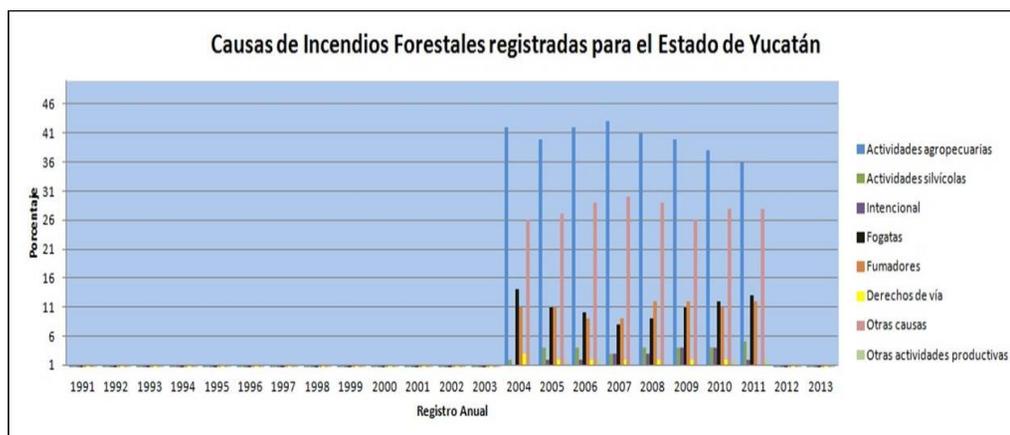


Figura 412. Causas de Incendios registrados. Fuente SEMARNAT, CONAFOR Febrero 2013.

El resultado muestra que se han presentado 902 incendios forestales en el estado, 78,329 ha de superficie afectada la cual correspondió a áreas arboladas, arbustos y matorrales, 17,759 ha., a pastos naturales y renuevos. Los meses con mayor número de incendios fueron: el mes de marzo, abril y mayo que representan el 78% de manera anual.

Evaluación multicriterio

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) es una técnica de decisión multicriterio propuesta por (Tomas L. Saaty 1977, 1980) La cual permite trasladar la realidad percibida por el Individuo una escala de razón en la que se reflejan las prioridades relativas de los elementos considerados, además de la utilización de conglomerados, de una modelización jerárquica y del uso de comparaciones pareadas para incorporar las preferencias, entre dos características diferencian de otras técnicas multicriterio de aspectos intangibles y la de evaluar la consistencia de los juicios emitidos por el tomador de decisiones(Jiménez *et al*, 1998;Coyle, 2004).

Para realizar la ponderación de atributos se utilizó el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ; SEMARNAT, 2006); el cual se divide en dos pasos principales, el desarrollar una estructura jerárquica, que contenga los elementos esenciales del análisis y la realización de comparaciones pareadas de estos elementos, con el objetivo de realizar la comparación de un elemento con otro.

El proceso de comparaciones pareadas, consta de cuatro pasos, el primero se genera una matriz donde se colocan los atributos o variables ambientales tanto en columnas como en renglones, para llenarla, se utiliza una escala de 1 a 6, con la que se evalúa la preferencia entre cada par de estos, utilizando esta misma escala se les asigna un valor a cada uno de los atributos (SEMARNAT, 2006), (Tabla 208).

Tabla 208. Matriz PAJ con la estructura jerárquica y las comparaciones pareadas.

MATRIZ DE COMPARACIONES PAREADAS						
Variables	Modelo Combustible	Puntos Frecuencia	Puntos Reincidencia	Frecuencia Huracanes	Espesor Horizonte O	Índice Sequías
Modelo Combustible	1	2	3	4	5	6
Puntos Frecuencia	1/2	1	2	3	4	5
Puntos Reincidencia	1/3	1/2	1	2	3	4
Frecuencia Huracanes	1/4	1/3	1/2	1	2	3
Espesor Horizonte O	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2
Índice Sequías	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1

El segundo paso es calcular los pesos de los atributos, en el cual se realiza una serie de operaciones donde los pesos son interpretados como el promedio de todas las maneras posibles de comparar el atributo. En la Tabla 209 se muestra el resultado de la obtención de los pesos.

Tabla 209. Resultados de la obtención de los pesos de la matriz PAJ.

CALCULO DE PESOS EN MATRIZ DE COMPARACIONES PAREADAS	
Promedio	Variables
Peso	
0.379	Modelo Combustible
0.249	Puntos Frecuencia
0.160	Puntos Reincidencia
0.102	Frecuencia Huracanes
0.065	Espesor Horizonte O
0.043	Índice Sequías
1.000	

El tercer paso es la estimación del vector de consistencia. Se obtiene al dividir el vector de la suma de peso entre los pesos de los atributos determinados en base a los resultados de la Tabla 210, mediante la siguiente formula.

Tabla 210. Tabla del vector de suma ponderada.

VECTOR DE LA SUMA PONDERADA						
Variables	Modelo Combustible	Puntos Frecuencia	Puntos Reincidencia	Frecuencia Huracanes	Espesor Horizonte O	Indice Sequías
Modelo Combustible	0.379	0.498	0.481	0.410	0.327	0.261
Puntos Frecuencia	0.190	0.249	0.321	0.307	0.262	0.217

.....Continuación de Tabla 210

VECTOR DE LA SUMA PONDERADA						
Puntos Reincidencia	0.126	0.124	0.160	0.205	0.196	0.174
Frecuencia Huracanes	0.095	0.083	0.080	0.102	0.131	0.130
Espesor Horizonte O	0.076	0.062	0.053	0.051	0.065	0.087
Índice Sequías	0.063	0.050	0.040	0.034	0.033	0.043
I	6.211	6.213	6.149	6.069	6.033	6.064

$$\lambda = (\lambda+n)/(n-6).$$

λ = Suma vector consistencia
n = Número de atributos

$$\lambda = (\lambda + n) / (n - 6) = (6.211+6.213+6.149+6.069+6.033+6.064) / (6) = 6.123$$

El cuarto paso es la estimación del Índice de Consistencia, que su vez determina la Proporción de Consistencia, mediante la fórmula:

$$IC = (\lambda - n)/(n - 1).$$

IC= Índice de consistencia.
 λ = Suma vector consistencia
n = Número de atributos

$$IC = (\lambda - n) / (n - 1) = (6.123 - 6) / (6 - 1) = -0.25$$

Vector de la suma de pesos ponderada. Se obtiene multiplicando el peso del primer atributo por la primera columna de la matriz de comparaciones pareadas, el peso del segundo atributo por la segunda columna y el peso del tercer atributo por la tercera columna de la matriz original, finalmente, se suman estos valores sobre los renglones.

Enseguida se calcula la proporción de consistencia (PC)

$$PC = IC / IA$$

$$PC = IC / IA = -0.25 / 1.24 = -0.020$$

Donde IA es el Índice de Aleatoriedad o de Inconsistencia Aleatoria, el cual se obtiene de tablas y depende del número de elementos (n). Un valor de $PC < 0.10$ indica un nivel razonable de consistencia en las comparaciones pareadas; $PC > 0.10$, indica inconsistencia en los juicios, en este caso, se debe reconsiderar y revisar los valores originales en la matriz.

Para el presente análisis el IC presentó un valor de -0.020, lo que indica consistencia en los juicios de valoración.

VIII.8.5. Descripción e Interpretación de Datos Tomados en Campo.

Con base en la información obtenida, se realizó los recorridos en campo en el periodo abril-mayo, donde se identificaron hacia la parte noreste y suroeste del estado de Yucatán (Figura 413), sitios relacionados con la Reincidencia y Susceptibilidad por acumulación de puntos de calor, derivados del análisis de las bases de datos proporcionadas por la CONAFOR y de la revisión de antecedentes como podría ser la CONABIO. Ambas zonas se analizaron tomado en cuenta la frecuencia de los puntos de calor.

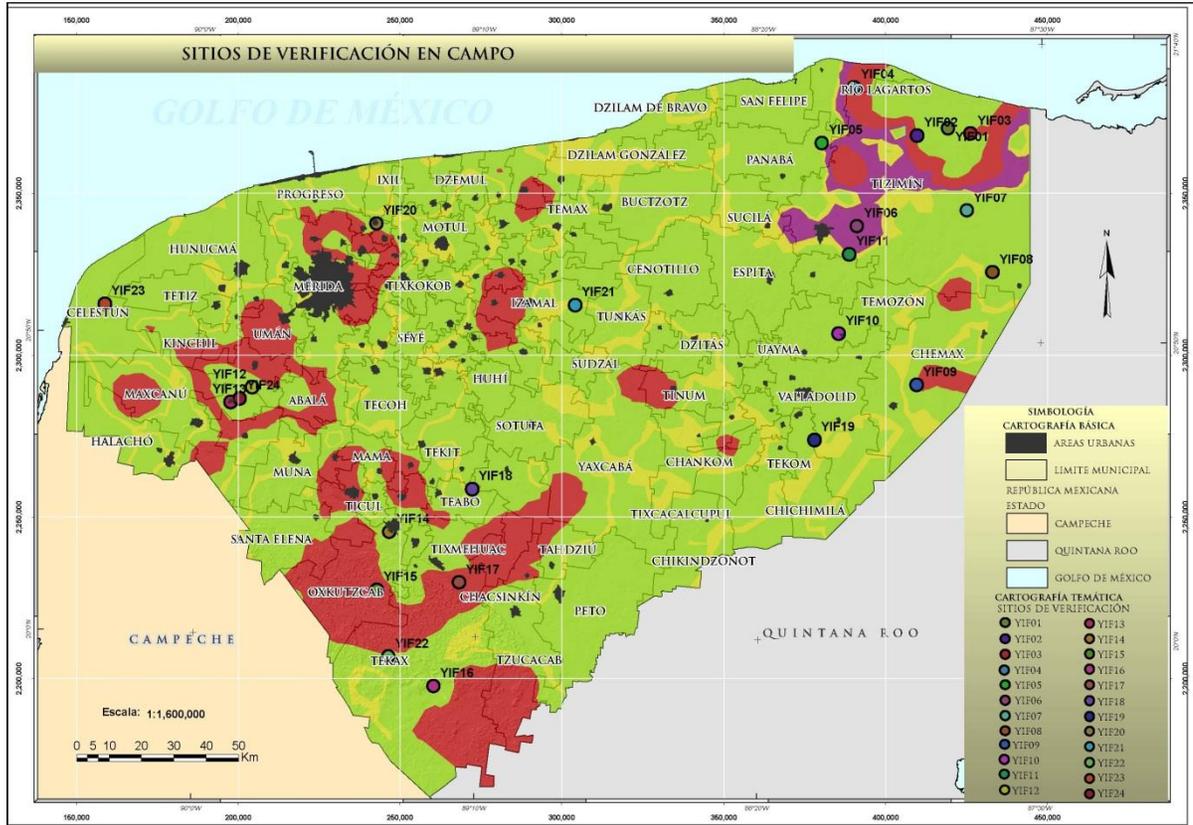


Figura 413. Puntos de Verificación de campo sobre la zona Noreste y Sureste del estado de Yucatán.

Como se puede observar en la figura anterior, al noreste del estado Yucatán, en colores más fuertes, se ubican los sitios en donde se detectaron los mayores índices de puntos de calor. Siendo las localidades más afectadas; Dzonot Carretero (YIF02); Col. Moctezuma (YIF03); San José (YIF01) y Colonia Nuevo Yucatán (YF07); registradas en el municipio de Tizimín (Tabla 211).

Tabla 211. Lugares verificados en campo con susceptibilidad de propagación de Incendios.

PUNTO DE CONTROL	X	Y	Z	MUNICIPIO	LOCALIDAD	OBSERVACIONES
YIF01	419494	2370196	12	Tizimín	San José	Agricultura a las cercanías de la localidad, constante quema de la vegetación original.
YIF02	409851	2367863	-19		Tizimín	Morfología no mayor a los 2 ⁰ , pastizales para ganado y con cultivos permanentes
YIF03	426369	2368475	14		Moctezuma	Existencia y practica de la quema de vegetación constante y existencia pastizales para ganado, morfología entre los 0-2 ⁰ ,
YIF04	390324	2382804	15	Rio Lagartos	San Salvador- Las Coloradas	Uso frecuente, de quema de vegetación a si como la existencia pastizales para ganado
YIF05	380467	2365541	16	Panabá	Panabá	Relativamente poca quema de vegetación

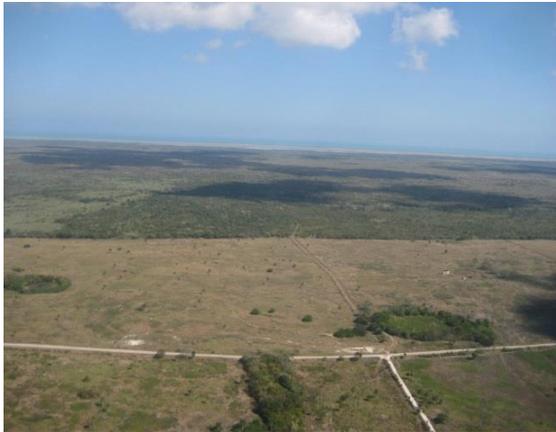
.....Continuación de Tabla 211

PUNTO DE CONTROL	X	Y	Z	MUNICIPIO	LOCALIDAD	OBSERVACIONES
YIF06	391310	2339782	19	Tizimín	Sucopo	Zona de agricultura y de pastizal
YIF07	425260	2344605	24		Las Ruinas	Uso frecuente de quema de vegetación para agricultura
YIF08	433180	2325552	27		El Álamo	Uso frecuente de quema de vegetación para agricultura
YIF09	409665	2290686	41	Chemax	X-Catzin	Uso frecuente de quema de vegetación en gran parte del municipio
YIF10	385634	2306534	35	Temozón	Temozón	Poca presencia de quema de vegetación
YIF11	388817	2331170	12	Tizimín	El Palomar	Prácticas frecuentes de quema de vegetación
YIF12	204228	2290032	17	Chocholá	Chocholá	Uso de quema de vegetación sin control
YIF13	197627	2285412	25	Kopomá	Kopomá	Presencia de agricultura y quema frecuente de vegetación este último sin control
YIF14	246740	2245274	80	Oxkutzcab	Venustiano Carranza	Presencia de propagación de incendios a orillas de carreteras
YIF15	242882	2227368	81		Xul	Solo pequeñas prácticas de quema de uso de vegetación este de manera frecuente
YIF16	260363	2197550	72	Tekax	San Diego	Uso de quema frecuente de vegetación esto en un 40 por ciento de las actividades del hombre
YIF17	268288	2229603	45		Ticum	Uso de quema frecuente de vegetación sin control en un 30 por ciento, a veces temporal
YIF18	272297	2258504	NA	Taebo	Xuxcab	Tipo de vegetación Selva mediana subcaducifolia
YIF19	378072	2273667	NA	Valladolid	Santa Cruz	Tipo de vegetación Selva mediana subcaducifolia
YIF20	242709	2340609	NA	Ixil	Ixil	Zona urbana
YIF21	304103	2315459	NA	Izamal	Balamtum	Tipo de vegetación Selva mediana subcaducifolia
YIF22	246408	2206726	NA	Tekax	Yaxche	Tipo de vegetación Selva mediana subcaducifolia
YIF23	158755	2315829	NA	Celesún	Santa Rosa	Tipo de vegetación Petén
YIF24	200547	2286612	NA	Kopomá	Kopomá	Tipo de vegetación Selva mediana subcaducifolia

NA: No aplica este valor debido a que son puntos verificados únicamente por vía aérea

A continuación para conocer mejor las características de las zonas con más probabilidades de incendios, se hace una breve descripción de los puntos tomados vía terrestre que se encuentran dentro o más cercanos a las mismas.

En la localidad de San José (YIF01), se observan áreas de una agricultura que están marcadas como una práctica frecuente de quema (Fotografía 241). Por otra parte, en la Localidad de Tizimín con clave YIF02 el fuego es utilizado para preparar una parcela y cultivar, ya que facilita la remoción de vegetación (Fotografía 242).



Fotografía 241. Se muestran zonas de Agricultura las cuales son representativas a las prácticas de quema de la vegetación original.



Fotografía 242. Muestra el tipo de vegetación que es Pastizal cultivado e Inducido, y la agricultura de temporal.

De manera similar, se menciona que dentro de las localidades de Moctezuma (YIF03), existen zonas de pequeños cultivos de pastizal inducido para las actividades ganaderas que son también uso de practicas de quema de la vegetación original, ya que la zona presenta pendientes muy suaves de hasta 2° de inclinación, lo que facilita el desarrollo de las actividades agrícolas.

La vegetación de manera general se encuentra en zonas de agricultura de temporal así como la existencia de terrenos para ganado, esto en las cercanías del poblado, y parcelas con grandes cantidades de pastizal seco como se muestra en la Fotografía 243. Con lo que respecta a las practicas frecuentes de quema de vegetación, se puede decir que lo anterior se constituye en un método de cultivo empleado desde hace años por lo cual esta práctica hace más productivas sus cosechas.

En los Municipio de Río Lagartos y Tizimín sobre las localidades de San Salvador (YIF04) y en cercanías a la localidad de las Coloradas, se presenta un índice de susceptibilidad de tipo alto relacionando con la quema frecuente de pastizales para cambio de uso de suelo, y donde se realizan las prácticas agrícolas, así como para la producción de ganado vacuno en modalidad extensiva (Fotografía 244).

Los tipos de vegetación de estas áreas observadas son: Pastizal Cultivado, Manglar, Petén, y Selva Baja Subperennifolia, con vegetación secundaria arbustiva.



Fotografía 243. En la Col. Moctezuma al Noreste del municipio de Tizimín, el fuego es utilizado para preparar una parcela para cultivar ya que facilita la limpia de vegetación.



Fotografía 244. Hacia la Col. San Salvador se observa la el tipo de vegetación y de sus pastizales secos.

Los puntos de verificación YIF05 y YIF06 tienen un tipo de susceptibilidad media, se presentan en el municipio de Tizimín sobre todo en la localidad de Panabá donde se muestra una quema de la vegetación con relación a la agricultura, (Fotografía 245) y en la localidad de Sucopo, donde se observan las extensas áreas dedicadas para la ganadería (Fotografía 246).



Fotografía 245. Hacia la localidad de Panabá se observa un tipo de susceptibilidad media.



Fotografía 246. Vegetación predominada por pastizal cultivado.

En el caso de la localidad Las Ruinas con la Clave (YIF07). La vegetación de estas áreas observadas es de Pastizal inducido. Y se propicia la quema agrícola para la limpieza de terrenos (Fotografía 247).



Fotografía 247. En la localidad de las Ruinas, Municipio de Tizimín se observa un pequeño incendio para fines de limpieza del terreno.

En la colonia el Álamo con la clave YF08, municipio de Tizimín, siguen con la práctica de roza tumba y quema, para ampliar la frontera agrícola de nuevos cultivos.

Sin embargo, en la Fotografía 249 la vegetación que se muestra pertenece a la localidad de X-Catzin, son: agricultura de temporal, selva mediana caducifolia, Subcaducifolia y pastizal cultivado, en los alrededores del poblado que corresponde al municipio de Chemax (Clave YF09), el uso actual del suelo es agropecuario, esto favorece que después de cada ciclo anual de cosecha sea sometido a una quema controlada.



Fotografía 248. Se observa el color café oscuro después de una quema de pastizal.



Fotografía 249. Se observan la zona de vegetación que es muy representativa como zonas de pastizales para la agricultura de temporal Municipio de Chemax.

En los municipios de Temozón y El Palomar con la claves YIF10 y YIF11 respectivamente, se identificaron algunos indicios de propagación de incendios forestales (Fotografías 250 y 251). Se observa que son grandes extensiones de pastizales con vegetación arbustiva ya seca por el periodo de estiaje que facilita la propagación de los incendios. En este caso el incendio se realizó para la limpieza del terreno con fines agrícolas.



Fotografía 250. Se muestra la propagación de incendios forestales dentro de la localidad de Temozón.



Fotografía 251. Vista panorámica que muestra la remoción de cubierta vegetal para introducir pastizal, con fines pecuarios.

Si siguiendo con la descripción de campo en el municipio de Chocholá clave YIF12 se observan quemados sin control donde la vegetación que se presenta en esta zona es del tipo selva baja Subcaducifolia y selva baja Subperennifolia las cuales son características a climas tropicales de temperaturas de 20-29 grados centígrados y en que sus árboles presentan alturas entre 6 y 8 m, donde la mitad de sus hojas caen en temporadas de sequía lo que hacen más factible la posible incidencia a incendios forestales. También algunas especies de árboles son usadas con fines maderables. (SEMARNAT 2012). Es también observable que el desmonte y acumulación de vegetación tienen como medida de control las quemaduras, la Fotografía 252, muestra la remoción de la vegetación y acumulación de maleza que se suscitó en un predio para ampliar la frontera agrícola y de pastoreo.

En el municipio de Kopomá se identificaron las localidades que presentan un tipo de susceptibilidad alta por acumulación de puntos de calor, además de contar con pendientes muy suaves entre los 0-2°; también se aprecia que los incendios se siguen originando como una medida de control de la maleza de áreas destinadas a la agricultura (Fotografía 253).



Fotografía 252. Se muestra la quema sin control de la vegetación la cual corresponde a la localidad de Chocholá.



Fotografía 253. Se muestra la quema de suelo dentro del municipio de Kopomá.

En las localidades de Venustiano Carranza y Xul municipio de Oxkutzcab, con Claves de verificación de campo YIF14 y YIF15 respectivamente, se observó que para el tipo de vegetación en estas zonas es de Selva Mediana Caducifolia y Selva Mediana Subcaducifolia con Vegetación Secundaria y Herbácea, y áreas de agricultura de temporal, prevaleciendo el uso frecuente de quema de la maleza, esto principalmente a las orillas de las carreteras y en campos de cultivo (Fotografías 254 y 255). En detalle, en esta última se aprecian las parcelas y como el uso del fuego se utiliza para ampliar la frontera agrícola y preparación del terreno (roza-tumba-quema).



Fotografía 254. En esta imagen se puede observar la ignición de un incendio forestal a la orilla de la carretera con dirección al municipio de Oxkutzcab.



Fotografía 255. Se observa el incremento de la quema de maleza a la orilla de la carretera con trayecto a la localidad de Xúl en el municipio de Oxkutzcab.

Algunos pobladores del municipio de Tekax, mencionan que estas prácticas (roza-tumba-quema) son realizadas para la obtención de buenas cosechas, principalmente en la localidad de San Diego (YIF16) con trayecto a la localidad de Becanchén (Fotografía 256).

De manera consecuente se identificaron los tipos de susceptibilidad alta en la localidad de Ticum, municipio de Tekax (YIF17), donde el tipo de vegetación existente es Selva Mediana Caducifolia y Selva Mediana Subcaducifolia con Vegetación Secundaria herbáceas y agricultura de temporal (Fotografía 257).



Fotografía 256. Se observa el terreno después de la quema de vegetación. Se distingue el color café-rojizo característico de las primeras quemadas.



Fotografía 257. Se muestra el uso del fuego para la quema de la vegetación, para limpiar el terreno y obtener una mejor cosecha, localidad de Ticum municipio de Tekax.

Con lo que respecta a los puntos de verificación que van del YIF18 al YIF24, éstos a diferencia de los anteriores, no cuentan con mayor información ya que fueron tomados vía aérea, sin embargo de acuerdo a lo observado y corroborado en datos bibliográficos, corresponden a zonas de selva mediana subcaducifolia y selva baja espinosa, en conjunto estas comunidades vegetales representan ecosistemas muy sensibles al fuego y a su vez son de gran valor ecológico para su conservación (fotografías 258 a 264).



Fotografía 258. YIF18 Vista aérea de la localidad Xuxcab Municipio de Teabo (Selva Mediana Subcaducifolia).



Fotografía 259. YIF19. Vista aérea de un incendio cerca a la localidad Santa Cruz, municipio de Valladolid.



Fotografía 260. YIF20. Vista aérea del municipio de Ixil, asociado a susceptibilidad muy alta en las inmediaciones por el tipo de vegetación de selva baja espinosa.



Fotografía 261. YIF21. Vista aérea de la localidad Balamtum, municipio de Izamal, muestra zonas agrícolas.



Fotografía 262. YIF22. Vista aérea de la comunidad de Xanché, municipio de Tekax, muestra selva mediana subcaducifolia susceptible a incendios.



Fotografía 263. YIF23. Vista aérea en las inmediaciones de la localidad Santa Rosa-Petén, municipio de Celestún.



Fotografía 264. YIF24. Vista aérea de la localidad Opinchén, municipio de Kopomá.

En resumen de acuerdo a las características de las localidades y municipios descritos, la generación de la mayor parte de los incendios, corresponden a actividades de origen antropogénico, y los incrementos de dichos incendios forestales son más abundantes especialmente en las zonas con mayor presencia de pastizales donde se ha dado usos mixtos entre agricultura de temporal y pastoreo para ganado. La quema controlada no representa una afectación evidente a las comunidades vegetales, sin embargo, las fotografías muestran que se amplía la frontera agrícola con fuego o para reducir la maleza resultado del fenómeno de roza, tumba y quema y/o como mejorador de suelo. De igual forma se puede apreciar en muchas de ellas que se deja fortuitamente la acción del fuego en los pastizales lo cual pudiera dar como resultado un incremento de la potencia del mismo por acción del viento o del combustible.

VIII.8.6. Determinación de Susceptibilidad de Incendios Forestales.

Los incendios sin un control suelen propagarse más rápido y quemar a temperaturas más altas que las quemaduras prescritas, extendiéndose a zonas vulnerables, en donde predominan ecosistemas compuestos principalmente por plantas y animales que no poseen las adaptaciones necesarias que les permiten sobrevivir o aprovechar al fuego. En estas zonas destacan ecosistemas con vegetación como selvas bajas y medianas, ecosistemas sensibles o de alto riesgo, debido a que albergan gran número de especies silvestres que son puestas en riesgo ante la presencia de fuego.

En los ecosistemas sensibles al fuego, los incendios intensos, frecuentes y de larga duración eran ocurrencias raras. La mayor parte de las plantas y animales que reinciden en estos hábitats carecen de adaptaciones para responder de manera positiva al fuego o recuperarse rápidamente después de un incendio como son el pecarí rayado, el jaguar, el jabalí, el venado cola blanca, el pavo de monte, el faisán, principalmente (*The Nature Conservancy*, 2004).

Con el análisis de las variables tomadas en cuenta como son: La Reincidencia, Frecuencia de los puntos de Calor, el Espesor de Horizonte O, la Severidad de las sequías y los ciclones tropicales al sobreponer los niveles de información, los datos resultantes de cada uno de los factores se suman, dando como resultado un mapa donde se delimitan las zonas de índice de peligro por incendios forestales. A partir del análisis de estos factores, se obtuvo una zonificación cuyos rangos predominantes son de índice Alto a Medio a Bajo y con menor recurrencia áreas de índice Muy Alto.

Conforme al resultado final, se corroboró con otro modelo con el *software* ArcGis versión 10.0, se utilizó la extensión (*AHP*) del, el cual consiste en agregar las capas de información requeridas en formato *raster*, se estructuró de la siguiente manera: Modelo de combustible, espesor del horizonte O, frecuencia de los puntos de calor, incidencia de los puntos de calor, Frecuencia de Ciclones Tropicales e índice de sequía. Posteriormente, se hace la matriz lineal con estos parámetros y se les asigna un valor, para que sean ponderados, dando como resultado el peso para cada uno de ellos (Figura 414).

El resultado del modelo es la suma de los valores asignados para cada uno de los atributos, para realizar esta suma cartográfica de atributos se homologaron las bases de datos de cada uno de ellos, bajo el siguiente criterio: Los valores se dividieron en cuatro clases, los mínimos corresponden al rango bajo y los valores máximos al rango muy alto. (Figura 415).

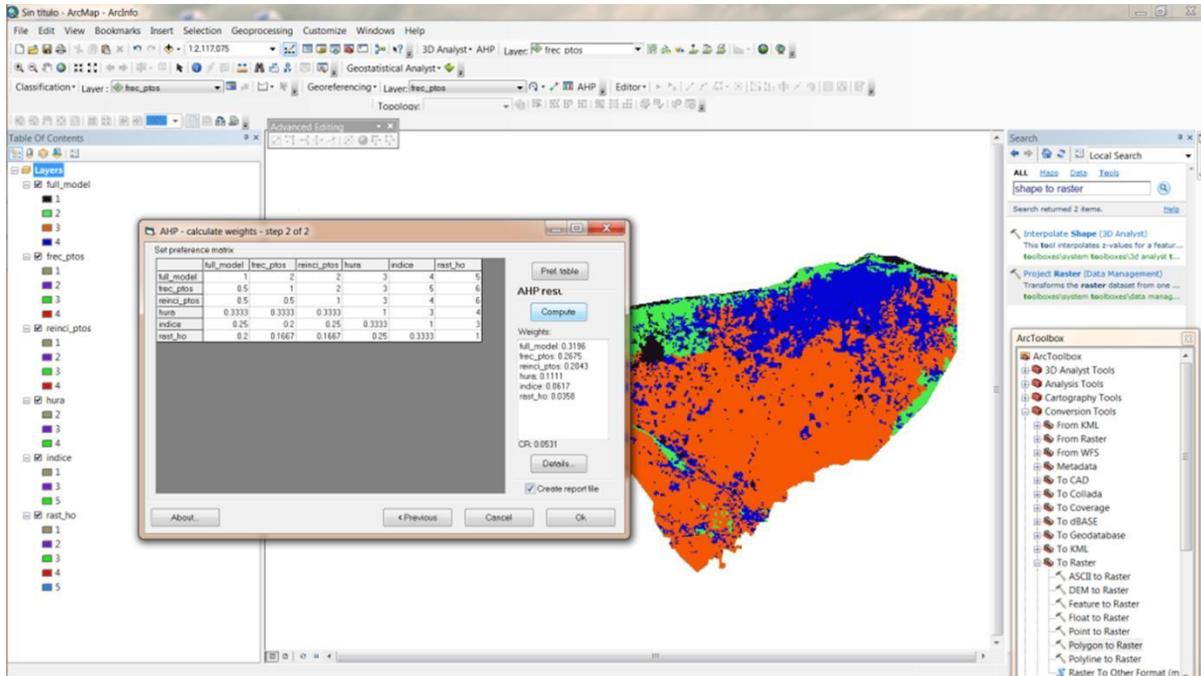


Figura 414. Esquema del proceso para la generación del mapa de susceptibilidad con (AHP) Arc Map. V 10.

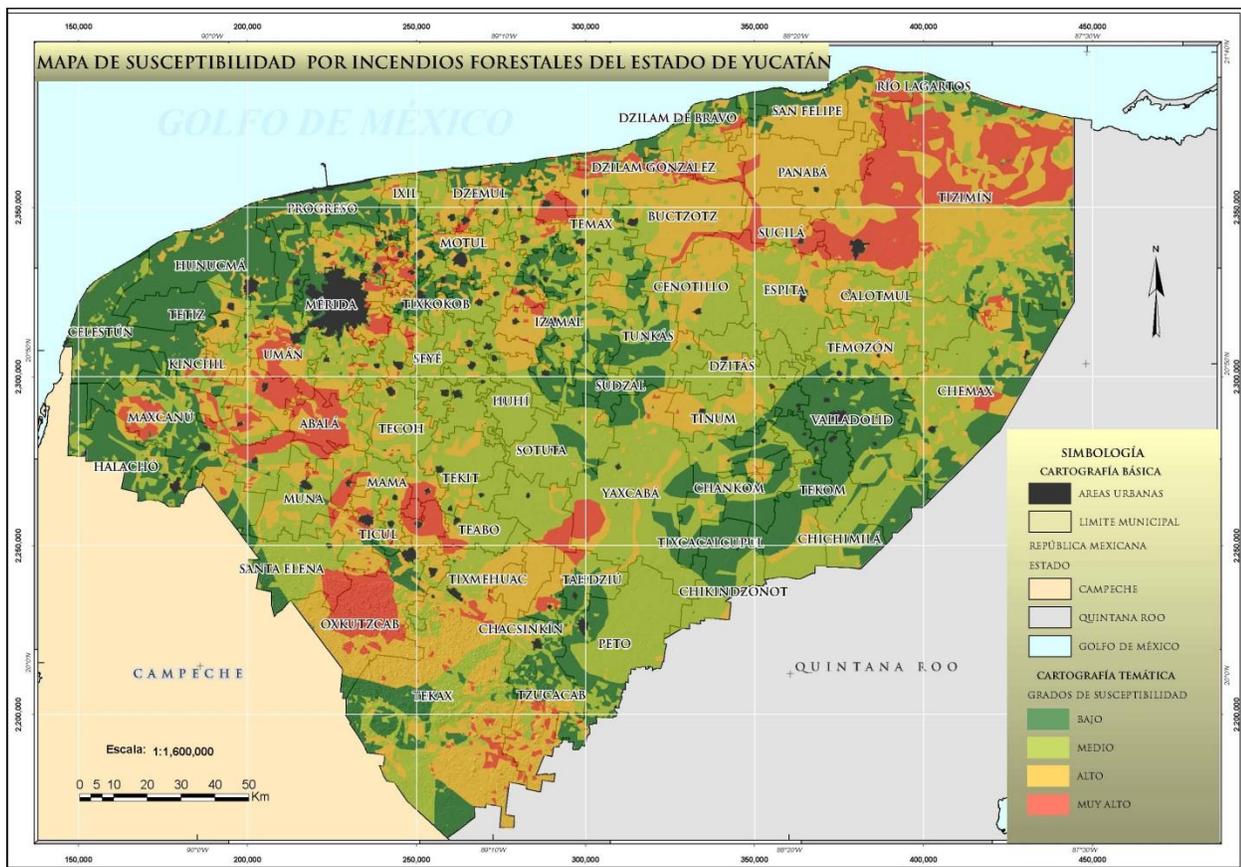


Figura 415. Mapa de susceptibilidad por incendios forestales.

Las áreas identificadas en el mapa susceptibilidad muestran los rangos asignados de acuerdo a la escala de valores utilizados de la suma de las variables ambientales utilizadas como resultado del proceso de análisis Jerárquico.

La Tabla 212 muestra las superficies identificadas por grado de susceptibilidad, para el grado de susceptibilidad Bajo representa el 22%, Medio 37%, Alto 27% y Muy Alto con el 10%, con respecto a la superficie terrestre del estado.

Tabla 212. Superficie estimada por grado de susceptibilidad.

GRADO DE SUSCPTIBILIDAD	SUPERFICIE HA	PORCENTAJE	SUPERFICIE DEL ESTADO	MUNICIPIOS	LOCALIDADES
Bajo	886300	22.22	3988780	104	424
Medio	1486248	37.26		106	639
Alto	1094755	27.45		106	846
Muy Alto	400750	10.05		77	462

Los municipios con mayor susceptibilidad de grado muy alto de incendios son: Maní con 8170 ha, que equivale a 64%, Abalá con 1713 ha. 59%, Dzán con 3404 ha.42%, Oxkutzcab 34476 ha. 39% y Tizimín con 141,659 ha, representa el 36% respecto a la superficie del Municipio. En la.Tabla 213 y Figura 415. se muestran las superficies de los municipios asociadas a una susceptibilidad muy alta.

Tabla 213. Municipios que presentan un grado de susceptibilidad Muy Alto de incendios forestales.

MUNICIPIO	SUPERFICIE HA SUSCEPTIBILIDAD MUY ALTA	SUPERFICIE HA MUNICIPIO	PORCENTAJE
Abalá	17513	29301	59.77
Acanche	888	13736	6.46
Baca	278	10855	2.56
Bokobá	31	7174	0.43
Buctzotz	4577	65429	7.00
Cansahcab	743	12885	5.77
Cantamayec	5846	35638	16.40
Cenotillo	926	54247	1.71
Chacsinkín	2148	11469	18.73
Chapab	2574	16955	15.18
Chemax	4754	139752	3.40
Chixchulub Pueblo	185	4431	4.18
Chocholá	10140	29326	34.58
Chumayel	44	8389	0.52
Conkal	1908	6340	30.09
Cuncunul	15	13586	0.11
Dzán	3404	7998	42.56
Dzemul	729	17422	4.18
Dzidzantún	6658	20759	32.07
Dzilam De Bravo	6564	43223	15.19
Dzilam González	9356	50648	18.47
Espita	4538	73505	6.17
Halachó	275	58747	0.47
Hoctún	6	12071	0.05
Hunucmá	139	84097	0.17
Ixil	342	13687	2.50
Izamal	1729	45887	3.77
Kanasín	3765	10238	36.77
Kaua	69	13732	0.50
Kinchil	1336	35645	3.75

.....Continuación de Tabla 213

MUNICIPIO	SUPERFICIE HA SUSCEPTIBILIDAD MUY ALTA	SUPERFICIE HA MUNICIPIO	PORCENTAJE
Kopomá	5236	15797	33.15
Mama	3348	10048	33.32
Maní	8170	12687	64.40
Maxcanú	10004	91242	10.96
Mérida	5356	88434	6.06
Mocochá	1203	4726	25.45
Motul	395	32079	1.23
Muna	1077	39782	2.71
Opichén	8143	25975	31.35
Oxkutzcab	34476	86372	39.92
Panabá	4271	66505	6.42
Peto	185	105515	0.18
Progreso	177	43067	0.41
Rio Lagartos	8119	33740	24.06
Sacalum	6372	19899	32.02
Samahil	878	16088	5.46
San Felipe	24	45196	0.05
Santa Elena	6534	51444	12.70
Seyé	673	17825	3.78
Sinanché	32	13433	0.24
Sucilá	8819	30713	28.71
Tecoh	332	36783	0.90
Tekantó	1579	7982	19.78
Tekax	11817	277016	4.27
Tekit	45	28117	0.16
Tekom	85	27305	0.31
Telchac Pueblo	1425	5798	24.58
Temax	49	33762	0.15
Teya	53	7789	0.68
Ticul	4610	34025	13.55
Timucuy	510	13470	3.79
Tinum	101	47043	0.21
Tixkokob	656	17239	3.81
Tixmehuac	162	23029	0.70
Tixpéhual	431	7096	6.07
Tizimín	141659	388251	36.49
Tzacacab	5502	76585	7.18
Ucú	100	13097	0.76
Umán	10128	34953	28.98
Yaxcabá	9551	147430	6.48
Yaxkukul	1915	4954	38.66
Yobaín	240	13183	1.82

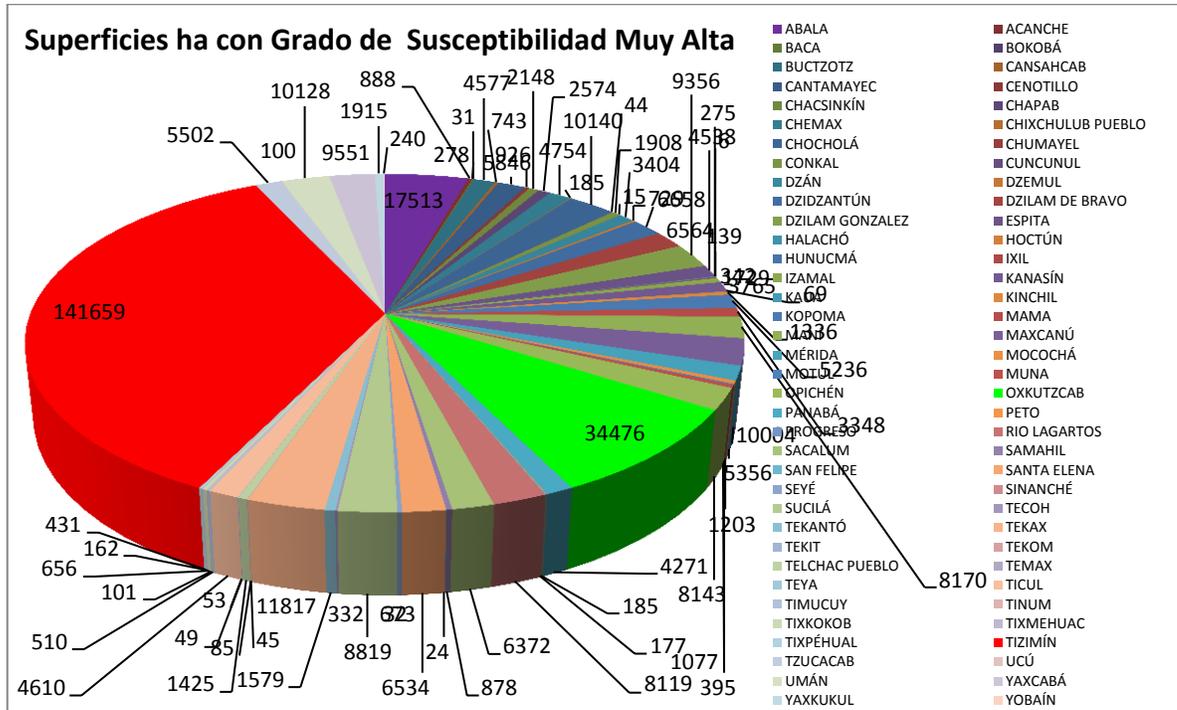


Figura 416. Municipios que presentan un grado de susceptibilidad Muy Alta de incendios forestales.

VII.7.6.1. Determinación de Amenaza de Incendios Forestales

La alteración de los regímenes de fuego en las tierras de los bosques tropicales es una amenaza significativa a la biodiversidad de los ecosistemas sensibles al fuego. Las fuentes de esta amenaza incluyen la alteración del uso tradicional del fuego, las quemas asociadas con los cambios en el uso del suelo y prevención de incendios (Mayers, 2005)

Debido a la dificultad de representar espacialmente los agentes causales de los incendios asociados al comportamiento humano en relación al fuego, García *et al*, 1999 y Almeida, 1994 *in* Muñoz, 2005 estimaron una relación indirecta con las actividades antropogénicas, utilizando las distancias a carreteras, poblaciones, tipo de propiedad y valor comercial.

En el Atlas de Peligros del Estado de Yucatán, para la generación del mapa de amenaza de incendios forestales, se realizó el análisis de las condiciones de la infraestructura dentro del Estado, y las variables críticas asociadas a causas antropogénicas de incendios. Por ejemplo, los incendios inducidos o provocados fueron considerados a partir de las distancias que hay entre las carreteras y localidades con respecto a los mismos.

Entre otros aspectos, los mapas que se tomaron en consideración para este apartado fueron:

Mapa de vías de comunicación:

Se realizó una clasificación por densidad, longitud, distancia y por tipo de carretera. Tomando estos criterios se procedió a realizar una conversión de líneas a puntos, para poder hacer la interpolación de datos, de este proceso se obtuvieron polígonos, a los que se les otorgo el valor de 1 a 4 para su aplicación en la suma de atributos y jerarquización de los mismos.

Mapa de áreas urbanas

Se hizo un análisis de las 127 áreas urbanas, clasificándolas por, tipo vivienda y la distancia promedio de 500 mts., dependiendo del tipo de vegetación y uso de suelo (INEGI, 2005). Tomando estos criterios se procedió a realizar la interpolación de datos, otorgándoles también valores de 1 a 4 dependiendo del tipo de viviendas en las localidades.

Mapa de infraestructura

El proceso es el mismo para el Modelo e Área Urbana, sólo que en este caso asocia los niveles de información de vías de comunicación tanto principales, secundarios y accesos tipo terracería que se incluyen en los niveles vectoriales de INEGI.

Generación del mapa de Amenaza.

A partir de la ponderación del mapa de susceptibilidad con el mapa de infraestructura, que incluye el análisis de carreteras y poblaciones se obtiene como resultado el mapa de amenaza por incendios forestales. Los valores obtenidos se dividieron en cuatro clases, donde los mínimos corresponden al rango muy bajo y los valores máximos al rango muy alto (Figura 417. 417).

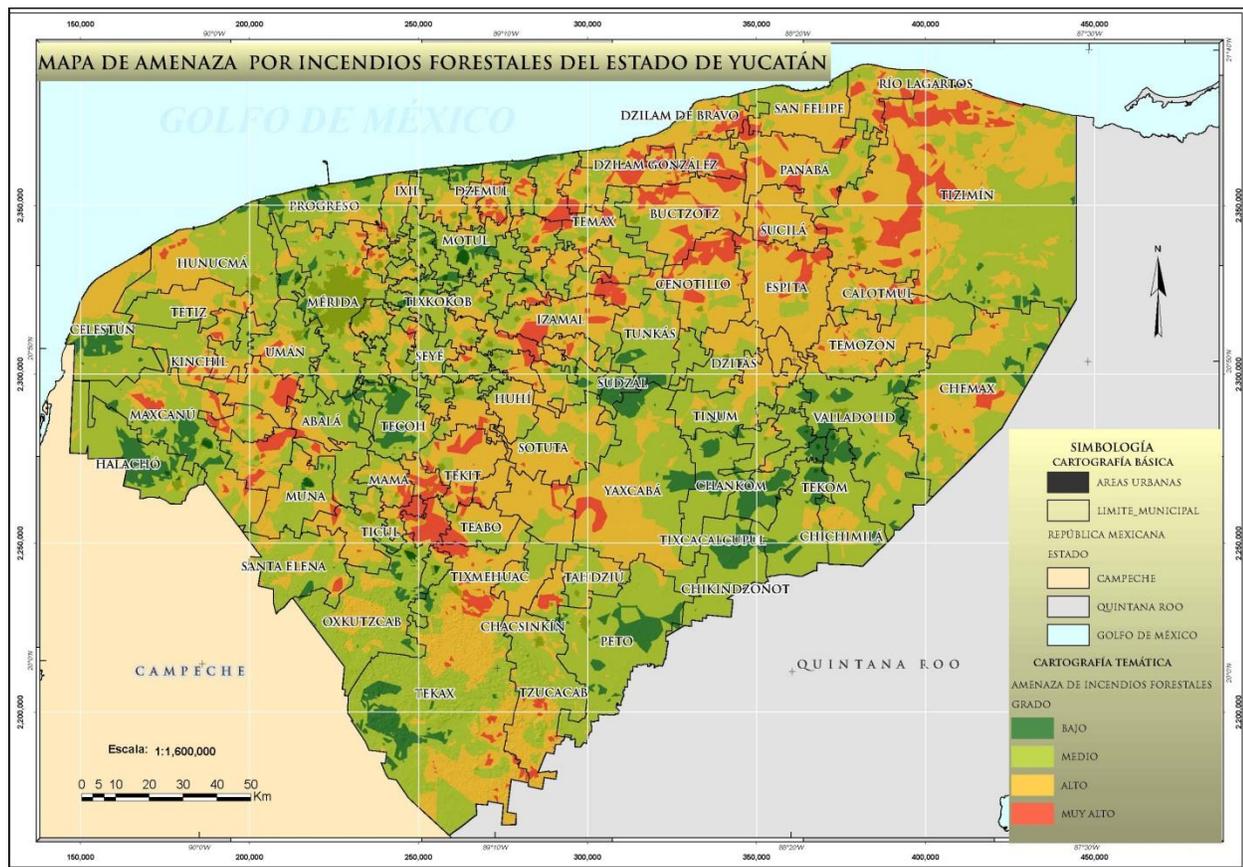


Figura 417. Mapa de amenaza por incendios forestales.

Con base al resultado obtenido en el mapa de amenaza por incendios forestales se identificaron las áreas que pudieran ser afectadas por este fenómeno. De acuerdo a las superficies estimadas, se suscitaron de la siguiente forma: Nivel de Amenaza Bajo, 255,316 ha, representa el 6.40 %. Amenaza Medio, 192,507.40, equivalente a un 48.26 %. Amenaza Alto con 153,865.80, significa un 38%, y Amenaza Muy Alto cuya superficie es 24,848.70., corresponde a 6.23%. (Tabla 214). El número de municipios que se pudieran ser afectados son: Grado de Amenaza Bajo, 61, con

162 localidades inferiores a 2500 habitantes, Amenaza Medio 105, con 1242 localidades, Amenaza Alto 104, con 1010 localidades y Amenaza Muy Alto 77, con 168 localidades.

Tabla 214. Superficies estimadas en relación al nivel de amenaza.

NIVEL DE AMENAZA	SUPERFICIE HA	PORCENTAJE	SUPERFICIE DEL ESTADO HA	MUNICIPIOS AFECTADOS	LOCALIDADES
Bajo	25,531	6.40	398,878	61	162
Medio	192,507	48.26		105	1242
Alto	153,865	38.57		104	1010
Muy Alto	24,848	6.23		77	168

De los 77 municipios considerados dentro del nivel de amenaza Muy Alto, 37 de ellos cuentan con 168 localidades mayores a 3 e inferiores a 2500 habitantes. Los municipios que presentan mayor superficie son: Cansahcab con 2,398 ha lo cual representa el 22 % de superficie municipal, Chacsinkín 2140 con 22% , Espita 9,322 con 13%, Maní 8,736 con 69%, Sinanché 2,915 con 22%, Sucilá 3,805 ha con 12%, Taebo 3,144 ha con 14%, Tekal de Venegas 4,850 ha con 24%, Tekax 11,723 ha con 4%, Tekit 4,630 ha, con 16%, Tuxcacab 2,292 ha con 3% y Tizimín 46,751 ha equivale a 12% de la superficie total del municipio.

El número de viviendas ubicadas dentro de las áreas que pueden afectarse son 1,338 de ellas 1,163 están habitadas, el promedio de habitantes por vivienda es de 4, la tipología de vivienda es de tipo I, II y III, los costos por cada tipo de vivienda oscila entre los 12,500 y 150,500 pesos respectivamente. El número de habitantes registrados es de 2,379 para las 1,163 viviendas.

A continuación se muestran las 23 localidades con más de 10 habitantes, las cuales presentan un mayor amenaza respecto a su ubicación, la tendencia de los municipios más afectados en relación a su población son Hochtún, Maní, Tecax, Espita, Tzucacab, Cansahcab, Tizimín, Tahmek, Seyé y Conkal (Tabla 215).

Tabla 215. Localidades con población mayor a los diez habitantes.

MUNICIPIO	LOCALIDAD	POBLACIÓN TOTAL	TOTAL DE VIVIENDAS	TIPO DE VIVIENDA	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL POR LOCALIDAD	AREA Km ²	SUPERFICIE (HA)	AMENAZA
Hochtún	San José Oriente	990	219	1	12500.00	2737500.00	31.05	3,105.00	MUY ALTO
Maní	Tipikal	951	247	2	50000.00	12350000.00	87.36	8,736.00	
Tekax	Manuel Cepeda Peraza	573	163	2		8150000.00	117.23	11,723.00	
Espita	Holcá	552	144	2		7200000.00	93.22	9,322.00	
Tzucacab	Corral	336	104	2		5200000.00	22.92	2,292.00	
	Sacbecán	236	56	2		2800000.00			
Cansahcab	Santa María	209	68	2		3400000.00	23.98	2,398.00	
Tahmek	Xtabay	110	40	2		2000000.00	2.66	266.00	
Tizimín	Dzonot Box	84	23	2		1150000.00	467.51	46,751.00	
Seyé	Bolonixán	40	10	2		500000.00	4.74	474.00	
Chacsinkín	Xno-Huayab	38	7	1		12500.00	87500.00	21.40	
Tekal De Venegas	San Felipe	33	8	2	50000.00	400000.00	48.50	4,850.00	
Tekax	Plan Chac Pozo Uno	22	17	1	12500.00	212500.00	117.23	11,723.00	
Espita	Dzadz Pichí	19	4	1		50000.00	93.22	9,322.00	

.....Continuación de Tabla 215

MUNICIPIO	LOCALIDAD	POBLACIÓN TOTAL	TOTAL DE VIVIENDAS	TIPO DE VIVIENDAS	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL POR LOCALIDAD	AREA Km ²	SUPERFICIE (HA)	AMENAZA
Tizimin	El Ramonal	18	7	1		87500.00	467.51	46,751.00	
	El Cerrito	13	6	1		75000.00			
	Buenavista	13	5	1		62500.00			
	Dzadz Mahas	12	2	1		25000.00			
	Dzidzilá	11	3	1		37500.00			
	San Ángel	11	1	1		12500.00			
	Dzodzil	10	2	1		25000.00			
	San Luis	10	4	1		50000.00			
Conkal	San Diego Cutz	10	3	3	150500.00	451500.00	5.60	560.00	
		4301	1143	35		47064000			

Análisis de Datos por Método Estadístico de Pearson

Para comprobar la relación directa que tienen las variables utilizadas para determinar el mapa de amenazas por incendios forestales y corroborar la confiabilidad de los datos de las variables se utilizó el modelo de correlación de Pearson mediante el *software* SPSS (*Statistical Package for the Social*).

El coeficiente de correlación de Pearson, aplica para variables cuantitativas (escala mínima de intervalo), es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente, que sus valores absolutos oscilan entre 0 y 1. Esto es, si tenemos dos variables X, Y, el signo el coeficiente de correlación de Pearson oscila entre -1 y +1. No obstante la magnitud de la relación viene especificada por el valor numérico del coeficiente, reflejando el signo la dirección de tal valor. En este sentido, tan fuerte es una relación de +1 como de -1.

Para comprobar los resultados obtenidos en la matriz anterior en donde muestra la correlación lineal entre la frecuencia de los puntos de calor (componente1) y el índice de sequía (componente 2) el porcentaje de la varianza es de la suma de ambos igual a 47.51 (Tabla 216).

Tabla 216. Análisis de la varianza.

AUTO VALORES			
COMPONENTE	TOTAL	% DE LA VARIANZA	% ACUMULADO
1	2.329	30.30	70.55
2	1.277	16.62	21.22
3	1.324	17.22	22.79
4	0.686	8.92	6.12
5	0.543	7.07	3.84
6	0.982	12.77	12.54
7	0.547	7.11	3.89

Para medir el grado de concordancia que existe entre la distribución de las variables se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov. El resultado demuestra el valor entre las variables de frecuencia de puntos de calor, (0.874), espesor del horizonte O de suelo (0.498), reincidencia de los puntos de calor (0.449) y ciclones (0.358). Lo que significa que estas cuatro variables son las que principalmente influyen en la detonación de un incendio forestal (Tabla 217)

Tabla 217. Prueba de Kolmogorov-Smirnov

PRUEBA	FRECUENCIA PUNTOS DE CALOR	REINCIDENCIA PUNTOS DE CALOR	ÍNDICE DE SEQUÍA	CICLONES	ESPESOR O DE SUELO	VIAS DE COMUNICACIÓN	POBLACIONES
Numero de Variables	18	18	18	18	18	18	18
Parámetros normales Media	2.8328	1.8322	2.13	2.5611	1.8844	3.2994	0.7417
Desviación típica	2.32864	1.27712	1.324	0.68563	0.54327	0.98160	0.54664
Diferencias más extremas Absoluta	0.140	0.203	0.242	0.218	0.195	0.261	0.348
Positiva	0.140	0.203	0.242	0.134	0.147	0.182	0.246
Negativa	-0.112	-0.146	-0.189	-0.218	-0.195	-0.261	-0.348
Z de Kolmogorov –Smirnov	0.593	0.861	1.025	0.926	0.829	1.107	1.478
Sig. asintót. (Bilateral)	0.874	0.449	0.245	0.358	0.498	0.173	0.025

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos

Los diagramas de dispersión muestran una estrecha relación entre las tres variables antes mencionadas (Figura 418.), y aunque las cuatro restantes no representan una correlación significativa, es importante mencionar que esto no las hace menos importantes ya que la influencia de las actividades económicas que se desarrollan en el estado de Yucatán, principalmente la agropecuaria y los ciclones son factores detonantes de los incendios.

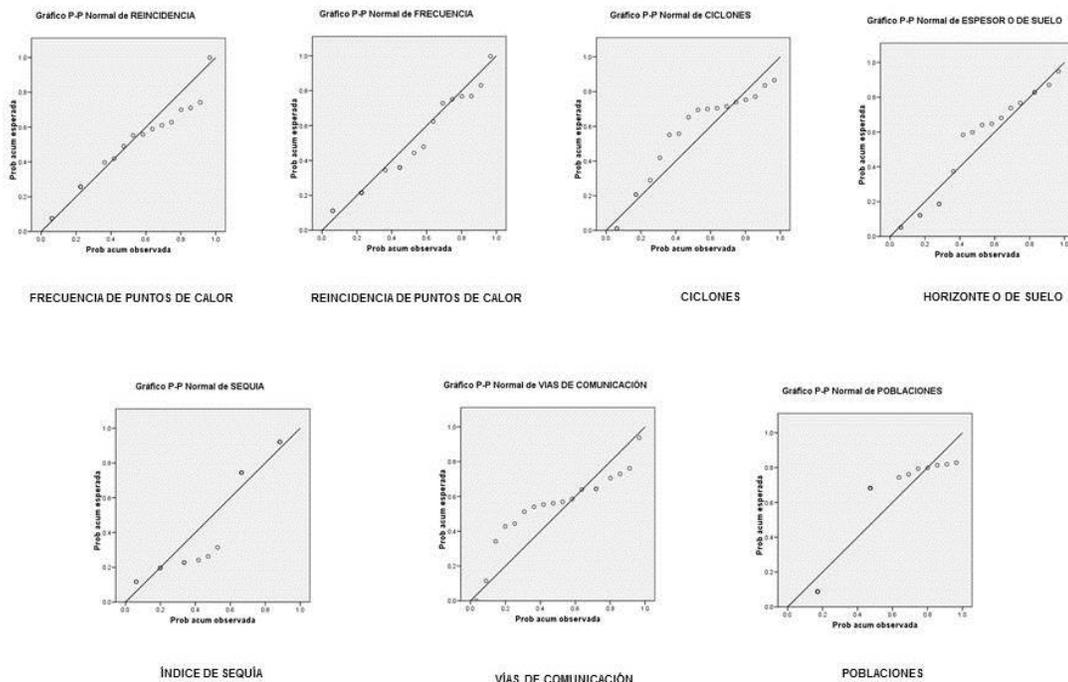


Figura 418. Dispersión de puntos de las 7 variables.

Debido a las variables que se consideraron como: 1) Los ciclones y tormentas tropicales, como fue los años 2005 con el Ciclón Wilma y 2008 con el paso de la tormenta tropical Dolly. 2) Las sequías, como se suscitó en el año 2009 que ha sido uno de los más secos al caer solo el 50% de lluvia que normalmente recibe el Estado. 3) La reincidencia y frecuencia de puntos de calor, nos permite tener un parámetro de los sitios que registran temperaturas que oscilan entre los 25 y 42° centígrados. 4) Espesor del horizonte O de suelo (materia orgánica), esta variable fue considerada debido al carecer de datos de carga de combustible por comunidad vegetal, es por ello que los datos que integran esta variable fueron realizados partir de la descripción de suelo en campo, con ello nos permitió identificar el uso actual de suelo y vegetación y determinar de manera general que tipo de carga de combustible existe en cada sitio muestreado. 5) Mapa de uso de suelo y vegetación, permitió identificar el tipo de comunidades vegetales más sensibles a incendios. 6) Vías de comunicación se identificaron las distancias y 7) Poblaciones, permitió establecer las actividades económicas realizadas en ellas.

Para corroborar el resultado obtenido por medio de las variables utilizadas, se realizó una correlación lineal, con el coeficiente de Pearson el cual dió como resultado la relación entre los puntos de calor y el índice de sequía. Por lo que los resultados esperados fueron los siguientes:

Para el estado de Yucatán la superficie identificada con un grado de amenaza Alto es de 178,714.50 ha lo que representa el 44.80% y Muy alto es de 24, 448 equivalente al 6%, conforme a la superficie terrestre del Estado

Los incendios registrados en Tizimín representa una superficie considerable con respecto al número de habitantes por Km², en contraste el municipio de Hochtún registra un mayor número de habitantes Km² y la superficie afectada es menor a la superficie total del municipio.

Amenaza por incendios en las Áreas Naturales Protegidas.

Las Áreas Naturales Protegidas de México (ANP) son regiones terrestres o acuáticas representativas de diversos ecosistemas, donde el ambiente original no ha sido significativamente impactado por la actividad del ser humano. La Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) administra actualmente 174 áreas naturales de carácter federal, representan 25 millones 384 mil 818 ha. Sin embargo, existen también Áreas Protegidas estatales, comunitarias o privadas. Están sujetas a regímenes especiales de protección, conservación, restauración y desarrollo, según categorías establecidas en la Ley. Ocupan el 12.92% del territorio nacional y producen beneficios ecológicos y sociales cada vez más reconocidos y valorados. (Bezaury *et al*, 2010).

Para el Gobierno de Yucatán las ANP tiene un papel fundamental como estrategia de política ambiental establecida en el Plan Estatal de Desarrollo 2007-2012, ya que las Áreas Naturales Protegidas tienen como objetivo primordial, el mantener la estructura y los procesos ecológicos que permiten una calidad ambiental adecuada y con ello un mejor nivel de vida para los pobladores de las mismas (SEDUMA, <http://www.seduma.yucatan.gob.mx/areas-naturales/>).

El uso del fuego para la preparación de terrenos agropecuarios dentro de las ANP es difícil de erradicar, ya que representa una herramienta barata, disponible y de gran importancia cultural para las comunidades rurales. Los incendios alteran principalmente el interior de las selvas y derivan en la pérdida del hábitat y la alteración de su estructura y composición, así como en la disminución de poblaciones silvestres, los efectos por los incendios son mínimos, sin embargo, los huracanes de gran intensidad que han impactado la región han provocado la caída de árboles y ramas, y esto ha generado la acumulación de material combustible, como el caso del impactó del huracán Emily en julio de 2005, que provocó la caída de árboles desde la raíz o el rompimiento de ramas; la mayor caída de árboles se observó en zonas con vegetación secundaria que crece en los bordes de los caminos rurales y carreteras, al contener individuos mayores de 8 m más expuestos a los fuertes vientos. La selva baja sufrió principalmente la caída de ramas y de hojas por el fuerte impacto del viento, el mayor porcentaje de estos daños ocurrió en zona de influencia de la Reserva de la Biósfera Ría Lagartos (CONANP, 2007). Lo que detonó que en el año 2006 se incrementará considerablemente los incendios forestales aproximadamente un 50% más que en el año 2005 (PCY, 2013).

Actualmente en el estado de Yucatán existen 15 Áreas Naturales Protegidas ocho de ellas las administra el Estado, una por el municipio, una Privada y las cinco restantes son administradas por la Comisión Nacional de áreas Naturales Protegidas (CONANP). (Tabla 218) El total cubren una superficie de 396,510 ha., lo que representa un 10 % del Estado, se tomó en consideración solo la superficie terrestre de cada una de ellas.

Los datos estadísticos para el análisis de la siguiente información vertida en este documento se obtuvo de la CONANP, 2010, SEDUMA, 2012 y del PDEY, 2013-2018. Las capas de información cartográfica digital se obtuvieron de la (CONANP, 2010 y del POETY, 2006) ocho de las quince ANP, por lo cual en el momento de este análisis no se contó con la cartografía digital de las reservas estatales, las cuales fueron excluidas.

Tabla 218. Áreas Naturales protegidas del estado de Yucatán.

NOMBRE DE LA ANP	CATEGORIA	TIPO DE ANP	SUPERFICIE TOTAL
Ría Celestún	Reserva De La Biósfera	Federal	34130
Ría Lagartos			43909
Playa Adjunta Ría Lagartos	Santuario		29
Balaan Kaax	Área de Protección de Flora y Fauna		15483
Otoch Ma'ax Yetel Kooh*			5367
Dzibilchantun	Parque Nacional	Estatal	537
Dzilam	Reserva Estatal		46885
El Palmar			39386
Ciénegas Y Manglares De La Costa Norte*			54776
Área Natural Protegida De Valor Escénico San Juan Bautista Tabi*			1355
Lagunas De Yalahau*			4683
Parque Estatal Kabah*			949
Reserva Estatal Biocultural Del Pucc*			135848
Reserva Ecológica Municipal Cuxtac*		Reserva Municipal	Municipal
Área De Conservación El Zapotal	Privada	Privada	2418

De acuerdo al mapa obtenido se identificaron las zonas que se pueden ver amenazadas por este fenómeno, el resultado se muestra en la (Figura 419. y Tabla 219) donde 182,777 ha., posiblemente se puedan ver amenazadas a sufrir algún tipo de incendio. 14,818 ha., muestran un grado de amenaza muy alto, 93,144 ha., un grado de amenaza Alto, 70,654, grado de amenaza Medio y 4,161 ha con un grado de amenaza Bajo.

Dzilam presenta 7,012 ha., El Palmar con 1,104 ha., y Ría Lagartos con 6697 ha., grado de amenaza Muy Alto. Esto se debe a las altas temperaturas que se registran en toda la costa norte del Estado aunado a los ciclones tropicales que afectan en un muy alto porcentaje la vegetación dejando a su paso derribó del árboles y remoción de la cubierta vegetal.

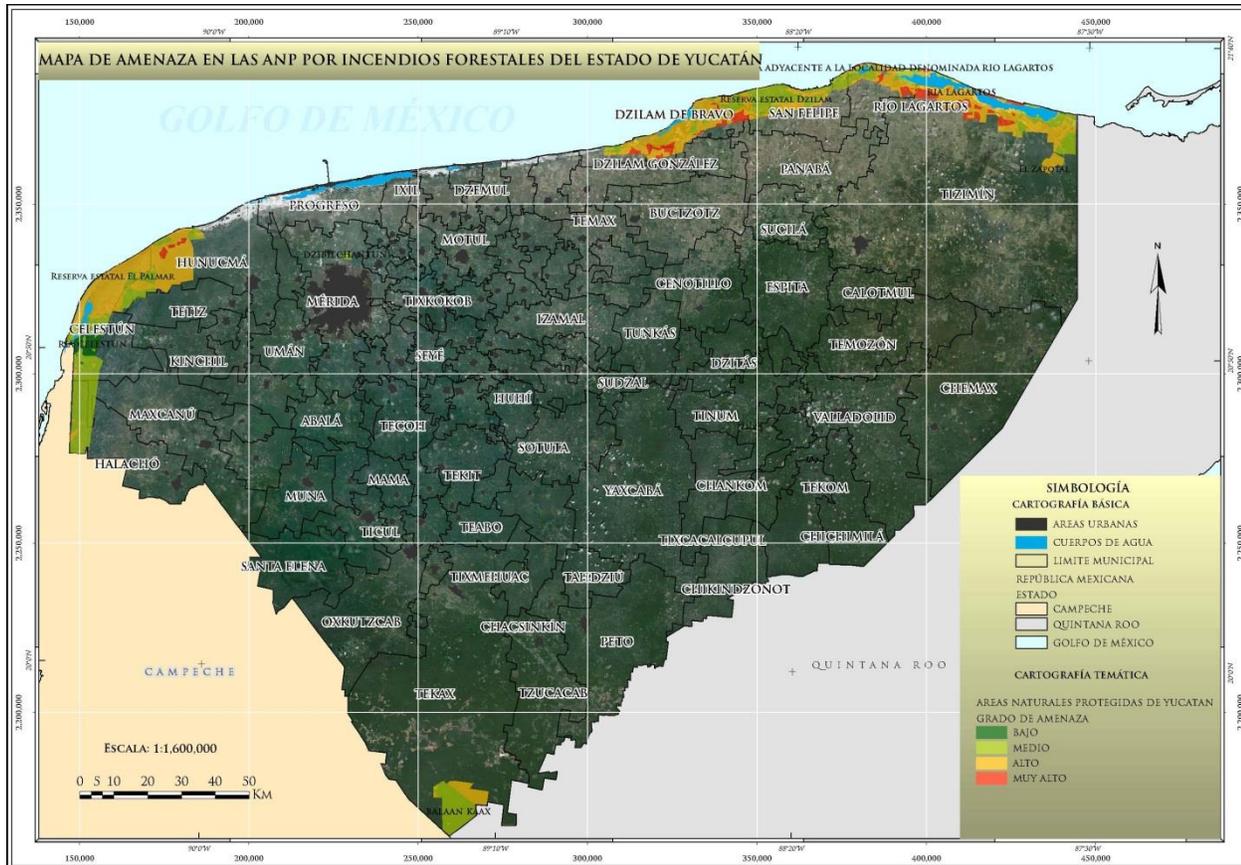


Figura 419. Mapa de Amenaza por Incendios Forestales de las Áreas Naturales Protegidas de Yucatán.

Tabla 219. Superficies por grado de amenaza de las áreas Naturales protegidas del estado de Yucatán.

NOMBRE DE LA ANP	GRADO DE AMENAZA HA				SUPERFICIE /HA
	MUY ALTO	ALTO	MEDIO	BAJO	
Balaan Kaax	0	4610	10873	0	15483
Dzibilchantun	0	50	396	91	537
El Zapotal	0	2282	136	0	2418
Playa De Ria Lagartos	5	15	9	0	29
Dzilam	7012	23677	16196	0	46885
El Palmar	1104	31165	7117	0	39386
Ría Celestún	0	6754	23306	4070	34130
Ría Lagartos	6697	24591	12621	0	43909
Suma Total	14818	93144	70654	4161	182777

Fuente POETY, 2006., CONANP, 2010., SEDUMA, 2012 Y PDEY, 2013.

Con el resultado del mapa se realizó un análisis de cada una de la ANP, incluyendo a los municipios que abarca y que tipo de comunidad vegetal se puede ver afectada, además de los costos de referencia para actividades de reforestación o restauración y su mantenimiento, para el concepto de compensación ambiental por cambio de uso del suelo en terrenos forestales, que implicaría en la restauración y conservación del tipo de vegetación de las ANP (Tabla 220). Los manglares tiene un costo por hectárea de \$40336.04, los Humedales \$167186.25 y las selvas \$12396.62 (DOF.25 de febrero de 2011).

Tabla 220. Superficies por grado de amenaza y costos por restauración y conservación por tipo de vegetación de las áreas Naturales protegidas del estado de Yucatán.

NOMBRE	CATEGORIA	MUNICIPIO	TIPO DE VEGETACION	GRADO DE AMENAZA HA				SUPERFICIE /HA	COSTO RESTAURACIÓN /HA	COSTO TOTAL		
				MUY ALTO	ALTO	MEDIO	BAJO					
Balaan Kaax	Apfyf	Tekax	Selva Mediana Subcaducifolia	0	4610	10873	0	15483	12396.62	191936867		
Dzibilchantun	Parque Nacional	Mérida	Selva Baja Caducifolia	0	50	396	91	537	12396.62	6656984.94		
El Zapotal	Privada	Tizimín	Selva Mediana Subcaducifolia	0	2270	110	0	2380	12396.62	29503955.6		
			Agricultura De Temporal	0			0	0	0	0	0	
			Tular	0	12	26	0	38	167186.25	6353077.5		
			Pastizal	0	0	0	0	0	0	0		
Playa De Ria Lagartos	Santuario	Tizimín	Vegetación De Dunas Costeras	2	6	3	0	11	0	0		
		San Felipe	Manglar	0		2	0	2	40336.04	80672.08		
		San Felipe	Vegetación De Dunas Costeras	0	1	2	0	3	0	0		
		Ria Lagartos	Vegetación De Dunas Costeras	3	8	2	0	13	0	0		
Dzilam	Reserva Estatal	Dzilam De Bravo	Manglar	137	10168	4030	0	14335	40336.04	578217133		
			Tular	305	1104	60	0	1469	167186.25	245596601		
			Peten	26	100	354	0	480	167186.25	80249400		
			Selva Baja Caducifolia	152	4357	1742	0	6251	12396.62	77491271.6		
			Pastizal	2345	1960	89	0	4394	0	0		
		Dzilam De Gonzalez	Manglar	38	106	1	0	145	40336.04	5848725.8		
			Tular	1	0	0	0	1	167186.25	167186.25		
			Selva Baja Caducifolia	121	1274	3	0	1398	12396.62	17330474.8		
		San Felipe	Pastizal	926	207		0	1133	0	0		
			Manglar	1209		7605	0	8814	40336.04	355521857		
			Tular		1189	208	0	1397	167186.25	233559191		
			Selva Baja Caducifolia	1680	348	1584	0	3612	12396.62	44776591.4		
			Pastizal	22	2864	346	0	3232	0	0		
		Panabá	Peten	0	0	174	0	174	167186.25	29090407.5		
		El Palmar	Reserva Estatal	Celestún	Pastizal	50	0	0	0	50	0	0
					Manglar	0	7862	366	0	8228	40336.04	331884937
Tular	0				2209	113	0	2322	167186.25	388206473		
Peten	0				2105	548	0	2653	167186.25	443545121		
Hunucmá	Vegetación De Dunas Costeras			0	439		0	439	0	0		
	Manglar			174	5131	3255	0	8560	40336.04	345276502		
	Tular			832	758	57	0	1647	167186.25	275355754		
	Peten			8	1288	2045	0	3341	167186.25	558569261		
	Selva Baja Espinosa Subperenifolia			79	5880	633	0	6592	12396.62	81718519		
	Selva Baja Caducifolia			0	4334	0	0	4334	12396.62	53726951.1		
	Selva Baja Subcaducifolia			0	1070	0	0	1070	12396.62	13264383.4		
	Vegetación De Dunas Costeras			11	87	0	0	98	0	0		
Tetiz	Manglar			0	0	65	0	65	40336.04	2621842.6		
	Selva Baja Espinosa Subperenifolia			0	0	35	0	35	12396.62	433881.7		
	Selva Baja Caducifolia			0	1	0	0	1	12396.62	12396.62		
	Selva Baja Subcaducifolia			0	1	0	0	1	12396.62	12396.62		
	Vegetación De Dunas Costeras	0	0	0	0	0	0	0				

.....Continuación de Tabla 220

NOMBRE	CATEGORIA	MUNICIPIO	TIPO DE VEGETACION	GRADO DE AMENAZA HA			SUPERFICIE /HA	COSTO RESTAURACIÓN /HA	COSTO TOTAL			
				0	1	2						
Ría Celestún	Reserva De La Biosfera	Celestún	Manglar	0	2791	2509	802	6102	40336.04	246130516		
			Tular	0	870	2516	280	3666	167186.25	612904793		
			Peten	0	1078	3642	2879	7599	167186.25	1270448314		
			Vegetación De Dunas Costeras	0	1156	698	2	1856	0	0		
			Pastizal Halofilo	0	0	217	107	324	0	0		
			Selva Baja Espinosa Subperenifolia	0	0	447	0	447	12396.62	5541289.14		
		Halaché	Manglar	0	0	3776	0	3776	40336.04	152308887		
			Tular	0	500	2589	0	3089	167186.25	516438326		
			Peten	0	38	3740	0	3778	167186.25	631629653		
			Selva Baja Espinosa Subperenifolia	0	0	500	0	500	12396.62	6198310		
		Hunucmá	Manglar	0	51	0	0	51	40336.04	2057138.04		
			Tular	0	8	0	0	8	167186.25	1337490		
			Peten	0	262	140	0	402	167186.25	67208872.5		
		Maxcanú	Manglar	0	0	916	0	916	0	0		
			Tular	0	0	210	0	210	167186.25	35109112.5		
			Peten	0	0	1037	0	1037	167186.25	173372141		
			Selva Baja Espinosa Subperenifolia	0	0	369	0	369	12396.62	4574352.78		
		Ría Lagartos	Reserva De La Biosfera	Río Lagartos	Manglar	0	3162	2138	0	5300	40336.04	213781012
					Tular	0	26	0	0	26	167186.25	4346842.5
					Peten	0	0	0	0	0	167186.25	0
					Vegetación De Dunas Costeras	210	1420	2049	0	3679	0	0
Pastizal	796				758	22	0	1576	0	0		
Selva Baja Caducifolia	61				0	0	0	61	12396.62	756193.82		
Tizimín	Manglar			205	4246	2627	0	7078	40336.04	285498491		
	Tular			345	1266	324	0	1935	167186.25	323505394		
	Vegetación De Dunas Costeras			707	1820	425	0	2952	0	0		
	Pastizal			4054	2299	145	0	6498	0	0		
	Selva Baja Caducifolia			0	5233	192	0	5425	12396.62	67251663.5		
	Selva Mediana Subcaducifolia			319	4198	3573	0	8090	12396.62	100288656		
San Felipe	Manglar			0	49	1063	0	1112	40336.04	44853676.5		
	Vegetación De Dunas Costeras			0	48	19	0	67	0	0		
	Pastizal			0	66	44	0	110	0	0		
TOTAL SUPERFICIE EN HA				14818	93144	70654	4161	182777	4258418.93	9162549940		

El fuego puede ser bueno para preservar el hábitat, reducir las amenazas y mantener los valores productivos y culturales. El fuego ha sido parte de las prácticas agrícolas y forestales utilizadas por las sociedades durante milenios y en muchos municipios, tiene un uso extensivo. Eliminar el fuego en un ecosistema, sin tomar en cuenta su relación ecológica, las especies susceptibles, la estructura y los componentes culturales que lo rodean, puede traer consecuencias negativas

La presencia constante de fuego puede provocar la pérdida de poblaciones de tortugas, y en algunos casos como la Reserva de la Biósfera Ría Lagartos (CONANP, 2007) ya ha ocasionado la reducción de lugares de anidación para aves acuáticas, también en el incremento de la vulnerabilidad de alguna especie endémica de las áreas naturales protegidas del Estado de Yucatán (CONANP, 2011).

IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

IX.1. Remoción en Masa

Conclusiones

La zona sur del Estado, llamada Sierrita de Ticul, se tienen problemas por Procesos de Remoción en Masa.

Las afectaciones son a las vías de comunicación, debido a los taludes que se construyeron para conectar las poblaciones, en la mayoría son de ángulos altos (70 a 89°), pero no son mayores a 8 m de altura.

De la superficie total del Estado 39,524 Km², el 13.2% tiene problemas por PRM, resultando el análisis en amenaza baja con el 5% y amenaza muy baja con 8.2%.

Recomendaciones

En los puntos verificados en campo poner señalizaciones de posibles deslaves, sobre todo en época de lluvias.

IX.2. Hundimientos

Conclusiones

En general, todo el estado de Yucatán tiene las condiciones para la presencia de hundimientos del terreno, sin embargo la predicción del momento en que puede ocurrir un colapso sigue siendo a nivel mundial uno de los temas de mayor importancia. Algunos esfuerzos se han realizado y se ha podido estimar las zonas donde puede presentarse el fenómeno y se ha documentado ampliamente que las variaciones bruscas de los niveles piezométricos son un factor relevante. Sin embargo se deben considerar otras variables intrínsecas con la morfología de la dolina y las condiciones mecánicas de las rocas, lo cual hace que los análisis sean estudios meramente individuales.

El empleo del análisis multicriterio a través del proceso de análisis jerárquico es una herramienta con gran versatilidad que permite generar modelos de susceptibilidad como base cartográfica para futuros análisis en el marco de peligros y riesgos geológicos en territorios más amplios. Los modelos obtenidos de acuerdo con la bondad de los datos de entrada, los criterios empleados y la escala de trabajo permiten establecer zonas con posibilidad de generar colapsos y enmarca zonas con colapsos históricos. El medio geológico del territorio del estado de Yucatán e interacción con otras variables pueden generar las condiciones necesarias para que exista disolución de las rocas y por consiguiente el colapso en zonas de por sí ya con evidencias de subsidencia del terreno, así como presentarse nuevos colapsos. Es importante mencionar que en el presente estudio, se emplearon métodos hidrogeoquímicos para establecer zonas donde actualmente actúan procesos de disolución. Esta variable en suma con la geología y zonas de fracturamiento ayudó a reconocer áreas principalmente en el poniente del estado donde existe relativamente mayor disolución. Sin embargo, los colapsos históricos y su relación con aumentos bruscos de los niveles freáticos establecen además zonas con gran susceptibilidad a hundimientos en el centro, este y sureste del Estado. Lo anterior es un tema que requiere de estudios de mayor detalle que necesariamente tienen que realizarse en zonas donde existe desarrollo urbano. En este sentido, el presente mapa de susceptibilidad a colapsos funciona como una herramienta en la toma de decisiones desde el punto de vista de protección civil o para el desarrollo urbano y uso de suelo, tomando siempre en consideración la escala aquí empleada.

El mapa de susceptibilidad a hundimientos muestra que principalmente en la zona noreste, área de la Sierrita de Ticul y áreas relacionadas con el anillo de cenotes se pueden considerar como de alta susceptibilidad de presentar hundimiento o subsidencia por karst cubierto (por suelos) y expansión del karst expuesto. Las dolinas, aparentemente están asociadas con una secuencia calcárea constituida por capas con alto contenido de impresiones de fósiles (coquina) y capas gruesas de calizas muy intemperizadas de aspecto granular aunque en otros casos se observa un control estructural o combinación de estos factores donde la roca es erosionada mecánica y químicamente generando cavidades y posterior hundimiento de la cubierta edáfica y rocosa suprayacente, bien por colapso brusco o subsidencia gradual.

A nivel regional, depósitos no consolidados a semi-consolidados de arena calcárea (Sascab) normalmente es cubierta por caliza dura masiva. Estos depósitos en muchos casos condicionan el desarrollo lateral de las cavidades; en el caso de las grandes cavernas en la Sierrita de Ticul, específicamente en la gruta de Loltún se observaron depósitos con estas mismas características; sin embargo no pudieron ser muestreados debido a la conservación y protección del INAH, por otro lado se pudo observar que invariablemente en la zona de mayor disolución existen una secuencia de depósitos con estratificación oblicua de hasta 40° de inclinación, en láminas gruesas a estratos de hasta 40 cm de espesor con laminación interna sobreyaciendo y subyaciendo capas horizontales relacionados con sistemas de fracturamiento.

Las áreas urbanas asociadas con zonas de mayor grado de amenaza son Cenotillo, Dzitás, Quintana Roo, Temozón, Calotmul, Sucilá, Sotuta, Oxkutzcab, Akil, Tekax, Kopomá y Maxcanú. Por otro lado, en función del área entre los municipios con mayor grado de susceptibilidad destaca Calotmul, Sotuta y Cenotillo con más del 80% de su superficie involucrada.

En lo que respecta a infraestructura vial se tiene que de los 1556 Km de tramos carreteros federales aproximadamente el 41% se encuentra considerado entre los grados de amenaza media a muy alta. Mientras que de los 3933 Km de carreteras estatales las cifras aumentan hasta 58% de tramos en estos mismos términos.

Por otro lado, aunque los resultados señalan que solo el 22% del territorio del municipio de Mérida presenta susceptibilidad a hundimientos media, es importante realizar estudios a detalle en estas zonas. La mayoría de los casos conocidos donde existe una estructura kárstica (cavidad) fue descubierta durante la construcción de pozos. En los casos visitados, la cubierta rocosa o techo de la cavidad es relativamente delgada y normalmente no se observaron bloque caídos en su interior, debido a que posiblemente los propietarios han extraído los escombros y colocado en su lugar grava y arena. Por tanto, se desconocen las condiciones kársticas reales en el subsuelo. Aunque se ha documentado que la mayor disolución de la roca se genera principalmente en la zona de mezcla de agua dulce con salada (Back *et al.*, 1986) y de acuerdo con la SARH, en 1989, determinó que la zona de agua salada se encontraba a poco más de 200 m de profundidad mientras que la zona de interface salina teóricamente se encontraba aproximadamente a 100 m en la zona de la ciudad de Mérida. Sin embargo es necesario determinar las características de las cavidades conocidas que estén relacionadas con infraestructura y estimar su expansión en el subsuelo.

Recomendaciones

Los resultados del presente estudio en relación con la escala, sugieren zonas que desde el punto de vista de susceptibilidad a hundimientos catalogados como muy alta a alta, deben ser estudiados con mayor detalle y complementados con estudios puntuales geofísicos y de mecánica de rocas y suelos cuando el área de investigación así lo requiera. Sin embargo a pesar de la existencia de áreas donde la susceptibilidad es media, baja o muy baja se deben considerar estudios detallados especialmente donde se tiene gran densidad de población, desarrollo urbano así como infraestructura vial.

La combinación de métodos geológicos, hidrogeológicos, geofísicos y espeleológicos (cuando estos últimos son viables) es la mejor vía de aproximación al problema. Las cartografías de peligrosidad basadas en el análisis de diferentes variables, apoyado en métodos geofísicos de detalle

como microgravimetría, magnetometría, sísmica de ondas superficiales o georadar (métodos indirectos, no invasivos y económicos) así como por perforación, pueden contribuir a la delimitación precisa de las zonas de máxima peligrosidad encaminados a la identificación de posibles cavidades en el subsuelo y depósitos de relleno secundarios (Pueyo-Anchuela *et al.*, 2009; Mochales *et al.*, 2008). De igual manera, el ordenamiento del uso de suelo en terrenos cársticos, tanto rurales como urbanos, y la aplicación puntual de medidas ingenieriles pueden evitar el incremento de los riesgos por hundimiento. De este modo, es importante considerar realizar estudios mediante RPT (Radar de Penetración Terrestre) y geoelectrónicos en sitios proyectados para el desplante de obras públicas.

Por otro lado, desde el punto de vista local es decir en las dolinas secas y con agua (cenotes), es importante considerar la colocación de perímetros de seguridad y señalética pertinentes donde exista flujo de transeúntes. En zonas donde existan estructuras consideradas como de peligro alto a medio, de acuerdo con la cercanía a vialidades con flujo vehicular, se hace necesario realizar estudios de estabilidad (mediante técnicas de ingeniería civil y geotécnica) con la finalidad de establecer las condiciones de seguridad de sitio además de colocación de señalética pertinente.

IX.3. Sismicidad

Conclusiones

De acuerdo a la Regionalización Sísmica de CFE (1993), el estado de Yucatán se ubica dentro de las región "A", clasificada con nivel de peligro sísmico bajo donde las aceleraciones del terreno se esperan por debajo del 10 % de g.

Los valores de aceleración máxima del terreno en el Estado para periodos de retorno de 10, 50 y 100, determinados en función de la vida útil de las edificaciones, son de 11, 27 y 45 Gal, respectivamente, por lo que el Estado no se ubica en peligro alto por la incidencia de este fenómeno. Para que se presenten aceleraciones del terreno que puedan llegar a afectar la infraestructura y por ende poner en riesgo a la población (> 0.15 g), se espera un periodo de retorno de 10,000 años, sin embargo, se pueden presentar eventos de magnitudes bajas.

Dentro del Estado no se tiene el registro de sismos, pero si en zonas geográficas próximas al mismo, tal es el caso de los estados colindantes Campeche y Quintana Roo, donde se han registrado eventos de magnitudes bajas; dentro de la distancia arbitraria considerada en este estudio, son 18 los epicentros que se han presentado en esta región en un periodo de 1994-2012 y con un rango de magnitudes que van de 3.7 a 5 grados en escala de Richter, los cuales pueden ser captados por instrumentación sísmica pero difícilmente pueden ser percibidos por las personas.

La sismicidad en Yucatán puede estar asociada a colapsos de cavidades cársticas, que como es bien sabido abundan el Estado, o bien, se pueden llegar a sentir sismos de magnitudes mayores que ocurren en el Golfo de México y/o en la franja del límite entre las placas Norteamericana y del Caribe.

IX.4. Vientos

Conclusiones

Se puede establecer que las dos temporadas observadas (Nortes y Ciclones) que cubren la totalidad del ciclo anual si presentan diferencias en lo que respecta a la dirección e intensidad de los vientos dominantes en rachas sostenidas superiores a los 10 segundos. Estos cambios comprenden las variaciones en intensidad del viento, dirección del flujo y creación de zonas de turbulencia y áreas de conducción (corredores) hacia el interior del Estado.

Para la temporada de Nortes, la variabilidad espacio-temporal del comportamiento de la acción del viento es más errática al tocar tierra por factores que van desde la pérdida de calor en la

superficie del Golfo de México y Mar Caribe, menor inclinación de la cuña de temperatura tierra – mar y viceversa así como el empuje de las masas polares desde la atmosfera superior y conducida por la subcorriente tropical.

Los vientos comprendidos para los meses de enero a abril y de noviembre a diciembre están sometidos a los cambios de temperatura de dos fuentes: a la acción de lo que se denomina “Nortes” o “Frentes Fríos Polares”, que tienden a crear amplios frentes de aire frío originando movimientos de anticiclón y con ello una mayor dispersión de los vientos al tocar el Golfo de México y encontrarse con las corrientes calientes del Mar Caribe y a los procesos adiabáticos, en climatología los procesos de humedad (aporte de vapor de agua) son adiabáticos, puesto que no hay transferencia de calor, a pesar que se consiga variar la temperatura del aire y su humedad relativa; lo cual impacta directamente en la entrada de viento marítimo tropical frío y húmedo a la parte continental.

Los registros de las estaciones climatológicas que se ubican a lo largo de la línea de costa muestran más evidentemente que el flujo sopla desde los rumbos ENE, E y ESE demostrando con ello que la temporada de nortes si es evidente y que su acción en el oleaje marino es determinante y por lo tanto las consecuencias en erosión costera, perturbaciones climáticas locales (lluvias y tormentas eléctricas) a pesar de las corrientes marinas. Esta combinación da como consecuencia zonas de mezcla de sedimentos y su movilidad, esto derivado de la velocidad de las rachas y su constante azote.

La acción de los vientos en la temporada de Nortes es menos evidente y con menos afecciones en la zona interior continental y por lo tanto no tiene mayores afectaciones en las viviendas y zonas agrícolas.

En lo referente a la temporada de Ciclones, es evidente el comportamiento más normal de los vientos y su agrupación a los que soplan desde el E, lo que se denomina la influencia de los Alisios; esto es la apertura que va desde el rumbo colateral NNE al rumbo SE. Las rachas sostenidas máximas llegan a los 7.5 m/s. Esto último principalmente a que la temperatura del mar va en aumento hasta el mes de julio, sin embargo los efectos máximos se evidencian hasta el mes de septiembre.

Si se observa desde el punto de vista anual, existe congruencia entre la anualidad de los vientos y la temporada de ciclones; por lo tanto, en intensidad y dirección del flujo, los vientos alisios se superponen a los registrados en la temporada de nortes.

A pesar del reducido número de estaciones meteorológicas se pudo tener una buena respuesta que cubra el estado de Yucatán. El número de 6 estaciones es bajo debido a que el censo automático para monitoreo del viento es nuevo por el organismo operador.

Se considera que la ubicación de cada estación automática meteorológica está correcta en cada asentamiento humano considerado como ciudad mediana y sobre todo que se tiene una continuidad regular ya de una década y sumado a ello existe una homogeneidad en la información recopilada.

IX.5. Erosión

Conclusiones

La pérdida de suelo o erosión de suelo en general algunos pueden considerarla sin importancia si se ve en sí mismo como un peligro geológico, sin embargo este recurso juega un papel preponderante al hablar de estabilidad de laderas y en estudios de hundimiento del terreno, por mencionar algunos ejemplos. Por otro lado algunos investigadores pueden considerar que la erosión debería encasillarse por el mecanismo principal que la genera como un peligro hidrometeorológico. Lo cierto es que para ambos casos es esencial realizar estudios que determinen las características físicas, químicas y biológicas del suelo y su interacción con otros procesos.

En términos erosivos, las repercusiones de la erosión en alguna región pueden tener enormes implicaciones en el sector social, económico y ambiental. Aunque la erosión se considera un fenómeno natural, sus efectos se ven incrementados y acelerados por el hombre. Una repercusión directa hacia la actividad económica es la pérdida de capacidad de producción del suelo (Inman, 2006) que se refleja en la seguridad alimentaria principalmente (Imeson y Curfs, 2008).

Aunque no se tienen datos de las repercusiones de la erosión en Yucatán, en algunos documentos informales mencionan que el deterioro del suelo aparentemente provocó el decremento de la producción de maíz en las ciudades antiguas (Gobierno del estado de Yucatán, 2012-2018); por otro lado en las observaciones de campo, la producción en general de cultivos es muy poca.

Los actuales cultivos que se adaptan muy bien a las características del terreno son específicamente el henequén y el chile habanero que son a su vez productos que no implican un impacto significativo al suelo debido a la tecnología de producción. Por otro lado, se sabe, que el henequén sigue siendo materia prima importante de explotación. De acuerdo con Guerrero-Medina y Díaz-Plaza (2011), la demanda de fibras naturales aparentemente se encuentra nuevamente en auge debido al empleo de materiales de tendencia a lo natural que representa una buena oportunidad para regiones productoras de fibra entre las que se encuentra Yucatán. Estos mismos autores señalan que en la década de los ochenta del siglo pasado se cultivaban aproximadamente 24,000 ha y se producían 6,500 toneladas de fibra; para 2010 se cultivan cerca de 12,000 ha y se producen unas 5,500 toneladas. De lo anterior se concluye que la agricultura no es un factor que induzca al deterioro del recurso edáfico pues aparentemente esta actividad solo ocupa aproximadamente el 1% del territorio.

Por el contrario, la industria ganadera (bovina) aparentemente emplea aproximadamente una tercera parte del territorio para su actividad productiva lo que implica que cada vez más se amplíen las fronteras donde los pastizales reemplazan a los bosques tropicales principalmente caducifolios los cuales proveen de materia orgánica para los procesos de generación y regeneración del suelo.

La presencia de vegetación y materia orgánica sumados al manejo y a la época del año, interactúan con las propiedades de los suelos frente al proceso de erosión hídrica, con lo cual se modifica la capacidad de infiltración y escurrimiento superficial trayendo como consecuencia la pérdida de sedimentos arrastrados e infiltrados al subsuelo por el agua y karsticidad de las rocas principalmente al norte y sureste del Estado. Por lo cual no se puede hacer una simple interpretación de este proceso.

Con base a la metodología empleada, se pudo estimar en campo el grado de erosión actual y potencial de los suelos. Este método constituye un instrumento de planeación para establecer prácticas y obras de conservación de suelos para que hagan que la erosión actual sea menor que la tasa máxima permisible. Además, acota los parámetros y factores que intervienen en los procesos erosivos, permite su extrapolación a nivel cualitativo a las regiones de estudio con base en un previo análisis y verificación en campo. Algunas evidencias existentes de la pérdida de suelo se manifiestan a través de conchas de erosión y cementación de los suelos como indicadores fuertes de desertificación. Muchos de estos procesos se observan al norte del municipio de Tecoh y sur de Tekit poniendo al descubierto la roca subyacente.

De acuerdo con el método de Pearson los gráficos de dispersión presentan una correlación perfecta con la precipitación como componente detonante de los procesos erosivos así como el clima que prevalece y espesor del horizonte "O" en conjunto con la cubierta vegetal actual. La erosión en grado alto está asociada a superficies desprovistas de vegetación, el suelo se encuentra sin protección frente a la acción erosiva de las precipitaciones principalmente en la zona centro y sur donde son mayores a los 800 milímetros anuales; la erosión en grado bajo a medio está asociado al mal manejo de algunas comunidades vegetales como la selva mediana subcaducifolia y suelos agrícolas principalmente; de igual forma estos factores están ligeramente ligados al relieve, microrelieve y profundidad de los suelos.

Por otra parte a través de la aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), fue posible evaluar cuantas toneladas de suelo por hectárea se pierden anualmente en términos cualitativos y cuantitativos en los distintos ambientes de cada una de las 7 regiones propuestas por Protección Civil del Estado, lo que permite realizar un diagnóstico preliminar de pérdida de material edáfico; donde se determinó que la región II y VII son las que menos t/ha pierden 1.31 y 1.65 respectivamente, mientras que la región I y VI son las que más t/ha pierden anualmente 4.58 y 3.56.

Se encontró que la resistencia del suelo a este proceso se relaciona con la textura, la estabilidad de los agregados, la cohesividad, la capacidad de infiltración y los contenidos minerales y orgánicos; por ejemplo los suelos de textura fina generalmente son más resistentes a la degradación pero sus sedimentos son fácilmente transportables como los Phaeozems, Vertisoles y Nitosoles los cuales predominan en la zona sur; mientras que los suelos de textura gruesa son degradados rápidamente, pero sus sedimentos son difíciles de transportar como los Cambisoles y Leptosoles; mientras que los suelos francos y franco-arenosos son fácilmente degradados y transportados, por eso se les considera muy erosionables como es el caso de los Arenosoles y Regosoles al norte y noreste.

De los 12 tipos de suelos existentes en la entidad se observó que los Phaeozems, Verisoles y Nitosoles los cuales predominan en la zona sur presentan una conductividad hidráulica deficiente, ya que son suelos con predominio de arcillas muy finas; presentan alta estabilidad dentro de las unidades estructurales; lo cual se ve reflejado en la rápida formación del "sello" superficial, acompañado de un fuerte descenso de la conductividad hidráulica hacia el subsuelo y mantos acuíferos por lo cual la erodabilidad es muy baja.

En general, los resultados fueron coincidentes con otros estudios; todos los niveles de información que se utilizaron en este trabajo tuvieron una relación directa con lo observado en campo y analizado en gabinete; Johnson y Blackbur (1989) trabajando sobre erosión de suelos en pastizales a nivel parcela con una metodología similar a la que se propuso en este trabajo, registraron una mayor pérdida de material edáfico en suelos poco profundos; coincidiendo con los resultados que se obtuvieron; ya que la mayor pérdida de material edáfico se da en suelos de tipo Leptosol los cuales tienen un espesor menor a los 10 cm de profundidad y ocupan el 55 % de superficie en la entidad. El cono sur a pesar que es una de las zonas más degradadas y de acuerdo a la ecuación universal de pérdida de suelo es donde menos toneladas de suelo por hectárea se pierde anualmente junto con la región II, debido a que es una zona de acumulación de sedimentos y estos son principalmente arcillosos aunado a la buena estabilidad de los agregados donde los suelos alcanzan más de 1 metro de profundidad.

Urge advertir sobre el peligro que representa la pérdida de material edáfico; educar a los habitantes de las localidades sobre la importancia de la edafodiversidad y sobre todo, enseñarles a realizar el manejo sustentable del suelo; de lo contrario esta situación empeorara en un futuro próximo llegando a convertirse en uno de los desastres ecológicos actuales.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) fueron de gran ayuda en este trabajo ya que es una herramienta eficaz que facilita el manejo y análisis de información espacial permitiendo realizar múltiples procesos similares bajo diferentes escenarios de evolución de los factores implicados en las pérdidas de suelo, de una manera rápida y sencilla. Estos resultados muestran que el uso sistemático y periódico de la información en la evaluación de los procesos erosivos será de extraordinaria utilidad en la gestión y evaluación ambiental de trabajos que permitan mitigar los efectos erosivos.

Recomendaciones

Como dato general, se citan algunas prácticas generales de manejo las que, adecuándolas a las condiciones de cada caso particular, permitirían el uso del suelo sin degradarlo o sin bajar su productividad (manejo sustentable) para el Estado, éstas se mencionan a continuación:

- Para prevenir, controlar y restaurar la erosión del suelo es necesario normar los usos del suelo y actividades productivas, lo cual se puede hacer por medio del Ordenamiento Ecológico de la entidad.
- Es necesario elaborar y llevar a cabo un programa de orientación y capacitación a campesinos, agricultores y ganaderos sobre el manejo y uso potencial del suelo.
- Para controlar, prevenir y recuperar las áreas degradadas por este fenómeno es imprescindible la participación de los tres niveles de gobierno y del pueblo.
- Es importante limitar las áreas de desmonte y sobrepastoreo.
- Hacer la gestión para que algunas áreas se consideren como áreas naturales protegidas.
- Se debe priorizar las áreas de prevención, control y recuperación.
- Cuando se quiera recomendar acciones puntuales, se tendrá que hacer estudios a mayor detalle.
- Los cultivos anuales deberán integrar un plan de rotaciones para permitir la recuperación de las propiedades deseables de los suelos que se hubieran perdido o que fueron disminuidas en la etapa de cultivos; dicho plan deberá adecuarse a los tipos de unidad edáfica.
- Reforestación; la cubierta vegetal se desempeña como agente regulador en los fenómenos erosivos, como amortiguar el impacto directo de las gotas de lluvia; controlando los excesos de agua en el perfil del suelo, disminuyendo las velocidades del flujo de escurrimiento entre otros beneficios.
- Crear cortavientos, los cuales son una barrera de filas de árboles a lo largo de la zona donde viene el viento en un terreno. Los cortavientos se hacen con árboles perennes o arbustos lo cual ayuda a prevenir la erosión ya que evita que el viento sople sobre los terrenos agrícolas.
- Usar el sembrado de contorno si se siembra en áreas con desniveles; esta técnica de conservación implica seguir la topografía al plantar las cosechas usando la forma natural de la tierra, de esta manera se mitigan los efectos erosivos, principalmente en la zona sur de la entidad.
- Construir zanjas de drenaje con el propósito de menguar el efecto de las aguas de escorrentía.
- Analizar periódicamente las características químicas del suelo. Las recomendaciones deben enfocarse hacia mantener la fertilidad del suelo.
- Realizar las fertilizaciones de acuerdo a los requerimientos nutricionales para cada especie y las características físicas y químicas del suelo.
- Tener en cuenta la fertilidad natural del suelo para los planes de fertilización.

IX.6. Erosión Costera

Conclusiones

El análisis que se llevó a cabo en este nivel de información, está basado en la interpretación de datos tomados en campo a lo largo de la línea de costa, así como de la interpretación y generación de mapas de susceptibilidad a la erosión arrojando las siguientes conclusiones:

- El 36.25% del total del litoral, presenta susceptibilidad baja ante el fenómeno de erosión costera, el 30.43% susceptibilidad media, el 22.51% susceptibilidad alta y el 10.81% susceptibilidad muy alta.
- Una franja aproximada de 16 Km lineales ubicada en el municipio de Progreso, es afectada de manera severa por esta problemática, las casas construidas frente a la línea de playa se encuentran prácticamente dentro del mar esto en las localidades de Yucalpetén, Chelém y Chuburná.
- Derivado de lo anterior es prioritario establecer programas de monitoreo en los municipios costeros del estado de Yucatán, con la finalidad de minimizar daños ligados con el crecimiento demográfico exponencial, que es la primera causa del deterioro ambiental para la zona costera.
- Sobre la línea de costa se encuentran construidas algunas áreas urbanas así como localidades sobre la playa o muy cercana a ella, las que se encuentran en una zona de susceptibilidad a la erosión alta a muy alta son: Telchac Puerto, Dzilam de Bravo, San Felipe, además de las localidades de El Porvenir y Santa Clara ubicados en el municipio de Dzidzantún, en una situación grave ante esta problemática se encuentran las localidades de Yucalpetén, Chelém y Chuburná pertenecientes al municipio de Progreso, la localidad de San Crisanto en el municipio de Sinanché, así como las Gaviotas y Chabihau ubicadas en el municipio de Yobaín.
- Es necesario que las autoridades correspondientes controlen y planifiquen de manera eficiente, la construcción de estructuras de protección tales como espigones, diques, geotubos y demás obras de infraestructura portuaria, ya que cuando estas se construyen de manera desmedida y caótica propician un desequilibrio en el flujo de los sedimentos provocando inestabilidad en el litoral acelerando el proceso de erosión costera.
- La grave problemática que sufre la zona poniente del litoral yucateco, se debe en gran medida a que el puerto de altura de Puerto Progreso de casi 5 Km de longitud que actúa como una gran barrera que impide el libre flujo de los sedimentos a esta parte del litoral generando erosión costera en la zona.
- En este análisis concluimos que un factor importante que ayuda en gran medida a mantener en buen estado y en equilibrio las playas que es la conservación de la vegetación en la duna costera, por lo que es de vital importancia conservar este tipo de flora, ya que actúa como un protector y reten natural de la arena ante el viento y los embates del oleaje.
- De manera general las playas que se encuentran bien conservadas, se ubican al oriente del litoral en la localidades del Cuyo en el municipio de Tizimín, así como en el poniente en los municipios de Celestún y Hunucmá, ya que allí se encuentra bien conservada la cubierta vegetativa de la duna costera, debido a que en estas zonas aún no se observa antropización y/o urbanización de la misma, ambos factores son fundamentales para que estas se conserven en buen estado.

Recomendaciones

De acuerdo a las conclusiones del presente análisis, es necesario considerar las siguientes recomendaciones:

- Realizar un estudio más detallado del fenómeno erosión costera a nivel municipal, ampliando el análisis al cálculo de la tasa de erosión mediante la comparativa de fotografías aéreas en un Sistema de Información Geográfica, es decir, cuantificar y delimitar el retroceso de la línea de costa en un determinado tiempo, con el objetivo de hacer una zonificación detallada de toda aquella infraestructura que se encuentre

amenazada por este fenómeno tales como viviendas, vías de comunicación, restaurantes, hoteles, puertos, etc.

- El presente Atlas, muestra los límites en los diagnósticos basados en la información disponible y escenarios asociados a ella en la construcción del capítulo de erosión costera, algunos temas fueron elaborados en paralelo retroalimentándose en la medida de lo posible, pero a pesar de ello se ubicó y generó información que se desfasó en la integración de este capítulo, como es la frecuencia e intensidad de los vientos, su efecto sobre la costa y las corrientes marinas que dieran como resultado un modelo de oleaje. Sin embargo, diversa y contundente información fue generada en este tema que ayudo a comprender el fenómeno de erosión del litoral, pero se sabe que ello es insuficiente desde la óptica del fenómeno dinámico costero – marino, razón por la cual se recomienda profundizar y detallar este apartado para el litoral del estado de Yucatán, partiendo desde la generalidad hacia un punto de vista holístico costero.
- Dicho estudio servirá además para llevar a cabo una mejor planificación en cuanto al desarrollo de viviendas y demás infraestructura que se pretenda construir a lo largo de la línea de costa.
- En cuanto a la mitigación del problema, existen varias obras que pueden ayudar a la recuperación de los litorales marinos afectados por este fenómeno, estas han sido exitosas en la restauración de playas en diversas partes del mundo, algunos ejemplos de ello son los geotubos; estos son sacos o tubos hechos a base de geotextiles tejidos de alta resistencia, soportan condiciones extremas como altas temperaturas, agua salada y la exposición prolongada a la intemperie; Los *Reef Balls* son estructuras de concreto que simulan arrecifes artificiales que al ser colocados a baja profundidad o cercanos a la costa, evitan que el sedimento sea arrastrado por efectos del oleaje; actualmente el cuerpo de ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, creo una estructura de concreto llamada *Core Loc* la cual actúa como un rompeolas protegiendo el sedimento que se acumula en la costa ayudando a mantener las playas en equilibrio, sin embargo, se recomienda realizar un estudio que permita identificar qué tipo de estructura es la más adecuada para las costas yucatecas.
- Mantener en constante monitoreo las zonas que presentan mayor susceptibilidad a ser erosionadas, para implementar medidas de prevención, remediación o en su caso de mitigación con el objeto de salvaguardar aquella infraestructura expuesta a este fenómeno.

IX.7. Inundación

Conclusiones

En las inundaciones en la zona costera a causa de los efectos de fenómenos hidrometeorológicos extremos, se conjuntan varios factores tales como, una pendiente reducida en playas, la ausencia de barreras artificiales, el poco sedimento de la costa, la fuerza de los vientos, la cantidad de lluvia, la fuerza del oleaje y por último, su ubicación respecto al paso de ciclones. Los principales tipos de inundación son a causa de la marea de tormenta y por fenómenos hidrometeorológicos extremos (lluvias extremas) que causan desde encharcamientos hasta acumulación.

El total de puntos verificados en campo es de 28 puntos a lo largo de la línea costera, el nivel de agua alcanza en algunos de ellos hasta 1 m. Localidades Vulnerables a inundaciones costeras están: en Celestún: Col. Centro, Felipe Carrillo, Los Pescadores, Puerto de Abrigo y Chichitos; En Hunucmá: Los Gatos; En Progreso: Chuburna, Chelem, Progreso, Nuevo Yucalpeten, Vicente Guerrero, Chicxulub, Rancho San Pedro; Telchac Puerto; En Sinanché: Sancrisanto; en Yobaín:

Chabihau; en Dzidzantún: Santa Clara; En Dzilam de Bravo, y Pueblo nuevo; En San Felipe; En Río Lagartos: Río Lagartos y Las Coloradas, y en Tizimín: El Cuyo.

En la zona que fue clasificada como zona plana las inundaciones no suelen ser de gran extensión ni alcanzan tirantes de agua mayores, ya que para que esto ocurra se necesita el aporte de grandes volúmenes de agua y las áreas de captación de las depresiones del terreno no son lo suficientemente grandes para acumular volúmenes de agua masivos. Localmente se presentan inundaciones por acumulación en zonas bajas y/o encharcamientos, debido a las variaciones del micro-relieve a lo que está expuesto prácticamente todo el territorio, sin embargo este fenómeno ocurre mayormente en aquellas áreas donde se ha modificado la capacidad de filtración del suelo como es el caso de zonas urbanas. Algunos otros casos se generan por la construcción de infraestructura que limita el flujo local del agua y condicionan el estancamiento de ésta.

La zona del Cono Sur presenta una variedad de estructuras kársticas de diferentes formas y tamaños a diferentes escalas, que van desde pequeñas depresiones denominadas dolinas hasta extensas planicies denominadas poljes. Por sus características físicas y condiciones morfológicas estas áreas son susceptibles a inundarse.

Las altas precipitaciones durante la temporada de lluvias, combinado con depresiones o estructuras kársticas de diferentes formas y tamaños, cubiertos en su base por un suelo arcilloso-limoso que no permite la infiltración, favorece la acumulación del agua.

No todas las cuencas que existen en el Cono Sur son inundables, sin embargo hay un número considerable de cuencas inundables donde existen varios asentamientos humanos que son vulnerables ante la temporada de lluvias normales y/o extraordinarias.

En general se observa que en los diferentes escenarios de susceptibilidad según cada periodo de retorno utilizado, la zona del cono sur se caracteriza por ser de valores altos, las zonas limítrofes de Yucatán con los estados de Quintana Roo y Campeche son también los sitios clasificados como alto, mientras que en la zona costera se observan las áreas de menor ponderación, por último en el interior del Estado se observa variable caracterizándose con valores que van de bajo, medio y alto.

Recomendaciones

Según la resolución del Modelo Digital de Elevación y modelo de pendientes que se empleó para este trabajo en la Sierra de Ticul, en las laderas de los lomeríos y pequeños cerros existen pendientes que no son favorables para el estancamiento de agua

Elaboración de atlas de riesgo a nivel más detallado respecto a escala de trabajo y a características físicas del terreno a analizar, ya que los puntos verificados en campo inundan áreas que según Priego, A. et. al. (2010) no son áreas representativas a escala 1:250, 000, Aunado a esto varias cuencas inundables del Cono Sur quedan fuera del alcance de este estudio, sin embargo, es importante realizar estudios por cuenca y sus características tales como pendiente, caracterización de suelos según su permeabilidad y escorrentía, tamaño de cuenca, etc. los cuales ayudan a una mejor entendimiento de los procesos de inundación

Realizar un estudio a detalle en todas las depresiones kársticas del cono sur, en las cuencas o depresiones donde se encuentren asentamientos humanos e infraestructura carretera.

Respecto al compromiso 207 del Plan de Desarrollo 2012 – 2018 del estado de Yucatán, es importante llevarlo a cabo de una forma integral ya que durante la etapa de verificación de campo que se realizó, se percibió que en general los ciudadanos de Yucatán usualmente no le dan la importancia adecuada al fenómeno de inundación, lo cual es atribuible a que en muchos casos dichos eventos se caracterizan por: a) el nivel del agua normalmente no llega a alcanzar grandes cotas, b) regularmente el agua es filtrada muy rápido, c) la frecuencia de ocurrencia de eventos con pocas consecuencias es muy alta, mientras que la ocurrencia de inundaciones de gran impacto es muy

espaciada en el tiempo. Éstas características tienen como consecuencia disminuir el grado de alerta que los pobladores prestan al fenómeno. .

Teniendo en cuenta que este documento servirá como un instrumento en la toma de decisiones, es importante remarcar que el mapa "Susceptibilidad del terreno a inundaciones pluviales" es la herramienta inicial a consultar, los diferentes escenarios resultantes de dicho mapa fueron calculados de forma individual e independiente, por lo que cada uno de ellos representa una ponderación de susceptibilidad a inundación dado el caso que ocurran precipitaciones específicas, por tal motivo no se debe de interpretar a partir de ellos escenarios hidráulicos, por el contrario dichos mapas serán de gran utilidad para determinar qué áreas serán más o menos afectadas respecto al resto del Estado.

IX.8. Ciclones Tropicales

Conclusiones

El estado de Yucatán es propenso a sufrir embates constantes ciclones tropicales, debido a la ubicación geográfica en la que se encuentra y por contar con ciertas condiciones de formación en el Océano Atlántico, las cuales depende de al menos tres características: Un disturbio atmosférico preexistente (onda tropical) con tormentas embebidas en el mismo; temperaturas oceánicas cálidas, al menos 26 °C, desde la superficie del mar hasta 15 metros por debajo de ésta; y vientos débiles en los niveles altos de la atmósfera que no cambien mucho en dirección y velocidad.

De acuerdo al análisis estadístico realizado se determinó que en el área acotada se han presentado 107 eventos en 158, años partiendo del año 1852 al 2010.

De los 107 eventos el de mayor frecuencia en ese intervalo de tiempo han sido las tormentas tropicales con 47 eventos, depresiones tropicales con 20 eventos, huracán categoría 2 con 18 eventos, huracán categoría 1 con 12 eventos y con 2, 5 y 3 eventos los huracanes con categoría 3, 4 y 5 respectivamente.

La formación de los ciclones tropicales del análisis realizado se han originado principalmente en 67 ocasiones en el Mar del Caribe y en 24 veces en la parte central de Océano Atlántico Norte, el resto se ha distribuido en las cercanías del Estado.

De la estadística realizada y en base a la información recopilada se determinó que en el mes de septiembre se han presentado en 40 ocasiones estos eventos, 26 ocasiones en el mes de agosto y en 17 en el mes de octubre, el resto se ha distribuido en los meses de junio, julio y noviembre, inclusive en los meses de febrero, mayo y diciembre se ha presentado al menos un evento.

La década que comprende de 1931 a 1940 es donde se han registrado un mayor número de eventos ciclónicos con 15 eventos, la mayoría tormentas tropicales; mientras que en la década que comprende del 2001 al 2010 se presentaron 12 eventos de los cuales dos fueron huracán categoría 4 (Emily y Wilma, ambos en 2005) y un huracán de categoría 5 (Dean, 2007).

El análisis y cálculo para los periodos de retorno de las áreas urbanas Mérida, Tizimín, Valladolid y Oxtutz se basó en la información de los mapas de probabilidad de ocurrencia y del mapa de eventos para ciclones tropicales y proporcionados por el CENAPRED. En general, las áreas urbanas localizadas en la zona occidente (Mérida y Oxtutz) para depresión tropical se obtuvo un periodo de retorno igual a 4.8, para tormenta tropical entre 7.8 y 8.2, para huracán categoría 1 la variación es de 20.6 y 28.3, para huracán categoría 2 osciló entre 33.3 y 44.9, huracán categoría 3 la variación fue de 77.5 y 134.6, para categoría 4 la variabilidad resultó entre 132.2 y 155 y finalmente para huracanes categoría 5 no se obtuvieron resultados debido a que no se tienen registros en los mapas de probabilidad de ocurrencia para esa categoría.

En las áreas urbanas ubicadas en la porción oriente del Estado (Tizimín y Valladolid) los resultados de los periodos de retorno para ciclones tropicales son prácticamente iguales para todas

las categorías (Depresión tropical 4.4, tormenta tropical 6.5, huracán categoría uno 12.8, categoría dos 15.8-16.2, categoría tres 45.5 y categoría cinco 155) excepto en la categoría de huracán 4 en donde los resultados fueron de 90.7 en Tizimín y 68.9 en Valladolid.

Recomendaciones

La formación de ciclones tropicales es el tema de muchas investigaciones y todavía no se entiende perfectamente, por lo cual es de suma importancia estar atentos a cada temporada de huracanes, atender las notificaciones emitidas por el Sistema Nacional de Protección Civil, de la Secretaría de Gobernación, a través de la Unidad de Protección civil o de las autoridades locales correspondientes que constantemente monitorean este tipo de fenómenos hidrometeorológicos.

Hoy en día existe información variada sobre las medidas a tomar en caso de enfrentar una contingencia referente a ciclones tropicales de las que destacan:

- Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales, emitida por el Sistema Nacional de Protección Civil
- La página electrónica de Servicio Meteorológico Nacional, dependencia gubernamental que tiene la misión es proveer pronósticos, alertas e información del estado del tiempo y del clima estratégica y útil para el país, que sustente la toma de decisiones.

A pesar de que el impacto de los ciclones tropicales puede causar muchos daños por efecto del viento, oleaje, lluvia y marea de tormenta, gracias a ellos, por la precipitación proporcionada, es factible que en el Estado los acuíferos se recarguen, facilitando con ello la existencia de agua para la agricultura y el suministro de agua potable.

IX.9. Marea de Tormentas

Conclusiones

Debido a la ubicación geográfica, en el Estado se presentan fenómenos ciclónicos, los cuales pueden generar mareas de tormenta que afecte la costa, sin embargo, en recientes eventos que impactaron severamente el Estado como el huracán Emily en 2005 alcanzó un promedio de 1.5 m y en Progreso el registro fue de medio metro, mientras que con el huracán Wilma la marea de tormenta alcanzo 1.5 m y en Río Lagartos se registró una altura de medio metro.

De acuerdo al análisis realizado en base a las curvas de nivel obtenidas del modelo digital de elevación se tiene que en la porción occidente del Estado se tienen un área de 272 Km², mientras que en la costa norte se tiene un área de 1634 km², en peligro por el fenómeno de marea de tormenta.

Dentro de la zonificación resultante se tienen 62 localidades, teniendo una población total de 70,257 habitantes en 32,876 viviendas, en su mayoría, con una tipología tipo I y II.

De los cálculos realizados para la estimación de la altura de marea de tormenta, se determinó que, para todas las zonas urbanas y localidades analizadas la mínima altura causada por una tormenta tropical es de 1.2 metros, mientras que para un huracán de categoría 5 la máxima altura de marea de tormenta alcanzaría una altura de 3.8 metros.

El número de habitantes en las zonas urbanas de la costa del Estado se ha incrementado considerablemente en el periodo comprendido entre 1990 y 2010, siendo Celestún, Telchac Puerto, San Felipe y Chicxulub Puerto las poblaciones que aumentaron en un 59, 55, 43 y 39 por ciento respectivamente.

Recomendaciones

Los resultados presentes se derivaron de un análisis a nivel estatal, por lo que se recomienda desarrollar trabajos municipales, principalmente en las localidades ubicadas en el polígono de peligro marcado en el presente informe, esto con la finalidad de acotar con mayor precisión el área de peligro en cada localidad por este fenómeno, así como descartar localidades que no presentan este problema y realizar los cálculos pertinentes de acuerdo a las características de cada sitio.

Los pobladores de las localidades mencionadas deben estar atentos a cada temporada de huracanes y atender las notificaciones emitidas por el Sistema Nacional de Protección Civil, de la Secretaría de Gobernación, a través de la Unidad de Protección civil o de las autoridades locales correspondientes que constantemente monitorean este tipo de fenómenos.

IX.10. Sequías

Conclusiones

La sequía es uno de los fenómenos hidrometeorológicos más difíciles de predecir, identificar y monitorear dado su silencioso arribo, sus efectos pueden llegar a verse mucho tiempo después de su evolución, es decir, puede ser reconocida una sequía hidrológica cuando ésta ya ha hecho estragos, cuando los acuíferos se han abatido, la humedad en los suelos ha disminuido y hacen irreversibles los daños y la erosión, la presas tienen ya un descenso en sus niveles y no se recuperan en forma definitiva.

En base a lo anterior, se recomiendan una serie de estudios técnicos y científicos interdisciplinarios, que conjuguen diversas técnicas y cálculos como es la aplicación de diversos índices para la severidad, análisis y seguimiento del fenómeno, una herramienta de última generación serán las imágenes obtenidas por el satélite SPOT 6, lanzado el 9 de Septiembre del 2012, que brindarán valiosos datos para el monitoreo del entorno rural, la producción de alimentos así como la atención, predicción y mitigación de los efectos en contingencias climatológicas como sequías e inundaciones.

Cabe destacar que las imágenes serán recibidas por la antena Estación de Recepción México (ERMEX). Lo anterior debe coadyuvar a la detección y alerta temprana, y ser evaluado como una prioridad nacional. Disponer de elementos sólidamente fundamentados, es una necesidad que las autoridades encargadas de la administración, protección civil, investigación y suministro de agua, se tomen acciones que permitan afrontar este tipo de calamidades que afectan a gran parte del país, muy necesario tiene que ser el auspiciar en los programas educativos un categórico énfasis en la cultura y el cuidado del vital líquido.

Tomando en consideración los dos mapas obtenidos del índice de severidad de sequía los cuales tienen una coincidencia con el déficit hídrico, se observa que el grado de severidad ha disminuido al menos hasta el 2003, una de las consecuencias negativas es que la calidad del agua pudiera verse afectada sobre todo en las zonas próximas a la línea de costa debido a la intrusión salina, esto último puede ser más serio si se revierte el proceso de sequía.

El tipo de sequía a la que se ha visto comprometido el estado de Yucatán es fundamentalmente meteorológica, aunque no se tienen datos de aforos o recuperación de los pozos los usuarios o lugareños comentan que la recuperación de éstos cuando se extrae agua es del orden de horas.

Según CONAGUA, las principales declaratorias de desastre en el país han sido por ciclones tropicales 40%, lluvias 33% y sequías 21%, esto permite de alguna forma dimensionar el problema.

Porque no pensar seriamente en un presupuesto gubernamental para la instalación de plantas desalinizadoras, más plantas de tratamiento para infraestructura hidráulica, obras de captación de agua, tecnología sustentable para la construcción, todo lo anterior encaminado a la mitigación del

problema. Es paradójico que mientras algunas personas pierden patrimonios e incluso sus vidas, por el exceso de agua, otras pierdan sus bienes y futuro por la carencia de esta.

En México los mapas de sequía que existen son muy generalizados, es decir abarcan áreas muy extensas, frecuentemente de todo el país, el trabajo de los doctores Roger Orellana Lanza y Celene Espadas Manrique del CICY, aborda el tema para el estado de Yucatán con una representación cartográfica definida.

Los tres sistemas que se ven comprometidos a causa del fenómeno de sequía son en definitiva; el social, el económico y el ambiental. Vale ejemplificar, que entre los años 1997 y 1998 se tiene registrada una sequía que afectó a todo el país con pérdidas de 204 millones de dólares en el renglón agrícola, el año de 1998 dejó un saldo de pérdidas por 5000 hectáreas de pastizales y maíz en el estado de Yucatán CENAPRED, (2007).

Como puede observarse prácticamente todo el territorio yucateco ha estado bajo los efectos de la sequía intraestival, las zonas con donde ha impactado con mayor intensidad son las porciones norte y sur, los valores están dados en porcentaje en relación al total de lluvia en verano. Algunos autores han detectado una distribución de la lluvia durante el año con un comportamiento bimodal (García E., 2004). No se descarta una influencia del calentamiento global al frágil sistema meteorológico.

Resumiendo los resultados obtenidos durante el análisis y desarrollo del presente Atlas, se tiene que, en el estado de Yucatán ha habido alrededor de 15 sequías entre los años de 1980 al 2012, considerando los registros, notas periodísticas y otras fuentes.

Recomendaciones

Es necesaria la aplicación de políticas y estrategias que vayan dirigidas al uso responsable del recurso agua, una acción más podría ser el desacelerar el crecimiento poblacional, y que se llegue a niveles sostenibles, una adecuada planeación para los nuevos asentamientos humanos.

Es necesario hacer extensivo un programa de alerta por parte de las autoridades en materia de salud, claro está que se trata de un desorden de regulación térmica atípica, esta condición la hace peligrosa, realmente existe poco conocimiento en la mayoría de las personas, el GC puede incidir en personas con padecimientos de tipo cardiaco en primer lugar, ya que el corazón es uno de los órganos afectados tempranamente, personas con edad avanzada, aunque también puede atacar a individuos sin antecedentes patológicos previos, ante la sospecha de un caso se debe proceder inmediatamente a reducir la temperatura del paciente en un plazo de una hora, la liberación de las vías respiratorias, la prevención de crisis convulsivas así como arritmias cardiacas, son maniobras que incrementan la posibilidad de supervivencia de estos pacientes.

Puede presentarse pérdida súbita de la conciencia, fatiga, calambres musculares, piel caliente y enrojecida, baja sudoración y afectaciones de orden clínico tales como alteraciones en la función renal, presión arterial baja y taquicardia. En algunos casos las manifestaciones pueden iniciarse con delirio, dolor de cabeza, entumecimiento y hormigueo, vértigos, inquietud y confusión mental por un tiempo variable antes del colapso. En los casos más severos el inicio del episodio puede manifestarse por convulsiones y el desenlace en breve tiempo a un estado de coma.

La hidratación debe realizarse de manera cuidadosa, lo más que puede hacerse es dar pequeñas porciones de agua helada si es que la persona aún reacciona ya que los médicos deberán hidratar al paciente según los requerimientos en función de la presión arterial. Como atención inmediata, lo prioritario es bajar la temperatura del paciente colocando sabanas húmedas, instalar ventiladores, fomentos de agua helada en tórax, incluso es muy acertado colocar bolsas con hielo en todo el cuerpo, pero lo recomendable es que el afectado reciba atención hospitalaria inmediata, donde se trabaje por estabilizar al paciente con técnicas específicas que permitan salvarle la vida.

Los daños y consecuencias mas frecuentes son afectaciones en el sistema nervioso central, daño en la médula espinal, parálisis del cuerpo o paraplejía y atrofia cerebral. Es necesario difundir cuales son los factores de riesgo y tenerlos muy en cuenta para la prevención y atención del golpe de calor. (Revista Biomédica, 1998, número 9 páginas 242-249).

IX.11. Incendios Forestales

Conclusiones

Con el análisis a partir del registro de los incendios de los años 2005 a Abril de 2013, mostró que la tendencia al incremento de los incendios en los meses de abril a mayo, sobresaliendo los años 2006 y 2009, por que se atribuye a quemas agropecuarias que no respetaron el calendario establecido por las autoridades federales, estatales y municipales.

Así mismo se pudo identificar las superficies de las principales tipos de comunidad vegetal y uso de suelo que presentan un rango de amenaza por incendio muy alto, en caso de que se vieran afectadas por un incendio, las cuales son: Selva baja caducifolia 48,887 ha., Selva mediana subcaducifolia 8,499 ha., Selva mediana subperenifolia 2,541 ha., Tular 993 ha., Pastizal inducido 9,518 ha., Pastizal cultivado 9,390 ha., Agricultura de temporal 10,045 ha y Agricultura de riego 150.4 ha.

Para el Gobierno del Estado, a través de Protección Civil, La Comisión Nacional Forestal Delegación Yucatán, Pronatura Península de Yucatán A.C. y otras Instituciones Académicas, están trabajando en conjunto para concientizar a la población de la importancia que se tiene en la prevención, control y manejo de los incendios forestales, para que Yucatán se siga manteniendo entre los diez primeros estados en mantenerse con el menor número de incendios a nivel nacional.

Los incendios suelen derivarse de actividades ganaderas, agrícolas y tradicionales como la cacería. La ganadería y la agricultura, como principales causas, buscan la expansión de los pastizales para el fomento de la primera y el uso del fuego para limpiar terrenos en el desarrollo de la segunda.

Por ultimo las principales causas que detonan un incendio siguen siendo, las quemas agrícolas, debido a la tradición que tiene el Estado por siglos a la roza, tumba y quema, quema de basureros, la cacería furtiva, limpieza de derecho de vía y fumadores principalmente.

Una limitante más para la definir el amenaza o riesgo por incendios forestales en México es que al no tenerse información sistematizada además del grado de complejidad en la toma de datos en campo de las cargas de combustible por comunidad vegetal, que el fuego en los ecosistemas forestales no es solo un factor ecológico, sino también un fenómeno social (Reyes Y Colli, 2009) sobre los regímenes de fuego, la falta de una política nacional que reconozca los impactos negativos y positivos del fuego, no es posible impulsar la planeación e implementación del manejo ecológico del fuego en las regiones forestales (*The Nature Conservancy*, 2004).

X. BIBLIOGRAFÍA

Metodología General

- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), 2004, Guía Metodológica para la elaboración de Atlas de Peligros Naturales a Nivel Ciudad, México, D.F.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), 2006, Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, Fenómenos Geológicos, 280 pp, Disponible en: <http://atl.cenapred.unam.mx/website/RiesgosGeologicos/Sismos/Viewer.htm>
- Chávez-Aguirre, J. M., 2006, Geotecnia, CFE y Facultad de Estudios Superiores Acatlán (Editores), UNAM, México.
- Flores, B. R., Hristov V. V., Li, L. X., 2001, Geotecnia en Ingeniería de Presas, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Tecnología del Agua, México.
- Herrera-Silveira, J. A., Capurro, F. L., Comin, S. A., Aranda, C. N., 2007, Los usos y abusos de la zona costera en la península de Yucatán, Centro de Estudios del Instituto Politécnico Nacional (IPN), Unidad Mérida, Instituto Pirenaico de Ecología, p. 388-396.
Disponible en:
<http://digital.csic.es/bitstream/10261/35618/1/P%C3%A1ginas%20de%20cap26.pdf>
- INDECI (Instituto Nacional de Defensa Civil), 2006, Manual Básico para la Estimación del Riesgo, Lima, Perú, 69 pp, versión 01.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2010, AGEB's (Área Geoestadística Básica), Información Digital.
- SCT-IMT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes - Instituto Mexicano del Transporte), 2009, Dirección General de Planeación, Cotizaciones consultadas por el IMT, Manual Estadístico del Sector del Transporte.

Generalidades

- ADMIN. S. C. (Administración de Cadena de Suministros), 2009, Unidad II, Logística de Transporte en el estado de Yucatán, Logística Ferroviaria en el Estado de Yucatán.
Disponible en: <http://suministros8d2.wordpress.com/unidad-ii-logistica-de-transporte-en-el-edo-de-yucatan/logistica-ferroviaria-en-el-estado-de-yucatan/>
- API (Administración Portuaria Integral de Progreso S.A. de C.V.), 2009-2014, Programa maestro de desarrollo de Puerto Progreso y puertos pesqueros de Yucatán, Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
Disponible en: <http://www.puertoyucatan.com/qs/files/pmdp-2009-2014.pdf>
- API (Administración Portuaria Integral de Progreso S.A. de C.V.), 2010, Puertos de Yucatán, Progreso, El Puerto del Sureste Mexicano, Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
Disponible en: <http://www.puertoyucatan.com/cgi-bin/news.cgi?folio=18>
Disponible en: <http://www.puertoyucatan.com/cgi-bin/news.cgi?folio=162>
Disponible en: <http://www.puertoyucatan.com/cgi-bin/news.cgi?folio=163>
Disponible en: <http://www.puertoyucatan.com/cgi-bin/news.cgi?folio=164>
- ASUR (Aeropuertos del Sureste), 2011, Aeropuertos, Aeropuerto Internacional de Mérida, Datos técnicos.
Disponible en: http://www.asur.com.mx/asur/espanol/aeropuertos/merida/technical_facts.asp

- CHM (Ferrocarriles Chiapas Mayab S.A. de C.V.), 2010, Ferrocarriles Chiapas Mayab, página no oficial forma parte de Railmexico y de la Sociedad Histórica de los Ferrocarriles Mexicanos. Disponible en: <http://chiapas-mayab.tripod.com/id4.html>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2009, Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero (3105), Península de Yucatán, Estado de Yucatán. Conagua. Aguas Nacionales. Agua Subterránea. Disponibilidad por acuífero. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/disponibilidad.aspx?id=Disponibilidadporacuífero|Aguasubterránea|0|62|0|0|0>
- Diario de Yucatán, 2011, Yucatán, Sucesos de Policía, Aeropistas en la mira, El Ejército vigila que no hayan resurgido clandestinamente, Publicación en la web, 30 Enero 2011. Disponible en: <http://www.yucatan.com.mx/20110201/nota-10/70200-aeropistas-en-la-mira.htm>
- Durán, R., Méndez, M., (Editores) 2010, Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán, CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. 496 pp., Disponible en: <http://www.cicy.mx/sitios/Biodiversidad/>
- Flores-Guido, J. S., Kantún-Balam, J. S., 2009, La vegetación del estado de Yucatán con especies que pueden ser básicas para combatir la desertización y el calentamiento global, Foro Desertificación, "Experiencia del manejo sustentable en Yucatán: contribuyendo a la lucha contra la desertificación y mitigación de los efectos de la sequía". CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/temas-forestales/desarrollo-y-transferencia/foro-desertificacionyucatan/115?task=view>
- FSMEX, 2011. Temas en Foro. Aviación Real. Aviación comercial Nacional. Temas en foros. Visita al aeropuerto de Chichén Itzá (Kaua CZT). Pagina de foros en debate. Usuario SuPerDudeMX. Disponible en: <http://foros.fsmex.com/showthread.php?t=43695>
- INE-SEMARNAT (Instituto Nacional de Ecología – Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México). 2003. Las comunidades vegetales de México. Francisco González Medrano. INE-SEMARNAT. 2003. Pp.77. Disponible en: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/>
<http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/download/443.pdf>
- INEGI¹ (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2011, Perspectiva Estadística Yucatán, 95 pp. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/perspectivas/perspectiva-yuc.pdf>
- INEGI² (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2010, Estadísticas, Censos y Conteos de Población y Vivienda, Principales resultados por localidad (ITER). Disponible en: http://www.inegi.org.mx/sistemas/consulta_resultados/iter2010.aspx?c=27329&s=est
- INEGI³ (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2011, Panorama Sociodemográfico de México. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/sistemas/productos/default.aspx?c=265&s=inegi&upc=702_825001897&pf=Prod&ef=&f=2&cl=0&tg=0&pg=0#inicio
- INEGI⁴ (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2010, Anuario Estadístico de Yucatán, Gobierno del estado de Yucatán, México. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/sistemas/productos/default.aspx?c=265&s=inegi&upc=70282_5201555&pf=Prod&ef=&f=2&cl=0&tg=13&pg=0#inicio

- INEGI⁵ (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2009, Catálogo de claves de entidades federativas, municipios y localidades.
Disponible en: <http://mapserver.inegi.org.mx/mgn2k/>
- INEGI⁶ (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2011. Información Geográfica del estado de Yucatán.
- La Jornada, 2008, El aeropuerto de Chichén Itzá, un elefante blanco, buscan rescatarlo, Estados, Yucatán, fecha de publicación: 29 de Septiembre del 2008.
Disponible en: <http://www.jornada.unam.mx/2008/09/29/index.php?section=estados&article=038n1est>
- LOGRA (Grupo Especializado en la Logística de Carga a Granel), 2007, Terminales Portuarias. Multisur, Servicios.
Disponible en: <http://www.logra.com.mx/espanol/terminales-portuarias/>
- PEMEX (Petróleos Mexicanos) 2010, Boletines Regionales, Mérida, Yucatán
Disponible en: <http://www.pemex.com/index.cfm?action=news§ionID=118&catID=11385&contentID=21755>
- SCT¹ (Secretaría de Comunicaciones y Transporte) 2009, Anuario Estadístico de Comunicaciones y Transportes, Infraestructura Carretera, Longitud y características de la red de carreteras por entidad federativa, Dirección General de Planeación, México. Edición 2009.
Disponible en: <http://www.sct.gob.mx/uploads/media/ANUARIO2009-final.pdf>
- SCT² (Secretaría de Comunicaciones y Transporte), 2010, Infraestructura Carretera, Longitud y características de la red de carreteras por entidad federativa.
Disponible en: http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAF/EST_BASICA/EST_BASICA_2004/EST2004_12_Infraestructura.pdf
- SEDUMA (Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente), 2010, Observatorio del cambio climático de Yucatán, Escenarios, Atlas de escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán, Orellana-Lanza, R., (editor).
Disponible en: <http://www.cambioclimatico.yucatan.gob.mx/atlas-cambio-climatico/index.php>
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México), 2011, Construcción y operación de la terminal especializada de fluidos ubicada en la terminal remota de Progreso, Yucatán, Servicios Combustibles del Caribe S.A. de C.V.
Disponible en: <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/yuc/estudios/2007/31YU2007I0001.pdf>
- SENEAM (Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano), 2011, Servicios y funciones de la SENEAM, Tránsito Aéreo, Información de Vuelos, Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
Disponible en: <http://www.seneam.gob.mx/index.asp>
- SSA México (Cruceros y Transbordadores S.S.A. de México S.A. de C.V.), 2010, Puertos, Progreso, Terminal de Pasajeros, Infraestructura
Disponible en: <http://www.ssamexico.com/progreso.aspx>
- TCY (Terminal de Contenedores de Yucatán), 2010, Puerto Progreso, Infraestructura portuaria y servicios.
Disponible en: <http://www.tcy.com.mx/index.php?modulo=contenido&id=87>

UDLAP (Universidad de Las Américas Puebla). 2011. Infraestructura ferroviaria en México. Ferrocarriles Chiapas-Mayab S.A. de C.V. Catarina (Inédito). Colección de Tesis Digitales Universidad de las Américas Puebla. Centro de Recursos de Información y Aprendizaje (CIRIA). Universidad de las Américas.

Disponible en: <http://ciria.udlap.mx/index.html>

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/capasso_g_ag/capitulo5.pdf

Villasuso M., Méndez, R., 2000, A Conceptual Model of the Aquifer of the Yucatán Peninsula. in: Lutz, W., Prieto, L., Sanderson, W. (Editors), Population, Development, and Environment on the Yucatan Peninsula: From Ancient Maya to 2030, Austria, 120-139.

Wikipedia. 2011. Estado de Yucatán. Gobierno del estado de Yucatán.

Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Yucat%C3%A1n>

Geología

Barbosa-Gudiño, J. R., Orozco-Esquivel, M. T., Gómez-Anguiano, M., Zavala-Monsivais, A. 2008. The early Mesozoic volcanic arc of western North America in northeastern Mexico: Journal of American Earth Sciences, 25, p. 49-63.

Bird, D. E., Burke, K., Hall, S. A., Casey, J. F., 2005, Gulf of Mexico tectonic history: Hotspot tracks, crustal boundaries and early salt distribution: AAPG Bulletin, 3(89), 311-328 p.

Campos-Enriquez, J. O., Chávez-García, F. J., Cruz, H., Acosta-Chang, J. G., Matsui, T., Arzate, J. A., Unsworth, M. J., Ramos-Lopez, J., 2004, Shallow crystal structure of Chicxulub impact crater imaged with seismic, gravity and magnetotelluric data: Inferences about the central uplift: Geophys J. Int., 157, 515-525.

Cobiella-Reguera, J. L., 2008, Reconstrucción palinspática del paleomargen mesozoico de América del Norte en Cuba occidental y sudeste del Golfo de México, Implicaciones para la evolución del SE del Golfo de México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 25(3), 382-401.

Collins, G. S., Melosh, H. J., Morgan, Jo. V., Warner, M. R., 2002, Hydrocode simulations of Chicxulub Crater collapse and peak-ring formation: Icarus, 157, 24-33.

Cornejo-Toledo, A., Hernández-Osuna, A., 1950, Las anomalías gravimétricas en la cuenca del istmo, planicie costera de Tabasco, Campeche y Península de Yucatán: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, (2), 453-460.

Flores, G., 1952, Geology of northern British Honduras: AAPG Bulletin, 36(2), 950-956.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1998. Carta geológica escala 1:250,000, serie 1.

Keller, G., Adatte T., Stinnesbeck W., Rebolledo-Vieyra M., Urrutia Fucugauchi J., Kramar U., and Stueben D. 2004(a), Chicxulub impact predates the K/T boundary mass extinction: Proceedings of the National Academy of Sciences 101, 3753–3758.

Keller, G., Adatte, T., Stinnesbeck, W., Stueben, D., Berner, Z., Kramar, V., Harting, M. 2004 (b). More evidence that the Chicxulub impact predates the K/T mass extinction: Meteoritics and Planetary Science 39(7), 1127-1144.

López-Ramos, 1973, Estudio geológico de la Península de Yucatán: Enciclopedia Yucatanense, 75 pp.

- López-Ramos, E., 1975, Geological summary of the Yucatán Peninsula, *in* Nair, A. E. M., y colaboradores (editors), The Gulf of Mexico and the Caribbean: New York Plenum Press, 257-282.
- Lugo-Hubb, J., Aceves-Quezada, J. F., Espinosa-Pereña, R., 1992, Rasgos geomorfológicos mayores de la península de Yucatán: Revista del Instituto de Geología, UNAM, 10(2), 143-150.
- Molina-Garza, R. S., Van Der Voo, R., Urrutia-Fucugauchi, J., 1992, Paleomagnetism of the Chiapas Massif, southern Mexico: Evidence for rotation of the Mayan Block and implications for the opening of the Gulf of Mexico: GSA Bulletin, 104(9), 1156-1168.
- Nakano, Y., Goto, K., Matsui, T., Tada, R., Tajika, E., 2008, PDF orientations in shocked quartz grains around the Chicxulub crater: Meteoritics and planetary Science 43(4), 745-760.
- Ortega-Gutiérrez, F., Mitre-Salazar, L. M., Roldan-Quintana, J., Aranda-Gómez, J. J., Moran-Centeno, D., Alanís-Álvarez, S., Nieto-Samaniego, A., 1992, Carta Geológica de la República Mexicana, escala 1:2, 000,000, Quinta edición.
- Sapper, K., 1986, Sobre la geografía física y la geología de la Península de Yucatán, Instituto Geológico de México: boletín, 3.
- COREMI (Consejo de Recursos Minerales, actualmente Servicio Geológico Mexicano), 2004, Carta geológico-minera Chetumal, E16-4-7, escala 1:250,000, estados de Quintana Roo y Campeche.
Disponible en:
http://mapserver.sgm.gob.mx/cartas_impresas/productos/cartas/cartas250/geologia/118_E16-4-7GM.html
- COREMI (Consejo de Recursos Minerales, actualmente Servicio Geológico Mexicano), 2004, Informe Carta geológico-minera Chetumal, E16-4-7, escala 1:250,000, estados de Quintana Roo y Campeche, 41 pp.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), 2004, Informe de la Carta Geológico-Minera Calkiní, F15-9-12, escala 1:250'000, 36 pp.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano) 2005, Carta Geológica-Minera Felipe Carrillo Puerto, E16-1, escala 1:250,000, Estados de Quintana Roo, Campeche y Yucatán.
Disponible en:
http://mapserver.sgm.gob.mx/cartas_impresas/productos/cartas/cartas250/geologia/117_E16-1GM.html
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), 2006, Carta Geológico-Minera y Geoquímica Mérida, F16-10, escala 1:250,000.
Disponible en:
http://mapserver.sgm.gob.mx/cartas_impresas/productos/cartas/cartas250/geologia/116_F16-10GM.html
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), 2006, Carta Geológico-Minera Tizimín, F16-7, escala 1:250,000.
Disponible en:
http://mapserver.sgm.gob.mx/cartas_impresas/productos/cartas/cartas250/geologia/115_F16-7GM.html
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), 2005, Informe de la Carta Geológico-Minera Cancún, F16-8, escala 1:250'000, 28 pp.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), 2005, Informe de la Carta Geológico-Minera Cozumel, F16-11, escala 1:250'000, 27 pp.

- SGM (Servicio Geológico Mexicano) 2005, Informe de la Carta Geológica-Minera Felipe Carrillo Puerto, E16-1, escala 1:250,000, Estados de Quintana Roo, Campeche y Yucatán, 97 pp.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), 2005, Informe de la Carta Geológico-Minera Tizimín, F16-7, escala 1:250'000, 39 pp.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), 2005, Informe de la Carta geológica-minera y geoquímica Mérida, clave F16-10, escala. 1:250,000, 56 pp.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), 2007. Carta Geológico-Minera de los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán, escala 1:500,000.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), 2011. Atlas de Riesgos del Estado de Tamaulipas. Escala 1:250,000.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano). 2011. Léxico Estratigráfico de México. Primera versión. Registro geológico sistematizado de unidades estratigráficas presentes principalmente en el norte de la República Mexicana. Análisis realizado de acuerdo con los procedimientos establecidos en el North American Stratigraphic Code (NACSN, 2005).
Disponible en: http://coremi02.sgm.gob.mx/LexicoEs_ND/
- Sharpton, V. L., Martín, L. E., Carney, J. L., Lee S., Ryder, G., Schuraytz, B. C., Sikora, P. and Spudis, P. D., 1996, A model of the Chicxulub impact basin based on evaluation of geophysical data, well logs and drill core samples, in Ryder, G., Fastovsky, D., and Gartner, S., eds., The Cretaceous-Tertiary Event and Other Catastrophes in Earth History: Boulder, Colorado, Geological Society of America: Special Paper 307, p 55-74.
- Stern, R. J., Dickinson, W. R., 2010, (Abstract) The Gulf of Mexico is a back arc basin, GSA: Geosphere, 6, 739-754.
- Urrutia-Fucugauchi, J., Morgan, J., Stoffler, D., Claeys, P. 2004. The Chicxulub Scientific Drilling Project (CSDP): Meteoritics and Planetary Science 39(6), 787-790.
- Viniegra, O. F., 1981, Great carbonate bank of Yucatán, southern México: Journal of Petroleum Geology, 3, 274-278.
- Vinson, G. L., Brineman, J. H., 1963, Nuclear Central America, Hub of the Antillean Transverse Belt, in Backbone of the Americas: AAPG Memories, (2), 101-112.

Peligros por fenómenos geológicos

- Adriani, G. F., Walsh N., Pagliarulo, R., 2005, The influence of the geological setting on the morphogenetic evolution of the Tremiti Archipelago (Apulia, Southeastern Italy): Natural Hazard and Earth System Sciences, 5, 29-41.
- Allen, A. S. 1984, Types of land subsidence in Poland J. F., Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal: Studies and reports in hydrology, UNESCO, 340 pp.
- Álvarez, L. W., Álvarez, W., Asaro, F., Michel, H. V., 1980, Extraterrestrial cause for the Cretaceous—Tertiary extinction: Science, 208, 1095-1108.
- Álvarez, W., Smith J., Lowrie W., Asaro F., Margolis S.V., Claeys P., Kastner M., Hildebrand A.R., 1992, Proximal impact deposits at the Cretaceous–Tertiary boundary in the Gulf of Mexico: A restudy of DSDP Leg 77 Sites 536 and 540: Geology, 20, 697–700.

- Antayhua, Y., Tavera, H., 2003, Volcanes y sismicidad en la región del Volcán de Sabancaya, Arequipa, Monografía, Centro Nacional de Datos Geofísicos, Instituto Geofísico del Perú, 86 pp.
- Aranda-Gómez, J.J., Torres-Hernández, R., Carrasco-Núñez, G., Aguillón-Robles, A., 2000, Contrasting styles of Laramide Folding across the west-central margin of the Cretaceous Valles-San Luis Potosí carbonate platform, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 17 (2), 97-111.
- Arce, J. L., Macías, J. L., Espíndola, J. M., Saucedo, R., 2002, (resumen), Erupción pliniana de hace 550 años del Volcán Chichón, Chiapas: Distribución, volumen y altura de columna, *GEOS*, 22(2).
- Ayala-Carcedo, F. J., Olcina-Cantos, J., 2002, *Riesgos Naturales*, Editorial Ariel, 1497 pp., ISBN: 84-344-8034.
- Back, W., Hanshaw, B. B., Herman, J. S., Van Driel, N., 1986, Differential dissolution of a Pleistocene reef in the ground-water mixing zone of coastal Yucatan, Mexico: *Geology*, 14, 137-140, doi: 10.1130/0091-7613(1986)14<137:DDOAPR>2.0.CO;2.
- Bardintzeff, J. M., McBirney, A. R., 2000, *Volcanology* (Second edition), Jones and Bartlett publishers, Sudbury, Massachusetts, 268 pp., ISBN 0-7637-1318-X.
- Bates, A. Bankher, K., 1997, Causes of land subsidence in the Kingdom of Saudi Arabia: *Natural Hazards*, 16(1), 57-63.
- Beck, B. F., 1988, Environmental and engineering effects of sinkholes - the processes behind the problems, 21st IAH proceedings: *Karst hydrogeology and karst environment protection*, 17-29.
- Beddows, P., Blanchon, P., Escobar, E., Torres-Talamante, O., 2007, Los cenotes de la Península de Yucatán: *Arqueología Mexicana*, 14(83), 32-35.
- Bertoni, W., Brighenti, G., Gambolati, G., Ricceri, G., Vuillermin, F., 1995, Land subsidence due to gas production in the on- and off- shore natural gas fields of the Ravenna area, Italy, in Barends, Brouwer, Schröder (eds.), *Land subsidence (proceedings of the fifth international symposium on land subsidence) IAHS*, (234), 13-20.
- Bolio-Barrios, E.R., Bautista, F., Pacheco-Ávila, J.G., 2011, Uso de la metodología EPIK para determinar la vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación en Yucatán, México: *Teoría y praxis*, 9, 55-72.
- Brook, G. A., Allison, T. L., 1984, Fracture mapping and ground subsidence susceptibility modeling in covered karst terrain: The example of Dougherty County, Georgia, in Johnson, Carbognin & Ubertini (eds.), *TISOLS, IAHS*, (151), 595-606, ISBN: 0-947571-40-X.
- Butterlin, J., Bonet, F., 1959, *Las formaciones cenozoicas de la parte mexicana de la Península de Yucatán*, UNAM.
- Calderhead, A. I., Martel, R., Garfias, J., Rivera, A., Therrien, R., 2010, Pumping effects on land subsidence in the Toluca Valley, Mexico, in Carreón-Freyre, D. C., Cerca, M., Galloway, D., Silva-Corona (Eds.) *Land Subsidence, Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development*, IAHS (International Association of Hidrological Sciences), Publication 339, ISBN 978-1-907161-12-4.
- Campos-Enríquez, J. O., Chavez-García, F. J., Cruz, H., Acosta, J. G., Takafumi, M., Arzate, J., Unsworth M., Ramos J., 2004, Shallow crustal structure of Chicxulub impact crater imaged

- with seismic, gravity and magnetotelluric data: inferences about the central uplift: *Geophys. J. Int.*, 156, 515–525.
- Carlos-Valerio V., García-Palomo A., López-Miguel C., Galván-García A.H., 2007, Geología y procesos de remoción en masa asociados a un domo volcánico tipo couleé: cerro El Tenayo, Tlalnepantla, Estado de México, *Boletín de la sociedad geológica mexicana volumen 59, núm. 2*, p. 183-201
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), 2002. Monitoreo de Laderas con fines de evaluación y alertamiento, Informe Técnico. México D.F.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), 2006, Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, Peligros Geológicos, Serie: Atlas Nacional de Riesgos, 280 pp.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), 2011, Serie Fascículos, Sismos, México D.F. 44 pp. Disponible en:
<http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/10112011Fasciculosismos.pdf>
- CFE (Comisión Federal de Electricidad). 1993. Manual de diseño de obras civiles. Sección C, Tomo I, Tema1, Capítulo 3 Diseño por sismo.
- Chandio, I, A., Matori, A. N., Lawal, D. U., Sabri, S., 2011, GIS-based Land Suitability Analysis Using AHP for public parks planning in Larkana City: *Modern Applied Science*, 5(4), 177-189.
- Chávez-Aguirre, J. M., 2006, Geotecnia, Comisión Federal de Electricidad (CFE). Universidad autónoma de México (UNAM) Facultad de Estudios Superiores Acatlán. México.
- Chivatá-Cárdenas, I., 2008, Estimación de la susceptibilidad ante deslizamientos: aplicación de conjuntos difusos y las teorías de la posibilidad y de la evidencia: *Revista de Ingeniería e investigación*, 28(1), 26-40.
- CINVESTAV-SEDUMA (Inédito), Base de datos de cenotes en el territorio del Estado de Yucatán.
- Civijíc, J., 1893: Das Karstphanomen, Versuch einer morphologischen Monographie. *Geographisches Abhandlungen*, 5(3), 266-273.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), 1999, Guía de Muestreo de Aguas Subterráneas y el Manual de Equipamiento de Pozos de Monitoreo. México, D.F.
- Coch, N. K., 1995, *Geohazards: Natural and Human*, 1st edition, Prentice-Hall, ISBN 0-02-322992-6.
- Coke, J. G., 2012, *Underwater Caves of the Yucatan Peninsula*, *Encyclopedia of Caves*, Elsevier, 833-838.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2011, Manual de Administración de Emergencias Meteorológicas del Estado de Yucatán, 51 pp.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2002, Evaluación de los efectos del Huracán Isidoro en el acuífero del Estado de Yucatán, Gerencia Regional de la Península de Yucatán, 37 pp.
- Corominas, J. y García Yagüe, A. 1997. "Terminología de los movimientos de ladera" IV Simposio Nacional de Taludes y Laderas Inestables; Alonso, E.; Corominas, J.; Chacón, J.; Oteo, C. y Pérez, J. (editores), Granada, 3, 1051-1072.
- CRM (Consejo de Recursos Minerales ahora Servicio Geológico Mexicano), 2004, Informe de la Carta Geológico-Minera Calkiní, F15-9-12, escala 1:250,000, 40 p.

- Cruden, D. M., 1991, A simple definition of a landslide: Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Paris, 43, 27-29.
- Damon, P., Montesinos, E., 1978, Late Cenozoic volcanism and metallogenesis over an active Benioff Zone in Chiapas, Mexico: Arizona Geological Society Digest, 11, 155-168.
- De la Cruz-Reyna, S., Martín del Pozo, A. L., 2009, The 1982 eruption of El Chichón Volcano, México: Eyewitness of the disaster: Geofísica internacional, 48(1).
- Delle Rose, M., Parise, M., 2002, Karst subsidence in south-central Apulia, Southern Italy, International: Journal of Speleology, 31, 181-199.
- Demant, A., 1975, Caracteres químicos principales del vulcanismo terciario y cuaternario de Baja California Sur. Relaciones con la evolución del margen continental pacífico de México: Universidad Nacional Autónoma de México: Revista del Instituto de Geología, 1(1), 19-69.
- Dreybrodt, W., Gabrovsek, F., 2003, Basic processes and mechanisms governing the evolution of karst: Speleogenesis and evolution of karst aquifers, The virtual Scientific Journal, 1, 26 pp.
- Durán-Valseo, 2002, Riesgo en terrenos kársticos in Ayala-Carcedo y Olcina-Cantos (eds.), Riesgos Naturales, editorial Ariel, 1370 pp., ISBN: 84-344-8034-4.
- Eguiluz De Antuñano, S., Aranda-García, M., Marrett, R., 2000, Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 53, 1-26.
- Eldrandaly, K., 2007, GIS software selection: a multi-criteria decision making approach: Applied GIS, 3(5), 1-17.
- EM-DAT, 2009, The international disaster database, fecha de consulta 07/2012 Disponible en: <http://www.emdat.be/result-country-profile>
- EPA (United States Environmental Protection Agency), 2002, Lexicon of Cave and Karst Terminology with Special Reference to Environmental Karst Hydrology, Supercedes EPA/600/R-99/006, 1/99.
- Espinasa-Pereña, R., 1994, Origen y distribución de las cavernas en México, Revista Ciencias, 36.
- Espíndola, J. M., 1989, El tercer planeta: Edad, estructura y composición de la Tierra, Colección La Ciencia desde México, 74, Fondo de cultura económica, México, 159 pp.
- Esquivel, M. C., Uribe, L. J., 2002, Zonificación de riesgo por hundimiento en la zona urbana de la ciudad de Zacatecas (inédito).
- Espinosa-Graham, L., 2003, Reporte interno (Visita al sitio de hundimiento del terreno propiedad del Sr. Nicanor Aké Avilés), Gobierno del estado de Yucatán, 2 pp.
- Fagundo, J.R. y E. Álvarez. Modelos geoestadísticos y geoquímicos para el tratamiento de datos hidroquímicos. En: Contaminación de Aguas Subterráneas. Monitoreo, Evaluación, Recuperación. Ed. Arellano, M., J.R. Fagundo, I. Antigüedad, I. Morell y otros, Universidad del País Vasco, Bilbao (España), 167-178, 1997.
- Fernández, T., 2001, Cartografía, análisis y modelado de la susceptibilidad a los movimientos de ladera en macizos rocosos mediante SIG: Aplicación a diversos sectores del sur de la provincia de Granada, Tesis Doctoral; Universidad de Granada, 648 pp.

- Ferrari, L., Garduño, V. H., Innocenti, F., Manetti, P., Pasquaré, G., and Vaggelli, G., 1994b, A widespread mafic volcanic unit at the base of the Mexican Volcanic Belt between Guadalajara and Queretaro: *Geofísica Internacional*, 33, 107–124.
- Ferrari, L., Pasquaré, G., Venegas-Salgado, S., Romero-Rios, F., 1999, *Geology of western Mexican Volcanic Belt and adjacent Sierra Madre Occidental and Jalisco block*, GSA, Special Paper 334, 83 pp.
- Fisher, R. V., Heiken, G., 1982 (abstract), Mt. Peleé, Martinique: May 8 and 20, 1902, pyroclastic flows and surges: *Journal of Volcanology and Geothermal Researches*, 13(3-4), 339-371.
- Fisher, R. V., Heiken, G., Hulen, J. B., 1997, *Volcanoes, Crucibles of change*, Princeton University press, 317 pp., ISBN 0-691-012213-X.
- Florea, L., 2005, Using state-wide GIS data to identify the coincidence between sinkholes and geologic structure, *Journal of Cave and Karst Studies*, 67(2), 120-124.
- Flores-Berrones, R., Vassilev H. V., Liu X. L., 2001, *Geotecnia en Ingeniería de Presas*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Progreso, Morelos, México.
- Ford, D. C., 1964, Origin of closed depressions in the central Mendip hills, Abstract Pap. 20th International. Geographic Congress (London), 105(6).
- Ford, D. C., Williams, P., 1989, *Karst Geomorphology and Hidrology*, Chapman and Hall, 601 pp, ISBN 0-412-44590-5.
- García, G. G., Graniel, C. E., 2010, *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán, México*.
- García-Palomo, A., Macías J. L., Arce, J. L., Mora, J. C., Hughes, S., Saucedo, R., Espíndola, J. M., Escobar, R., and Vallance, J. W., 2006, Geological evolution of the Tacaná Volcanic Complex, México-Guatemala, in Rose W. I., Bluth G. J., Carr M. J., Ewert J. W., Patiño L. C., and Wallace J. W., *Volcanic Hazards in Central America: Geological Society of America Special Paper 412*, 39-57.
- Gillman, J., Palmer, J., Young, G., Prewett, J., 2007, Soil-cover karst collapse: A geologic hazard in Missouri, *National cave and karst management symposium*, 175-185.
- Gobierno del estado de Tamaulipas, 2011, *Atlas de riesgos del estado de Tamaulipas*, 369 pp.
<http://proteccioncivil.tamaulipas.gob.mx/wp-content/uploads/2012/03/ATLAS-DE-RIESGOS-DEL-ESTADO-DE-TAMAULIPAS.pdf>, acceso libre.
- Gobierno del estado de Zacatecas, (inédito), *Atlas de peligros por fenómenos geológicos del Estado de Zacatecas*, 438 pp.
- González-Mellado, A. O., De la Cruz-Reyna, S., 2010, A simple semi-empirical approach to model thickness of ash-deposits for different eruption scenarios: *Natural Hazards Earth System Science.*, 10, 2241-2257.
- Graniel-Castro, E., Carrillo-Rivera, J., Benavides-Cardona, A., 2003, Dispersividad de solutos en el cárst de Yucatán, México: *Ingeniería*, 49-56.
- Graniel-Castro, E., Pacheco-Medina, A., Coronado-Peraza, V., 2009, Origen de los sulfatos en el agua subterránea del sur de la Sierrita de Ticul, Yucatán, *Ingeniería Revista Académica*, 13(1), 49-58.
- Gutierrez, R., 2008, *Compilation and production of a karst map of México* (abstract), American Geophysical Union.

- Gutiérrez, F., 1998, Subsistencia por colapso en un karst aluvial, Análisis de estabilidad, in Gómez-Ortiz, A., y Salvador, F., (Editores), Investigaciones recientes de la Geomorfología española, 47-58, Barcelona.
- Gutierrez, F., Cooper, A. H., Johnson, K. S., 2008, Identification, prediction and mitigation of sinkholes hazards in evaporate karst areas, *Environmental Geology*, 53, 36 pp.
- Hall, F.G., 1936, Physical and chemical survey of cenotes of Yucatán, in *The Cenotes of Yucatan: Carnie Institute of Whashington Publication 457*, 5-16.
- Herrera-Castañeda S. R., 2002, Regionalización de los deslizamientos en México, Universidad Autónoma de México, Academia de Ingeniería de México.
- Hildebrand, A. R., Boynton W. V., 1990, Proximal Cretaceous–Tertiary boundary impact deposits in the Caribbean: *Science*, 248, 843–847
- Hildebrand A. R., Penfield G.T., Kring D.A., Pilkington M., Camargo–Zanoguera A., Jacobsen S.B., Boynton W.V., 1991, Chicxulub Crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico: *Geology*, 19, 867–871.
- Howell, F. T., 1986, Photogeology of some karst subsidences, Cheshire, England, in Johnson, A. I., Carbognin, L., Ubertini, L., (Editors), *Land Subsidence proceedings of the Third International Symposium of Land Subsidence*, 617-627.
- Ibrahim, E. H., Mohamed, S. E., Atwan, A. A., 2011, Combining fuzzy Analytic Hierarchy Process and GIS to select the best location for a wastewater lift station in El-Mahalla El-Kubra, north Egypt, *International Journal of Engineering & Technology IJET-EJENS*, 11(5), 44-50.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) 2010, Continuo Nacional Geológico, Escala 1:250 000.
- Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 2009, Manual estadístico del sector del transporte, 330 pp.
- Jabr, W. & El-Awar, F., 2004. GIS & analytical hierarchy process for siting water harvesting reservoirs , Irsal-Lebanon: Esri.
- Kring, D. A. and W. B. Boynton, 1992, (Abstract), Petrogenesis of an augite–bearing melt rock in the Chicxulub structure and its relationship to K/T impact spherules in Haiti: *Nature*, 358, 141 – 144. doi:10.1038/358141a0.
- Lefticariu, M., Perry E. C., William C. W., Lefticariu L., 2006, Post-Chicxulub depositional and diagenetic history of the northwestern Yucatan Peninsula, Mexico, *Sedimentary Geology*, 183, 51–69.
- López, F., Buxó, P., Palau, J., Marturià, J., Concha, A., Martínez, P., 2010, Evaluation of the subsidence and risk of collapse in the Estació neighborhood of Sallent City, Catalonia (Spain), in Carreón-Freyre, D. C., Cerca, M., Galloway, D., Silva-Corona (Editors) *Land Subsidence, Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development*, IAHS (International Association of Hidrological Sciences), Publication 339, ISBN 978-1-907161-12-4.
- López-Doncel, R., Rodríguez-Hernández, E., Cruz Marquez, J., Navarro-Montezuma, A., Pichardo Barrón, Y., Aguilar Pérez, J., 2007, Microfacial and stratigraphic relationships of the Aptian-Santonian deposits of a transitional “platform-to-basin” area: An example from the east central portion of Mexico, Diaz Martínez, E., y Rábano, I. (Editors), 4Th European meeting on the paleontology and stratigraphy of Latin America, Cuadernos del Museo Geominero, 8, ISBN 978-84-7840-707-1.

- Macías-Vázquez, J. L., Capra-Pedol, L., 2005, Los volcanes y sus amenazas, Colección La ciencia para todos, 210, 159 pp., ISBN: 968-16-7568-1.
- Macías-Vázquez, J. L., Espíndola, J. M., 2002, (Resumen) Historia eruptiva durante el Holoceno y su impacto en la actividad humana: GEOS, 22(2).
- Manea, V. C., Manea, M., 2006, The origin of modern Chiapanecan Volcanic Arc in southern Mexico inferred from thermal models, in Rose W. I., Bluth G. J., Carr M. J., Ewert J. W., Patiño L. C., and Wallace J. W., Volcanic Hazards in Central America: Geological Society of America Special Paper (412), 27-38.
- Marín-Stillman, L. E., Pacheco-Ávila, J. G., Méndez-Ramos, R., 2005, Hidrogeología de la Península de Yucatán in Jiménez, B., y Marín, L., (Editores) El agua en México vista desde la academia, Academia Mexicana de Ciencias, 411 pp., ISBN: 968-7428-22-8.
- Martín-Barajas, A., 2000, Volcanismo y extensión en la Provincia Extensional del Golfo de California: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 53, 72-83.
- Marsico, A., Giuliano, G., Pennetta, L., Vurro, M., 2004, Intrinsic vulnerability assessment of the south-eastern Murge (Apulia, southern Italy), Natural Hazards and Earth System Sciences, 4, 769-774.
- McClain, J., 1997. Tertiary carbonate biostratigraphy of northwestern Yucatan Peninsula, Mexico. MS thesis, Northern Illinois University, DeKalb, IL, 125 pp.
- Mendoza-Rosas, A. T., De la Cruz-Reyna, S., 2010, Hazard estimates for El Chichón Volcano, Chiapas, México: a statistical approach for complex eruptive histories, Natural Hazards Earth Systems. Science, 10, 1150-1170. Disponible en: www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/10/1159/2010/doi:10.5194/nhess-10-1159-2010.
- Mendoza-Rosales C. C., Silva-Romo G., 2001, Tectonosomas del Cretácico Superior en la región de Zimapán, Hgo. México. Memorias en CD del XI CONGRESO LATINOAMERICANO DE GEOLOGÍA, Montevideo, Uruguay.
- Mochales, T., Casas, A. M., Pueyo, E. L., Pueyo, O., Román, M. T., Pocoví, A., Soriano, M. A., Ansón, D., 2008, Detection of underground cavities by combining gravity, magnetic and ground penetrating radar survey: a case study from the Zaragoza area, NE Spain, Environmental Geology, 53, 1067-1077, DOI: 10.1007/s00254-007-0733-7.
- Mora, J. C., Macías, J. L., Gardner, J. E., Arce, J. L., 2002, (Resumen) Condiciones pre-eruptivas de la erupción ocurrida hace 550 años ap. en el Volcán Chichón, Chiapas: Petrología experimental: GEOS, 22(2).
- Muñiz-Jáuregui y Hernández-Madrigal, 2012, Zonificación de procesos de remoción en masa en Puerto Vallarta, Jalisco, mediante combinación de análisis multicriterio y método heurístico, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 29(1), 103-114.
- NASA-Jet Propulsion Laboratory, 2003, PIA03380: Anaglyph, Yucatan Peninsula, Mexico, <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA03380>, (acceso libre), fecha de publicación: 06/03/2006, fecha de consulta: 03/2012.
- Navarro, V. J., 2012, Susceptibilidad y amenaza de movimientos de ladera mediante SIG en el Municipio de Berlín, El Salvador, Trabajo de fin de master: Tecnologías de la información geográfica, Universidad Complutense de Madrid.

- Newhall, C.G., Self, S., 1982, The Volcanic Explosivity Index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism, *Journal of geophysical research*, 87(C2), 1231-1238.
- Ordoñez-Crespo, I.; García-Rodríguez, M., 2010, Formas kársticas comunes de los cenotes del Estado de Quintana Roo (México), *M+A Revista electrónica de medio ambiente*, UCM, 9, 15-35, ISSN: 1886-3329.
- Ogden, A. E., Reger, J. P., 1977, Morphometric analysis of dolinas for predicting ground subsidence, Monroe County, West Virginia, *Hydrologic Problems in karst regions*.
- Pacheco-Ávila, J., Cabrera-Sansores, A., Calderón-Rocher, L., Marín, L., Steinich, B., Escolero, O., 2002(a), Delineación de una zona de protección para el abasto de agua en Mérida, Yucatán, México, *Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (Memorias)*, 11 pp.
- Pacheco-Ávila, J., Cabrera-Sansores, A., Graniel-Castro, E., Vázquez-Montalvo, J., Pérez-Ceballos, R., 2002(b), Diagnostico de la calidad del agua subterránea y evaluación de la infraestructura física de los sistemas de abastecimiento municipales en el estado de Yucatán (YUC-2002-CO1-8721), (Inédito).
- Pacheco, F. J., Jiménez, C., Iglesias, A., Santana-Pérez, J., Franco, S. I., Estrada, J. A., Cruz, J. L., Cárdenas, A., Li-Yi, T., Gutiérrez, M. A., Rubí, B., Santiago, J. A., 2002, Sismicidad del Centro y Sur de México (Periodo Abril a Junio, 2002): *Unión Geofísica Mexicana*, 466-471.
- Padilla y Sánchez, R. J., 1985, Las estructuras de la curvatura Monterrey, estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 6(1), 1-20.
- Perry, E.C., Swift, J., Gamboa, J., Reeve, A., Sanborn, R., Marín, L.E., and Villasuso, M., 1989, Geological and environmental aspects of surface cementation, North coast, Yucatan, Mexico: *Geology*, 17, 818-821.
- PGS (Pennsylvania Geologic Survey), 2012, Sinkholes, Fact sheet, 2 p.
- Pope, K., Ocampo, A.C., Kinsland, G.L., Smith, R., 1996, Surface expression of the Chicxulub crater, *Geology*, 24(6), 527-530.
- PSM (Programa de Peligro Sísmico en México), 1996, Mapas de peligro sísmico en México, Programa elaborado por el Instituto de Ingeniería, UNAM; CENAPRED, CFE y el IIE.
- Pueyo-Anchuela, Ó., Pocoví, J., Soriano, M. A., Casas-Sainz, A. M., 2009, Characterization of karst hazard from the perspective of the dolina triangle using GPR-Examples from Central Ebro Basin (Spain), *Engineering Geology*, 108, 225-236.
- Raines, T. W., 1968, Sótano de las Golondrinas, Description, *Association for Mexican Cave Studies*, Bulletin 2, 37 pp.
- Rebolledo-Vieyra, M., 2009, Aspectos geológicos de la cuenca del Caribe, *in* Espinoza-Ávalos, J., Islebe, G. A., Hernández-Arana, H. A., (Editores), *El sistema ecológico de la bahía de Chetumal/Corozal: costa occidental del Mar Caribe*, El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR).
- Richetti, G., Ciaranfi, N., Sinni, L., Mongelli, F., Pieri, P., 1988, Geodinamica ed evoluzione sedimentaria e tettonica dell'Avampaese Apulo, *Mem., Soc. Geol. It.*, 41, 57-82.
- Rose, W.I., Durant, A.J., 2008. El Chichón Volcano, 4 April 1982: volcanic cloud history and fine ash fallout: *Natural Hazards*.

- Saaty, T. L., 1990, How to make a decision: The analytic herarchy process, *European Journal of Operational Research*, 48, 9-26.
- Saaty, T. L., 2008, Decision making with the analytic hierarchy process, *International Journal Services Sciences*, 1(1), 83-98.
- Salinas-Rodríguez, 2011, Rumbo a la Sierra Madre Oriental, Especies vistas en el sendero del bosque escuela de la Facultad de Ciencias Forestales de la UANL, en Iturbide, N. L.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos), 1988, Sinopsis Geohidrológica del Estado de Yucatán, Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica; Dirección General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos.33 pp.
- Sartain, N., Mian, J., O`Riordan, N., Storry, R., 2011, Case study on the assessment of sinkhole risk for the development of infrastructure over karstic ground, ISGSR, in Vogt, Schuppener, Straub & Bräu (Editors), *Bundesanstalt für wasserbau*, ISBN: 978-3-939230-01-4.
- Schmitter-Soto J.J., Comín, F.A., Escobar-Briones, E., Herrera-Silveira, J., Alcocer, E., Suárez Morales, E., Elías-Gutiérrez, M., Díaz-Arce, V., Marín, L.E., Steinich, B., 2002, Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatán Peninsula (SE México), *Hydrobiología*, 467, 215-228.
- SEDESOL (Secretaria de Desarrollo Social), 2004, Guía metodológica para la elaboración de atlas de peligros naturales a nivel de ciudad (identificación y zonificación)", 84,85 p.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), 2006, Carta Geológico-Minera Cancún, F16-8, escala 1:250,000.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano) 2006, Informe de la Carta Geológica-Minera y Geoquímica Mérida, F-16-10, Estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo, 60 pp.
- Sharpton V.L., Dalrymple G., Marin L., Ryder G., Schuraytz B., Urrutia-Fucugauchi J., 1992, New links between the Chicxulub impact structure and the Cretaceous/Tertiary boundary, *Nature*, 359, 819–821.
- Siebert L., and Simkin T (2002). *Volcanoes of the World: an Illustrated Catalog of Holocene Volcanoes and their Eruptions*. Smithsonian Institution. Global Volcanism Program Digital Information Series, GVP-3. Disponible en: <http://www.volcano.si.edu/world/>
- Sigurdsson H., Bonte P., Turpin L., Steinberg M., Pradel P., Jehanno C., Rocchia R., 1991, Geochemical constraints on source region of Cretaceous/Tertiary impact glasses, *Nature*, 353, 839–842.
- Simón, J. L., Soriano, M. A., Arlegui, L., Caballero, J., 1998, Estudio de riesgo de hundimientos kársticos en el corredor de la carretera de Logroño, Memoria informativa, Departamento de geología, Universidad de Zaragoza, 59 pp.
- Simón, J. L., Soriano, M. A., Pocoví, A., Arlegui, L. E., Casas, A. M., Liesa, C. L., Luzón, A., Pérez, A., Pueyo, E., Mochales, T., Gracia-Abadías, F. J., Ansón, D., 2009, Riesgo de subsidencia kárstica en áreas urbanas: El caso de Zaragoza, *Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra*, 17(3), 303-315, ISSN: 1132-9157.
- Smit J., Montanari A., Swinburne N.H.M., Álvarez W., Hildebrand A.R., Margolis S.V., Claeys P., Lowrie W., Asaro F., 1992, Tektite-bearing, deep-water clastic unit at the Cretaceous-Tertiary boundary in northeastern Mexico. *Geology*, 20, 99–103.

- Soki, R., Gaona-Viscayno, S., Perry, E., and Villasuso-Pino, M., 1984, A chemical drill: Sulphur isotope evidence for the mechanism of formation of deep sinkholes in tropical karst, Yucatán, México, Geological Society of America, Abstracts and programs 16, 662.
- Soriano, M. A., 1995, Metodología para la elaboración de un mapa de peligrosidad de dolinas, Enseñanza de las ciencias de la tierra, 3(3), 184-190.
- SSN¹ (Servicio Sismológico Nacional). Instituto de Geofísica, UNAM, disponible en: <http://www.ssn.unam.mx>
- Steffen G., Martínez-Oscar F., Jobst W., 2005 (resumen), El uso turístico de un riesgo geológico, GEOS, 25(1).
- Suarez, D. J., 1998, Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Publicaciones Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 548 pp.
- Supper, R., Motschka, K., Bauer-Gottwein, P., Ahl, A., Römer, A., Neumann-Gondwe, B., Merediz A. G., Kinzelbach, W., 2007, Spatial mapping of karstic cave structures by means of airborne electromagnetic: An emerging technology to support protection of endangered karst systems, EGU, Geophysical Research Abstract.
- Swisher III C. C., Grajales-Nishimura, J. M., Montanari, A., Renne, P., Cedillo-Pardo, E., Maurrasse, F. J. M. R., Curtis, G. H., Smith, J., McWilliam, S. M. O., 1992, Chicxulub crater melt-rock and K-T boundary tektites from Mexico and Haiti yield coeval 40Ar/39Ar ages of 65 Ma: Science, 257, 954-958.
- Tarback, E.J. y Lutgens, F.K., 2000, Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física. Prentice Hall, Madrid.
- Tilling R. I., 2009, El Chichón "surprise" eruption in 1982: Lesson to reduce volcanic risk: Geofísica Internacional, 48(1), 3-19.
- Tilling R. I., Beat B., 1989, Apuntes Sobre un Curso Breve Sobre Los Peligros Volcánicos, World organization of volcano observatory, 109 pp.
- Tomás-Jover, R., Ferreiro-Prieto I., Sentana-Gadea, I., Díaz-Ivorra, M. C., 2002, Aplicaciones de la Proyección Estereográfica en Ingeniería Geológica, XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, Santander, España.
- Urrutia-Fucugauchi, J., Camargo-Zanoguera, A., Pérez-Cruz, L., Pérez-Cruz, G., 2011, The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatán carbonate platform, Gulf of México, Geofísica Internacional, 50(1), 99-127.
- USGS, 2010, Volcanic gases and their effects, fecha de consulta 07/2012, fecha de actualización viernes 11/06/2010, Disponible en: <http://volcanoes.usgs.gov/hazards/gas/index.php>
- USGS, 2010, VHP Photo glossary: Volcanic ash, fecha de consulta 07/2012, fecha de actualización lunes 19/04/2010, Disponible en: <http://volcanoes.usgs.gov/images/pglossary/ash.php>
- USGS (United State Geological Survey),
Disponible en: <http://earthquake.usgs.gov/learn/faq/?categoryID=2>
- Varnes, D .J., 1978, Slope movements types and processes, Landslides: analysis and control; Schuster, R.L. & Kizek, R.J. (editors) National Academy of Sciences. Washington D.C. Special report, 176, 11-33.

- Vickery, A.M., Kring, D. A., Melosh, H. J., 1992, Ejecta associated with large terrestrial impacts: Implications for the Chicxulub impact and K/T boundary stratigraphy, *Lunar Planet. Sci. XXIII*, 1473-1474.
- Wilson, W. L., Beck, B. F., 1992, Hydrogeologic factors affecting new sinkhole development in the Orlando area, Florida, *Ground Water*, 30(6).
- Wilson B.W., Hernández P. y Meave T.E. 1955, Un banco calizo del Cretácico en la parte oriental del Estado de Querétaro, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 18(1), 1-10.
- Witthuhn, K. M., Calvin, A. E. Jr., 1995, Sinkholes and sinkhole probability, *Geologic Atlas of Fillmore, Minnesota, Plate 8*, Department of Natural Resources, Division of Waters.
- Wu, Y., Jiang, W., Ye, H., 2010, Karst collapse hazard assessment system of Wuhan City based on GIS, *INTERPRAEVENT*, International symposium in Pacific Rim, 948-947.
- Wyllie, D.C., Mah, C. W., 2004, *Rock slope engineering civil and mining*. 4th Edition, Based on the third edition by E Hoek and J Bray. New York, USA, 81 pp.
- Yu, P., 1994, Surface subsidence in the karst mining area in China, *Mine Water and the Environment*, 13(2), 21-26.
- Yuhr, L., Benson, R. C., Kauffmann, R. D., Casto, D., Jennings, J., 2003, A case history of a large karst investigation, *3rd International Conference of Applied Geophysics*, 5-13.
- Zuñiga, R., Guzmán, M., 1994, Main seismogenic source zones in Mexico, Technical Report, Seismic Hazard Project, IPGH.
- Zuñiga, R., Suárez, G., Ordaz, M., García-Acosta, V., 1997, Instituto Panamericano de Geografía e Historia. Proyecto 89-0190: Peligro Sísmico en Latinoamérica y el Caribe. Ottawa, Canadá. 82 pp.

Peligros por fenómenos hidrometeorológicos

- Adema, E., Babinec, F; Buschiazzi, D., Martín, M., Peinemann, N; 2003, *Erosión Hídrica en Suelos del Caldenal*, Buenos Aires, 35 pp.
- Alvarado, C. M., 1988, Utilización de la cartografía edafológica en el proyecto Ordenamiento Ecológico de la Cuenca del Río San Juan. *Memorias del XXI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo: Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C. Ciudad Juárez, Chih, México*, 3-15.
- Anderson, H. E., 1982, Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. United States Department of Agriculture, Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT 84401, General Technical Report INT-122.
- Aparicio-Mijares, F. J., 1989, *Fundamentos de hidrología de superficie*, Editorial Limusa S. A. de C.V., México Distrito Federal. Primera edición, ISBN 968-18-3014-8.
- Ávila-Armella, A., 2007, *Procesos a múltiple escala en la evolución de la línea de costa*, Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Granada, España, 1-151, disponible en: <http://0-hera.ugr.es.adrastea.ugr.es/tesisugr/1724545x.pdf>

- Baeza, S; Paruelo, M; Altesor, A; 2006, Caracterización Funcional de la Vegetación del Uruguay Mediante el Uso de Sensores Remotos, 31(5), 382-388.
- Baltasavias, E.P., s/a, Object extraction and revision by image analysis using existing geodata and knowledge: current status and steps towards operational systems, Institute of geodesy and operational systems, Institute of Geodesy and Photogrammetry, Swis Federal Institute of Technology Zurich (ETHZ), ETHZ, Hoenggerberg, CH-8093 Zurich, Switzerland.
- Batista-Silva, J. L., Sánchez-Celda, M., 1999, Riesgo por inundaciones pluviales en Cuba, VII Encuentro de Geógrafos de América Latina, Universidad de Puerto Rico.
- Batllore-Sampedro, E., 1999, Dinámica de playas en la región costera del Estado de Yucatán, CINVESTAV-I.P.N. Unidad Mérida.
- Bautista, F., E. Batllori-Sampedro, G., Palacio, M., Ortiz Pérez, M., Castillo-González, 2005, Integración del conocimiento actual sobre paisajes geomorfológicos de la península de Yucatán, p. 33-58 en F. Bautista y G. palacio (Editores) Caracterización y manejo de los suelos en la península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarios, Forestales y Ambientales, Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, 282 pp.
- Bautista, F; 2007, Información Técnica para el desarrollo agropecuario y forestal del estado de Yucatán, Centro de Investigación en Geografía Ambiental, 12 pp.
- BBC (British Broadcasting Corporation), 2010, Clima en la Tierra: Agua, Documental. Director Ben Fox. Duración 60 min. Londres Inglaterra.
- Bezaury-Creel, J. E., Torres, J. F., Ochoa-Ochoa, L. M., 2007, Base de Datos Geográfica de Áreas Naturales Protegidas Estatales del Distrito Federal y Municipales de México - Versión 1.0: The Nature Conservancy / PRONATURA A.C. / Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad / Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 6 Capas ArcGIS 9.2 + 2 Capas Google Earth (KMZ) + 1 Archivo de Metadatos Word
- Bitrán, D., 2001, Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980-99, CENAPRED, México.
- Bojorquez-Tapia, L. A., de la Cueva, H., Díaz, S, Melgarejo, D., Alcantar, G., Solares, M.J., Grobet, G., Cruz-Bello, G., 2004, Environmental conflicts and nature reserves: redesigning Sierra San Pedro Mártir National Park, Mexico: Biological Conservation, 117, 111–126.
- Bosque-Sendra J., González-Ferreiro, D., 2008, Generación de un mapa de vientos en un SIG: Boletín de la A.G.E., Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, (47), 51-77.
- Camel, Y., Paz, S., Jahashan, F., Shoshany, M., 2009, Assessing fire riks using Monte Carlo simulations of fire spread: Forest Ecology and Management, 257, 370-377.
- Cano, L., Hernández, G., 2009, Las sequías en México, Supervisión técnica del Dr. Israel Velasco. Disponible en:
http://www.imta.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=177:las-sequias-en-mexico&catid=52:enciclopedia-del-agua&Itemid=106
- Carrillo, R. L., Rodríguez, A. D., Tchikoué, H., Monterroso, I. A., Santillán, P.J., 2012, Análisis espacial de peligro de incendios forestales en Puebla, México: INTERCIENCIA, 37(9), 678-683.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), Sistema de Alerta Temprana de Ciclones Tropicales SIAT CT. Disponible en: http://geografica.cenapred.unam.mx/DocumentosSIAT/SIAT_CT.pdf

- CENAPRED, 2001. Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastre en México, primera edición, 225 pp., ISBN: 970-628-593-8
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), 2002, Atlas Climatológico de Ciclones Tropicales en México IMTA. Secretaría de Gobernación. Sistema Nacional de Protección Civil. Primera edición.
Disponible en:
<http://www.proteccioncivil.gob.mx/work/models/ProteccionCivil/Resource/375/1/images/acctm.pdf>
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). 2004. Guía Metodológica para la elaboración de Atlas de Peligros Naturales a Nivel Ciudad. México, D.F.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2005, 2006 Disponible en:
http://www.proteccioncivil.gob.mx/es/ProteccionCivil/Series_Especiales
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), 2006, Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, Peligros Geológicos, Serie: Atlas Nacional de Riesgos, 280 pp.
Disponible en: <http://atl.cenapred.unam.mx/website/RiesgosGeologicos/Sismos/Viewer.htm>
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), 2007, Ciclones Tropicales, Serie Fascículos, 1ra Reimpresión de la 1ra Edición, 51 pp., Disponible en:
http://www.files.cenapred.gob.mx/es/publicacionesRelevantes/FASCICULO_CICLONES_TROPICALES_2013.pdf
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). 2007. Sequías, Serie Fascículos. México D.F., Pp.6-8., Pp. 18. Disponible en:
<http://www.cenapred.unam.mx/es/Investigacion/RHidrometeorologicos/FenomenosMeteorologicos/Sequia/>
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), 2008, implementación de la metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones costeras por marea de tormenta: caso Isla arena, municipio de Calkiní, Campeche, Disponible en:
http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/1412009Libro_Aplicacion_Metodologia_Calkini.pdf
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), 2008, Incendios Forestales, Serie Fascículos Fenómenos Químicos, México.D.F.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), 2012, Mapas de índices de riesgo a escala municipal por fenómenos hidrometeorológicos, CENAPRED, Av. Delfín Madrigal #665, Delegación Coyoacán, México, D.F., pág. 5-11.
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), 2012. Índice de peligro municipal por Inundaciones en el estado de Yucatán, Mapa interactivos, fecha de generación 12 de Septiembre de 2007, fecha de actualización 18 de Mayo del 2012, Disponible en:
http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=78&Itemid=190
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), 2013, página de Internet referente a ciclones tropicales. Disponible en:
http://atl.cenapred.unam.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=53&Itemid=75

- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres), 2013, Investigación. Riesgos Hidrometeorológicos, Fenómenos Meteorológicos, Sequía. 2013. Actualización enero 2013, Disponible en:
<http://www.cenapred.unam.mx/es/Investigacion/RHidrometeorologicos/FenomenosMeteorologicos/Sequia/>
- CFE (Comisión Federal de Electricidad), 2009, Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño Por Viento. México D.F.
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L., Williams, D., 1983, Forest Fire Behavior and Effects: Fire in Forestry, 1, 450 pp., John Wiley and Sons (editors), NY.
- Chávez- Aguirre, J. M., 2006, Geotecnia, CFE y Facultad de Estudios Superiores Acatlán de la UNAM (editores).
- Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, M., P., Vilar, L., Martínez, J., Martín, S., Ibarra, P., de la Riva, J., Baeza, J., Rodríguez, F., Molina, J. R., Herrera, M. A., Zamora, R., 2009 (in press), Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies: Ecological Modelling, doi:10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, M. P., Vilar, L., Martínez-Vega, J., Martín, S., Ibarra P., de la Riva, J., Baeza, J., Rodríguez, F., Molina, J.R., Herrera, M.A. y Zamora, R., 2010. Development of a framework for fire danger assessment using Remote Sensing and Geographic Information System Technologies: Ecological Modelling, 221, 46- 58.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Jurdao, S., Pettinari, M. L., Yebra, M., Salas, J., de la Riva, J., Ibarra, P., Rodrigues, M., Echeverría, M., Azqueta, D., Román, M.V., Bastarrika, A., Recondo, C., Zapico, E. y Martínez-Vega, J. 2012. Integrating geospatial information into fire risk assessment: International Journal of Wildland Fire, Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1071/WF12052>
- Cifuentes-Jara, M. A., 2009. ABC del Cambio Climático en Mesoamérica. CATIE, Grupo Cambio Climático 3 pp.
- Comisión Europea - Oficina de Cooperación Europe Aid Euro-Mediterranean Regional Programme Local Water Management (MEDA Water) Mediterranean Drought Preparedness and Mitigation Planning (MEDROPLAN). Guías de Gestión de la Sequía. 11-16.
Disponible en:
http://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=2&ved=0CDQ QFjAB&url=http%3A%2F%2Fextras.springer.com%2F2009%2F978-1-4020-9044-8%2Farchivos%2Fguidelines_spanish.pdf&ei=b7uJUbGjNaTL0QG3q4CICQ&usg=AFQjCNFY RXIHpezYuCy8aBxom5V_4JWBSw&sig2=fAQeB_bwFPH_TY4M7p-DIQ
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), 2011, La costa de Yucatán en la Perspectiva del Desarrollo Turístico.
Disponible en: www.conabio.gob.mx
- CONABIO (Comisión nacional para el uso y conocimiento de la biodiversidad), 2012, Programa de detección de puntos de calor mediante técnicas de percepción remota. [En línea] 07 de Septiembre de 2012. [Citado el: 09 de Septiembre de 2012.]. Disponible en:
http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/puntos_calor/doctos/puntos_calor.html
- CONABIO (Comisión nacional para el uso y conocimiento de la biodiversidad), 2013, Portal de Geoinformación, fecha de consulta 15 de febrero del 2013.
Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal), 2006, Programa Nacional de Protección Contra Incendios Forestales, Zapopan, Jalisco. México.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal), 2008. Programa Nacional de Protección contra Incendios Forestales, 2013, Zapopan, Jalisco. México.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal), 2012, Programa Nacional de Protección contra Incendios Forestales, 2013, Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco. México.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal), 2013, Programa Nacional de Protección contra Incendios Forestales, 2013, Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco. México.
- CONAFOR, (Comisión Nacional Forestal), 2013, Estadísticas Finales, fecha de consulta 08 de Marzo de 2013. Disponible en:
<http://www.conafor.gob.mx/portal/index.php/component/content/article/6/269>.
- CONAGUA, (Comisión Nacional del Agua), 2009, Plan Operativo de Inundaciones de Celestún, Municipio de Celestún, Yucatán, Organismo de Cuenca Península de Yucatán, 41 pp.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2010. Plan Operativo de Inundaciones del Cono Sur del estado de Yucatán
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2011-a, Organismo de Cuenca Península de Yucatán, Gerencia de Protección de la Infraestructura y Emergencias, "Manual de Administración de Emergencias Meteorológicas del Estado de Yucatán", 51 pp.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2011-b. Manual para el control de inundaciones.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2013, Condiciones de sequías de mayo del 2011, fecha de consulta Febrero de 2013. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo17.html>
- CONANP, 2007, Programa de Manejo y Conservación de la Reserva de la Biosfera Ría Lagartos. Comisión Nacional de áreas Naturales Protegidas, México.
- CONANP, 2011, Estrategia y Lineamientos de Manejo del Fuego en Áreas Naturales Protegidas, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México.
- COPLADE (Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado), 2007, Regionalización del Estado de Yucatán, Perfil Geoestadístico, Secretaria de Planeación y Presupuesto, Yucatán México, 18 pp.
- Cotler, H., López, C; Trinidad, S., 2007, ¿Cuánto nos cuenta la erosión de suelos? Aproximación a una valoración económica de la pérdida de suelos agrícolas en México, Instituto Nacional de Ecología, UNAM, México, 31 pp.
- Crespo, 2008, Comparación de dos metodologías índice de severidad de sequía para doce reservas de la biósfera mexicana, Universidad Autónoma de Chapingo.
- Diario Oficial de la Federación, 2003, Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable.
- Diario Oficial de la Federación, 2009, Norma Oficial Mexicana-015-SEMARNAP/SAGAR-1997, Que regula el uso del fuego en terrenos forestales y agropecuarios y que establece las especificaciones, criterios y procedimientos para ordenar la participación social y de gobierno en la detección y el combate de los incendios forestales.

- Diario Oficial de la Federación, 2011, Acuerdo mediante el cual se emiten los costos de referencia para reforestación o restauración y su mantenimiento para compensación ambiental por cambio de uso de suelo en terrenos forestales y la metodología para su estimación, publicado el 25 de febrero de 2011
- Diario Oficial del Gobierno del Estado, 2006, Ley de prevención y combate de incendios del estado de Yucatán.
- Diario Quequi, 2006, Evaluación de daños. Devastadas 53 mil hectáreas por incendios, Quintana Roo.
- DINAPRE (Instituto Nacional de Defensa, Dirección Nacional de Prevención). 2006. Manual Básico para la Estimación del Riesgo. Lima, Perú.
- DOF (Diario Oficial de la Federación), 17 de abril de 2002. NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.
- Durán, R. M., Méndez, A., Dorantes, C., Espadas, G., Dzib, M., Ferrer, A., López, Bañuelos, S., 2006, Propuesta de Modificación en la lista de especies en riesgo de la NOM-059-SEMAR-NAT-2001 de Mammillaria gaumer, Orcutt, Centro de Investigación Científica de Yucatán, México.
- Eagleman, J., R., 1985, Meteorology: The atmosphere in action. Ed. Wadsworth Pub Co; 2 Sub edition 445 pp.
- ECHO (Oficina de Asuntos Humanitarios de la Comunidad Europea), Programa de Preparativos, Mitigación y Prevención de Desastres (DIPECHO); Movimiento por la Paz, el Desarme y la Libertad (MPDL); Cuba. Estado Mayor Nacional de Defensa Civil. La Habana, CU. Actualización 2003, "Guía comunitaria para la gestión por inundaciones". Documento 14901, Sección B: Red Centroamericana de Información de Salud y Desastres. Disponible en:
<<http://desastres.usac.edu.gt/documentos/pdf/spa/doc14901/doc14901.htm>>; acceso libre, consulta: noviembre, 2013. En Biblioteca Virtual en Salud y Desastres (BVS), <http://desastres.usac.edu.gt/resultados_busqueda.html?cx=000383781198529444667%3A5gizvj00wda&cof=FORID%3A11&q=doc14901&sa=Buscar>
- El Excelsior, 2011, Vive 40% del país las peores sequías de los últimos 70 años, en el apartado de "El Pulso de la sequía", fecha de consulta 19/06/2011. Disponible en: <http://www.excelsior.com.mx/2011/06/19/nacional/745920>
- Enciclopedia de los Municipios de Yucatán, 2002.
- Espinosa-Graham, L., 2004, Recomendaciones para control y alivio de inundaciones en la región denominada Cono Sur en el Estado de Yucatán: Ingeniería, 8(2), 67-79.
- Espinoza, R; Návar, J., 2005, Producción de biomasa, diversidad y ecología de especies en un gradiente espinoso tamaulipeco del noreste de México: Revista Chapingo, 1, 25-31.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), 1980, Metodología provisional para la Evaluación de la degradación de los suelos, Roma Italia.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), 2007, Base Referencial Mundial del Recurso Suelo, Primera Actualización, Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos, Roma, (103), 130 pp.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), 1967, La erosión del suelo por el agua, Cuadernos de Fomento Agropecuario, Roma, (81), 207 pp.

- Flores, B. R., Hristov, V. V., Li, L. X., 2001. Geotecnia en Ingeniería de Presas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Tecnología del Agua, México.
- Flores-Garnica, J. G., 2011, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Estado de México. México.
- Frausto, O., Ihl, T., Rojas, J., Goldacker, S., Chale, G., Giese, S., Wurl, J., Careaga, P., Bacab, R., 2006, Áreas susceptibles de riesgo en localidades de pobreza extrema en el sur de Yucatán: Teoría y praxis, 2(2), 87-103.
- Galván-Ortiz, L. M., 2007, Aplicación del índice estandarizado de precipitación (SPI), en la detección de sequías históricas en México, Tesis de Licenciatura. UNAM, México.
- García, E., 1989, Las Regiones Climáticas de México, Instituto de Geografía, UNAM.
- García, E., 2004, Antología, Centro de Investigación Científica de Yucatán, UNAM, Instituto de Geografía.
- García, F., Córdoba, J., Ordoñez, A., 2010, Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán, *in* Durán-García, R., Méndez-González, M., CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. 63-70.
- García, Gil, E., Graniel-Castro, E., 2010: Geología en R. Durán-García, y M. Méndez, (editores), 2010, Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán, CICY, PPD-FMA, CONABIO, SEDUMA. 446 pp. Disponible en: <http://www.cicy.mx/sitios/biodiversidad/>
- Gay-García, C., 2000, México: una visión hacia el siglo XXI, El cambio climático en México, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México, 220 p. ISBN 968-36-7562-X. Capítulo II, Sequía Meteorológica.
- Giffen, B., Chuck, L., Wilson, N., 2010, Natural Resource Report NPS/SWAN/NRR—20XX/XXX. Version 1.0. Alaska Regional Office. National Park Service. Natural Resource Program Center. U.S. Department of the Interior. Washington DC.
- Gobierno del estado de Yucatán, 2012-2018, Agricultura, disponible en <http://www.yucatan.gob.mx/menu/?id=agricultura>, fecha de consulta, julio 2013.
- Góngora-Biachi R. A., Moguel-Rodríguez, W. A., González-Martínez, P., Esquina-Ocaña, E., Serapio-Hernández, M. A., 1998, Golpe de Calor: revisión de conceptos a propósito de un caso: Revista biomédica, 9(4), 242-249. Disponible en: <http://www.dgepi.salud.gob.mx/informes/informesh/informes%202012%20%20sem%2039/temperaturas.htm>.
- Graniel-Castro, E., 2010, en R. Durán García, y M. Méndez, (editores), 2010, Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán, CICY, PPD-FMA, CONABIO, SEDUMA. 446 pp., disponible en: <http://www.cicy.mx/sitios/biodiversidad/>.
- Guerrero-Medina, R., y Díaz-Plaza, R., 2011, Paquete ecológico henequén Agave fourcroydes, Establecimiento y mantenimiento productivo, Programa estratégico para el desarrollo rural sustentable de la región sur-sureste de México trópico húmedo, SAGARPA, 25 pp.
- Guino-Aldana, P., Ramírez-Camperos, A., Godínez-Orta, L., Cruz-León, S., Juárez-León, A., 2009, Estudio de la erosión costera en Cancún y la Riviera Maya, IMTA-UNAM-IPN, 41-56, disponible en: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/arh/article/viewFile/14330/15109>

- Hardy, C., 2005, Wildland fire hazard and risk: Problems, definitions, and context USDA Forest Service—Rocky Mountain Research Station, Missoula Fire Sciences Laboratory, P.O. Box 8089, Missoula, MT 59802, USA.
- Hernández-H., 2013, Calentamiento Global y Zonas Costeras: Peligrosa combinación, Área de Conservación de la Biodiversidad, Unidad Chetumal, 10-13, fecha de actualización 27 de Enero de 2013. Disponible en:
<http://www.ecosur.mx/ecofronteras/ecofrontera/ecofront31/Calentamientoglobal.pdf>
- Herrera-Silveira, J. A., Capurro, F. L., Comin, S. A., Aranda, C. N., 2007 s/a, Los usos y abusos de la zona costera en la Península de Yucatán, Centro de Estudios del Instituto Politécnico Nacional (IPN), Unidad Mérida, Instituto Pirenaico de Ecología, 388-396.
Disponible en: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/35618/1/P%C3%A1ginas%20de%20cap26.pdf>
- Honorato P; 2000, Manual de Edafología. 4 Edición, Universidad Católica de Chile, 239 – 245 Pp.
- Hoorman, J. J., McCutcheon, J., (n. e), Negative effects of livestock grazing riparian áreas, Ohio State University, Extension Fact Sheet LS-2-05, fecha de consulta Julio de 2013.
Disponible en: <http://ohioline.osu.edu/ls-fact/0002.html>.
- Imerson, A., y Curfs, M., 2008, La erosión del suelo, Land care in desertification affected áreas (LUCINDA proyect) 2006-2008, Folleto B, (1), 15 pp.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2005, Uso de suelo y vegetación, serie III, escala 1:250,000. Aguas Calientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2005, Cuéntame, información por entidad, Yucatán, movimientos migratorios, fecha de consulta julio 2013. Disponible en:
http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/yuc/poblacion/m_migratorios.aspx?tema=me&e=31.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2006, Climas en el Estado de Yucatán, Disponible en: <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/climas/climas.cfm>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2007, Documentación del Proyecto SIDEN, Dirección de Geografía de la Dirección Regional Sureste.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 2010, AGEB's (Área Geoestadística Básica), Información Digital.
- Inman, A., 2006, Soil erosion in England and Wales: causes, consequences and policy options for dealing with the problema, Worl Wildlife.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP); 2009.
- IRI (International Research Institute for Climate and Society), 2013, Standardized Precipitation Index analyses of multiple global precipitation datasets, fecha de actualización 5 de Julio 2013.
Disponible en: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.IRI/.Analyses/.SPI/p>
- IUSS Grupo de Trabajo WRB; 2007, Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera Actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO. (Roma).
- Jiménez-Steer, I., Rodríguez-Domínguez, L., 2008, Diagnóstico de la infiltración y permeabilidad en los suelos de la zona de recarga del acuífero Morroa en el área Sincelejo, Corozal y Morroa, Universidad de Sucre. Facultad de Ingeniería Agrícola Sincelejo, Colombia.

- Johnson, C. and Blackburn W; 1989, Factor contributing to sagebrush rangeland soil loss, Trans Vol. 32. (USA): 155-160 Pp.
- Kauffer-Michel, E. F., Villanueva-Aguilar, C. L., 2011, Retos de la gestión de una cuenca construida: La península de Yucatán en México: Aqua-LAC, 3(2), 81 - 91.
- Keane, R. E., Drury, S.E., Hessburg, P., Reynolds, K., 2010, A Method for mapping fire hazard and risk across multiple scales and its application in fire management: Ecological Modelling., 221, 2-18.
- La Jornada. 2011, Aumentará en Quintana Roo riesgos de incendios forestales en las próximas dos semanas. Periódico La Jornada, fecha de consulta 11 de mayo 2011.
Disponible en: <http://www.jornada.unam.mx/2011/05/11/estados/029n2est>
- La Jornada, 2013, Participan 20 universidades e institutos en programa nacional contra la sequía. Elaborarán plan de alerta temprana, entre otras acciones, fecha de consulta 26 de Marzo de 2013. Disponible en: <http://www.jornada.unam.mx/2013/03/26/ciencias/a03n1cie>
- Lambin E; Turner J; Helmut S; Agbola A; Angelsen J; Bruce O; Coomes R; Dirzo G; Fischer C; Folke P; George K; Homewood J; Imbernon R; Lemmans X; Mora M; Mortimore P; Ramkrishnan J; Richards A; Skanes W; Steffen G; Stone U; Svedin T; Veldkamp C; 2001, The causes of land cover change: moving beyond the myths, Global Environmental Change, 11, 261-269 Pp.
- Lapucci, A., Lombardo, S., Petri M., Santucci A., 2005, A KDD based multicriteria decision making model for fire risk evaluation: Department of Civil Engineering, Pisa, Italy.
- López-Bátiz O., 2006, Guía metodológica para elaborar mapas de riesgo ante la acción de vientos fuertes, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México D.F. Presentación Interna.
- López-Gutiérrez, H., Arrecifes artificiales como obras de reconstrucción y preservación de playas, Asociación Mexicana de Infraestructura Portuaria, Marítima y Costera.
Disponible en: <http://www.amip.org.mx/hm/RevAMIP/A3NUM09/AMIP30906c.pdf>.
- Lugo-Hubp, J. I., 1988, Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos Cartográficos), Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Manrique-Sanguino, J. A., 2012, Estudio experimental de alternativas de protección costera, caso Chelem-Chuburná, Yucatán, E.S.I.A. Zacatenco, I.P.N.
- Marelli, H.J; Arce J.M y Lattanzi A; 1984, Evaluación de la Erosión Hídrica en Suelo Labrado, Ciencia del Suelo V: 2 N°1, 69-77 Pp.
- Martínez-López, B., Pares-Sierra, A., 1998, Circulación del Golfo de México inducida por mareas, viento y la corriente de Yucatán: Ciencias Marinas, 24(001), 65-93.
- Martínez-Vega, P. Echavarría, P., Ibarra, M. Echeverría y M. Rodríguez 2012 Valoración del paisaje de España peninsular en el contexto de la generación de un índice sintético de riesgo de incendios forestales, memorias del XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Madrid, AGE-CSIC, 19-21 de Septiembre de 2012.
- Mayers, R. L., 2005, Incendios y Ecosistemas: Un Enfoque Integral del Manejo de Fuego en América Latina: The Nature Conservancy—Fire Initiative. FL. USA
- Mayers, R. L., 2006, Convivir con el fuego, Manteniendo los ecosistemas y los medios de subsistencia mediante el manejo integral del fuego, Iniciativa Global para el Manejo del Fuego: The Nature Conservancy. Florida. USA.

- Méndez-Pérez, J. M., Magaña-Rueda, V., Análisis de los Elementos Dinámicos que Modulan la Sequía Meteorológica en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Disponible en:
http://www.uqm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos09-1/sesiones_regulares/CCA.pdf
- Mokarram, M., Aminzadeh, F., 2008, Gis-based multicriteria land suitability evaluation using ordered weight averaging wiht fuzzy quantifier: A case study in Shavur Plain, Iran. The internacional archives of the fotogrammetry remote sensing and spatial information sciences, 38, Part II.
- Moreno-Casasola, P., Peresbarbosa-Rojas E., Manejo Integral de la zona costera, s/a, p.p--
Disponible en:
<http://www1.inecol.edu.mx/costasustentable/esp/pdfs/VOLI/SECCIONI/ManejoIntegralDeLaZonaCostera.pdf>
- Moreno-Merino, L., Fernández-Jurado, M. A., Rubio-Campos, J.C., Calaforra-Chordi, J. M., López-Geta, J. A., Beas-Torroba, J., Alcaín-Martínez, G., Murillo-Díaz, J. M., Gómez-López, J. A., 2003. La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno, Instituto Geológico y Minero de España: Casos prácticos, Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas, 4, 168pp., I.S.B.N.: 84-7840-464-3.
- Morfín-Ríos, J. E., Jardel, P., Alvarado, C., Michel-Fuentes, J.M.. 2012, Caracterización y cuantificación de combustibles forestales, Comisión Nacional Forestal-Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco, México.
- Morgan R. P; 1986, Soil Erosion and Conservation, Longman Scientific y Technical, New York, 298 Pp.
- Mitsch y Gosselink, 1993, Clasificación de Litoral en el estado de Yucatán, sitado en Programa de Ordenamiento del Territorio Costero del Estado de Yucatán (P.O.E.T.C.Y., 2007).
- Muñoz-Black, C. J., Sánchez-Sesma, J., López-López, A., Pérez-Rocha, L. E., 2009, Design wind speeds for Mexico: An optimum approach of wind design of structures, en 11th American Conference on Wind Engineering – San Juan, Puerto Rico, June 22-26.
- Muñoz, R.A.C., Treviño, G.E.J., Verástegui, C.J., Jiménez, P. J., Aguirre, C. O. A., 2005, Desarrollo de un modelo espacial para la evaluación del peligro de incendios forestales en la Sierra Madre Oriental de México: Investigaciones Geográficas, Abril (056), Universidad Nacional Autónoma de México, México. .D.F., 101-107.
- National Park Service, 2010, Methods for monitoring climate in Southwest Alaska, Network Parks. SWAN Draft Climate Monitoring Protocol, v. 3/11/2010, Natural Resource Program Center. U.S. Department of the Interior, Washington DC.
- National Research Council, 1990.
- NASA (National Aeronautics and Space administration), 2013, fecha de consulta 12 de febrero del 2013. Disponible en: <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=703>
http://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/0/703/itcz_goes11_lrg.jpg
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), 2011, National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponible en: <http://www.csc.noaa.gov>
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), 2013, Water, fecha de consulta 12 de febrero del 2013. Disponible en: <http://www.noaa.gov/wx.html>.

- Ojeda-Zújar J., 2001, Métodos para el cálculo de erosión costera, revisión, tendencias y propuestas, Departamento de Geografía Física y AGR, Universidad de Sevilla, España, p.p. 103-118, Disponible en:
http://age.ieg.csic.es/metodos/gran_canaria08/ponencia_3/Ojeda%20Zujar%20et%20al.pdf
- Ojeda-Zujar, J., 2001, Métodos para el cálculo de la erosión costera, Revisión, Tendencias y Propuestas: Boletín del AGE, 30, 103-118.
- Ojeda, J., Vallejo, I., 1995, Viciana, A., 1998, Citado en Métodos para el cálculo de erosión costera, revisión, tendencias y propuestas, Departamento de Geografía Física y AGR, Universidad de Sevilla, España, 103-118.
- Oliver, J., Fairbridge, R., 1987. The Encyclopedia of Climatology (New York: Van Nostrand Reinhold Co., Inc.).
- OMM/UNESCO, (Organización Meteorológica Mundial/ Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura), 1974, Glosario hidrológico Internacional, WMO/OMM/BMO, (385), Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial, Suiza.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial), 1992, Vocabulario meteorológico internacional 2nd edition, Geneva, Switzerland: WMO (Series); 182, 784 pp.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas), 1994, Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la desertización en los países afectados por sequía grave; fecha de actualización 30/05/2007. Disponible en :
http://europa.eu/legislation_summaries/development/sectoral_development_policies/r12523_es.htm
- Ordaz, S. M., 2006, Evaluación de la idoneidad del marco analítico y de las metodologías específicas, caso México, Programa de información para la gestión de desastres, segunda fase. Naciones Unidas (ONU). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Orellana, L. R., Espadas, M. C., 2002, Aplicaciones de los Diagramas Ombrotérmicos de Gausson Modificados, en la Península de Yucatán, Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- Orellana, L. R., Espadas M. C., 2010, Atlas de Escenarios de Cambio Climático en la Península de Yucatán. Centro de Investigación Científica de Yucatán. Disponible en:
<http://www.cambioclimatico.yucatan.gob.mx/escenarios-cambio-climatico/index.php>
- Oropeza, O. O., Enríquez, G.C., 2003, Programa Estatal de Ordenamiento Territorial del Estado de Yucatán, Caracterización y Diagnósticos Sectoriales. Instituto de Geografía de la UNAM. México. 241-247.
- Ortiz, M. A., 1997, Análisis de diferentes metodologías para la captura de la línea de costa.
- Oxford Education, 2006, Weather, School climate Course, Oxford and Texas A&M (Editors), media presentation.
- Palacio-Aponte, A. G., Salles-Afonso de Almeida, P., Silva-Casarin, R., Bautista-Godínez, E., Posada Vanegas, G., y Val Segura, R., 2005. Diagnóstico de Riesgo por Inundación para la Ciudad de Campeche. Universidad Autónoma de Campeche.
- Palomares-Losada A. M., 2002, Caracterización del régimen de vientos y desarrollo de un modelo de predicción eólica a escala local en el estrecho de Gibraltar, Memoria presentada para optar al grado de Doctor en Física de la Tierra, Madrid España, ISBN: 84-669-1750-0.

- Paredes, F., Millano, J. L., Guevara, E., 2008, Análisis espacial de las sequías meteorológicas en la región de Los Llanos de Venezuela durante el período 1961-1996: Revista de Climatología, 8, 14 pp, ISSN 1578-8768.
- Pedraza, C. J., 1996, Geomorfología, Principios, Métodos y Aplicaciones, Editorial Rueda, Madrid, España.
- Peña-Olivas, J.M., Sánchez-Palomar, F.J., 2007, ¿Qué es erosión costera?, Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX-Ministerio de Fomento, España.
Disponible en: www.citop.es/PubPDF/Cimbra380_01.pdf
- Pirego, A., Bocco, G., Mendoza, M., Garrido, A., 2010, Propuesta para la generación semiautomatizada de unidades de paisajes Fundamentos y métodos, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Plan de Desarrollo Estatal 2012-2018. Yucatán. 2013. Gobierno del Estado de Yucatán 2012-2018. Mérida, Yucatán, México.
- Política Nacional de Mares y Costas, 2009, Comisión Intersecretarial para el manejo sustentable de Mares y Costas (CIMARES), 1-167. Disponible en:
http://www.semarnat.gob.mx/temas/ordenamientoecologico/Documents/cimares/grupo_trabajo_1/doc_pnmc_5a_cima_g1.pdf
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2011, Manejo Local de Riesgos en la Península de Yucatán, México. Boletín (08).
Disponible en: <http://www.pmrpnud.org.mx/boletines/boletin/boletin.pdf>
- Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio Costero del estado de Yucatán, P.O.E.T.C.Y., 2007.
- Protección Civil del Estado de Yucatán, 2013. Registro histórico de conatos e incendios forestales de los años 2005-abril, 2013. Inedito (Reporte interno).
- Ribera, M. L., 2004, Los mapas de riesgo de inundaciones: representación de la vulnerabilidad y aportación de las innovaciones tecnológicas. Doc. Anal. Geogr. 43, 153-171. Universitat de Girona. Departament de Geografia, Historia i Historia de L'Art.
- Richardson, B. G., 2008, Las Grandes Sequías Mayas Agua, Vida y Muerte, Fondo de Cultura Económica.
- Rivera, P., 2003, La Labranza de los Suelos en el Trópico: ¿Necesidad o Costumbre?, Facultad de Minas, Universidad Nacional Autónoma de Colombia, Medellín, 22 pp.
- Rodríguez, J. J., Windevoxhel, N. J., 1998, Análisis Regional de la situación de la zona marina costera centroamericana, 1-197.
Disponible en: <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=822685>
- Rodríguez, T., D. A. 1994, La lucha contra el fuego, Guía para la prevención y supresión de incendios forestales. Universidad Autónoma Chapingo / Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México. 170 pp.
- Rodríguez T., D. A., H. Ramírez M., H. Tchikoué, y J. Santillán P. 2008. Factores que inciden en la siniestralidad de incendios forestales: Ciencia Forestal, 33(104), 37-58.

- Rodríguez T., D. A., H. Tchikoué, J. Santillán P y H. Ramírez M. 2011, Informe Final, Evaluación complementaria del ejercicio del Programa E013 Prevención y Combate de Incendios Forestales. Ejercicios fiscales 2008-2010. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco. México.
- Rothermel, R. C., 1972, A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels: Res. Pap. INT- 115. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 40 pp.
- Rothermel, R. C. 1983. How to predict the spread and intensity of forest and range fires: Gen. Tech. Rep. INT-143. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 161 pp.
- Rzedowski, J., 2005, Vegetación de México, 1ra Edición digital, Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación), 2012, Comunicado de prensa número 006/12, Presentan avances de Programa de Atención a Sequía, fecha de actualización Enero de 2011. Disponible en: <http://www.sagarpa.gob.mx/saladeprensa/boletines2/2012/enero/Documents/2012B006.pdf>
- Salati, E., Nobre, A. C., 1991, Possible climatic impacts of tropical deforestation: Climatic Change, 19, 177-196.
- Saldaña-Flores, R., Miranda-Miranda, U., Cariño-Garay, R., 2009, Estudio del potencial eoloenergético en un sitio de interés ubicado en la zona costera norte de la península de Yucatán, publicado en la Gerencia de Energías No Convencionales, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Morelos, México.
- Sanchez-Bribiesca, J., 1987, Manual de Hidráulica Marítima Elemental, Comisión Federal de Electricidad.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos), 1978, Análisis de las sequías en México, Documentación de la Comisión del Plan Nacional Hidráulico. México D.F.
- SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes), 2010, Anuario estadístico TNC/WWF/UICN, 2004. El Fuego, los Ecosistemas y la Gente, Una evaluación preliminar del fuego como un tema global de conservación.
- SCT-IMT (Secretaría de Comunicaciones y Transporte-Instituto Mexicano del Transporte), 2009, Dirección General de Planeación. Cotizaciones consultadas por el IMT. Manual Estadístico del Sector del Transporte.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente, fecha de consulta 12 febrero 2013, disponible en: <http://www.seduma.yucatan.gob.mx/areas-naturales/>
- SEFOE (Secretaría de Fomento Económico), 2012, Infraestructura carretera, Gobierno del estado de Yucatán. Disponible en: <http://www.sefoe.yucatan.gob.mx/esp/ventajas/infraestructura-carreteras.php>
- SEIGE (Dirección del Sistema Estatal de Información Geográfica y Estadística del Estado de Quintana Roo), 2012, Plan Estratégico de Desarrollo Integral del Estado de Quintana Roo 2000-2025. Administración 2011 - 2016.
Disponible en línea:
http://seplader.seige.qroo.gob.mx/seigeweb/PlanEstrategico20_25/Tomo1/Cap2/EntornoGeografico.pdf
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2004, Cambio Climático una Visión Desde México.

Disponible en: http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=437

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2006, Manual del Proceso de Ordenamiento Ecológico, México, D. F., 1ra edición, 360 pp.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2013, página de internet referente a crecimiento poblacional en la zona costera. Disponible en: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores_2010/conjunto_basico/10.100.8.236_8080/ibi_apps/06_biodiversidad/6_3_marinos/indicador_6_3-5.html

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera), 2012, DISEMINA, Estadísticas del Sector Agroalimentario y Pesquero. Prevalencia de fenómenos hidrometeorológicos en México. (70), fecha de actualización Marzo de 2012.
Disponible en: <http://www.siap.gob.mx/opt/123/71/70.html>.

SINADES (Sistema Nacional de Lucha Contra la Desertificación y la Degradación de los Recursos Naturales), 2003, Estrategia Nacional de Manejo Sustentable de Tierras, 30 pp.

SINAVE (Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica), 2012, Dirección General de Epidemiología del Gobierno Federal, Secretaría de Salud.
Disponible en: <http://www.dgepi.salud.gob.mx/informes/informesh/informes%202012%20%20sem%2039/temperaturas.htm>

SMN (Servicio Meteorológico Nacional), página de Internet referente a ciclones tropicales.
Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/ciclones/ciclones.html>

Sorensen, McCreary, 1990, citado en Fischer., 1999, Técnicas para la formulación de políticas en zonas costeras, Universidad Autónoma de Baja California, 1-116.

Suarez, C. F., 1980, Conservación de suelos, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José, Costa Rica, 315 pp.

Tencate, Geotube, Turk, G. F., Melby, J. A., 1996, Unidades de armadura de concreto CORE LOC, Líneamientos Técnicos, Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. Vicksburg, MS

The Nature Conservancy, 2004, El fuego, los ecosistemas y la gente: una evaluación preliminar del fuego como un tema global de conservación, Tallase, FL. Octubre de 2004. Disponible en: [http://www.tncfire.org/documents/-global_fire_assessment_span1.pdf \(07/08/09\)](http://www.tncfire.org/documents/-global_fire_assessment_span1.pdf (07/08/09)).

Torres, J. M., Magaña, O.S., Ramírez, F. A., 2006, Índice de peligro de incendios forestales de largo plazo. Centro de Investigación y Docencia Económicas (CIDE), México. .D.F.

U.S Commission on Marine Sciences, 1969.

USDA (United States Department of Agriculture), 1999, Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys, Soil Survey Staff.

Velasco-Reyes, O. L., Colli Chi, J. M. J., 2009, Diagnóstico de combustibles forestales en el área de conservación el Zapotal, municipio de Timizín, Yucatán. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Chapingo. Texcoco, México.

Vitousek, P., Money, A., Lubchenco, J., Melillo, M., 1997, Human domination of earths ecosystems: Science 277, 494-499.

WEBLAKES, 2013, WRPLOT View, Version 7.0.0 (Wind rose PLOT) Meteorological processors and accessory programs, EPA (Environmental Protection Agency). Disponible en: <http://www.weblakes.com/products/wrplot/index.html>
http://www.weblakes.com/download/us_epa.html

Wikipedia, 2013, Escala de Beaufort de la Fuerza de los Vientos, fecha de consulta 16 de Febrero de 2013. Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Escala_de_Beaufort

Wilhite, D. A., Glantz, M. H., 1985, Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. Water International, School of Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln. 10:111-120.

Xinhua, 2006, Forest fire damage Yucatán ruins in México, fecha de actualización 15 de Mayo de 2006, fecha de consulta 04 de Junio de 2013. Disponible en: http://english.people.com.cn/200605/15/eng20060515_265775.html#

Zingg, A. W., 1940, Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff: Agriculture Engineering, 21, 59-64.

XI. GLOSARIO

Abertura: Es la distancia perpendicular entre las paredes de las diaclasas cuando estas no tienen relleno (sólo agua o aire). Hay diaclasas cerradas.

Aceleración máxima del terreno: nivel de excitación máxima a la que está sometido el terreno en función de la magnitud del terremoto. El método más usado para estimar la aceleración máxima en un sitio determinado es la aplicación de correlaciones empíricas de atenuación de la aceleración máxima, como función de la magnitud del terremoto, distancia al epicentro y las condiciones locales del sitio.

Acreción: Crecimiento por adición de materia, como en los depósitos minerales o los continentes.

Acuífero: 1. Formaciones rocosas que contienen agua en cantidades recuperables. 2. Zona terrestre con rocas permeables capaces de retener cantidades de agua que pueden ser explotables. Si su parte superficial está en contacto con la atmósfera, se denomina acuífero libre; si está cubierto por rocas impermeables y el agua retenida está a presión mayor que la atmosférica, se denomina acuífero confinado.

Adyacente: Situado en la inmediación ó proximidad de algo.

Agricultura extensiva: Modo de cultivo que fomenta el aumento de las áreas agrícolas para poder aumentar la productividad. Los cultivos extensivos van generalmente acompañados de una deforestación importante (a fin de aumentar la superficie de las tierras cultivables) y de una gran utilización de fertilizantes.

Agricultura intensiva: Modo de producción de alimentos basado en el cultivo de plantas y la cría de ganado, con el fin de maximizar la producción en áreas reducidas. La agricultura intensiva a menudo conduce al sobrepastoreo, a los monocultivos y a la eliminación de los períodos de barbecho, lo que agota los suelos.

Agricultura pluvial: Modo de producción, a veces llamado agricultura seca, que depende de la lluvia natural, sin necesidad de sistemas artificiales de irrigación (ver cultivo pluvial).

Agricultura sostenible: Modo de producción basado en cultivos y cría de ganado que permite utilizar los recursos naturales de forma que se mantengan y se renueven a lo largo del tiempo sin poner en peligro el futuro de las siguientes generaciones (ver desarrollo sostenible).

Aguacero: Lluvia abundante que produce crecimientos súbitos de caudal y potencialmente, inundaciones. Precipitación pluvial de corta duración y de considerable intensidad, que consta de gotas relativamente grandes. Es también conocido como chubasco o chaparrón.

Aguas residuales: Son las resultantes de actividades y procesos industriales, o de otro orden, que se vierten como efluentes.

Agua subterránea: El agua subterránea es el agua del subsuelo, que ocupa la zona saturada.

Albedo: Relación entre la radiación solar reflejada y la recibida por una superficie.

Altitud: Altura de un punto de la tierra con relación al nivel del mar.

Aluvión: Material detrítico transportado y depositado transitoria o permanentemente por una corriente. Dicho material puede ser arena, grava, arcilla o limo. Se acumula en los canales de las corrientes, en las planicies inundables y en los deltas, el término aluvión se refiere a material no consolidado.

Amplitud (de una onda): Altura máxima de la cresta o del valle de una onda a partir del valor cero o línea base (aquella que corresponde a nula excitación sísmica).

Anemómetro: Aparato meteorológico que se usa para medir la velocidad del viento. Consta de tres aspas con cazoletas unidas a un dispositivo giratorio, y que el número de vueltas puede ser leído directamente en un contador o registrado sobre una banda de papel o de manera electrónica.

Anisotropía: Cambio de escala de una figura o un cuerpo, se produce con factores distintos (o en dependencia de una función) en cada coordenada.

Antrópico: Se refiere a lo originado por la actividad humana.

ArcGIS: Conjunto de productos comerciales de software en el campo de los sistemas de información geográfica (SIG y en inglés GIS). Elaborado y comercializado por la compañía estadounidense ESRI Inc., donde agrupa una serie de herramientas de aplicación para la captura, edición, análisis, tratamiento, diseño, publicación e impresión de información geográfica. ArcGIS no es en sí el sistema de información geográfica sino solo un componente del mismo.

Áreas Naturales Protegidas: Son regiones terrestres o acuáticas representativas de diversos ecosistemas, donde el ambiente original no ha sido significativamente impactado por la actividad del ser humano.

Arrecife Artificial: Estructura colocada en el piso marino para imitar alguna de las características de un arrecife natural.

Aridez: Condición climática natural y permanente con una precipitación media anual o estacional muy baja.

Atmósfera: Capa gaseosa que envuelve a la Tierra.

Avalancha: Masa grande de materia (nieve, arena, tierra) que se desprende a toda velocidad por una pendiente.

Avenida máxima o extraordinaria: Brusco aumento del caudal y elevación del nivel que experimentan los ríos, superior a la máxima presentada, debido a escurrimientos extraordinarios en la corriente, a causa de las lluvias o de la fusión de las nieves o hielos. Se la denomina también creciente, crecida o riada.

Azolve: Lodo ó basura que obstruye un conducto de agua.

Barbecho: Práctica voluntaria de interrumpir las actividades agrícolas por un período de dos o más años, de forma que permita la restauración natural de la cubierta vegetal del suelo desgastada por los diversos cultivos.

Barrera verde: Conjunto de árboles y arbustos plantados con el fin de obstaculizarlas agresiones externas (fuego, arena, viento, invasiones de animales, etc.).

Batimetría: Estudio de las profundidades oceánicas mediante el trazado de mapas de isóbatas, configuración del fondo marino.

Biodiversidad o diversidad biológica: Conjunto de las especies vivientes (animales, plantas, hongos, microorganismos) que componen un ecosistema.

Biomasa: Peso o volumen total de organismos presentes en un área o volumen dados.

Bioma: Zona geográfica que por compartir similitudes climatológicas, permite el desarrollo altamente uniforme de flora y fauna.

Buffer: Palabra inglesa que para este caso significa, dar una zona de cobertura a un punto determinada.

Brecha (geología): De acuerdo con el tamaño de grano es una roca que consiste fundamentalmente de fragmentos de otras rocas. Los granos son de más de 2 mm de diámetro y son de formas angulosas. Generalmente se encuentran mal seleccionados y soportados por lodo o arena.

Brecha Calcárea: Brecha con componentes principalmente de roca caliza.

Brújula: Instrumento de bolsillo, compacto, que consiste de una brújula ordinaria, miras abiertas plegadizas, espejo y clinómetro con nivel de burbuja rectangular, que puede usarse en la mano o en un soporte para leer los ángulos horizontales y verticales, para nivelar y para leer los rumbos magnéticos de las líneas. Se usa en el levantamiento de datos geológicos de superficie, por ejemplo, para determinar el rumbo, echado, etc.

Buzamiento: Ángulo de inclinación de un plano geológico, como por ejemplo una falla, medido desde un plano horizontal. El buzamiento incluye tanto el valor del ángulo de inclinación como la dirección hacia la cual esta inclinada la roca.

Caducifolio: Se aplica al árbol o la planta de hoja caduca. Las plantas que pierden su follaje estacionalmente son plantas caducifolias.

Calentamiento Global: Es un término utilizado para referirse al fenómeno del aumento de la temperatura media global, de la atmósfera terrestre y de los océanos.

Caliza: Roca sedimentaria química. Compuesta fundamentalmente por calcita (CaCO_3) y se forma por medios inorgánicos o procesos bioquímicos.

Cambio climático: Tratado no vinculante acordado en 1992 en la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro para reducir los gases de efecto invernadero en la atmósfera.

Canevá: Marco exterior de líneas continuas que representa los paralelos y meridianos que se ajustan dentro del marco la información geográfica a representar. Los valores de los paralelos y meridianos son indicados sobre el límite del formato cartográfico mediante una plantilla de salida del mapa.

Carga de combustible: Peso seco por unidad de área, de todos los Combustibles pertenecientes a las distintas clases diamétricas.

Cársticidad (Karsticidad): paisaje generado sobre calizas, se caracteriza por depresiones cerradas y una red de drenaje escasamente funcional y en profundidad por la existencia de cavidades y un drenaje subterráneo bien desarrollado.

Cauce: El cauce o álveo de una corriente continua o discontinua es el terreno cubierto por las aguas en la máxima crecida ordinaria, definidas éstas según la Ley de Aguas.

Chubasco: También se le conoce como aguacero, es un tipo de precipitación cuya característica principal es la rapidez con la que aparece y con la que finaliza. La precipitación puede ser en forma líquida (lluvia), acompañada, o no, de granizo.

Ciclón (depresión): Zona de la atmósfera con presiones bajas. Los vientos que entran en ellas, en lugar de ser perpendiculares a las isobaras, se desvían en sentido de las agujas del reloj en el hemisferio sur y al revés en el hemisferio norte.

Ciclón tropical: Fenómeno natural que se origina y desarrolla en mares de aguas cálidas y templadas, entre las latitudes 5° a 15° , tanto en el hemisferio norte como en el sur. Según la velocidad de los vientos, se clasifican en depresión tropical, cuando sus vientos máximos constantes alcanzan

62 Km/h; tormenta tropical, cuando sus vientos máximos constantes se encuentran entre 63 y 118 Km/h y huracán, cuando sus vientos máximos constantes exceden de 119 Km/h.

Clasificación Herbert Saffir y Robert Simpson: Categorización de ciclones tropicales de acuerdo a la presión que existe en su centro o a la velocidad de sus vientos. Se les denomina depresión tropical (presión de 1008 a 1005 mb o velocidad de los vientos menor que 63 km/h), tormenta tropical (presión de 1004 a 985 mb o velocidad del viento entre 63 y 118 km/h) y huracán (presión menor que 984 mb o velocidad del viento mayor que 119 km/h).

Clastos: fragmentos de roca.

Clima: Conjunto de condiciones atmosféricas propias de una región, constituido por la cantidad y frecuencia de lluvias, la humedad, la temperatura, los vientos, las presiones, etc.; el clima está condicionado por la latitud (climas ecuatorial, tropical, templado y polar) y factores geográficos (altitud, proximidad de mares y montañas, relieve, vegetación, etc).

Clima continental: Tipo de clima que se caracteriza por un invierno muy frío, un verano muy caluroso y una estación de transición muy breve. Las regiones caracterizadas por un clima continental se encuentran generalmente lejos del mar y de los océanos.

Climograma: También se le conoce como diagrama hombrotérmico, es una gráfica que representa las precipitaciones mensuales y las temperaturas medias mensuales de un lugar determinado en un tiempo determinado, con el cual es posible identificar el tipo de clima del que se trata y definir sus características.

Cobertura vegetal: Proporción del suelo ocupada por la proyección perpendicular de las partes aéreas de las plantas sobre el suelo. Por ejemplo, si iluminásemos la vegetación desde arriba y verticalmente, la cobertura sería la proporción del suelo que está sombreado. La cobertura vegetal se expresa generalmente como un porcentaje.

Coluviación: Procesos de transporte y de acumulación de material detrítico por escurrimiento superficial (a veces combinado con la gravedad y la solifluxión superficial), El material así transportado y depositado se llama Coluviones.

Combustible: Material orgánico vegetal, vivo o muerto, subterráneo, superficial o aéreo, susceptible de ser quemado.

Cono de terraza: Cono de deyección en posición de terraza como consecuencia de un entalle fluvial posterior. Frecuentemente el cono terraza tiene una forma más amplia y presenta un material más estratificado que el cono de deyección típico. En el material muy heterométrico de deyección existen algunos estratos más.

Contingencia: Cosa que puede suceder o no, especialmente un problema que se plantea de manera no prevista.

Coquina: Caliza bioquímica, de grano grueso, compuesta por caparazones y fragmentos de caparazón poco cementados.

Coraza: Capa principal de protección de un rompeolas, que constituye la defensa primordial de la estructura ante el embate de las olas.

Corriente superficial: Clase de corriente acuífera de la cual existen tres tipos: corriente perenne o constante, es la que tiene un escurrimiento que no se interrumpe en ninguna época del año, desde su inicio hasta su desembocadura; corriente intermitente, es aquella cuyos escurrimientos se interrumpen periódicamente; corriente efímera, es la que ocurre única y exclusivamente durante el tiempo en que se producen las precipitaciones o inmediatamente después de ocurridas éstas.

Costa: Franja intermedia de ancho indefinido donde interactúan la tierra y el mar.

Cota: Altitud asociada a un punto.

Crecimiento demográfico: Aumento o disminución de la población de un país. Crecimiento demográfico = (tasa de natalidad - tasa de mortalidad) + (tasa de inmigración - tasa de emigración).

Cuadrícula: Red de líneas que se compone dentro del cuerpo del caneavá la cual están espaciadas por equidistancia en metros.

Cubeta (aluvial): Pequeña depresión generalmente cerrada y aislada en una planicie aluvial.

Cubierta de decantación: Depresión cerrada donde el estancamiento prolongado de las aguas de inundación permiten la decantación del material en suspensión. Las texturas del material de las cubetas de decantación son siempre arcillosas.

Cubierta de vegetación: Término general para denominar a la vegetación que cubre el suelo y que en general, son plantas de porte bajo.

Cuenca hidrológica: Conjunto de puntos del terreno cuyas líneas o corrientes de flujo convergen en un sumidero.

Cuerpos de agua menores: Se refiere exclusivamente a abrevaderos, represas, bordos y arroyos.

Cúmulos: Las nubes cúmulos pertenecen a las Nubes de Crecimiento Vertical. Son nubes esponjosas de color blanco o gris y, parecen motas de algodón flotando en el cielo. Las nubes cúmulos tienen un margen bien definido y una base plana. Generalmente la base de las nubes cúmulos está a una altura de 1 000 metros y tienen 1 kilómetro de ancho.

Cumulonimbos: Nubes de gran desarrollo vertical, internamente formadas por una columna de aire cálido y húmedo que se eleva en forma de espiral rotatorio. Su base suele encontrarse a menos de 2 km de altura mientras que la cima puede alcanzar unos 15 a 20 km de altitud. Produce chubascos y tormentas eléctricas.

Curvas de nivel: Línea trazada en un mapa que corresponde a una altitud constante.

Datum: Punto de contacto tangencial entre el geoide (Tierra) y el esferoide llamándose “punto fundamental” en donde se define el origen del sistema de coordenadas tanto en longitud como latitud y en sus ejes X y Y.

Degradación: Proceso de disminución de la capacidad de los ecosistemas forestales para brindar servicios ambientales, así como capacidad productiva.

Déficit hídrico: Se asocia directamente con la evaporación, la temperatura es factor determinante para que se lleve a cabo este proceso en combinación con los vientos y la presión atmosférica, existe un equilibrio entre la humedad del ambiente y la del entorno, tratándose de plantas, suelo y cuerpos de agua, pero lo cierto es que para cada situación particular, según como interactúen todos esos factores, habrá una cantidad de agua que puede ser evaporada, a la que se llama evaporación potencial. Luego entonces se habla de déficit hídrico cuando hay menos cantidad de agua disponible de la que podría evaporarse si estuviera presente.

Deforestación: Conjunto de procesos por los cuales se destruyen los ecosistemas boscosos por actividades humanas como la sobreexplotación de madera, incendios forestales y actividades agrícolas en bosques.

Degradación de la tierra: Pérdida de la fertilidad del suelo relacionada con una disminución de la materia orgánica y un acumulación de minerales, o debido a cambios estructurales y físicos del suelo por la desecación, deforestación u otros procesos erosivos.

Depresión: En geomorfología, término empleado para designar las partes bajas de un conjunto fisiográfico. Se define también como el área o porción de terreno situado bajo el nivel del mar, o bajo el nivel de regiones vecinas. Las primeras son denominadas depresiones absolutas y las segundas depresiones relativas.

Desarrollo sostenible: Forma de desarrollo que respeta al medio ambiente a través del uso prudente de los recursos naturales, basado en la explotación racional y moderada de la naturaleza y sus recursos, asegurando así la manutención y continuidad de la productividad biológica de la biosfera.

Desbrozar: Limpiar la tierra eliminando las hojas, ramas, cortezas y malezas.

Desecar: Secar o extraer la humedad.

Desertificación: la degradación del suelo en zonas áridas, semiáridas u otras que tengan una estación seca, causada principalmente por la sobreexplotación o uso inapropiado del suelo en interacción con la variabilidad climática.

Desierto: Ambiente que se caracteriza por una sequía de la atmósfera y una extrema escasez o ausencia de lluvias, una hidrografía vestigial o ausente, y una cobertura vegetal poco desarrollada o inexistente.

Detrítico: Designa cualquier tipo de material que resulta de la acción de la meteorización, de la alteración o del arrastre de una roca "in situ". Una formación detrítica es una formación constituida por detritos, es decir por fragmentos, o productos de alteración de una roca coherente. En petrografía una roca detrítica es una roca sedimentaria constituida por detritos sueltos o consolidados.

Dique: Es un terraplén para evitar el paso del agua, puede ser natural o artificial, por lo general de tierra y paralelo al curso de un río o al borde del mar.

Disectado: Caracteriza a formas topográficas entalladas y cortadas por efectos de la erosión.

Drenado: Canalización y extracción de las aguas que impregnan un terreno.

Discontinuidad: Superficies en una formación rocosa en donde se rompe la continuidad, tales como grietas, fisuras, juntas, y diaclasas (grietas sensiblemente verticales que delimitan formaciones rocosas de basaltos columnares).

Duna: Colina de arena movediza que en los desiertos y en las playas forma y empuja el viento.

Echado o buzamiento: En geología, una capa de roca que buza es una capa inclinada, y el echado es el ángulo de inclinación de una superficie medida con respecto a la línea horizontal.

Ecología: Estudio de las relaciones entre los seres vivos y su medio ambiente y de los mecanismos que explican su distribución, abundancia y comportamiento.

Ecosistema: Comunidad de seres vivos cuyos procesos vitales se relacionan entre sí y se desarrollan en función de los factores físicos y químicos en que evolucionan.

Ecosistema Forestal: La unidad funcional básica de interacción de los recursos forestales entre sí y de éstos con el ambiente, en un espacio y tiempo determinados condición.

Efecto de Coriolis: Efecto debido al movimiento rotacional de la tierra, que se manifiesta en todo cuerpo en movimiento, de tal forma que lo desvía de su trayectoria recta. En el hemisferio norte la desviación ocurre hacia la derecha de la dirección del cuerpo y mientras que en el hemisferio sur la desviación es hacia la izquierda.

Elevación: Distancia vertical comprendida entre un punto considerado sobre la superficie terrestre y el nivel medio del mar.

Elipsoide: Representación teórica de la Tierra. Resultado de revolucionar a la elipse sobre su propio eje. Definido matemáticamente en función de los parámetros de radio mayor (a), radio menor (b) y su achatamiento polar.

Endorreico: Fenómeno por el cual una región no presenta salida de las aguas hacia el mar abierto.

Epicentro: Punto en la superficie de la Tierra resultado de proyectar sobre ésta el hipocentro de un terremoto. Se encuentran usualmente en un mapa, señalando el lugar justo sobre el origen del movimiento sísmico.

Erosión: Conjunto de fenómenos exógeno que contribuyen al desgaste del modelado terrestre. En su sentido más amplio corresponde a los procesos de ablación, alteración y acumulación. En la práctica, se limita, casi exclusivamente, a los procesos de arrastre de material y a la alteración (erosión química).

Erosión hídrica laminar: Forma de arrastre o de remoción superficial y uniforme a la superficie de un terreno, sin que se desarrollen canales conspicuos.

Erosión regresiva: Caracteriza todo fenómeno de erosión o de arrastre actuando y desarrollándose a partir de su nivel de base hacia aguas arriba.

Escala: Expresión numérica donde la dimensión superficial de la Tierra es medida sobre el plano y la misma dimensión medida en la superficie real. La escala se representa por una forma fraccional y suele ser indicada de la siguiente manera: 1:1, 000,000.

Escala de Mercalli Modificada: escala de intensidad que abarca de grado I a grado XII, sirve para designar la intensidad de un sismo en un sitio dado. La intensidad se asigna en forma subjetiva según el sismo sea percibido por las personas (grados I a VI), según los daños que ocasione a las edificaciones (grados VII a X) y según los cambios geológicos que éste produce (grados XI a XII).

Escala de Richter: La escala sismológica de Richter, también conocida como escala de magnitud local (ML), es una escala logarítmica arbitraria que asigna un número para cuantificar el efecto de un terremoto, en términos de energía liberada.

Escollera: Estructura que se construye en la desembocadura de los ríos en forma convergente para aumentar la velocidad de descarga con el fin de reducir el azolve.

Escurrimiento: agua proveniente de la precipitación, circula sobre o bajo de la superficie terrestre y llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca.

Espaciamiento: Es la distancia perpendicular entre dos discontinuidades de una misma familia. Debe advertirse que el espaciamiento aparente, el que muestra en superficie la roca, por regla general es mayor que el real. Se utiliza el promedio.

Espigón: Estructura construida de manera perpendicular a la línea de costa, que intercepta los sedimentos; Macizo saliente que se construye a la orilla de un río o en la costa del mar, para defender los márgenes o modificar la corriente.

Estación climatológica: Instalación conexas a las hidráulicas que dispone de un conjunto de instrumentos para medir la temperatura, la humedad del viento y la precipitación en las cuencas.

Estación meteorológica: Sitio donde se evalúan las condiciones actuales del tiempo; consta de un jardín con características especiales donde se instalan los instrumentos meteorológicos, entre los cuales se consideran como más frecuentes: el abrigo o garita de instrumentos, el pluviómetro, el evaporómetro, la veleta, etcétera.

Estalactitas: Espeleotema, generalmente de calcita, formado por el goteo de agua y que cae del techo de una caverna. Las estalactitas adoptan una enorme variedad de tamaños y formas. Se forman cuando la percolación de agua se filtra a través de una cavidad en el techo llegando a saturarse de calcita debido a la pérdida de dióxido de carbono en el aire de la caverna. La calcita se precipita alrededor de la circunferencia de la gota y continúa su depósito creando un hueco tubular como popote.

Estalagmitas: Espeleotema, normalmente de calcita, formado por el crecimiento hacia arriba desde el piso de una caverna y por consiguiente complemento de una estalactita. Las estalagmitas se forman cuando gotas saturadas caen desde el techo de una cueva o estalactita y, cuando o después de que toca el suelo, pierde dióxido de carbón, causando precipitación de calcita.

Estereograma: Diagrama gráfico en una superficie plana, que da la representación tridimensional, tal como el proyectar un juego de relaciones angulares; por ejemplo, el diagrama de bloques de una estructura geológica.

Estrato: Capa de suelo o de roca que se localiza en una región, originalmente en posición horizontal; en ocasiones su espesor puede ser muy variable.

Estructura: Es el aspecto megascópico del macizo rocoso, es decir, la roca estudiada en todo su afloramiento.

Estructura de Protección Costera: Obra marítima destinada para disminuir la energía del oleaje incidente generando una zona de calma.

Estuario: Desembocadura de un río caudaloso en el mar, caracterizada por tener una forma semejante al corte longitudinal de un embudo, cuyos lados van apartándose en el sentido de la corriente, y por la influencia de las mareas en la unión de las aguas fluviales con las marítimas.

Evapotranspiración: Conjunto de las pérdidas de agua en forma de vapor que pasan a la atmósfera y que son la suma de la transpiración de las plantas y de la evaporación del agua de la superficie del suelo.

Exposición: Dirección y sentido de orientación de la pendiente, generalmente expresada con respecto al punto cardinal que la misma enfrenta.

Falla: Superficie de ruptura en rocas a lo largo de la cual ha habido movimiento relativo, es decir, un bloque respecto del otro. Se habla particularmente de falla activa cuando en ella se han localizado focos de sismos o bien, se tienen evidencias de que en tiempos históricos ha habido desplazamientos. El desplazamiento total puede variar de centímetros a kilómetros dependiendo del tiempo durante el cual la falla se ha mantenido activa (años o hasta miles y millones de años). Usualmente, durante un temblor grande, los desplazamientos típicos son de uno o dos metros.

Flancos: Partes del perímetro del fuego, aproximadamente paralelas a la dirección principal de propagación.

Fisiografía: Descripción de los aspectos naturales del paisaje terrestre: relieve, modelado, vegetación, hidrografía, etc. Se diferencia de la geomorfología por su carácter exclusivamente

descriptivo. La geomorfología, en su concepción moderna es al mismo tiempo descriptiva y explicativa, trata de explicar la génesis de las formas terrestres y su evolución.

Foco: Punto de origen del sismo, en el interior de la Tierra. Lugar donde empieza la ruptura que se extiende formando un plano de falla. También nombrado como hipocentro. En Incendios, se define como el fuego inicial que afecta un área de escasas dimensiones, en las proximidades del punto de ignición. También utilizado para describir un sector de un incendio que arde con mayor intensidad que el resto.

Fracturamiento: Patrones de ruptura que determinan generalmente la consistencia de las masas rocosas. Los patrones de estratificación y fracturamiento o ruptura así como los lentes de roca muy intemperizada son los factores que controlan la consistencia de la roca.

Freático: Nivel de las aguas acumuladas en el subsuelo sobre una capa impermeable del terreno; pueden aprovecharse por medio de pozos. También se da este nombre a la capa del subsuelo que las contiene y almacena.

Frecuencia: Referida a una calamidad, es su número de ocurrencias en un período dado. En Estadística es la cantidad de veces que se repite un determinado valor de la variable.

Frecuencia (de una onda): Número de ciclos por segundo. Se expresa en unidades llamadas Hertz. La frecuencia es el inverso del periodo.

Frente (Hidrometeorología): zona de transición o contacto entre dos masas de aire de diferentes características meteorológicas.

Frente Frío: es una zona frontal de una masa de aire frío en movimiento que empuja aire más cálido a su paso.

Fuente de ignición: Cualquier fuente de calor, natural o artificial, capaz de encender combustibles vegetales.

g: unidad de aceleración, basada en la aceleración que produciría la gravedad terrestre en un objeto cualquiera en condiciones ideales (sin atmosfera). Una aceleración de 1g es generalmente considerado como igual a la gravedad estándar, que es de 9.80665 m/s^2 .

Gal: El Gal es el nombre que se le asigna a la unidad de aceleración en el sistema cegesimal, esto es, al centímetro por segundo por segundo, por lo que por definición $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$. La aceleración gravitacional de la Tierra varía entre 976 y 983 Gal.

Geomorfología: Tipos y formas del relieve, pendientes del terreno, procesos erosivos. Es la parte de la geología que se encarga de la clasificación, descripción, naturaleza, origen y desarrollo del paisaje terrestre, su relación con las estructuras que las subyacen, así como la historia que los cambios del paisaje han sufrido a lo largo del tiempo. Aunque el término ha sido utilizado en la interpretación genética del paisaje, en ocasiones se le restringe a la interpretación de los rasgos producidos por la erosión y el depósito de sedimentos. A veces el término se utiliza como sinónimo de fisiografía, sin embargo, esta última es la parte descriptiva de la geomorfología, mientras que la primera es la parte interpretativa del estudio de las formas del paisaje.

Glacis coluvial: Glacis de acumulación, formado por material detrítico proviniendo directamente de la vertiente dominante por intermedio del escurrimiento superficial.

Gradícula: Intersección de líneas en forma de cruz que están dentro del caneavá el cual guardan una equidistancia en grados de latitud y longitud (sexagesimales).

Hidrología Subterránea: Tipos de acuíferos, pozos, norias, aeromotores, a profundidad de niveles estático y dinámico, dirección de flujos subterráneos, isolíneas de calidad de agua, zonas de veda, tipos de permeabilidad litológica.

Hidrología Superficial: Regiones hidrológicas, cuencas, subcuencas, almacenamientos de agua, manantiales, hidrometría, tipos de corrientes, calidad de agua, coeficientes de escurrimiento, infiltración y evapotranspiración.

Hidrometeorológico: fenómeno asociado con procesos en la atmósfera y que involucra ausencia o presencia de agua.

Homogénea: Dicho de un conjunto, formado por elementos iguales.

Inclinación: En geología estructura, el complemento del buzamiento; el ángulo que una superficie estructural forma con la vertical, medido perpendicularmente al rumbo.

Infiltración: Absorción en el terreno del agua que esta en la superficie.

Infraestructura: Conjunto de bienes y servicios básicos que sirven para el desarrollo de las funciones de cualquier organización o sociedad, generalmente gestionados y financiados por el sector público. Entre ellos se cuentan los sistemas de comunicación, las redes de energía eléctrica, etcétera.

Intensidad (de un sismo): Número que se refiere a los efectos de las ondas sísmicas en las construcciones, en el terreno natural y en el comportamiento o actividades del hombre. Los grados de intensidad sísmica, expresados con números romanos del I al XII, correspondientes a diversas localidades se asignan con base en la escala de Mercalli.

Intensidad de lluvia: Lluvia recogida en un determinado intervalo de tiempo o, que de mantenerse con el mismo ritmo de precipitación que en un momento dado, se recogería en ese intervalo de tiempo.

Interpolación: Construcción de nuevos puntos dados partiendo del conocimiento de un conjunto de puntos dados discretos.

In situ: Expresión utilizada para referirse a características o actividades realizadas "en el sitio".

Isóbata: Curva para la representación cartográfica de los puntos de igual profundidad en océanos y mares.

Isolínea: Es una curva que conecta los puntos en que la función tiene un mismo valor constante.

Isoterma: Línea o superficie curva que une los vértices de puntos de en un plano cartográfico, que presentan las mismas temperaturas en un determinado lapso de tiempo.

Isoyeta: Línea curva que une los vértices de dos lugares que presentan las mismas cantidades de precipitación registrada en un periodo de tiempo determinado, en un plano cartográfico.

Kriging: Método estadístico de interpolación que ayuda a predecir los valores de la variable de interés en lugares no muestreados, utilizando un modelo de variograma para la obtención de datos.

Laderas (naturales): Costados de las montañas, representados por las faldas de los cerros.

Lecho fluvial: Entalle ocupado o que ha sido afanado por las aguas de una corriente fluvial.

Línea de costa: es la línea en la superficie de la Tierra que define el límite entre el mar y la tierra firme. Históricamente ha sido uno de los principales elementos registrados por la Cartografía, debido al límite que la línea de costa ha representado para el desarrollo de las actividades humanas.

Litológico: Todo lo que se refiere a las rocas o basamento geológico en general.

Litoral: Relativo a las costas ó cercanías al mar.

Litosfera: Envoltura rocosa que constituye la corteza exterior sólida del globo terrestre.

Lluvia: Precipitación de gotas de agua de un diámetro superior a 0,5 mm.

Loma: Tipo particular de colina, con forma redondeada y vertientes pías convexo-cóncavos.

Macizo rocoso: Es el conjunto de elementos resistentes (roca intacta) separado por discontinuidades.

Magnitud (de un sismo): Valor relacionado con la cantidad de energía liberada por el sismo. Para determinar la magnitud se utilizan, necesariamente uno o varios registros de sismógrafos y una escala estrictamente cuantitativa, sin límites superior ni inferior. Una de las escalas más conocidas es la de Richter, aunque en la actualidad frecuentemente se utilizan otras como la de ondas superficiales (Ms) o de momento sísmico (Mw).

Manejo del fuego: Actividades que involucran la predicción de la ocurrencia, el comportamiento, los usos y los efectos del fuego, como así también la toma de decisiones adecuadas a cada caso, de acuerdo con los objetivos planteados.

Manglar: Terreno que en la zona tropical cubren de agua las grandes mareas, lleno de esteros que lo cortan formando muchas islas bajas, donde crecen los árboles que viven en el agua salada.

Mantillo: Estrato de materia orgánica en descomposición que se encuentra sobre el suelo mineral, constituido principalmente por follaje caído, vegetación herbácea y madera en descomposición (ramitas y miembros pequeños).

Marea: Oscilación periódica del ascenso y descenso del nivel del mar causado por las fuerzas gravitacionales de la luna y el sol.

Marea de Tormenta: ascenso del nivel medio del mar debido a la acción de los vientos de los ciclones tropicales sobre una región del océano.

Marisma: Terreno bajo y pantanoso que inundan las aguas del mar.

Metadato: Archivo digital el cual describe a un grupo de datos de tipo vectorial o raster para su mejor referencia, clasificación y ubicación.

Meteorización o intemperismo: Desgregación y/o transformaciones de las rocas por procesos mecánicos, químicos, biológicos, principalmente bajo la influencia de fenómenos atmosféricos.

Meteorología: Estudio de la atmósfera y sus fenómenos que se observan en la atmósfera o en la superficie de la Tierra, que consiste en la precipitación, la suspensión o el depósito de partículas líquidas o sólidas, acuosas o no. También se dice de fenómenos de naturaleza óptica o eléctrica.

Métodos geofísicos: Métodos de prospección y exploración que utiliza las propiedades físicas inherentes a la Tierra y componentes de la corteza terrestre. Las mediciones pueden ser directas o indirectas e incluyen los métodos gravimétrico, magnetométrico, eléctrico, electromagnético, sísmico y radiométrico etc.

Modelo: Representación estructurada de la realidad territorial para facilitar su comprensión y análisis.

Modelo de combustible: Conjunto de descriptores numéricos que caracteriza un determinado complejo de combustible. Los modelos de combustible son utilizados para ingresar las características de los complejos de combustible, a los modelos matemáticos de predicción de comportamiento del fuego.

Modelo de predicción de comportamiento del fuego: Conjunto de ecuaciones matemáticas que brindan una base cuantitativa para la predicción del comportamiento del fuego.

Montaña: Relieve alto con crestas generalmente bien definidas y vertientes predominantemente complejas. Para diferenciarlas de las colinas se ha adoptado 300 m como desniveles mínimos entre las crestas o cimas y la base de las vertientes. En forma muy general, la amplitud de los desniveles confiere a los ríos de montaña un perfil longitudinal muy acentuado, con pendientes fuertes. La presencia de varios pisos altitudinales permite además su diferenciación de las colinas.

Movimiento de Rotación de la Tierra: La tierra rota sobre su eje y lo hace cada 23hs y 56 minutos, se trata de la duración de un día –para nosotros 24hs -. Esta rotación sobre el eje (de polo a polo) terrestre se realiza en dirección oeste-este, en sentido anti-horario, este movimiento es el que origina los días y las noches.

Movimiento de Traslación de la Tierra: Este movimiento es el que realiza la Tierra alrededor del sol, para efectuar éste movimiento nuestro planeta se ve impulsado por la gravedad solar. La Tierra da una vuelta alrededor del sol exactamente cada 365 días, 5 horas y 57 minutos.

Nivel freático: Superficie en la zona de saturación de un acuífero libre sometido a la presión atmosférica.

Nivel medio del mar: Se denomina nivel del mar al que sirve como referencia para ubicar la altitud de las localidades y accidentes geográficos que se miden por su profundidad. La unidad en que suele medirse la altura sobre el nivel del mar es el metro. Se habla pues de metros sobre el nivel del mar, abreviado msnm.

Norias: Son perforaciones de poca profundidad, no más allá de 20 m, y con diámetros de 1 a 3 metros. Su objetivo es captar y extraer aquellas aguas que escurren en forma subterránea por acuíferos cercanos a la superficie del suelo. Normalmente estos acuíferos son el tipo freático, es decir, no están sometidos a presión interna y para extraer el agua es necesario bombearla.

Obras de protección: Estructuras que se encuentran en contacto directo con el embate de las olas.

Oleaje: Ondulaciones con movimientos sinusoidal que se desarrolla en la superficie del mar.

Ondas sísmicas: Perturbaciones elásticas de los materiales terrestres generadas por un sismo. Se pueden clasificar en ondas de cuerpo (P y S) y superficiales (Love y Rayleigh). Las primeras se transmiten en el interior de la tierra en todas las direcciones. Las ondas S no se propagan en medios líquidos. Las ondas superficiales muestran su máxima amplitud en la interfase aire-tierra.

Orientación: Es la posición espacial y se da con el rumbo y buzamiento de la superficie de discontinuidad. Es importante ver la actitud de los bloques y fracturas para efectos de estabilidad.

Pendiente: Es un declive del terreno y la inclinación, respecto a la horizontal, de una vertiente.

Periodo de retorno: Es el tiempo medio, expresado en años, que tiene que transcurrir para que ocurra un fenómeno con una determinada intensidad (avenidas, sismos, movimientos de laderas, etc.).

Permeabilidad: Capacidad de un cuerpo para dejar pasar un fluido bajo presión.

Piedemonte: Área de transición entre relieves accidentados y las zonas circundantes más bajas. En el medio de piedemonte predominan los aportes coluviales y las acumulaciones forzadas.

Placas tectónicas: Porciones de la litosfera terrestre, de grandes dimensiones y espesor no mayor a 100 km, que se mueven con relación a otras sobre el manto terrestre. Las placas chocan en zonas de convergencia y se separan en zonas de divergencia. La superficie de la Tierra está dividida en unas 17 placas mayores.

Planicie (aluviales): Conjunto de paisajes amplios caracterizados por una topografía plana y baja en relación con el nivel de base y originado por sedimentación del material depositado por los ríos.

Planicie de desborde: Planicie aluvial originada por desbordamiento en napa, generalizado o localizado a partir de un río. Las posiciones geomorfológicas más características son las napas y las cubetas de desbordamiento. La presencia de diques aluviales no es una condición necesaria para diferenciar este tipo de planicie

Planicie deltaica: En forma general corresponden a las planicies aluviales más cerca del nivel de base. Frecuentemente constituye la parte terminal de una planicie de desborde o de explayamiento.

Playa: Depósito de sedimentos no consolidados que varían entre arena y grava, excluyendo el fango ya que no es un plano aluvial o costa de manglar, que se extiende desde la base de la duna o el límite donde termina la vegetación hasta una profundidad por donde los sedimentos ya no se mueven.

Pleamar: Se refiere al nivel máximo del nivel del mar en un ciclo de marea, también llamado marea alta.

Polígonos de Thiessen: Método de interpolación simple, basado en la distancia entre dos puntos basándose en el teorema de Pitágoras, siendo especialmente apropiada cuando los datos son cualitativos. Se crean al unir los puntos entre sí, trazando las mediatrices de los segmentos de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control, de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante a los puntos vecinos y designando su área de influencia.

Precipitación: Proceso por el cual el vapor de agua que forma las nubes se condensa, formando gotas de agua que al alcanzar el tamaño suficiente se precipitan, en estado líquido como lluvia o sólido como nieve o granizo, hacia la superficie terrestre.

Presión barométrica: La presión atmosférica es la fuerza que ejerce el peso del aire sobre la superficie de la tierra, gráficamente se puede ilustrar como la fuerza que ejerce el peso de una columna de aire sobre un área a una altitud determinada. En una región específica que se encuentra al nivel del mar, la columna de aire será mayor en comparación de una región localizada a mayor elevación. Las diferencias de presión en la atmósfera son las responsables del movimiento de las masas de aire. Cuando el aire está frío desciende, aumenta la presión y provoca estabilidad atmosférica, se forma entonces un anticiclón térmico que se asocia con buen tiempo. Cuando el aire está caliente asciende, baja la presión y provoca inestabilidad, se forma un ciclón o borrasca térmica que se relaciona con un mal estado del tiempo.

Presión de poro: Presión en el agua que ocupa los poros o vacíos de un suelo.

Profundidad focal (de un terremoto): Profundidad del foco por debajo de la superficie de la Tierra.

Proyección Cartográfica. Representación gráfica de la tierra sobre un plano de papel tomando en cuenta su expresión matemática.

Relieve: Hace referencia a las formas que tiene la corteza terrestre o litosfera en la superficie, tanto al referirnos a las tierras emergidas, como al relieve submarino, es decir, al fondo del mar.

Relleno: Alude al material entre las paredes de la discontinuidad, casi siempre más blando que el macizo rocoso. Un parámetro en el material de relleno es su grado de cementación.

Régimen térmico: Serie general del régimen de las temperaturas del aire, basado en los ciclos anuales característicos de las temperaturas medias mensuales del mismo.

Regionalización sísmica: proceso de determinación del peligro o amenaza sísmica en muchos sitios comprendidos dentro de una región o país con el objeto de delimitar zonas sísmicas sujetas a un grado similar de riesgo.

Restauración forestal: El conjunto de actividades tendentes a la rehabilitación de un ecosistema forestal degradado, para recuperar parcial o totalmente las funciones originales del mismo y mantener las condiciones que propicien su persistencia y evolución

Resistencia al control: Dificultad relativa que presenta un incendio para ser controlado, a raíz de los factores que inciden en su comportamiento. o desde la superficie durante las operaciones de supresión del fuego.

Roca: Es un agregado de uno o más minerales. Por su origen se dividen en ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Rompeolas: Estructura de protección costera, ya sea en forma de enrocamiento o de elementos artificiales que generan una zona de calma.

Rugosidad: Se alude a la rugosidad de la superficie y a la ondulación de la discontinuidad, pues ambos afectan la resistencia del macizo rocoso. Una alta rugosidad aumenta la resistencia a la fricción.

Rumbo (geología): Ángulo entre el norte magnético y una línea obtenida mediante la intersección de un estrato rocoso inclinado, o falla, con un plano horizontal.

Sedimento: Material sólido acumulado sobre la superficie terrestre (litósfera) derivado de las acciones de fenómenos y procesos que actúan en la atmósfera, en la hidrosfera y en la biosfera (vientos, variaciones de temperatura, precipitaciones meteorológicas, circulación de aguas superficiales o subterráneas, desplazamiento de masas de agua en ambiente marino o lacustre, acciones de agentes químicos, acciones de organismos vivos).

Sequía: Fenómeno meteorológico que ocurre cuando la precipitación, en un lapso, es menor que el promedio, y cuando esta deficiencia es lo suficientemente grande y prolongada como para dañar las actividades humanas.

Sequía Intraestival: conocida también como sequía de medio verano o canícula. La presencia de este fenómeno puede ubicarse entre el 15 de julio y el 15 de agosto sin dejar de causar estragos en los procesos productivos, en los ecosistemas y en el aspecto hidrológico

Shapefile (Shape): Formato vectorial-digital patentado por ESRI Inc., que representa información geográfica en forma geométrica (punto, línea y polígono) y compuesto por información por atributos incorporados en tablas de archivos dBASE (.dbf).

Sismicidad: parámetro que describe la actividad sísmica en un área geográfica dada, definido por la ocurrencia de sismos en tiempo y espacio. Generalmente se refiere a la frecuencia de ocurrencia y a la magnitud de sismos pasados; puede estar dada por el número promedio por unidad de tiempo de ocurrencia de sismos de características dadas, por ejemplo $M > 6$, en una región o segmento de falla.

Sismo (terremoto o temblor): Vibraciones de la Tierra ocasionadas por la propagación, en el interior o en la superficie de ésta, de varios tipos de ondas elásticas. La energía que da origen a estas ondas proviene de una fuente sísmica.

Sismos de intraplaca: Se generan en la parte interna de las placas, aun en zonas donde se ha llegado a suponer un nivel nulo de sismicidad. Son consecuencia de deformaciones continentales y son menos frecuentes que los de interplaca. Se caracterizan por tener magnitudes pequeñas o moderadas.

Sismos de interplaca: Su origen se da en las zonas de contacto de las placas tectónicas, debido a la fricción de estas. Se caracterizan por tener una alta magnitud, un foco profundo, gran liberación de energía y por lo general alejados de los centros de población.

Sismógrafo: Instrumento de alta sensibilidad para registrar los movimientos del terreno ocasionados por la propagación de las ondas sísmicas. Al registro producido se le conoce como sismograma, necesario para el cálculo de la magnitud (tamaño) de un sismo.

Sistemas de baja presión: región donde la presión atmosférica es más baja que la del aire circundante.

Sistemas de Información Geográfica (SIG). Conjunto de procesos lógicos e informáticos que integran la información geoespacial (mapas, imágenes de satélite y base de datos en tablas de atributos) a través de una serie de herramientas de recolección, almacenamiento, visualización, recuperación, análisis, transformación y despliegue del comportamiento de los elementos espacio-temporales de un lugar o área determinada.

Sobrepastoreo: Utilización descontrolada de los pastos naturales para la alimentación de ganado.

Subtropical: Proceso que se encuentra o desarrolla cerca del trópico pero en una latitud más elevada.

Suelo: Formación superficial de la corteza terrestre, resultante de la alteración de las rocas por meteorización y por la acción de los organismos. Sostén de la vida vegetal y animal, es el cuerpo natural que se forma a partir de los componentes de la corteza terrestre (las sustancias minerales). Es el sustrato natural donde viven las plantas terrestres.

Suelos residuales: Suelos no transportados producto de la descomposición química (meteorización) de las rocas, debida a las condiciones climáticas.

Sumidero: Este término solo se utiliza en el idioma español y se refiere a un hoyo o hueco en el terreno somero, en América Latina se refiere como sumidero a cualquier depresión cerrada causada por disolución; aunque también se considera que sumidero representa un punto en el que las aguas exteriores se internan bajo tierra.

Susceptibilidad: Se refiere a la probabilidad de que un deslizamiento ocurra en una determinada área, por lo que se basa en las condiciones locales del terreno, sin tener en cuenta el factor temporal.

Talud: Superficies inclinadas que unen los desniveles del terreno, producto de actividades de construcción, ya sea por corte o relleno o construcción de un terraplén artificial.

Tasa de excedencia: Número de veces, por unidad de tiempo, en que el valor de cualquier intensidad es excedido.

Terraplén: Macizo de tierra con que se rellena un hueco, o que se levanta para hacer una defensa, un camino u otra obra semejante.

Terraza: Término topográfico y descriptivo. Se caracteriza por una superficie alta y plana limitada por una escarpa o talud vertical a subvertical.

Terraza aluvial: Terraza de acumulación que corresponde a una napa aluvial actualmente en posición de terraza por efecto del entalle fluvial posterior a la acumulación. Cuando el basamento geológico rocoso aparece en el talud se habla de terraza aluvial escalonada. En cambio, cuando el talud está entallado en el material aluvial, se trata de una terraza aluvial encajonada.

Terraza de erosión: Tiene el aspecto de una terraza. Se presenta en forma de escalón o relleno plano en las vertientes rocosas de un valle, prácticamente sin material aluvial. Corresponde a un nivel de erosión fluvial.

Tiempo de residencia: Tiempo requerido por la zona del frente de llama para pasar un punto estacionario. Se calcula como la razón entre el ancho del frente de llama y la velocidad de propagación del fuego.

Tirante: profundidad, generalmente el valor máximo, de un cuerpo de agua, típicamente referido a un río, aunque puede ser respecto a un lago o almacenamiento artificial.

Topografía: Conjunto de particularidades que presenta un terreno en su configuración espacial.

Transporte Litoral: Movimiento del sedimento en la zona litoral producido por efectos del oleaje y corrientes.

Trayectoria: de un ciclón: Dirección de desplazamiento que toma un ciclón tropical. Este movimiento es afectado por los vientos globales (vientos alisios) y los sistemas presión.

Veleta: Dispositivo giratorio que consta de una placa que gira libremente, un señalador que indica la dirección del viento y una cruz horizontal que indica los puntos cardinales.

Velocidad de propagación: Es el cociente entre la distancia recorrida por una onda (longitud de onda) y el tiempo recorrido por la misma (período). Es aquella con la que la vibración se propaga por el medio y está en función de las características elásticas de los materiales a través de las cuales se propagan las ondas. En medios más rígidos la velocidad aumenta y decrece en medios de menor densidad.

Zona de subducción: segmento de placa oceánica que desciende y se sumerge bajo una placa continental u oceánica a lo largo de la fosa marina; en ella se sitúan generalmente los focos de sismos que definen la zona de Benioff.



Yucatán

Gobierno del Estado
Comprometidos con tu bienestar
2012 • 2018