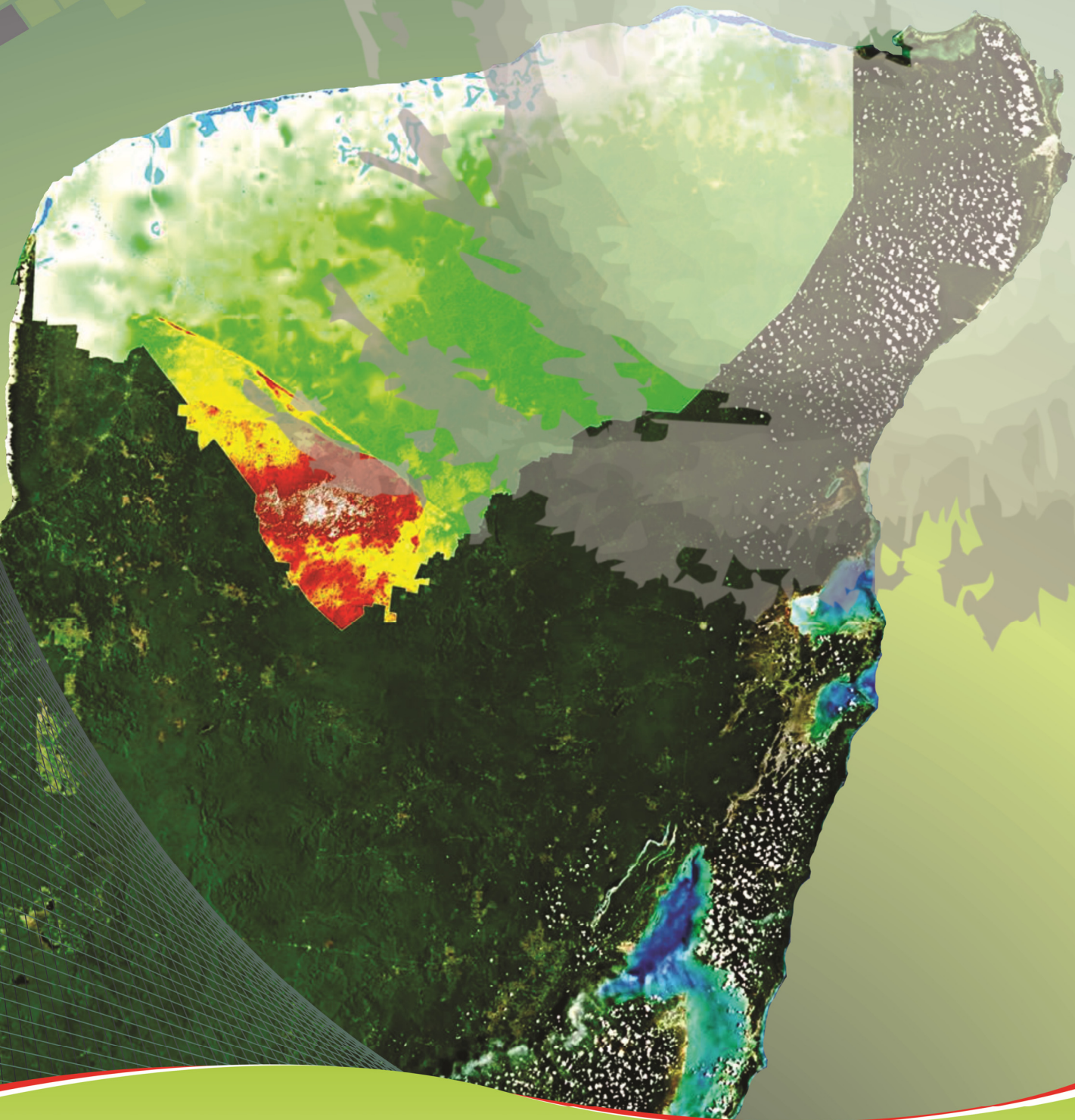


ATLAS

DE PELIGROS POR
FENÓMENOS NATURALES
DEL ESTADO DE YUCATÁN

INFORME EJECUTIVO



ATLAS DE PELIGROS POR FENÓMENOS NATURALES DEL ESTADO DE YUCATÁN





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

INFORME EJECUTIVO

Con la finalidad de que el estado de Yucatán cuente con la información necesaria sobre los Peligros por Fenómenos Naturales que inciden en el territorio y los daños que estos pueden ocasionar provocando pérdidas de vidas humanas y económicas en una comunidad o población, el Gobierno del estado, 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 de un estudio preventivo, denominado “Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales del Estado de Yucatán”.

Para desarrollar dicho Atlas, el Servicio Geológico Mexicano realizó ante el Fondo de Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN), la gestión correspondiente a fin de obtener financiamiento parcial para desarrollar el estudio preventivo, teniendo como resultado, que el 25 de enero de 2011, el Director General del FONDEN, Lic. Rubén Hofliger Topete, a través del Oficio DGF/0049/2011, comunicara 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, siendo esta la autorización definitiva de coparticipación, según la cual cada una de las partes, FOPREDEN y SGM, aportarían el 50% del costo del estudio preventivo.

La realización del “Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales del Estado de Yucatán”, tiene como objetivo principal generar un instrumento que permita establecer estrategias 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, al identificar y zonificar los peligros (geológicos e hidrometeorológicos) por posible afectación hacia el ser humano y su infraestructura. 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), confiable y de fácil manejo, para servir a las autoridades en materia de Protección Civil.

El estado de Yucatán, por su ubicación (Figura 1) y características geográficas, es una región expuesta a diversos peligros naturales y riesgos que implican ocurrencia de desastres. Entre algunas experiencias recientes de fenómenos hidrometeorológicos destacan los impactos de los huracanes Isidore, Emily, Wilma y Dean, con vientos extremadamente fuertes y lluvias torrenciales que produjeron inundaciones, pérdida por erosión de la línea de costa y marejadas ciclónicas en áreas costeras las cuales fueron dañadas de forma significativa. Por otra parte, también algunas amenazas a las que se enfrenta el Estado, son las numerosas ondas tropicales que se presentan anualmente en la zona y que provocan lluvias extraordinarias, así como algunas considerables inundaciones en la capital del Estado y comunidades de los municipios del Oriente y Sur de la misma.

Para poder prevenir y en su caso poder evitar este tipo de desastres, es de vital importancia contar con una herramienta que permita conocer la recurrencia de un fenómeno natural, como el Atlas de Peligros, el cual es un sistema integral de información, compuesto por bases de datos, que permiten integrar, evaluar y difundir los resultados de los análisis de peligro y vulnerabilidad, a diferentes niveles y escalas, mediante la realización de escenarios, por lo cual es muy importante que pueda ser actualizado fácilmente y se mantenga vigente.

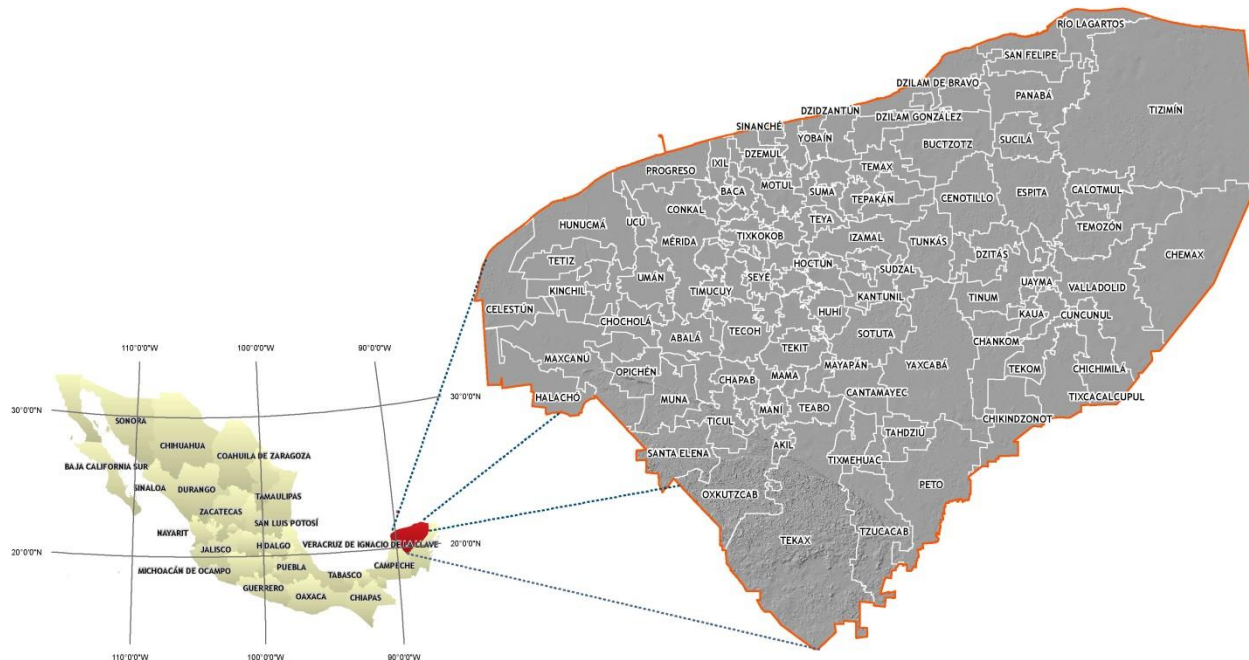


Figura 1.- Localización del estado de Yucatán.

Para el desarrollo de este trabajo se empleó la metodología oficial vigente, “Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos” (CENAPRED, 2006 y 2007). Así mismo se desarrollaron métodos de trabajo propuestos por el SGM que no están dentro de las guías metodológicas arriba mencionadas.

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, 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, la verificación en campo que consistió en la ubicación de sitios en peligro y el llenado de una ficha técnica, y la tercera nuevamente de gabinete donde se incluye el análisis de la información recabada en campo. Esta tercera etapa es importante ya que es donde se ajustan los mapas base y se llega al resultado de los mapas finales de susceptibilidad y 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, 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 y adicionalmente erosión.

El estado de Yucatán tiene las mismas características geológicas que los otros Estados que conforman la Península de Yucatán, 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.

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).

De acuerdo con las cartas geológico-mineras escala 1:250,000 editadas por el Servicio Geológico Mexicano, la traza del denominado anillo de cenotes Chicxulub se infiere con base a una serie de cenotes alineados, mismos que afectan principalmente a la formación Carrillo Puerto y que coinciden con la interpretación de lineamientos realizada por INEGI (1998). Sin embargo, 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, no obstante, 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.

PELIGROS POR FENOMENOS GEOLOGICOS.

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.

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.

VULCANISMO.

En el territorio del estado de Yucatán, no existen indicios de actividad volcánica ni productos volcánicos recientes que hayan afectado o puesto en riesgo a la población o a su infraestructura. Los registros indican que las estructuras volcánicas con actividad en los últimos 10,000 años, corresponden a los volcanes situados en el estado de Chiapas y en la república de Guatemala en los límites con México los cuales corresponden a los volcanes El Chichón y Tacaná localizados aproximadamente a 438 Km y 507 Km respectivamente (Figura 2).



Figura 2. Estructuras volcánicas más cercanas al estado de Yucatán, con actividad en los últimos 10,000 años.

Los productos volcánicos que pudieran afectar al Estado, se restringen únicamente a cenizas volcánicas, sin embargo, de acuerdo con la metodología de CENAPRED (2006) en el estado de Yucatán no existe peligro por este fenómeno. Cabe señalar que en los registros históricos de actividad del volcán más cercana (Chichónal), los depósitos de cenizas alcanzaron hasta 400 Km de distancia del edificio volcánico en dirección al estado de Yucatán dentro de la isopaca de 0.5 mm.

Por otra parte, los efectos del volcán Tacaná al encontrarse aun más alejado del estado de Yucatán son aun menos probables.

SISMICIDAD

El análisis de sismicidad se basa en la Regionalización Sísmica del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 1993), así como en la recopilación e interpretación de registros históricos de sismos obtenidos de la base de datos del Servicio Sismológico Nacional (SSN) y United States Geological Survey (USGS) periodos 1900-2013 y 1973-2013, respectivamente. Aunado a esto, se plasma la información del Programa de Peligro Sísmico en México (PSM), 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.

Con base al análisis e interpretación de lo anterior; el estado de Yucatán se ubica dentro de la zona "A" de la Regionalización Sísmica de CFE, donde registros históricos indican que no se han reportado sismos de gran intensidad y las aceleraciones del terreno se podrían esperar serían menores al 10% del valor de la gravedad (g). Los valores de aceleración máxima del terreno para el Estado son de 11, 27 y 45 Gal, correspondientes a periodos de retorno de 10, 100 y 500 años, respectivamente (PSM). Con base a lo descrito anteriormente, se espera un periodo de retorno de 10,000 años para que se presenten aceleraciones del terreno que generen movimientos perceptibles y daños considerables.

Dado que el estado de Yucatán se ubica en una zona tectónicamente estable no existen sismos, sin embargo, se han presentado algunos epicentros en zonas geográficas próximas al Estado, mismos que han registrado magnitudes bajas de 3.9 a 5.0 grados en escala de Richter (Figura 3).



Figura 3. Epicentros cerca del estado de Yucatán, los valores corresponden a su magnitud en la escala de Richter.

Lo anterior da pauta para asumir que en el Estado no se tienen evidencias de eventos tectónicos, sin embargo, dada la cercanía de algunos epicentros no excluye a la entidad de que se lleguen a percibir sismos originados en alguna otra región geográfica. De igual forma no impide la incidencia de pequeños movimientos telúricos de cobertura local, donde algunos de ellos podrían asociarse al colapso de cavidades kársticas dada las características geológicas de la región.

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA.

La estimación de la amenaza por Procesos de Remoción en Masa (PRM), todavía es una tarea ardua y que enfrenta una serie de problemas, como el alto grado de complejidad e incertidumbre que implica dicha estimación. 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 al favorecimiento del ambiente físico de los elementos inherentes como la geología, geomorfología, el uso del suelo, pendiente, y otros factores para potenciar deslizamientos.

El nivel de susceptibilidad, se realizó mediante el análisis multicriterio utilizando el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ). Este proceso incluye cinco variables donde se ponderó su peso, tomando en consideración su relativo impacto en términos de susceptibilidad a los PRM, con estos datos se obtuvo la Matriz de Comparaciones Pareadas de Variables.

El resultado fue la obtención de un mapa de susceptibilidad a los procesos de remoción en masa figura 4, 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”, en amarillo “bajo”, y en blanco “nulo”, que representan el 54.7, 32.9 y 12.4% respectivamente, de la zona de estudio.

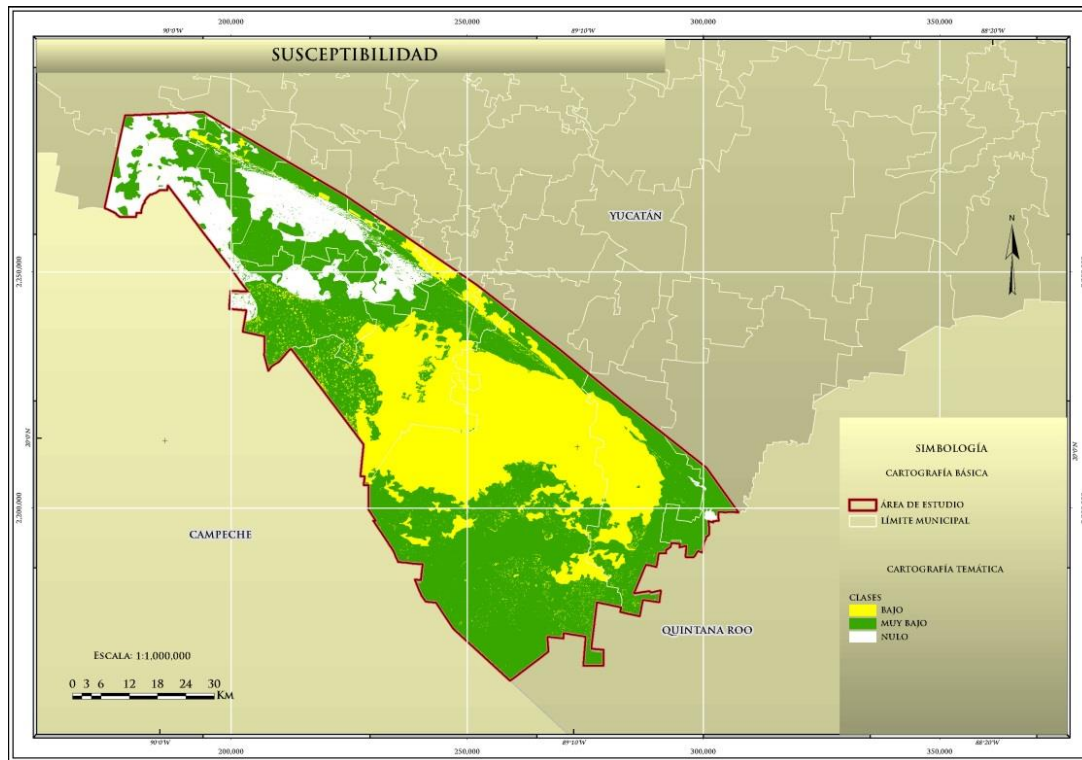


Figura 4. Mapa de susceptibilidad de la zona de estudio.

Del trabajo realizado se puede deducir que la mayor parte del territorio estatal son zonas planas pero al Sur se encuentra la Sierrita de Ticul, donde existen procesos de remoción en masa (PRM), que afectan a algunas vías de comunicación. Los principales procesos identificados son caídos de bloques y flujos, considerándolos como problemas aislados por deslizamientos. Con base en el análisis de datos obtenidos en campo y al cruce de información básica y temática con ayuda de un Sistema de Información Geográfica (SIG), se determinó que de los 39,524 Km² de la superficie total del Estado (Figura 5a), el 13.2% del territorio, se encuentra en posibilidades de tener PRM, en susceptibilidad baja el 5%, muy baja el 8.2%, y nula el 86.80% (Figura 5b). Esto debido a que los taludes y laderas que afectan los caminos son de hasta 8 m de altura, lo que provoca que los PRM sean de categorías bajas.

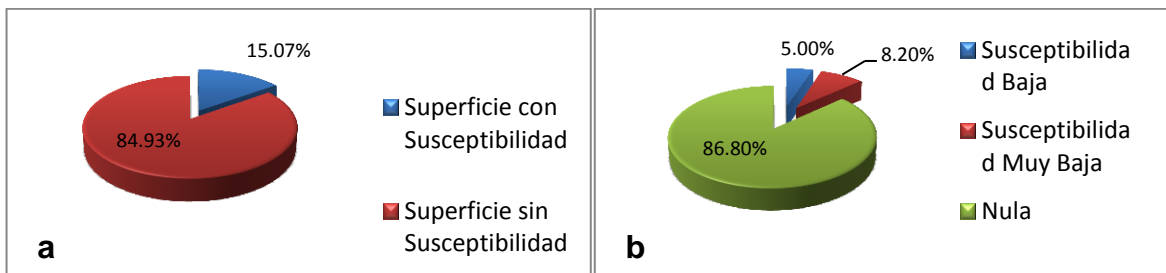


Figura 5. Superficie del territorio estatal con susceptibilidad por PRM (a) y porcentaje de superficies dentro de los dos niveles de susceptibilidad (b).

Por otra parte, para este nivel de información, también se obtuvo el mapa de amenaza por PRM, que es el resultado del cruce de información del mapa de susceptibilidad con la capas de infraestructura (manzanas, áreas urbanas, localidades y vías de comunicación), entendiéndose como amenaza la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural que puede generar daños en un sitio o región (Figura 6).

Las localidades urbanas que caen dentro de la zonificación de amenaza son: Halacho, Cepeda Peraza, 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.

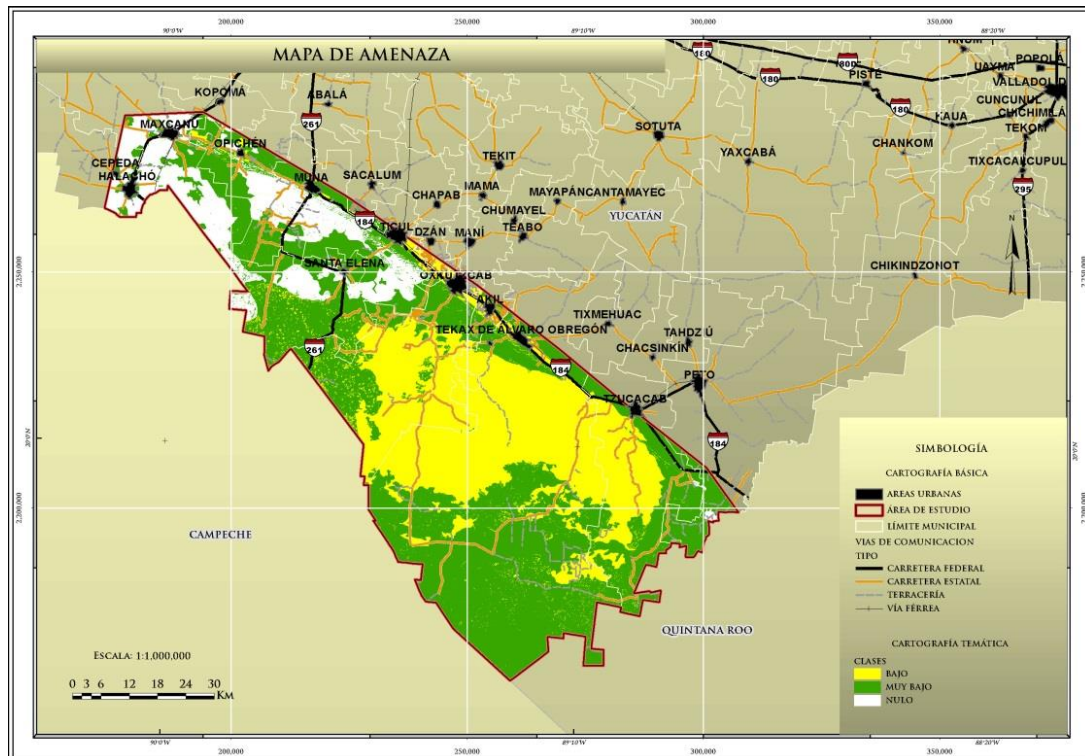


Figura 6. Mapa de Amenaza por PRM, donde se muestran las localidades y vías de acceso que pueden ser afectadas.

Lo que respecta con las vías de comunicación que son afectadas por PRM, en la zona de estudio se tienen 11,525.24 Km² a ser afectadas. Del cual 4,045.30 Km² se encuentran en susceptibilidad baja y 7,497.51 Km² en susceptibilidad muy baja.

HUNDIMIENTOS

El territorio del estado de Yucatán, geológicamente está constituido por rocas calcáreas principalmente. Aunado a condiciones hidrogeológicas e hidroquímicas, prevalece el desarrollo de procesos kársticos. Dicho término es referido a la disolución indirecta del carbonato de calcio contenido en las rocas solubles debido a la acción del agua cuando se infiltra y escurre por el interior del macizo rocoso, a través de las discontinuidades geológicas, disolviendo la roca y creando una red de galerías y sistemas hidrológicos subterráneo. Se manifiesta en superficie a través de estructuras denominadas dolinas y cenotes (dolinas con agua), asociadas con hundimiento gradual y colapso repentino del terreno; de las cuales se obtuvo el registro de aproximadamente 10,000 estructuras, con base en el análisis e interpretación de cartas topográficas escala 1:50,000 de INEGI, imágenes de satélite y registros de cenotes (CINVESTAV-SEDUMA)

La metodología propuesta para el análisis de susceptibilidad por hundimientos en el estado de Yucatán, se basó principalmente en el análisis bibliocartográfico, casos de estudio a nivel mundial, disponibilidad de datos y escala de trabajo; posteriormente se realizó la integración de niveles de información referente a mapas temáticos (fallas y fracturas, geología, densidad de dolinas, agresividad del agua y espesor de suelos). Como resultado se obtuvo el mapa de zonificación del grado de susceptibilidad por hundimiento (Figura 7), en el cual se determinaron 5 clases o grados de susceptibilidad (muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo). Las zonas con susceptibilidad muy alta y alta (color rojo y naranja respectivamente) se distribuyen principalmente en el Centro y Noreste del territorio del Estado, coincidiendo con áreas de 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.

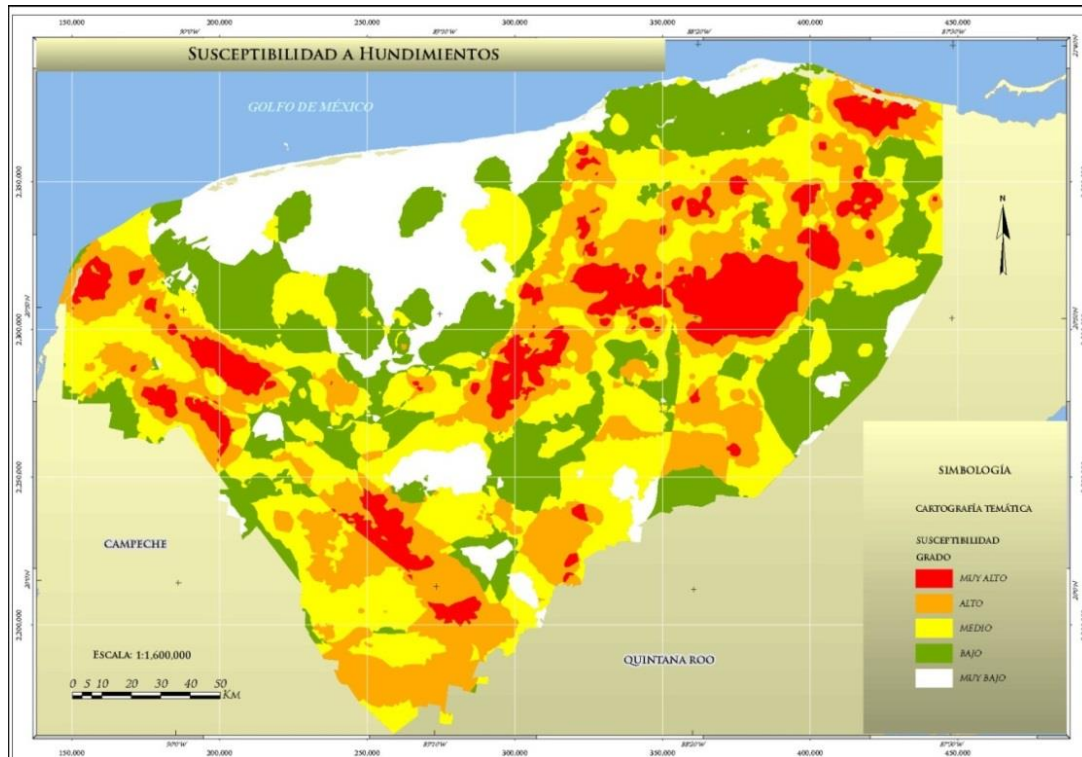


Figura 7. Mapa de susceptibilidad a hundimiento del terreno en el estado de Yucatán.

Con base en el resultado del plano de susceptibilidad de hundimientos se obtuvo el área y el porcentaje de los diferentes grados de susceptibilidad con respecto a la superficie estatal; apoyados con un Sistema de Información Geográfica (SIG), se estimó que aproximadamente el 8.78% (3,446 Km²), del territorio presenta susceptibilidad muy alta, mientras que áreas con susceptibilidad alta a media representan el 23.78% (9,336 Km²) y 29.30% (11,503 Km²) respectivamente (Figura 8 a, b).

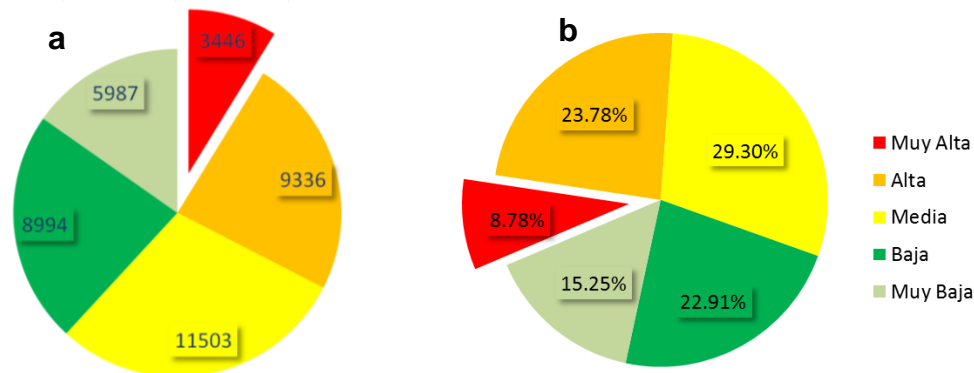


Figura 8. a) Áreas (Km²) estimadas dentro de los diferentes grados de susceptibilidad y b) porcentaje de área correspondiente en el territorio del estado de Yucatán.

A partir del cruce de información entre el mapa de susceptibilidad y la infraestructura urbana (áreas urbanas, vialidades federales y estatales) se generaron los mapas de amenaza respectivos.

En el mapa de amenaza de áreas urbanas (localidades con más de 2,500 habitantes) (Figura 9) destacan las poblaciones de Cenotillo, Dzitas, Quintana Roo, Temozón, Calotmul, Sucila, Sotuta, Oxkutzcab, Akil, Tekax, Kompoma y Maxcanu destacan en el grado muy alto. En cuanto al área involucrada en los grados de amenaza a áreas urbanas, se encuentran Tekax de Álvaro Obregón, Akil, Cenotillo, Calotmul y Temozón con superficies mayores a 2 Km² dentro del grado muy alto; por otro lado, la ciudad de Mérida se

destaca por presentar la mayor superficie involucrada (57 Km²) en el grado medio, seguida por Kanasin, Ticul y Halacho con 15, 10 y 8 Km² respectivamente.

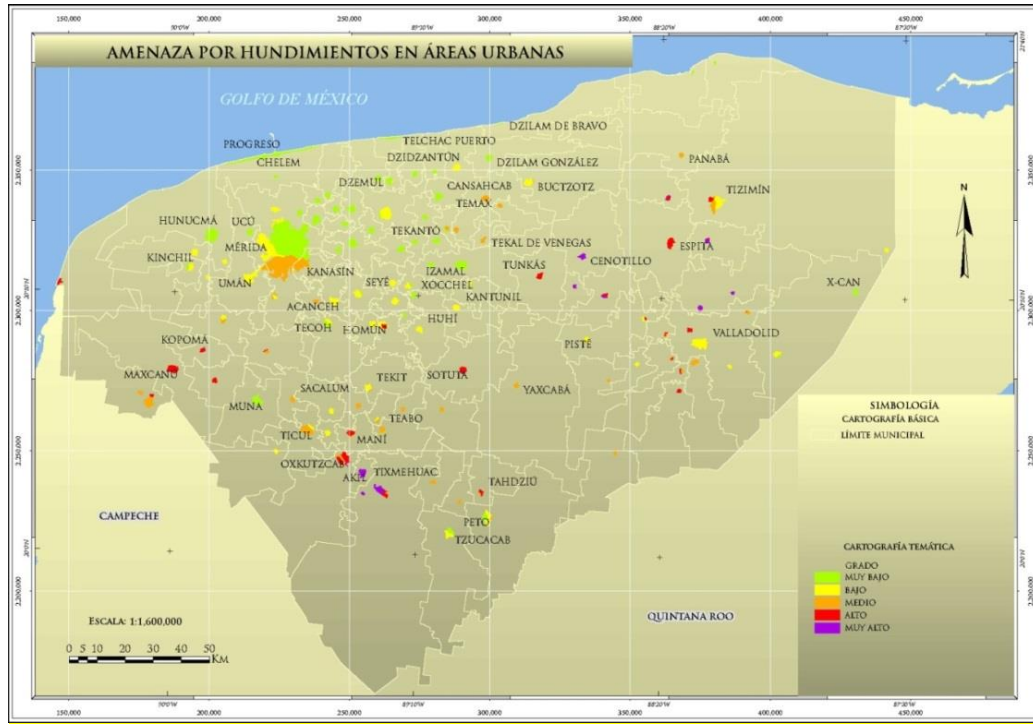


Figura 9. Mapa de amenaza por hundimiento en áreas urbanas.

Del mismo modo, con respecto a la infraestructura vial, de los 1,556 Km de carreteras federales 90 Km (5.78%) se consideran en amenaza muy alta mientras que 247 Km y 313 Km corresponden amenaza alta a media respectivamente (Figura 10).

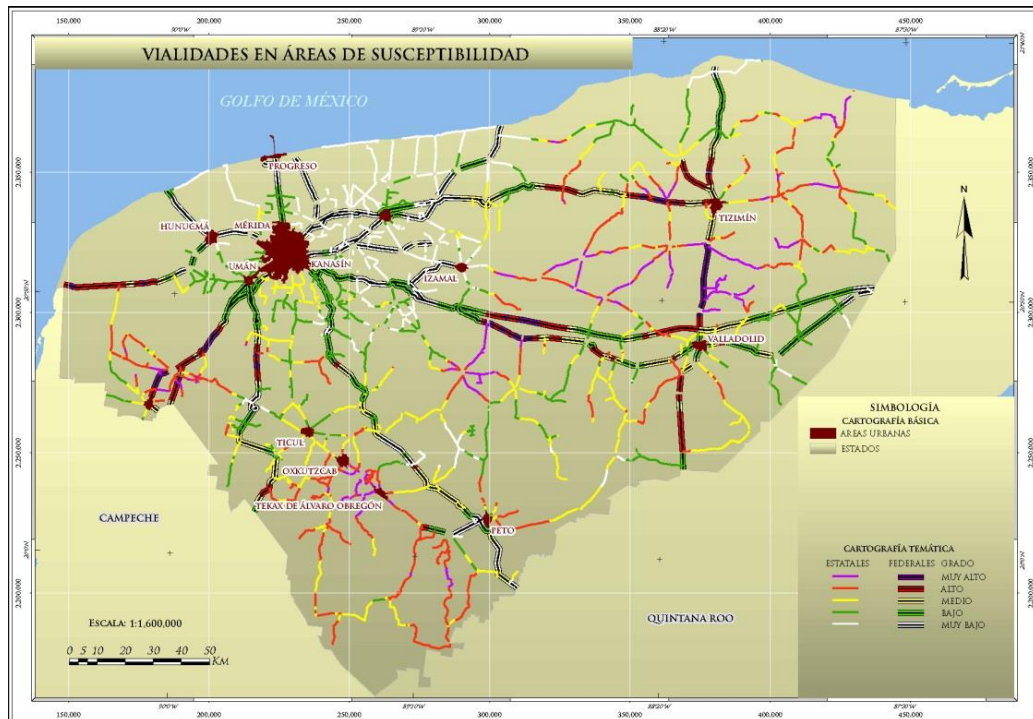


Figura 10. Mapa de amenaza por hundimientos en vialidades federales y estatales.

El costo total por afectación de amenaza de hundimientos en tramos carreteros es de \$33´157,623.00 pesos, de un total de 1,556 Km de vías federales 90 Km se encuentra en amenaza muy alta, alta 247 Km, media 313 Km, baja 516 Km y muy baja el 390 Km restante.

Por otra parte, con respecto a las Carreteras Estatales (Figura 10) y su relación con las áreas de susceptibilidad a hundimientos se tiene lo siguiente: De los 3933 Km², solo 338 Km² 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 y 1072 Km asociados respectivamente. Dando un costo total por afectación en vías de comunicación expuestas al grado de amenaza por hundimientos de aproximadamente \$9´648,013.00 pesos.

FENOMENOS HIDROMETEOROLOGICOS.

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 son: ciclones tropicales, tormentas, heladas, nevadas, granizadas, inundaciones, tornados, sequía, temperaturas extremas, erosión y entre otras consecuencias como la marea de tormenta. La importancia de abordar este tipo de fenómenos es debido a la ubicación geográfica del Estado y su orografía con respecto a la constante incidencia de estos y los efectos adversos que pueden causar hacia la población, la infraestructura, bienes y el medio,

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.

CLIMATOLOGIA

Para el desarrollo de este apartado se recopilaron los datos de estaciones meteorológicas de 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).

En el Estado existen 92 estaciones meteorológicas, de las cuales 17 estaciones cumplen con los criterios que marca la Organización Mundial Meteorológica (OMM). Cabe mencionar que esta información debe contar un periodo mayor a 30 años, que es más del límite mínimo inferior representativo de cada estación, así mismo no debe tener faltantes de 3 años consecutivos y por último, es necesario que la información de cada estación tenga más del 80% de datos.

Para tener una mejor cobertura se incluyeron 5 datos de los estados colindantes (Campeche y Quintana Roo) y se verificó que se tuviera una cobertura suficiente con las 21 estaciones analizadas, además se realizaron buffers tomando como base la categorización que hace la Organización Mundial Meteorológica (OMM) para determinar la superficie de influencia de cada una de ellas (Figura 11).

Las variables analizadas en este capítulo fueron: Temperatura Máxima, Temperatura Media, Temperatura Mínima, Precipitación, Días con Tormenta de lluvia y Días con Granizo

Para el presente estudio se utilizó el método de interpolación de la Media Ponderada por el Inverso de la Distancia (IDW) con Arc GIS, que es el que mejor se ajusta a la configuración de cada variable, ya que toma el dato puntual y en base a este realiza el cálculo necesario. Los resultados de cada variable analizada se describen brevemente más adelante.

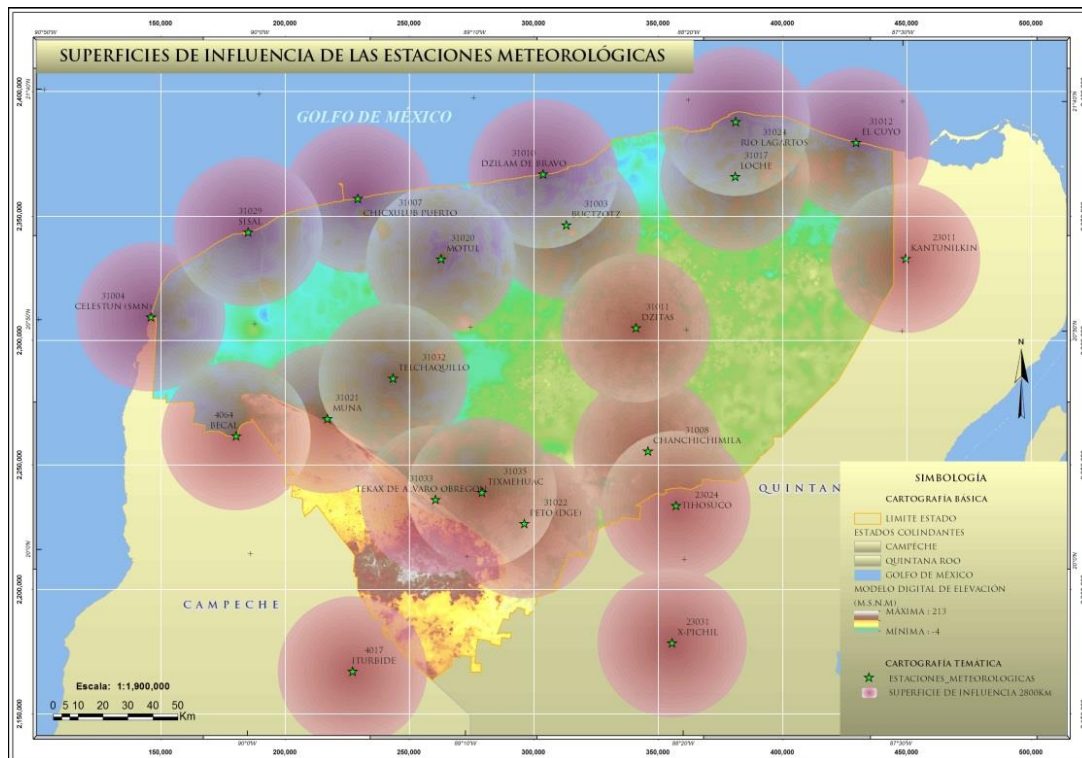


Figura 11. Superficies de influencia estaciones meteorológicas.

Temperatura Máxima

Históricamente la temperatura más alta para el estado de Yucatán, fue la reportada en la Estación Pisté (con clave 31088) del municipio de Tinum, con 49.6 °C registrada el día 21 de mayo de 1995, la temperatura máxima promedio anual osciló entre los 41.5 y 46°C (Figura 12a). Para el parámetro de la Temperatura máxima se tiene una amplitud térmica de aproximadamente 6°C con registros que van desde los 41.5 a los 46°C

Temperatura Mínima

Históricamente la temperatura más baja reportada en el estado de Yucatán fue en San Diego Buenavista (estación 31085), municipio de Tekax con 0.5°C durante dos días consecutivos, el 17 y 18 de diciembre de 1996 (Figura 12b). La mayor parte del estado ha presentado temperaturas mínimas de hasta 10°C (tonos azules). En la región del Centro las temperaturas mínimas son de hasta 2°C (tonos verdes). 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

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 12c). La temperatura promedio tiene poca 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. 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.

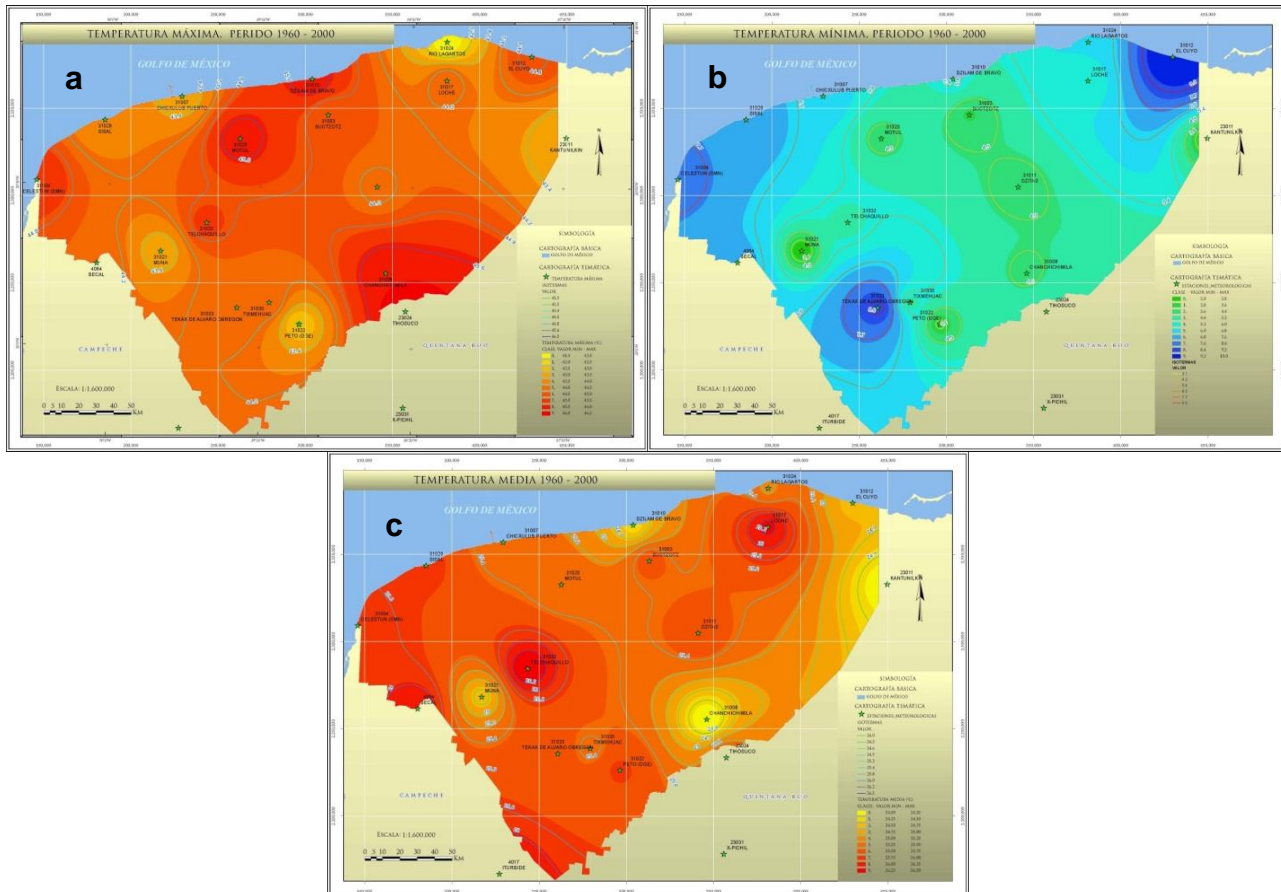


Figura 12. a) Distribución de los valores registrados de temperatura máxima. b) Distribución de las temperaturas mínimas registradas en 40 años (1960-2000). c) Distribución de las temperaturas medias registradas en 40 años (1960-2000).

Precipitación

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.

En la Figura 13a se muestran rangos de 500 a 700 mm, hacia la llanura costera, al Noroeste del Estado; rango de mayor precipitación hacia el Sur de 1,000 a 1,200 mm, de 700 a 1,000 mm en la porción central del Estado organizado de manera diagonal, de Noreste a Suroeste. El promedio de la precipitación acumulada anual es de 908 mm, el valor de la mínima de este promedio es de 512 mm, mientras que la máxima dentro del Estado es de 1179 mm.

Del análisis estadístico de los valores de precipitaciones (lluvias), se aprecia que la temporada de lluvias para Yucatán es de mayo a octubre.

Días con Granizo

Para el Estado durante los 40 años tomados en cuenta, se tiene que los meses de abril, mayo y junio son los que registraron más eventos de granizada, entre 2 y 4 días en promedio, reportándose en total 19 días con granizo para el Estado.

Días con Tormenta

De los 40 años analizados, en total se registraron 1,555 tormentas de lluvia, al año se reportaron en promedio 39 tormentas, 8 por mes, con un periodo de ocurrencia de junio a octubre.

Del análisis de los Climogramas generados donde se comparan las precipitaciones contra la temperatura media, se obtuvo que para el Estado predomina 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, las precipitaciones son elevadas pero hay meses secos por lo tanto es tropical.

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, siendo el componente principal el de lluvia convectiva. Por otra parte, cabe mencionar que la Península es recorrida por los frentes fríos, los cuales si están saturados de humedad, se denominan "Nortes" y éstos depositan lluvia.

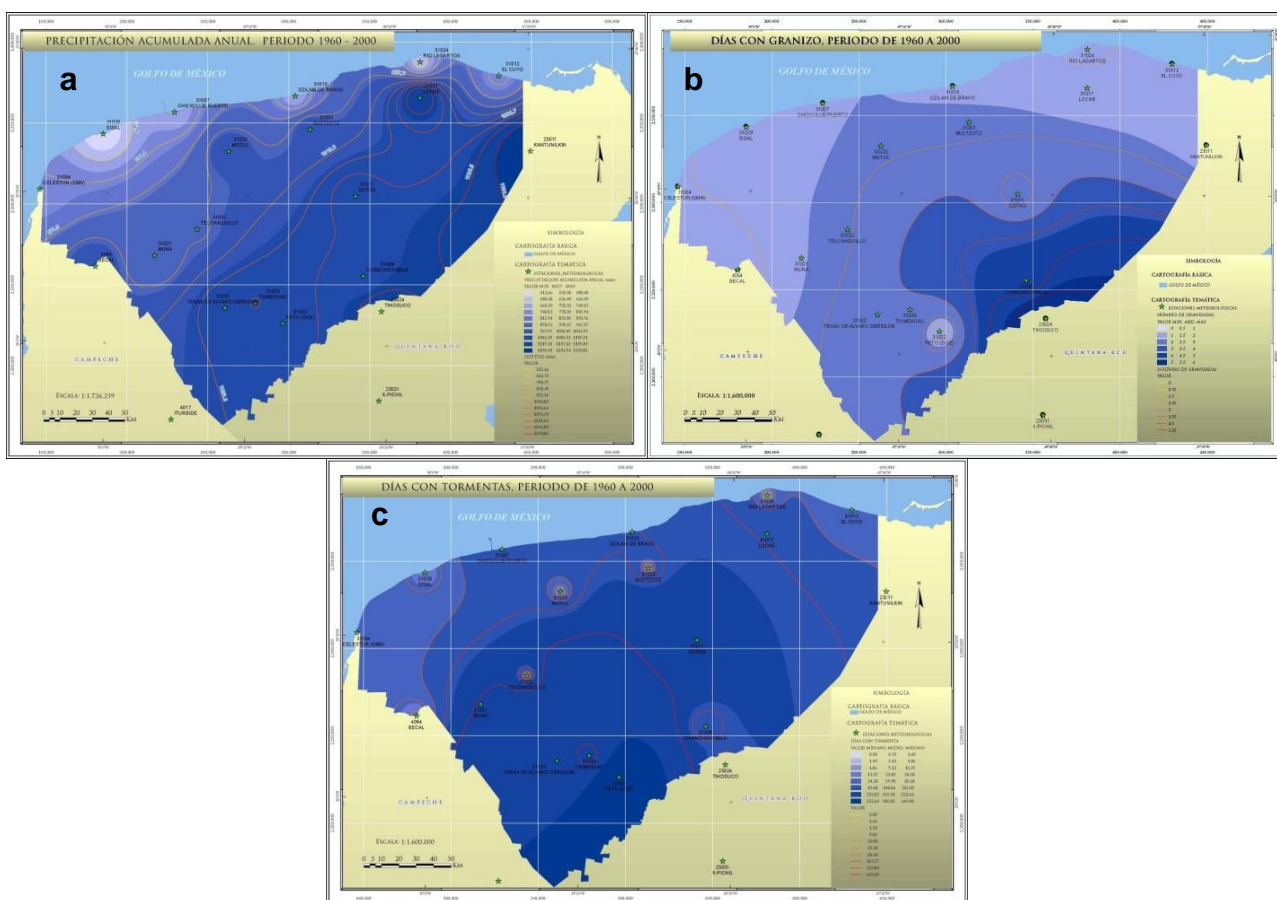


Figura 13. a) Distribución de la precipitación registrada en el periodo de 1960 al 2000. b) Distribución de la ocurrencia de Granizadas en Yucatán. Periodo 1960-2000. c) Distribución de la ocurrencia de Tormentas en Yucatán. Periodo 1960-2000.

VIENTOS

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, ocasionando con ello el lanzamiento de proyectiles y problemas asociados al riesgo por impacto directo.

En el presente trabajo se realizó un análisis general de la acción de los vientos, su intensidad, duración y periodicidad, 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.

Para este apartado se generaron una serie de mapas vectoriales de flujo de viento que son el producto de la simplificación del modelo de Rosa de Vientos, que 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. Estos mapas se generaron con información de las estaciones comprendidas desde enero del 2000 a diciembre del 2010 de seis estaciones climatológicas que son Celestún, Ría Lagarto y Tantakin, y periodos de observación de la temporada de Nortes (enero a abril y de noviembre a diciembre) y de Ciclones (mayo a octubre).

Para la Temporada de Ciclones se deduce que los flujos del cuadrante Norte al Este son más intensos en la costa y existe en el borde al Este del estado de Yucatán (Figura 14), 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 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.

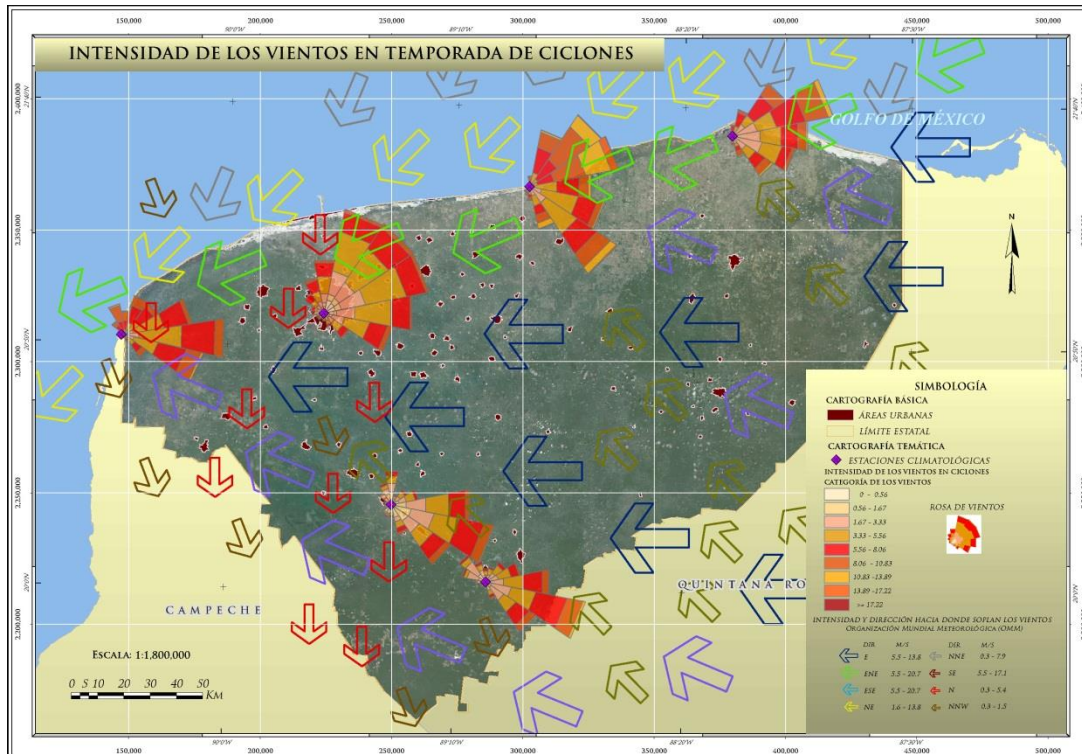


Figura 14.- Flujo vectorial (predominante) del viento en temporada de ciclones.

El cálculo también incluyó una estimación promedio de los máximos y mínimos que se manejan en la Rosa de Vientos y que está ligado a la dirección del flujo del viento en esta temporada. El programa, utilizado para este análisis 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.

Con respecto a 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 15).

En la temporada de Nortes, se pierde un poco el efecto de la predominancia de los vientos alisios del este franco y también disminuye la fuerza con la que entran en tierra firme desde el litoral de Quintana Roo, en su lugar vientos provenientes del Noreste que atraviesan Yucatán dan un ligero giro hacia la costa de Campeche y Tabasco.

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 NW y en sentido de las manecillas del reloj hasta el NE muestra la influencia de los frentes fríos en el litoral.

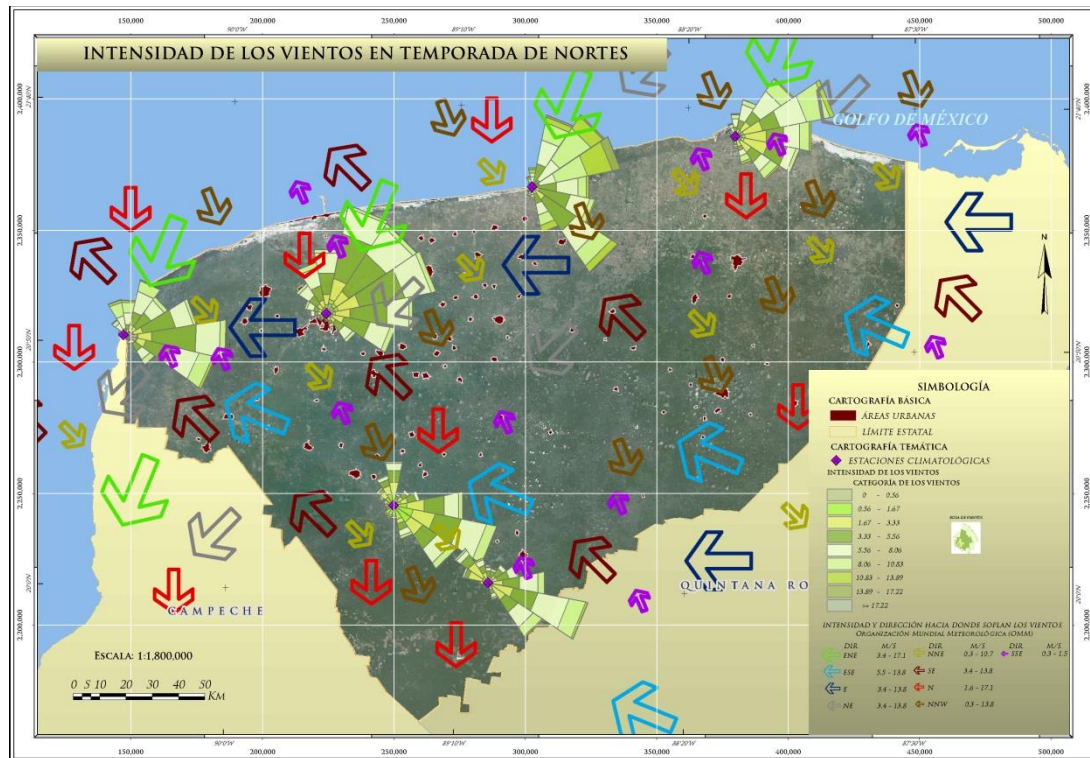


Figura 15. Flujo vectorial (predominante) del viento en temporada de Nortes.

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.

EROSIÓN

Se elaboró el mapa de susceptibilidad por erosión hídrica, en el estado de Yucatán; Para lo cual, se propuso la metodología del Servicio Geológico Mexicano en el marco de elaboración del Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales de la entidad; se utilizaron mapas base y temáticos, asociados a factores que pueden condicionar o acelerar los procesos erosivos, tomando en cuenta las alteraciones antrópicas y las condiciones “naturales” del territorio Estatal. Para ello se consideraron los siguientes parámetros: pendiente del terreno, cubierta vegetal, precipitación, litología, clima, uso y manejo de suelo; espesor del horizonte O y profundidad de suelo; los cuales fueron analizados mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG). Los resultados obtenidos mediante el cruce de información de los mapas de los parámetros mencionados 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 (Figura 16).

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.

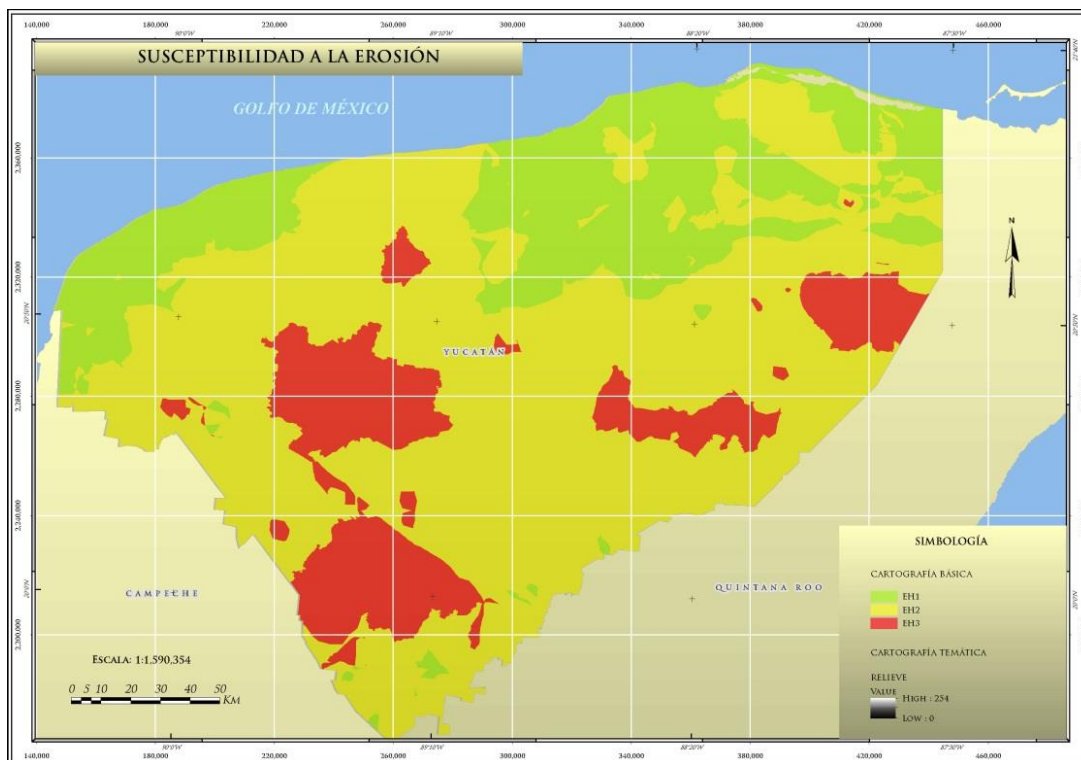


Figura 16. Grado de erosión actual en el estado de Yucatán.

A través 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; 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 y VI son las que más t/ha pierden anualmente 4.58 y 3.36 (Figura 17).

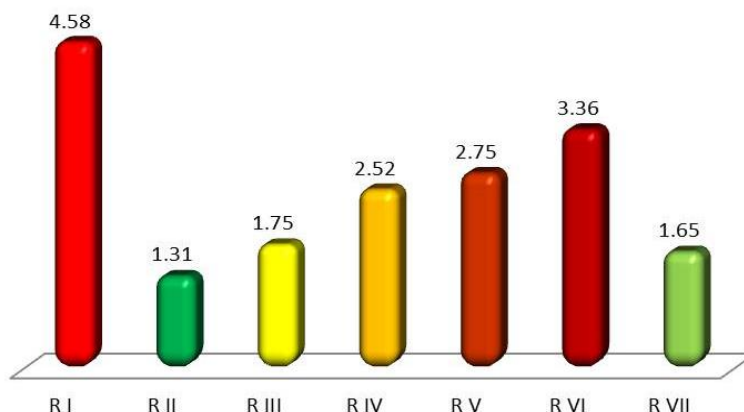


Figura 17.- Numero de toneladas de suelo que se pierden anualmente por hectárea.

De los 12 tipos de suelo que existen, los Leptosoles y Arenosoles son los más propensos a erosionarse principalmente en la zona Norte; 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.

La diferenciación de las unidades homogéneas, se ven influenciadas principalmente en suelos poco susceptibles como los Cambisoles y Nitosoles 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.

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. El cono Sur a pesar de ser una de las zonas más degradadas es donde menos toneladas de suelo por hectárea se pierde anualmente junto con la región III, debido a que es una zona de acumulación de sedimentos donde los suelos alcanzan más de un metro de profundidad. 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.

EROSIÓN COSTERA

En cuanto a este nivel de información 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. A cada una de las variables se les asigno 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 un 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. La combinación de los factores ambientales antes descritos generan zonas de susceptibilidad por erosión costera la cual se clasifico en baja, media, alta y muy alta, como se muestra en la Figura 16.

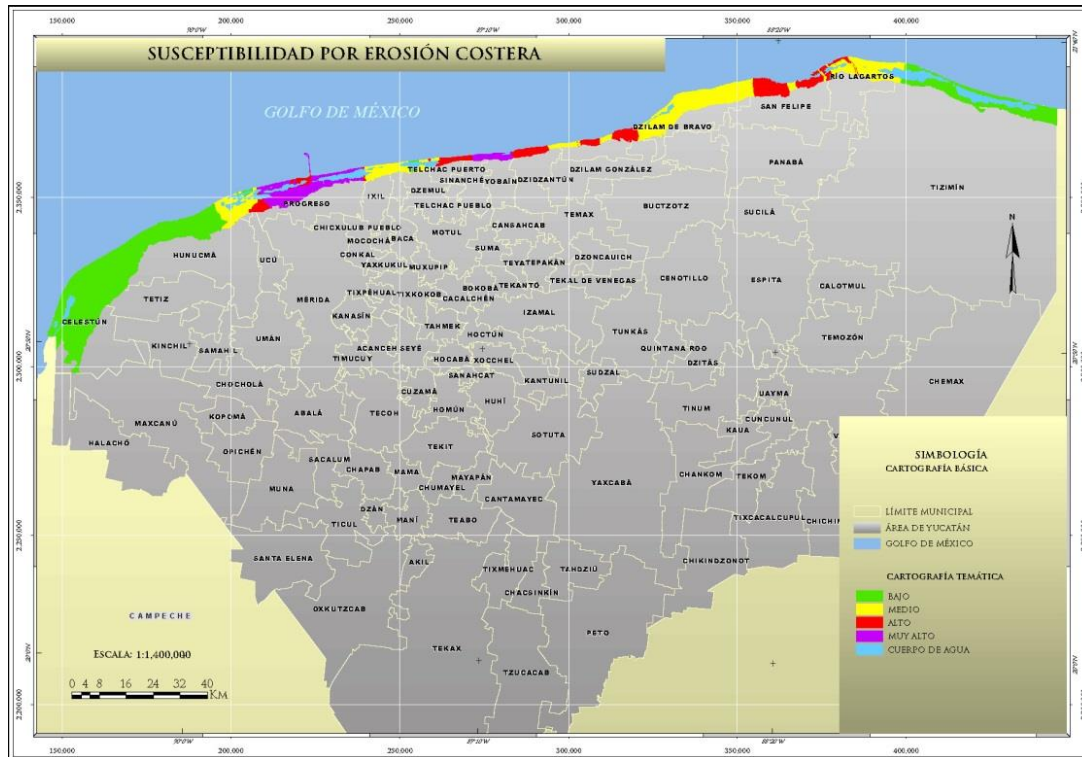


Figura 16. Susceptibilidad de la línea de costa en el estado de Yucatán.

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 costera, 104 Km con susceptibilidad media (color amarillo) 30.43%, 77 Km presenta susceptibilidad alta principalmente al Oeste equivalente al 22.51% de la misma y por último, la susceptibilidad muy alta se presenta en la parte Centro y Poniente con 37 Km afectados que representan el 10.81% del litoral (Figura 17).

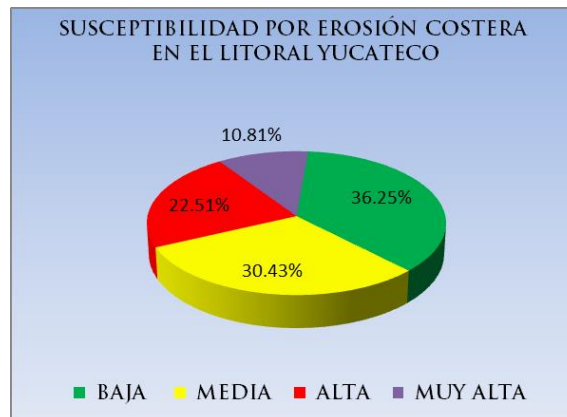


Figura 17.- El 33.332% del total de la línea de costa presenta susceptibilidad alta a muy alta.

El área con mayor probabilidad a ser afectada se encuentra en las localidades de Chuburná, Chelém, Yucalpetén, Puerto Progreso, Chicxulub Puerto, San Crisanto, Las Gaviotas, El Porvenir y Santa Clara, las prospecciones realizadas en campo confirman esta situación, ya que efectivamente es allí donde se encuentra la mayor problemática de erosión costera en el Estado. Derivado de ello se observó que además los habitantes de estas localidades, construyen obras de mitigación como espolones, diques y/o geotubos para tratar de conservar el frente de playa de sus viviendas, ya que la problemática en esta zona se intensificó cuando se construyeron los Puertos de Altura en Progreso y el de Abrigo en Yucalpetén. Cabe mencionar que estas obras de mitigación si benefician la conservación del ancho en la playa, pero también es cierto que erosionan de manera considerable el lado contiguo, provocando un desequilibrio en la evolución y dinámica en la costa.

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.

Derivado de lo anterior se recomienda realizar un estudio más detallado del fenómeno de 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 (S.I.G.), 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., además de 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.

INUNDACION

En el estado de Yucatán se presentan inundaciones a pesar de tener características físicas particulares como: suelo cárstico (muy permeable) y topografía plana, que en consecuencia le es atribuible la ausencia de ríos, no por ende como sabemos la entidad ha sido afectada por inundaciones provocadas por ciclones tropicales tales como Hilda, Janet, Beulah, Gilbert e Isidore entre otros. En el estudio de “Diagnostico de Riesgo por Inundación para la Ciudad de Campeche” (2005), se expone un caso que se asemeja a algunas condiciones físicas de la zona Sur del Estado, en el cual se realiza un análisis de infiltración-escurrimiento, dicho trabajo resulta de gran utilidad para valorar las características físicas del suelo Yucateco. Sin embargo, el estado de Yucatán consta de sus propias características físicas por lo que en este trabajo se adaptó una metodología específica que se adecua a la información disponible y en relación a las particularidades de la Entidad.

Durante la etapa de verificación en campo se evaluaron los sitios que fueron señalados por cartografía de estudios previos al presente trabajo, también se consideraron sitios que son reportados por el departamento de emergencias de CONAGUA, Protección Civil Estatal y Municipal así como reportados en notas periodísticas. Finalmente, se obtuvieron en total 287 sitios, de estos puntos 181 corresponden a inundación por acumulación, 90 para encharcamientos y 16 para marea de tormenta. Todos estos puntos verificados se distribuyen en 48 cartas topografías 1:50,000.

Para la descripción de los puntos 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 “Sierra de Ticul” la cual se presentan inundaciones por acumulación en zonas bajas, sin embargo cabe aclarar que dichas zonas no son exclusivas de un solo tipo de inundación.

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. El total de puntos verificados en campo para esta zona fue de 28 puntos distribuidos a lo largo de la línea costera

En la Zona plana, debido a las condiciones planas del terreno y a que no hay corrientes superficiales de agua, sólo se abordaron en esta zona inundaciones pluviales que se dividen en encharcamientos e inundación por acumulación en zonas bajas. Esta es la zona más extensa, abarca el 83% del territorio estatal, que corresponde a 32,777.2 Km² y se distribuye parcial o totalmente en todos los municipios a excepción de Santa Elena. En general se presentan encharcamientos en zonas urbanas, causado

principalmente por fallas en el drenaje, modificación del micro-relieve, recubrimiento del suelo por carpeta asfáltica impermeable, entre otros. Los eventos que fueron detectados se presentan de manera puntual dentro de las localidades y no tienen grandes extensiones.

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. Es importante mencionar que no todas las cuencas que existen en la zona son inundables, sin embargo existe un número considerable de cuencas de este tipo, donde existen varios asentamientos humanos que son afectados durante temporadas de lluvias normales y/o extraordinarias.

La localidad X-Cunchaca ubicada a una altitud de 73 msnm. Corresponde a una localidad pequeña que cuenta con 20 habitantes distribuidos en 4 viviendas. En esta localidad por ejemplo, sufrió inundación durante el paso del huracán Isidoro. En este sitio el nivel del agua subió hasta alcanzar el nivel de 8 metros, tardándose 3 meses en bajar.

Por otra parte, se realizó el análisis de siete variables que favorecen los procesos de inundaciones pluviales. Dichos parámetros describen las características físicas del territorio Yucateco, como son las condiciones del relieve que fueron procesadas a partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de la Península, que fue retomado del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) del INEGI, se calcularon pendientes del terreno y zonas planas acumulativas. El coeficiente de escorrentía también fue extraído de dicha institución, mientras que valores de permeabilidad de roca, infiltración, espesor de suelo fueron calculados en el presente estudio.

Estos parámetros fueron considerados en la evaluación final del estado y cada uno de ellos representó un valor numérico que fue tomado en cuenta para que el área en cuestión quede clasificada en zona de susceptibilidad muy baja, baja, media, alta y/o muy alta. De esta manera las zonas de alta y muy alta susceptibilidad a la inundación pluvial corresponden en general a la Sierra de Ticul (Figura 18).

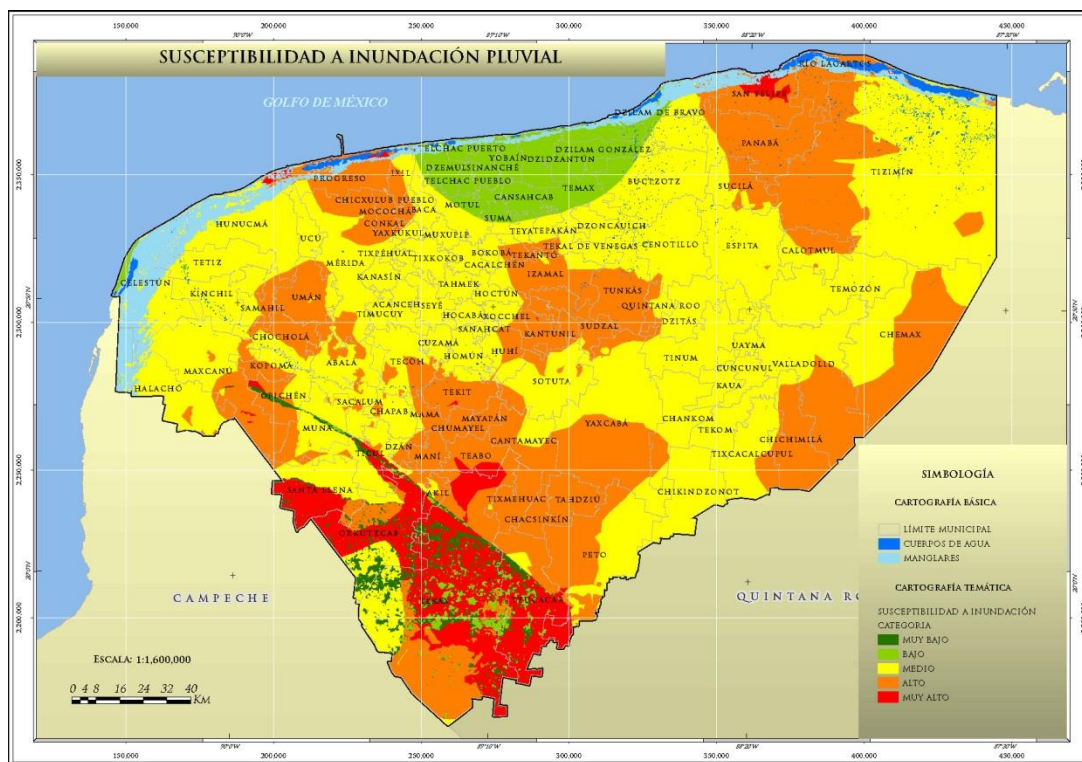


Figura 18. Mapa de susceptibilidad del terreno por inundaciones pluviales.

Finalmente debe quedar claro, que las inundaciones en el Estado no son fenómenos ajenos a este y que siempre se deben de tener en consideración a la hora planificar el desarrollo tanto de infraestructura como económico y social.

CICLONES TROPICALES

Los ciclones Tropicales son eventos hidrometeorológicos que generan pérdidas humanas y económicas en el Estado, y a su vez desencadenan problemas severos en materia de peligros naturales. Para este trabajo en particular, se realizó un análisis estadístico basado en la información histórica, a partir del cual se obtuvieron mapas que ejemplifican la frecuencia e incidencia exclusiva de los ciclones para el estado de Yucatán.

La determinación de zonificación de frecuencia por ciclones tropicales, como ya se mencionó antes, se basó en el análisis de bases de datos históricos y estadísticos de ciclones tropicales de acuerdo al Programa de computo "Busca Ciclones" generado por CENAPRED (registro de 1851 al 2010), posteriormente se acotó un área de 100 Km para el análisis en el estado de Yucatán con base al semáforo de alerta Sistema de alerta temprana para ciclones tropicales (SIAT CT) generada por CENAPRED (Figura 19).

El análisis se realizó de acuerdo a las categorías Saffir-Simpson (Depresión tropical, tormenta tropical, huracán categoría 1, 2, 3, 4 y 5) y los Periodos de tiempos (1881-1890, 1891-1900, 1931-1940, 1951-1960, 1961-1970, 1971-1980, 1991-2000 y 2001-2010.).

Análisis de trayectoria de huracanes en el área de Yucatán

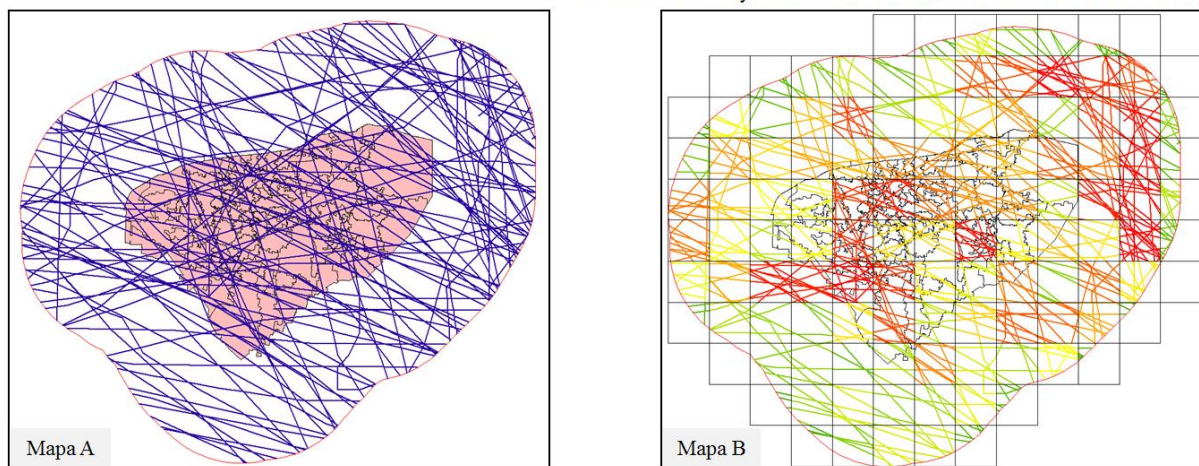


Figura 19. Mapa A) Se efectuó el análisis para todas las trayectorias localizadas en el área propuesta. Mapa B) Se realizó la frecuencia por el número de trayectorias y longitud total de cada celda de 40 x 40 Km.

Basándose en Interpolaciones de trayectorias y cuadrícula de afectación (Figura 20c), se obtuvieron los mapas de frecuencia por categoría y por periodo de tiempo, asignándose niveles de frecuencia para cada mapa realizado (Frecuencia muy alta, alta y media). Cabe mencionar, que estos mapas servirán de apoyo para otros fenómenos en temas hidrometeorológicos ocurrientes en el estado, como por ejemplo, precipitaciones, inundación, mareas de tormenta, sequías, incendios.

Análisis de trayectoria de huracanes en el área de Yucatán

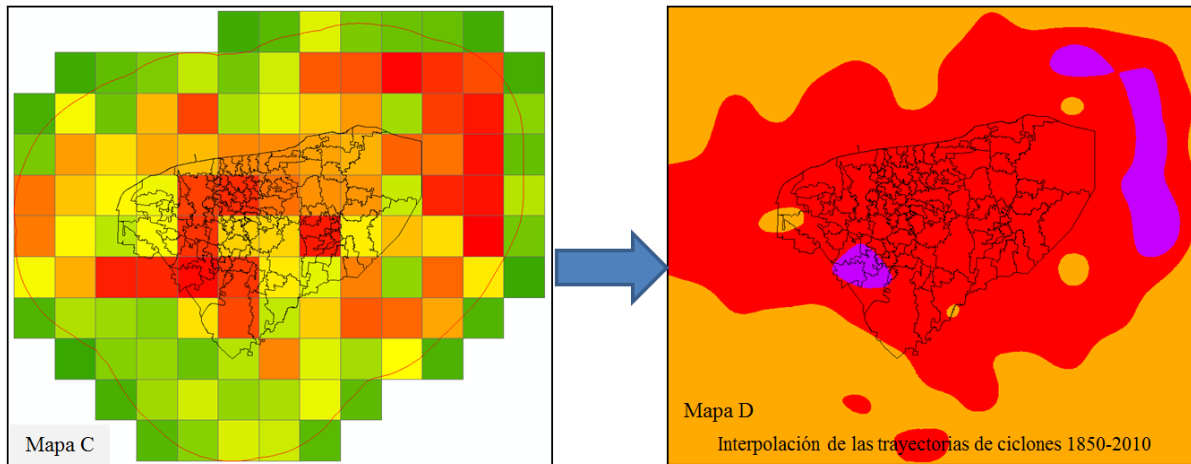


Figura 20. Mapa C: Se determinó el mapa de frecuencia de cada celda, considerando trayectoria y longitud. D) Se realizan mapas de interpolación para determinar áreas más propensas, para cada una de las categorías según la escala de huracanes Saffir-Simpson y por periodos de tiempo.

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 desarrollo de periodos 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, donde se interpolaron 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 (T_r) se utilizó la hoja de cálculo proporcionada por el CENAPRED “Cálculo de T_r de Ciclones 2005 V2.2”, donde se alimentaron la probabilidad de ocurrencia y el número total de ciclones que cruzaron el área de interés y los cuales comprenden un periodo de tiempo que va del año 1851 al 2005 (155 años).

El análisis y cálculo para los periodos de retorno de las áreas urbanas Mérida, Tizimín, Valladolid y Oxkutzcab se basó en la información de los mapas de probabilidad de ocurrencia y del mapa de eventos para ciclones tropicales proporcionados por el CENAPRED. 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.

En conclusión el estado de Yucatán es propenso a sufrir embates constantes de ciclones tropicales, debido a la ubicación geográfica en la que se encuentra y por contar con ciertas condiciones de formación en el Océano Atlántico, mismas que dependen de al menos tres características: Un disturbio atmosférico preexistente (Onda Tropical) con tormentas embebidas en el mismo; temperaturas oceánicas cálidas de 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 cambian 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. Donde de los 107 eventos los de mayor recurrencia 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 se ha originado principalmente en 67 ocasiones en el Mar del Caribe y 24 en la parte central de Océano Atlántico Norte, el resto se ha distribuido en las cercanías del Estado.

MAREA DE TORMENTA

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

Con el objetivo de determinar la posible altura de marea que se alcanzaría, las zonas urbanas consideradas fueron: Río Lagartos, Dzilám de Bravo, Telchac Puerto, Chuburná, Chelem, Progreso, Chicxulub, Chelem, Chuburná, Celestún; y dos localidades: Sisal y El Cuyo. Para su determinación se tomaron en cuenta 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. También se determinó el área de peligro delimitada entre la línea de costa y la cota uno obtenida del modelo digital de elevación (Figura 21).

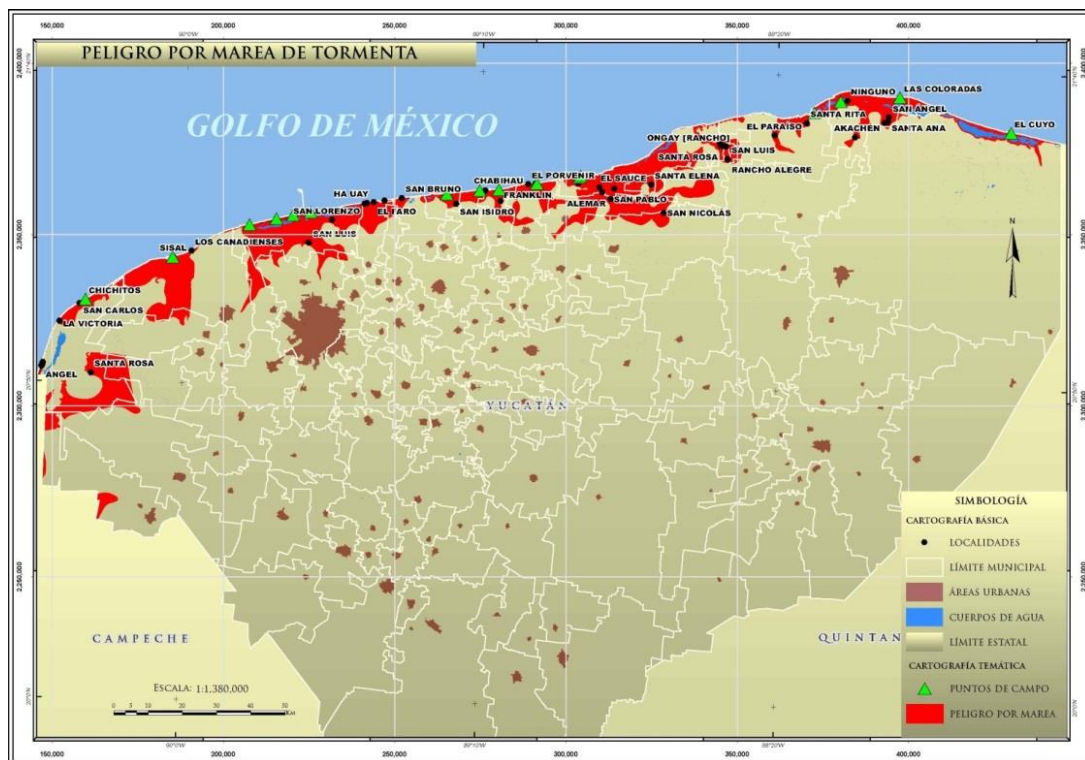


Figura 21. Mapa de peligro por el fenómeno de marea de tormenta.

Para el desarrollo del tema, se analizaron las áreas urbanas de Río Lagartos, Dzilám de Bravo, Telchac Puerto, Chuburná, Chelem, Progreso, Chicxulub, Chelem, Chuburná, Celestún; y dos localidades:

Sisal y El Cuyo; en estas regiones se realizó el cálculo con base a valores de tablas y mapas del CENAPRED para determinar los parámetros necesarios y utilizar la expresión anteriormente descrita para obtener la altura de la marea de tormenta.

En conclusión se obtuvo que debido a su ubicación geográfica, en el Estado se presentan fenómenos ciclónicos, los cuales pueden generar mareas de tormenta que afecten la costa, sin embargo, en recientes eventos que impactaron severamente el Estado como el huracán Emily, en 2005 se alcanzó una altura de marea promedio de 1.5 m, en Progreso el registro fue de medio metro, mientras que con el huracán Willma la marea de tormenta alcanzó 1.5 m, registrando medio metro de altura en Río Lagartos.

De acuerdo al análisis realizado tomando como base las curvas de nivel del modelo digital de elevación, se obtuvo que en la porción occidente del Estado se tiene un área de 272 Km² en peligro por el fenómeno de marea de tormenta, mientras que en la costa Norte un área de 1634 Km².

Dentro de la zonificación resultante se ubican 62 localidades, teniendo una población total de 70,257 habitantes en 32,876 viviendas que en su mayoría cuentan 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 se alcanzaría una altura máxima de marea de tormenta de 3.8 metros.

SEQUÍAS

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. Se define 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.

Para el desarrollo del tema de Sequía, se tomó 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 utilizaron las bases de datos de la Comisión Nacional del Agua, de estaciones meteorológicas correspondientes a los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo.

Por medio de un análisis estadístico, se obtuvieron los mapas representativos que comprenden a todo el estado de Yucatán, tomando las series de años de 1960-1990 y 1960-2003, el criterio para tomar estas dos series, fue que los datos presentaban mejor continuidad, además de identificar una comparativa entre las dos para observar el comportamiento o variaciones significativas.

Para los períodos, se identifica que el estado de Yucatán estuvo expuesto a niveles de sequía meteorológica que van de fuerte, muy fuerte y severa, procesándose los datos de precipitación media mensual de 31 estaciones meteorológicas distribuidas en el Estado y su periferia, mismos con los que se generaron modelos y áreas de afectación del índice de severidad de sequía.

En los mapas resultantes, se hace evidente que la concentración de sequía se ubica hacia el Norte y Noroeste del estado, disminuyendo esta hacia el Sur y Sureste. (Figuras 22).

Para el periodo 1960 a 2003, se muestra una diferencia expresada en un retroceso de los valores mayores de sequía hacia el Norte y Noroeste aunque esta disminución es de 0.61 a 0.58, es decir, de solo 3 décimas. Los valores de grado severo disminuyeron en el periodo 1990-2003, los niveles fuerte y muy fuerte aumentaron para este mismo periodo de la misma forma que aumentó la superficie en Km².

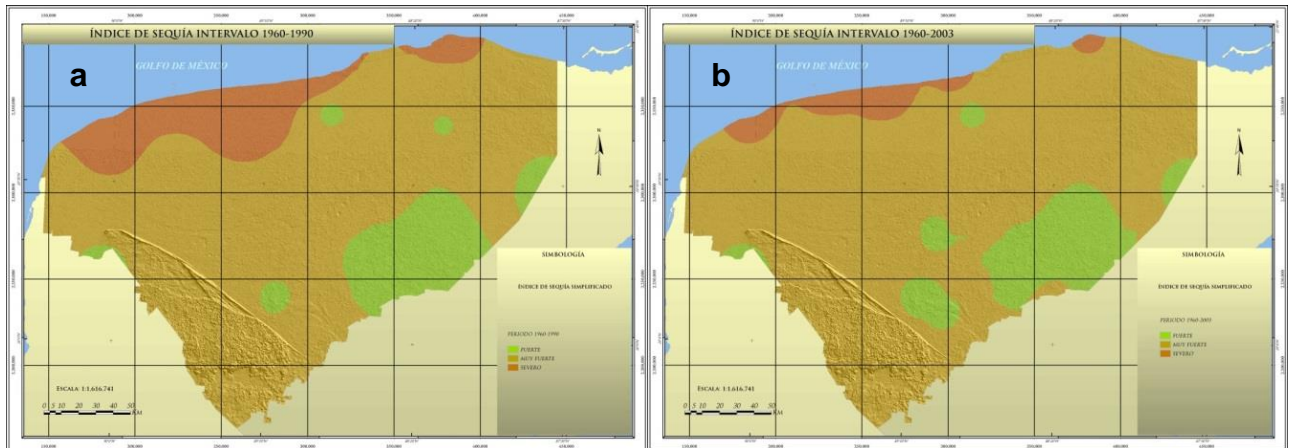


Figura 21. a) Serie 1960 a 1990. b). Serie 1960 a 2003.

No se puede asentar que las condiciones actuales son graves aunque pueden evolucionar tanto positiva como negativamente ya que este tipo de eventos son erráticamente cíclicos, sin embargo, no hay que olvidar los episodios de sequía agrícola a que ha sido sometido el estado de Yucatán, por mencionar alguno, el año de 1998 dejó un saldo de pérdidas por 5,000 hectáreas de pastizales y maíz.

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. 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.

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 de 1991 a 2013, se registraron 902 incendios que afectaron 78,229 ha; Así mismo los incendios registrados en el periodo de diciembre de 2012 a abril de 2013, afectaron a 5,279.43 ha, donde los municipios más impactados en el presente año son: Chemax con 225.68 ha afectadas, Motul con 444.78 ha, Tekax con 479.27 ha y Tizimín con 710.50 ha.

Actualmente en México no se tiene establecida una metodología para realizar modelos de susceptibilidad, peligro, vulnerabilidad y riesgo por incendios forestales. Solo existen propuestas, con base en la cuantificación de los tipos de combustible, análisis hidrometeorológico, registros históricos de incendios, actividades humanas y vías de comunicación (CENAPRED, 2005, 2008), por lo tanto, para la realización de este tema, se propone una metodología alternativa para identificar las zonas susceptibles y de amenaza por incendios forestales, tomando en cuenta los tres componentes (biótico, meteorológico y socioeconómico).

En primer lugar, se realizó un análisis de las comunidades vegetales para identificar las superficies y tipos de vegetación prevalecientes, con base a sus características bióticas. Por otra parte, 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.

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), 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 reincidencia por puntos de calor y frecuencia de puntos de calor, por otra parte con los datos obtenidos en campo se realizó el mapa de espesor de la capa superficial de suelo (Horizonte O). También al igual que en otros temas, se utilizó el proceso de análisis jerárquico mediante una matriz donde se le otorgo el peso a cada variable de mayor a menor importancia y posteriormente se hizo el análisis geoestadístico con Arc Map.10.1 para identificar espacialmente las áreas susceptibles a incendiarse. El resultado fue el mapa de

susceptibilidad por incendios forestales, a partir del cual se identificaron zonas, en donde la dinámica representa una susceptibilidad a incendios forestales.

Los municipios con mayor susceptibilidad de grado muy alto de incendios son: Maní con 8,170 ha, que equivale a 64%, Abalá con 1,713 ha 59%, Dzán con 3,404 ha 42%, Oxkutzcab 34,476 ha 39% y Tizimín con 141,659 ha, representa el 36% respecto a la superficie del Municipio.

Aunado a lo anterior se identificaron los factores de amenaza y peligro asociados a la actividad humana y las variables que podían permitir su cuantificación y cartografía, siendo estas la distancia de la infraestructura vial y las poblaciones, obteniendo así el mapa de amenaza de incendios forestales.

De los resultados obtenidos se tiene: nivel de amenaza baja 255,316 ha, que representa el 6.40 % del territorio, amenaza media 192,507.40 ha equivalente a un 48.26 %. Amenaza alta con 153,865.80 que representa un 38% y amenaza muy alta cuya superficie es de 24,848.70 ha que corresponde a 6.23%. Por otra parte, el número de municipios que se pudieran ver afectados son: Con grado de amenaza baja 61 con 162 localidades inferiores a 2,500 habitantes; amenaza media 105 con 1,242 localidades, amenaza alta 104 con 1,010 localidades y amenaza muy alta 77, con 168 localidades.

De los 77 municipios considerados dentro del nivel de amenaza muy alta, 37 de ellos cuentan con 168 localidades mayores a 3 e inferiores a 2,500 habitantes. Los municipios que presentan mayor superficie son: Cansahcab con 2,398 ha, Chacsinkín con 2,140 ha, Espita con 9,322 ha, Maní con 8,736 ha, Sinanché con 2,915 ha, Sucilá con 3,805 ha, Teabo con 3,144 ha, Tekal de Venegas con 4,850 ha, Tekax con 11,723 ha, Tekit con 4,630 ha, Tzucacab con 2,292 ha y Tizimín con 46,751 ha (Figura 22).

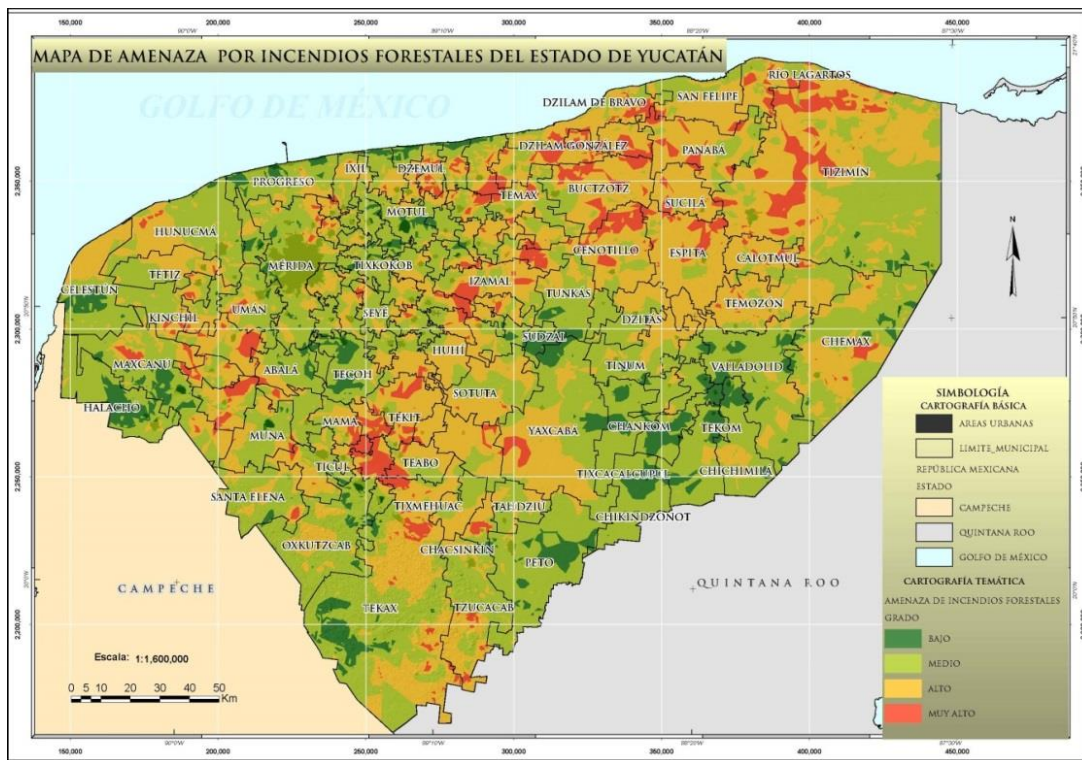


Figura 22. Mapa de amenaza por incendios forestales.

El número de viviendas ubicadas dentro de las áreas que pueden afectarse son 1,338 de ellas 1,163 están habitadas y 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 y el número de habitantes registrados es de 2,379 para las 1,163 viviendas.

Por otro lado debido a la importancia que tiene las Áreas Naturales Protegidas en México y para el Gobierno de Yucatán, las Áreas Naturales Protegidas (ANP) tienen un papel fundamental como estrategia de política ambiental establecida en el Plan Estatal de Desarrollo 2007-2012, ya que las ANP 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.

Es por ello que se identificaron las zonas de amenaza dentro de las ANP, de acuerdo al mapa obtenido, identificándose las zonas que se pueden ver amenazadas por este fenómeno. El resultado muestra que 182,777 ha, posiblemente se puedan ver amenazadas a sufrir algún tipo de incendio. Donde 14,818 ha, muestran un grado de amenaza muy alta, 93,144 ha, un grado de amenaza alta, 70,654 ha, un grado de amenaza media y 4,161 ha un grado de amenaza baja.

Dzilam presenta 7,012 ha El Palmar 1,104 ha y Ría Lagartos 6,697 ha, con un 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 derribo de árboles y remoción de la cubierta vegetal.

