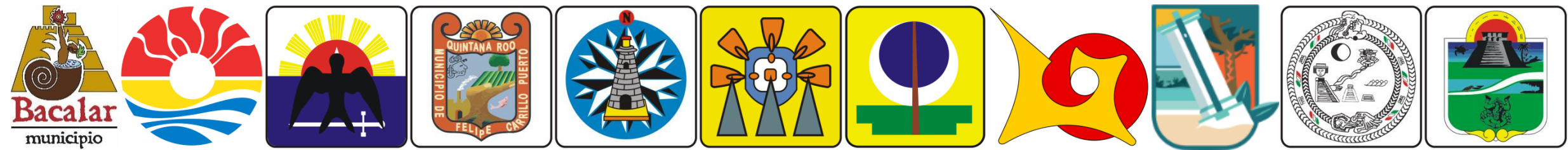


ATLAS ESTATAL DE RIESGOS DEL ESTADO DE QUINTANA ROO

FASE I: PELIGRO, VULNERABILIDAD Y RIESGOS

INFORME TÉCNICO

TOMO ÚNICO



SEPTIEMBRE 2022

CONTENIDO

Presentación.....	6	3.1.1.1	Introducción	46
Prólogo	6	3.1.1.2	Metodología	47
Resumen.....	5	3.1.1.3	Desarrollo.....	48
I. Generalidades del Atlas Estatal de Riesgo del Estado de Quintana Roo.....	7	3.1.1.4	Resultados	50
1.1 Introducción	8	3.1.1.5	Conclusiones	54
1.2 Antecedentes	8	3.1.1.6	Medidas de prevención y mitigación.....	55
1.3 Objetivos	11	3.1.1.7	Referencias bibliográficas	55
1.4 Definiciones y conceptos básicos de la gestión integral de riesgo.....	11	3.1.1.8	Introducción	58
1.4.1 Peligro	11	3.1.1.9	Metodología	58
1.4.2 Vulnerabilidad	12	3.1.1.10	Desarrollo.....	59
1.4.3 Riesgo.....	12	3.1.1.11	Resultados	61
1.4.4 Desastre	12	3.1.1.12	Conclusiones	64
1.5 Bases metodológicas.....	12	3.1.1.13	Medidas de prevención y mitigación.....	65
II. Descripción del área de estudio	12	3.1.1.14	Referencias bibliográficas	65
2.1 Marco físico	12	3.1.2	Inestabilidad de laderas, el caso de Tulum.....	67
2.1.1 Relación Cartográfica	12	3.1.3	Hundimientos en ciudad.....	70
2.1.2 2.1.2 Localización	20	3.1.3.1	Introducción	70
2.1.3 Fisiografía	21	3.1.3.2	Metodología	70
2.1.4 Geología.....	21	3.1.3.3	Desarrollo.....	70
2.1.5 Edafología	22	3.1.3.4	Resultados	71
2.1.6 Uso de Suelo y Vegetación	22	3.1.3.5	Conclusiones	78
2.1.7 Hidrografía	22	3.1.3.6	Medidas de prevención y mitigación.....	79
2.1.8 Áreas Naturales Protegidas	22	3.1.3.7	Referencias bibliográficas	80
2.1.9 Batimetría	25	3.2	Sismicidad	82
2.2 Marco socio-económico	27	3.2.1	Introducción	82
2.2.1 Dinámica de la población.....	27	3.2.2	Metodología.....	83
2.2.2 Pobreza, marginación y desarrollo humano.....	28	3.2.3	Peligro	83
2.2.3 Economía.....	29	3.2.4	Vulnerabilidad.....	86
2.3 Sistemas expuestos establecidos y su vulnerabilidad	30	3.2.5	Resultados.....	93
2.3.1 Tipología de la vivienda para estimación de vulnerabilidad	30	3.2.6	Conclusiones.....	94
III. Fenómenos geológicos.....	46	3.2.7	Medidas de Prevención y mitigación	95
3.1 Karsticidad.....	46	3.2.8	Referencias bibliográficas	95
3.1.1 Inventario de cenotes	46	3.3	Tsunami.....	95
		3.3.1	Introducción	95
		3.3.2	Metodologías	96
		3.3.2.1	Antecedentes	96

3.3.2.2 Modelos sintéticos	99	4.2.2.1 Introducción	228
3.3.3 Peligro	101	4.2.2.2 Metodología	229
3.3.4 Vulnerabilidad	111	4.2.2.3 Peligro	229
3.3.5 Resultados	117	4.2.2.4 Desarrollo	229
3.3.6 Conclusiones	117	Tratamiento del modelo digital	229
3.3.7 Medidas de mitigación y prevención	117	4.2.2.5 Vulnerabilidad	266
3.3.8 Referencias Bibliográficas	117	4.2.2.6 Riesgo	274
IV. Fenómenos hidrometeorológicos	118	4.2.2.7 Referencias bibliográficas	284
4.1 Ciclones tropicales	118	4.2.3 Inundación de Río Hondo	287
4.1.1 Definición	118	4.2.3.1 Introducción	287
4.1.2 Antecedentes	119	4.2.3.2 Metodología	287
4.1.3 Peligros asociados	119	4.2.3.3 Peligro	293
4.2 Viento	119	4.2.3.4 Vulnerabilidad	309
4.2.1 Introducción	119	4.2.3.5 Riesgo	310
4.2.2 Metodología	119	V. Fenómenos químico-tecnológicos	311
4.2.3 Desarrollo	120	5.1 Almacenamiento de sustancias peligrosas	311
4.2.4 Peligro	120	5.1.1 Introducción	311
4.2.5 Vulnerabilidad	121	5.1.2 Metodología	316
4.2.6 Riesgo	130	5.1.3 Desarrollo	321
4.2. Marea de tormenta	135	5.1.4 Vulnerabilidad Física	321
4.2.1. Introducción	135	5.1.4 Resultados	332
4.2.2 Metodología	136	5.1.5 Conclusiones	336
4.2.3 Desarrollo	138	5.1.6 Referencias bibliográficas	336
4.2.4 Peligro	150	5.2 Transportación de sustancias peligrosas	337
4.2.5 Vulnerabilidad	164	5.2.1 Introducción	337
4.2.6 Riesgo	165	5.2.2 Metodología	338
4.2 Inundaciones	194	5.2.3 Desarrollo	339
4.2.1 Inundación municipal	194	5.2.4 Resultados	340
4.2.1.1 Introducción	194	5.2.5 Conclusiones	341
4.2.1.2 Metodología	194	5.2.6 Referencias bibliográficas	341
4.2.1.3 Peligro	195	5.3 Incendios forestales	341
Importación de datos Introducción	206	5.3.1 Introducción	341
4.2.1.4 Vulnerabilidad	219	5.3.2 Metodología	344
4.2.1.5 Riesgo	224	5.3.3 Desarrollo	346
4.2.1.6 Referencias bibliográficas	228	5.3.4 Resultados	364
4.2.2 Inundación de ciudad	228	5.3.5 Conclusiones	369

5.3.6	Medidas de prevención y mitigación	369
5.3.7	Referencias bibliográficas	369
VI.	Vulnerabilidad social	370
6.1	Introducción	370
6.2	Metodología	370
6.3	Indicadores socioeconómicos	370
6.4	Percepción local del riesgo	386
6.5	Capacidad de respuesta	393
6.6	Índice de Vulnerabilidad Social	397
6.7	Conclusiones	400
6.8	Medidas de prevención y mitigación	401
VII.	Epílogo: 2ª Etapa.....	401

PRESENTACIÓN

El objetivo central del presente documento es ser una herramienta que permita establecer medidas de prevención, reducción y mitigación de peligros y riesgos por fenómenos naturales y antropogénicos en el estado de Q. Roo, mediante la compilación, integración y generación de conocimiento geológico, ambiental, meteorológico, topográfico, social y económico de la entidad, organizado todo esto en una base de datos asociada a cartografía georreferenciada, validada en campo, disponible para su consulta y actualización en un Sistema de Información Geográfica.

En esta primera etapa del Atlas de Riesgos, se abordan los temas que tienen mayor incidencia en el territorio estatal.

Para los fenómenos geológicos se realizó un inventario de cenotes para los diez municipios del Estado, esta información sirvió de base para estudiar la susceptibilidad de la región a la karstificación, lo que en las ciudades desencadena un problema de hundimientos.

En cuanto a los fenómenos hidrometeorológicos, se llegó al análisis del riesgo para los vientos, e inundaciones por marea de tormenta causada por ciclones tropicales, también se estudiaron las inundaciones pluviales tanto a nivel municipal como de ciudad, además se consideró de manera especial a las comunidades aledañas al río Hondo para también generar modelos de inundación que pudiese afectar a las localidades.

Otro de los fenómenos a estudiar fué el de químico – tecnológicos, en los cuales se incluyó el análisis por derrame y fuga tanto en almacenamiento como transporte de sustancias peligrosas, tales como Gas LP, diésel, gasolina y otras diez sustancias de uso industrial. Así mismo, el cálculo del Índice de Peligro por Incendios Forestales se encuentra en este apartado, cuyo resultado se presenta para cada una de las estaciones climatológicas y para la totalidad de los municipios de la Entidad.

Para el desarrollo del Atlas se contó con la participación de un grupo de especialistas en cada uno de los temas, quienes tienen pleno conocimiento de los conceptos y las metodologías recomendadas por el Centro Nacional para la Prevención de Desastres, sin embargo, es importante mencionar que se buscó complementar lo anterior con la experiencia laboral de cada uno de los expertos y con el uso de los SIG.

Cabe mencionar que las fases que se llevaron a cabo para el desarrollo del proyecto en cuestión fueron: a) recopilación de toda aquella información considerada de importancia para el Atlas, para lo cual se acudió tanto a instancias oficiales como a dependencias gubernamentales diversas; b) planeación de salidas al campo cuyo objetivo fue la verificación de la información recopilada y la obtención de datos recientes; c) análisis de la información recibida en ambas etapas previas para; d) generación de modelos.

Las escalas de trabajo fueron tres según el nivel de representación: 1: 250,000, para información de carácter estatal: 1: 100,000 para aquella que se refiere a aspectos municipales y: 1: 10,000 para los temas de las ciudades. Sin embargo, es de considerar que el Sistema de Información Geográfica en el que está contenido y organizado el Atlas es multi escalable y para fines de cartografía impresa se ajustaron las escalas a un tamaño de papel de 90 por 60 cm.

El Atlas Estatal de Riesgos del Estado de Quintana Roo, Fase I: Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo es un proyecto que facilitará la toma de decisiones en materia de Prevención de Desastres por lo cual se presenta en una plataforma de fácil acceso pues aprovecha los recursos tecnológicos con que se cuenta hoy en día.

PRÓLOGO

El Gobierno del Estado de Quintana Q. Roo en coordinación con el Gobierno de la República, a través de la

Secretaría de Gobernación, elaboró el proyecto preventivo Atlas Estatal de Riesgo del Estado de Q. Roo, Fase I: Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo.

Realizado de acuerdo al Programa de Actividades Plazos y Costos aprobado por el Fondo para la Prevención de Desastres Naturales, FOPREDEN.

Ejecutado totalmente por el Gobierno del Estado a través de la Secretaría de Finanzas y Planeación, es la instancia que dió seguimiento al proyecto, mismo que fue aprobado por el Comité Técnico del Fideicomiso 2068 (preventivo) FIPREDEN, en su tercera sesión extraordinaria celebrada el 20 de noviembre de 2013.

El Atlas de Riesgo cubre toda la superficie del estado de Q. Roo, con énfasis en las ciudades y centros de población y abarca los temas relacionados con los fenómenos geológicos, tales como el peligro por hundimiento derivado de la karstificación de la roca y el peligro por sismos y tsunamis; fenómenos hidrometeorológicos como marea de tormenta, inundación y vientos derivados de ciclones tropicales, así como lluvias extraordinarias; fenómenos químico-tecnológicos, como son el peligro por fuga y derrame de sustancias peligrosas en almacenamiento y transporte de las mismas, incluyendo también el análisis del peligro por incendios forestales.

Al ser la primera fase del proyecto, se considera que se llegó al nivel de riesgo en el caso de los fenómenos hidrometeorológicos dado que son los que mayor impacto tienen en el Estado, sin dejar de lado los riesgos geológicos y la vulnerabilidad física y social.

El estudio es una importante herramienta de política pública en materia de protección civil que tiene como objetivo apoyar en la planeación y la toma de decisiones que lleven a la prevención de los desastres y permita salvaguardar a la población y sus bienes.

RESUMEN

El Gobierno del Estado de Q. Roo en Coordinación con el Gobierno de la República a través de la Secretaría de Gobernación, elaboró el proyecto preventivo Atlas Estatal de Riesgo del Estado de Quintana Roo, Fase I: Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo y se realizó el presente estudio de acuerdo al Programa de Actividades Plazos y Costos aprobado por el Fondo para la Prevención de Desastres Naturales, FOPREFEN, en un plazo de 24 meses y la instancia encargada de darle seguimiento fue la Secretaría de Finanzas y Planeación.

El Atlas de Riesgo cubre la superficie total del estado partiendo del límite que tradicionalmente ha tenido Q. Roo y que se sigue luchando por el mismo: 50,012.21 Km², con 1,375 km de litoral, su principal afluente el Río Hondo mide más de 188 km de extensión, por ello y con énfasis en las ciudades y centros de población se detalló información que abarca los temas relacionados con los fenómenos geológicos, tales como el peligro por hundimiento derivado de la karstificación de la roca y el peligro por sismos y tsunamis; fenómenos hidrometeorológicos como marea de tormenta, inundación y vientos derivados de ciclones tropicales, así como lluvias extraordinarias; fenómenos químico-tecnológicos, como son el peligro por fuga y derrame de sustancias peligrosas en almacenamiento y transporte de las mismas, incluyendo también el análisis del peligro por incendios forestales. Es decir este documento es un instrumento de política pública en materia de protección civil y que por su transversalidad de temas trastoca vertientes en medio ambiente, desarrollo urbano, urbanismo, fragmentación de ecosistemas, desarrollo económico, acceso a recursos, equidad de género entre otros.

Al ser la presente, la primera fase del proyecto, se consideró llegar al nivel de riesgo solo en algunos casos y que fueron ponderados por el propio gobierno del estado, en el caso de los fenómenos hidrometeorológicos dado que son los que

mayor impacto tienen en el Estado de Quintana Roo. Solo algunas ciudades fueron escogidas para una diversidad de temas y lo mismo aplico para los municipios.

El objetivo central del mencionado estudio es ser una herramienta que permite establecer medidas de prevención, reducción y mitigación de peligros y riesgos por fenómenos naturales y antropogénicos en el estado de Quintana Roo, mediante la compilación, integración y generación de conocimiento geológico, ambiental, meteorológico, topográfico, social y económico de la entidad, organizado todo esto en una base de datos asociada a cartografía georreferenciada, validada en campo, disponible para su consulta y actualización en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

En esta primera etapa del Atlas de Riesgos, se abordan los temas que tienen mayor incidencia en el territorio estatal. Aclarando que este documento no pretende ser un brevario cultural del estado ni tampoco un anuario estadístico social-económico; se trabajaron temas que se pactaron en un contrato entre la GLH y el Gobierno del Estado de Q. Roo y revisado y aprobado por las autoridades pertinentes en materia de Protección Civil federales.

Para los fenómenos geológicos se realizó un inventario de cenotes para los diez municipios del estado, esta información sirvió de base para estudiar la susceptibilidad de la región a la karstificación, lo que en las ciudades desencadena un problema de hundimientos.

En cuanto a los fenómenos hidrometeorológicos, se llegó al análisis del riesgo para los vientos, e inundaciones por marea de tormenta causada por ciclones tropicales, también se estudiaron las inundaciones pluviales tanto a nivel municipal como de ciudad, además se consideró de manera especial a las comunidades aledañas al río Hondo para también generar modelos de inundación que pudiese afectar a dichas localidades.

Otro de los fenómenos a estudiar fue el de los químicos – tecnológicos, en los cuales se incluyó el análisis por derrame y fuga tanto en almacenamiento como transporte de sustancias peligrosas, tales como Gas LP, diésel, gasolina y otras diez sustancias de uso industrial. Así mismo, el cálculo del Índice de Peligro por Incendios Forestales se encuentra en este apartado, cuyo resultado se presenta para cada una de las estaciones climatológicas y para la totalidad de los municipios de la entidad.

Cabe mencionar que las actividades que se llevaron a cabo para el desarrollo del proyecto en cuestión fueron: a) recopilación de toda aquella información considerada de importancia para el Atlas, para lo cual se acudió tanto a instancias oficiales como a dependencias gubernamentales diversas; b) planeación de salidas al campo cuyo objetivo fue la verificación de la información recopilada y la obtención de datos recientes; c) análisis de la información recibida en ambas etapas previas para; d) generación de modelos.

Las escalas de trabajo fueron tres según el nivel de representación: 1: 250,000, para información de carácter estatal: 1: 100,000 para aquella que se refiere a aspectos municipales y: 1: 10,000 para los temas de las ciudades. Sin embargo, es de considerar que el SIG en el que está contenido y organizado el Atlas es multiescalable y para fines de cartografía impresa se ajustaron las escalas a un tamaño de papel de 90 por 60 cm.

El Atlas Estatal de Riesgos del Estado de Quintana Roo, Fase I: Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo es un proyecto que facilita la toma de decisiones en materia de Prevención de Desastres por lo cual se presenta en una plataforma de fácil acceso pues aprovecha los recursos tecnológicos con que se cuenta hoy en día.

Sin embargo, por ser un trabajo de investigación de un estado relativamente joven, con apenas 42 años de creación y fundación, los registros temáticos de su evolución poblacional, industrial, de comunicaciones e infraestructura, así como la de los servicios que se prestan hacia la principal fuente de ingreso como es el turismo; no existen o no están sistematizados,

razón por la cual no se pudieron desarrollar mapas de eventos históricos que se hayan evidenciado.

Esto no fue impedimento para la creación de 141 mapas de diversas temáticas (solicitados) y escalas. No se dejó pasar la oportunidad de innovar y complementar los trabajos de campo y de investigación documental con un desarrollo cartográfico que integre la información generada, a pesar de que al revisar las fuentes oficiales en este tema como es el INEGI y el CENAPRED no se encontró referencia a un manual o guía para el desarrollo de mapas en los Atlas de Vulnerabilidad, Peligro o Riesgo. Existen referencias a la creación de metadatos y Normas Técnicas, pero no de cartografía o la representación del peligro o riesgo; esto nos obliga a incluir criterios de ingeniería (civil y geológica) para su representación. Esto se ve en la inclusión de los Modelos Digitales de Terreno y Marino, de las escalas gráficas, de la simbología y de la orientación del mapa, principalmente.

El documento que integra toda la metodología detallada, el procedimiento paso a paso, los resultados que arrojaron los modelos y las conclusiones encontradas, para cada una de los temas desarrollados se denomina Informe Técnico y está conformado por seis capítulos.

Integra también y es el primer Atlas a nivel nacional que realza la idea de trabajar elementos marinos y costeros, como se menciona, Q. Roo tiene 1,176 km de litoral hacia el Mar Caribe y esto se incluye en un despliegue y modelado de las cartas náuticas de la SEMAR. Se procesaron un total de 33,428 puntos de profundidad que van desde los 0.1 a los 5,000 metros. El estado de Q. Roo cuenta con 1,375 km que equivale al 35.7% de los estados con vertiente al Golfo de México y Mar Caribe y al 10.6% del total de litorales de mares y costas. Otros Atlas estatales como su vecino Yucatán, además de Tamaulipas, Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Veracruz (SGM, 2016) y el Atlas Oceanográfico del Caribe (UQRoo, 2012), no cuentan con cartografía detallada de la costa, de los niveles de profundidad, del relieve marino y terrestre; por lo tanto, el cálculo de peligro y riesgo se reducen, así como su visualización.

El primer capítulo contiene las generalidades del Atlas de Riesgos, incluyendo conceptos básicos tales como el peligro, la vulnerabilidad y el riesgo entre otros importantes.

En el capítulo dos, se encuentra la localización del área de estudio y la descripción de los elementos abióticos del estado, como la fisiografía, geología, edafología, hidrografía, uso de suelo y vegetación y áreas naturales protegidas, además de una descripción de la dinámica de la población, pobreza, marginación, desarrollo humano y economía, como parte del marco socio-económico de la Entidad. La metodología adoptada para estimar la vulnerabilidad de los sistemas expuestos (vivienda) se encuentra en el tercer apartado de este mismo capítulo, incluye un catálogo de viviendas encontradas en localidades urbanas y rurales del Estado.

El desarrollo de los fenómenos geológicos tiene lugar en el capítulo tres del documento en mención y en él se desarrolla la karsticidad, (inventario de cenotes, peligro por karsticidad y hundimientos en ciudad), la sismicidad desde un punto de vista regional al igual que los tsunamis. Cabe aclarar que tanto los apartados de sismicidad como de tsunamis fueron elaborados partiendo de la información histórica y bibliográfica por lo que lo representado son modelos simples en tres dimensiones y no modelos dinámicos que incluyen el efecto de la ola sobre las estructuras.

El cuarto capítulo inicia con la definición, antecedentes y análisis de los peligros asociados a los ciclones tropicales, de ahí parte el desarrollo detallado del peligro, la vulnerabilidad y el riesgo por vientos, marea de tormenta, inundaciones a nivel municipal, inundaciones de las ciudades e inundaciones causadas por el desbordamiento del río Hondo.

El capítulo cinco se enfoca al estudio del peligro derivado por almacenamiento y transporte incorrecto de sustancias peligrosas, para lo cual se realizaron simulaciones de explosiones y bolas de fuego de las mismas, considerando siempre el

peor de los escenarios. Para éste apartado se hizo énfasis en el estudio y modelamiento de las gaseras y gasolineras del Estado, sin embargo, hubo varios tipos de establecimientos que también fueron considerados tan sólo por las sustancias que utilizan. El Índice de Probabilidad de los Incendios Forestales, así como las metodologías adaptadas para llegar a las conclusiones presentadas se incluyen en la tercera parte de este capítulo.

Y finalmente, en el apartado seis del informe, se tiene un capítulo dedicado exclusivamente al análisis de la vulnerabilidad física y social en el que se incluye la descripción de los indicadores socioeconómicos, el análisis de la percepción local del riesgo, así como de la capacidad de respuesta por parte de los responsables de la protección civil en el estado y los municipios. Se finaliza con el índice de vulnerabilidad social para cada municipio del cual se deriva el mapa del mismo nombre y algunas conclusiones de relevancia. El mapeo de la información que arroja el DENUe y su actualización por los recorridos de campo, verificaciones de la propia infraestructura de gobierno y aportaciones geográficas tanto urbanas como rurales complementarán los análisis de la vulnerabilidad física y social.

Integrando la información cartográfica, las bases de datos y las evidencias de campo, tales como las cédulas levantadas por cada temática y las fotografías tomadas durante los recorridos realizados, se cuenta con un SIG del cual se desprenden los mapas en formato PDF y JPG incluidos también en el informe técnico.

La información compilada, su proceso, análisis, interpretación y modelos se encuentran georreferenciados a un SIG mismos, que se integran a una pantalla panorámica táctil con servidor, en la cual el usuario podrá integrar e interactuar con toda la información, con más de 10,000 datos georreferenciados y donde todos los niveles de información pueden ser interrelacionados y dispuestos en arquitectura horizontal en la utilización del ATLAS es una nueva herramienta que permite conjugar todos los datos para la obtención de modelos que puedan ayudar en la prevención de los desastres ocasionados por todos los fenómenos estudiados.

Existe información complementaria que fue obtenida en campo como son las fichas para apartados como la geología y los peligros químicos, fotografías que complementan los levantamientos de cenotes y que fue alojada en el Sistema de Información Geográfica.

I. Generalidades del Atlas Estatal de Riesgo del Estado de Quintana Roo

1.1 Introducción

Uno de los principales problemas en el mundo, son los desastres ocasionados por los fenómenos naturales que causan grandes daños en la misma naturaleza, la infraestructura y en las personas y sus bienes. Nuestro país, debido a su morfología y constitución geológica y geográfica, no es la excepción; cada año se tienen pérdidas humanas y como económicas, por lo que se termina pagando un alto costo por no contar con instrumentos de prevención.

Una de estas herramientas son los ATLAS DE PELIGROS Y RIESGOS, estudios basados en información generada a través de trabajos de campo, información histórica y presente con la cual se conforman una serie de datos, mapas y modelos, cuya finalidad es que las autoridades y la población en general conozcan los peligros y los riesgos generados por la actividad natural del hombre a los que están expuestas las comunidades y los bienes, y de esta forma prevenirlos estableciendo protocolos, procedimientos y métodos que puedan coadyuvar en la mitigación de los daños causados por dichos fenómenos.

El Estado de Quintana Roo es uno de los más vulnerables en materia de fenómenos hidrometeorológicos y también de hundimientos debido a su ubicación y morfología. En atención a estos problemas y fomentando la cultura de la prevención el Gobierno del Estado, en convenio con la Secretaría de Gobernación a través del Fondo Nacional para la Prevención de los

Desastres FONDEN y el Centro Nacional para la Prevención de los Desastres CENAPRED, se dieron a la tarea de elaborar el ATLAS ESTATAL DE RIESGO DEL ESTADO DE QUINTANA ROO, FASE I: PELIGRO, VULNERABILIDAD Y RIESGOS en el que se conjunta un compendio de información, textos, mapas, sistema de información geográfica SIG, que sirve como herramienta de información y prevención en los futuros fenómenos que se presenten en el Estado.

El estudio contempla y analiza, en primera, la creación de un marco estatal de referencia geoespacial y geográfica, conformado por la información propia de Q. Roo, límites estatales y municipales, poblaciones, costas, playas y ríos que aporten información para el desarrollo de las políticas de protección civil y que permita el manejo exacto y detallado de la información recopilada de las diferentes instancias y niveles de gobierno así como la generada por GLH, con ello, permitir ser estructurada en la plataforma SIG y en segunda, la información con la que se alimenta la arquitectura de datos como son los fenómenos geológicos, como estructuras, hundimientos y sismicidad; fenómenos hidrometeorológicos a los cuales el Estado se encuentra fuertemente expuesto, como ciclones tropicales, marea de tormenta, inundaciones, vientos y erosión; fenómenos químicos considerados como antropogénicos ya que son ocasionados por la actividad humana, entre los que se encuentran ubicación, transporte y almacenamiento de plantas industriales y depósitos de materiales peligrosos.

Para llevar a cabo este estudio se realizó un acopio de información en el que colaboraron diferentes autoridades tanto municipales, estatales y federales, así como universidades y organizaciones de la sociedad civil. Esta información fue procesada y representada en mapas y visitas de campo en más de 7000 puntos de la entidad en las que se llevaron a cabo levantamientos de fichas técnicas, posicionamientos con sistemas de posicionamiento global GPS y sensores remotos. Además, se elaboraron 123 mapas base de diferentes temas entre los que destacan mapas geológicos, mapas de estructuras geológicas donde principalmente se detectaron más de 2000 cenotes; mapas de hundimientos, mapas de vulnerabilidad, mapas de plantas industriales, transporte y almacenamientos de materiales químicos; mapas de la infraestructura del Estado, como carreteras, comunidades, pueblos y ciudades; escuelas, templos infraestructura mayor. Y se llevaron a cabo talleres y cursos de capacitación en el uso, análisis y comprensión de los diferentes temas del atlas.

Del mismo modo se llevaron a cabo análisis y modelos para detectar los diferentes grados de exposición al fenómeno, alcance a la población, infraestructura y la exposición a los bienes, y se determinó el grado de la vulnerabilidad tanto física como social. Esta información se encuentra impresa, digital y totalmente georreferenciada en una plataforma de Sistema de Información Geográfica única en su género, misma que podrá alimentada y actualizada constantemente con datos y sucesos, con el fin de que las autoridades de Protección Civil y gobierno del Estado puedan interactuar para un mejor conocimiento y prevención de los desastres ocasionados por los diferentes fenómenos aquí estudiados.

1.2 Antecedentes

A continuación, se presenta un resumen por municipio de los fenómenos que más han afectado al Estado de Quintana Roo, obtenido de la Base de Datos de Declaratorias de Desastre, Emergencia y Contingencia Climatológica del CENAPRED en una actualización al 2014.

Tabla 1. Declaratorias de Desastre Emergencia y Contingencia Climatológica para Bacalar (Fuente: CENAPRED).

Municipio	Fecha de publicación	Fecha de ocurrencia	Tipo de declaratoria	Tipo de fenómeno	Clasificación del fenómeno	Observaciones
Bacalar	13/06/2014	31 mayo al 3 de junio, 2014	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa, inundación fluvial y pluvial
Bacalar	11/06/2014	31 de mayo al 2 de junio, 2014	Emergencia	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa, inundación fluvial y pluvial
Bacalar	22/10/2012	8 de agosto, 2012	Contingencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Ernesto, Huracán. Desastre

Municipio	Fecha de publicación	Fecha de ocurrencia	Tipo de declaratoria	Tipo de fenómeno	Clasificación del fenómeno	Observaciones
			climatológica			Sagarpa
Bacalar	22/08/2012	8 de agosto, 2012	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Ernesto, Huracán

Tabla 2. Declaratorias de Desastre Emergencia y Contingencia Climatológica para Benito Juárez (Fuente: CENAPRED)

Municipio	Fecha de publicación	Fecha de ocurrencia	Tipo de declaratoria	Tipo de fenómeno	Clasificación del fenómeno	Observaciones
Benito Juárez	13/06/2014	31 mayo al 3 de junio, 2014	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa, inundación fluvial y pluvial
Benito Juárez	11/06/2014	31 de mayo al 2 de junio, 2014	Emergencia	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa, inundación fluvial y pluvial
Benito Juárez	26/11/2013	12 al 14 de noviembre, 2013	Emergencia	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa e inundación fluvial
Benito Juárez	25/11/2013	12 al 15 de noviembre, 2013	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia Severa e inundación fluvial
Benito Juárez	18/06/2013	Del 1 al 5 de junio, 2013	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa
Benito Juárez	14/06/2013	Del 3 al 5 de junio, 2013	Emergencia	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa
Benito Juárez	05/09/2007	20 y 21 de agosto, 2007	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán Deán
Benito Juárez	28/08/2007	17 de agosto, 2007	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán Deán
Benito Juárez	28/11/2005	21 y 22 de octubre, 2005	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Ciclón Tropical "Wilma"
Benito Juárez	31/10/2005	19 de octubre, 2005	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Wilma"
Benito Juárez	05/08/2005	17 de julio, 2005	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Lluvias Extremas y Oleaje por Huracán "Emily"
Benito Juárez	29/07/2005	16 de julio, 2005	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Emily"
Benito Juárez	15/10/2004	11 al 13 de septiembre, 2004	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Iván"
Benito Juárez	03/12/2003	10 de julio, 2003	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Tormenta Tropical "Claudette"
Benito Juárez	23/10/2002	22 al 24 de septiembre, 2002	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia Atípica, Afectaron el Patrimonio
Benito Juárez	11/10/2002	20 al 23 de septiembre, 2002	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Isidore"

Tabla 3. Declaratorias de Desastre Emergencia y Contingencia Climatológica para Cozumel (Fuente: CENAPRED)

Municipio	Fecha de publicación	Fecha de ocurrencia	Tipo de declaratoria	Tipo de fenómeno	Clasificación del fenómeno	Observaciones
Cozumel	13/06/2014	31 mayo al 3 de junio, 2014	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa e inundación fluvial y pluvial
Cozumel	11/06/2014	31 de mayo al 2 de junio, 2014	Emergencia	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa, inundación fluvial y pluvial
Cozumel	18/06/2013	Del 1 al 5 de junio, 2013	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa
Cozumel	14/06/2013	Del 3 al 5 de junio, 2013	Emergencia	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa

Municipio	Fecha de publicación	Fecha de ocurrencia	Tipo de declaratoria	Tipo de fenómeno	Clasificación del fenómeno	Observaciones
Cozumel	05/09/2007	20 y 21 de agosto, 2007	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán Deán
Cozumel	28/08/2007	17 de agosto, 2007	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán Deán
Cozumel	28/11/2005	21 y 22 de octubre, 2005	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Ciclón Tropical "Wilma"
Cozumel	31/10/2005	19 de octubre, 2005	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Wilma"
Cozumel	05/08/2005	17 de julio, 2005	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Lluvias Extremas y Oleaje por Huracán "Emily"
Cozumel	29/07/2005	16 de julio, 2005	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Emily"
Cozumel	15/10/2004	11 al 13 de septiembre, 2004	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Iván"
Cozumel	24/09/2004	11 al 13 de septiembre, 2004	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Iván"
Cozumel	04/08/2004	11 y 12 de junio, 2004	Emergencia	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvias Extremas
Cozumel	18/06/2004	11 al 13 de junio, 2004	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia Atípica e Impredecible
Cozumel	03/12/2003	10 de julio, 2003	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Tormenta Tropical "Claudette"

Tabla 4. Declaratorias de Desastre Emergencia y Contingencia Climatológica para Felipe Carrillo Puerto (Fuente: CENAPRED)

Municipio	Fecha de publicación	Fecha de ocurrencia	Tipo de declaratoria	Tipo de fenómeno	Clasificación del fenómeno	Observaciones
FCP	07/10/2013	14,15 y 16 de septiembre, 2013	Emergencia	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa
FCP	22/10/2012	8 de agosto, 2012	Contingencia climatológica	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Ernesto, Huracán. Desastre Sagarpa
FCP	22/08/2012	8 de agosto, 2012	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Ernesto, Huracán
FCP	05/09/2007	20 y 21 de agosto, 2007	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán Deán
FCP	28/08/2007	17 de agosto, 2007	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán Deán
FCP	28/11/2005	21 y 22 de octubre, 2005	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Ciclón Tropical "Wilma"
FCP	02/11/2005	20 de octubre, 2005	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Wilma"
FCP	29/07/2005	17 de julio, 2005	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Emily"
FCP	15/10/2004	15 de septiembre, 2004	Contingencia climatológica	Sequia	Hidrometeorológicos	Sequia Atípica Impredecible
FCP	03/12/2003	10 de julio, 2003	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Tormenta Tropical "Claudette"
FCP	16/10/2002	20 al 23 de septiembre, 2002	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Isidore"
FCP	11/10/2002	20 al 23 de septiembre, 2002	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Isidore"
FCP	26/09/2001	21 y 22 de agosto, 2001	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Tormenta Tropical "Chantal"
FCP	23/08/2001	21 y 22 de agosto, 2001	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Tormenta Tropical "Chantal"

Tabla 5. Declaratorias de Desastre Emergencia y Contingencia Climatológica para Isla Mujeres (Fuente: CENAPRED)

Municipio	Fecha de publicación	Fecha de ocurrencia	Tipo de declaratoria	Tipo de fenómeno	Clasificación del fenómeno	Observaciones
-----------	----------------------	---------------------	----------------------	------------------	----------------------------	---------------

Municipio	Fecha de publicación	Fecha de ocurrencia	Tipo de declaratoria	Tipo de fenómeno	Clasificación del fenómeno	Observaciones
Isla Mujeres	13/06/2014	31 mayo al 3 de junio, 2014	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa, inundación fluvial y pluvial
Isla Mujeres	11/06/2014	31 de mayo al 2 de junio, 2014	Emergencia	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa, inundación fluvial y pluvial
Isla Mujeres	18/06/2013	Del 1 al 5 de junio, 2013	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa
Isla Mujeres	14/06/2013	Del 3 al 5 de junio, 2013	Emergencia	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa
Isla Mujeres	05/09/2007	20 y 21 de agosto, 2007	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán Deán
Isla Mujeres	28/08/2007	17 de agosto, 2007	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán Deán
Isla Mujeres	28/11/2005	21 y 22 de octubre, 2005	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Ciclón Tropical "Wilma"
Isla Mujeres	31/10/2005	19 de octubre, 2005	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Wilma"
Isla Mujeres	05/08/2005	17 de julio, 2005	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Lluvias Extremas y Oleaje por Huracán "Emily"
Isla Mujeres	29/07/2005	16 de julio, 2005	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Emily"
Isla Mujeres	15/10/2004	11 al 13 de septiembre, 2004	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Iván"
Isla Mujeres	24/09/2004	11 al 13 de septiembre, 2004	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Iván"
Isla Mujeres	03/12/2003	10 de julio, 2003	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Tormenta Tropical "Claudette"
Isla Mujeres	11/10/2002	20 al 23 de septiembre, 2002	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Isidore"

Municipio	Fecha de publicación	Fecha de ocurrencia	Tipo de declaratoria	Tipo de fenómeno	Clasificación del fenómeno	Observaciones
Lázaro Cárdenas	07/10/2013	14,15 y 16 de septiembre, 2013	Emergencia	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa
Lázaro Cárdenas	18/06/2013	Del 1 al 5 de junio, 2013	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa
Lázaro Cárdenas	14/06/2013	Del 3 al 5 de junio, 2013	Emergencia	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa
Lázaro Cárdenas	05/09/2007	20 y 21 de agosto, 2007	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán Deán
Lázaro Cárdenas	28/08/2007	17 de agosto, 2007	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán Deán
Lázaro Cárdenas	28/11/2005	21 y 22 de octubre, 2005	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Ciclón Tropical "Wilma"
Lázaro Cárdenas	31/10/2005	19 de octubre, 2005	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Wilma"
Lázaro Cárdenas	05/08/2005	17 de julio, 2005	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Lluvias Extremas y Oleaje por Huracán "Emily"
Lázaro Cárdenas	29/07/2005	16 de julio, 2005	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Emily"
Lázaro Cárdenas	15/10/2004	11 al 13 de septiembre, 2004	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Iván"
Lázaro Cárdenas	03/12/2003	10 de julio, 2003	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Tormenta Tropical "Claudette"
Lázaro Cárdenas	16/10/2002	20 al 23 de septiembre, 2002	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Isidore"
Lázaro Cárdenas	11/10/2002	20 al 23 de septiembre, 2002	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Isidore"

Tabla 6. Declaratorias de Desastre Emergencia y Contingencia Climatológica para José María Morelos (Fuente: CENAPRED)

Municipio	Fecha de publicación	Fecha de ocurrencia	Tipo de declaratoria	Tipo de fenómeno	Clasificación del fenómeno	Observaciones
José María Morelos	05/09/2007	20 y 21 de agosto, 2007	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán Deán
José María Morelos	28/08/2007	17 de agosto, 2007	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán Deán
José María Morelos	02/11/2005	20 de octubre, 2005	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Wilma"
José María Morelos	29/07/2005	17 de julio, 2005	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Emily"
José María Morelos	14/12/2004	junio a noviembre, 2004	Contingencia climatológica	Sequia	Hidrometeorológicos	Sequia Atípica
José María Morelos	03/12/2003	10 de julio, 2003	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Tormenta Tropical "Claudette"
José María Morelos	16/10/2002	20 al 23 de septiembre, 2002	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Isidore"
José María Morelos	11/10/2002	20 al 23 de septiembre, 2002	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Isidore"

Tabla 7. Declaratorias de Desastre Emergencia y Contingencia Climatológica para Lázaro Cárdenas (Fuente: CENAPRED)

Tabla 8. Declaratorias de Desastre Emergencia y Contingencia Climatológica para Othón P. Blanco (Fuente: CENAPRED)

Municipio	Fecha de publicación	Fecha de ocurrencia	Tipo de declaratoria	Tipo de fenómeno	Clasificación del fenómeno	Observaciones
Othón P. Blanco	13/06/2014	31 mayo al 3 de junio, 2014	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa, inundación fluvial y pluvial
Othón P. Blanco	11/06/2014	31 de mayo al 2 de junio, 2014	Emergencia	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa, inundación fluvial y pluvial
Othón P. Blanco	02/12/2013	13 al 15 de noviembre, 2013	Emergencia	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa e inundación fluvial
Othón P. Blanco	22/10/2012	8 de agosto, 2012	Contingencia climatológica	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Ernesto, Huracán. Desastre Sagarpa
Othón P. Blanco	22/08/2012	8 de agosto, 2012	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Ernesto, Huracán
Othón P. Blanco	03/07/2008	2 de junio, 2008	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvias extremas
Othón P. Blanco	05/09/2007	20 y 21 de agosto, 2007	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán Deán
Othón P. Blanco	28/08/2007	17 de agosto, 2007	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán Deán
Othón P. Blanco	28/11/2005	21 y 22 de octubre, 2005	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Ciclón Tropical "Wilma"
Othón P. Blanco	02/11/2005	20 de octubre, 2005	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Wilma"
Othón P. Blanco	29/07/2005	17 de julio, 2005	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Emily"
Othón P. Blanco	03/12/2003	10 de julio, 2003	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Tormenta Tropical "Claudette"

Municipio	Fecha de publicación	Fecha de ocurrencia	Tipo de declaratoria	Tipo de fenómeno	Clasificación del fenómeno	Observaciones
Othón P. Blanco	11/12/2002	27 y 28 de octubre, 2002	Desastre	Inundaciones	Hidrometeorológicos	Inundaciones Atípicas
Othón P. Blanco	11/10/2002	20 al 23 de septiembre, 2002	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Isidore"
Othón P. Blanco	10/10/2001	8 de octubre, 2001	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Iris"
Othón P. Blanco	26/09/2001	21 y 22 de agosto, 2001	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Tormenta Tropical "Chantal"
Othón P. Blanco	23/08/2001	21 y 22 de agosto, 2001	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Tormenta Tropical "Chantal"
Othón P. Blanco	26/07/2001	25 al 29 de mayo, 2001	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Inundaciones y Lluvias Atípicas

Tabla 9. Declaratorias de Desastre Emergencia y Contingencia Climatológica para Solidaridad (Fuente: CENAPRED)

Municipio	Fecha de publicación	Fecha de ocurrencia	Tipo de declaratoria	Tipo de fenómeno	Clasificación del fenómeno	Observaciones
Solidaridad	13/06/2014	31 mayo al 3 de junio, 2014	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa, inundación fluvial y pluvial
Solidaridad	11/06/2014	31 de mayo al 2 de junio, 2014	Emergencia	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa, inundación fluvial y pluvial
Solidaridad	18/06/2013	Del 1 al 5 de junio, 2013	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa
Solidaridad	14/06/2013	Del 3 al 5 de junio, 2013	Emergencia	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa
Solidaridad	05/09/2007	20 y 21 de agosto, 2007	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán Deán
Solidaridad	28/08/2007	17 de agosto, 2007	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán Deán
Solidaridad	28/11/2005	21 y 22 de octubre, 2005	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Ciclón Tropical "Wilma"
Solidaridad	31/10/2005	19 de octubre, 2005	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Wilma"
Solidaridad	05/08/2005	17 de julio, 2005	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Lluvias Extremas y Oleaje por Huracán "Emily"
Solidaridad	29/07/2005	16 de julio, 2005	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Emily"
Solidaridad	15/10/2004	11 al 13 de septiembre, 2004	Emergencia	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Iván"
Solidaridad	24/09/2004	11 al 13 de septiembre, 2004	Desastre	Ciclón Tropical	Hidrometeorológicos	Huracán "Iván"

Tabla 10. Declaratorias de Desastre Emergencia y Contingencia Climatológica para Tulum (Fuente: CENAPRED)

Municipio	Fecha de publicación	Fecha de ocurrencia	Tipo de declaratoria	Tipo de fenómeno	Clasificación del fenómeno	Observaciones
Tulum	13/06/2014	31 mayo al 3 de junio, 2014	Desastre	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa, inundación fluvial y pluvial
Tulum	11/06/2014	31 de mayo al 2 de junio, 2014	Emergencia	Lluvias	Hidrometeorológicos	Lluvia severa, inundación fluvial y pluvial

1.3 Objetivos

Ser una herramienta que permita establecer medidas de prevención, reducción y mitigación de peligros y riesgos por

fenómenos naturales y antropogénicos en el Estado de Quintana Roo, mediante la compilación, integración y generación de conocimiento geológico, ambiental, meteorológico, topográfico, social y económico de la entidad, organizado todo esto en una base de datos asociada a cartografía georreferenciada, validada en campo, disponible para su consulta y actualización en un Sistema de Información Geográfica.

Objetivos Específicos

- Generar un inventario de cenotes y realizar un estudio detallado de la susceptibilidad por karstificación en el Estado y de hundimientos en las ciudades de Cancún, Playa del Carmen y Tulum.
- Realizar un estudio estatal de peligro y vulnerabilidad física por sismos y por tsunamis (estos últimos para Cozumel, Isla Mujeres, Othón P. Blanco, Benito Juárez, Solidaridad y Tulum).
- Estimar, en materia de fenómenos hidrometeorológicos, el peligro y riesgo derivados de los ciclones tropicales, tales como la inundación por marea de tormenta para las ciudades costeras (Isla Mujeres, Cozumel, Cancún, Playa del Carmen, Tulum y Chetumal), viento para las ciudades de Cozumel, Felipe Carrillo Puerto, Isla Mujeres, Chetumal, Cancún, José María Morelos, Kantunilkin, Playa del Carmen, Tulum y Bacalar, así como las inundaciones pluviales a nivel municipal de Felipe Carrillo Puerto, José María Morelos, Bacalar y Othón P. Blanco, a nivel ciudad (Cozumel, Felipe Carrillo Puerto, Isla Mujeres, Chetumal, Cancún, Playa del Carmen y Bacalar) e inundaciones de las localidades aledañas al río Hondo.
- Generar modelos de afectación por derrame y fuga de sustancias peligrosas en su almacenamiento en las ciudades de Cozumel, Felipe Carrillo Puerto, Isla Mujeres, Chetumal, Cancún, Playa del Carmen y Bacalar; y transporte en las carreteras estatales y federales de la entidad. Las sustancias incluidas son: gasolina, diésel y gas LP principalmente, pero también se incorporaron cloro, amoníaco, hidróxido de sodio, ácido sulfúrico, gas avión, turbosina, combustóleo y explosivos.
- Crear una base de datos que contenga el material de muros y techos de las viviendas a nivel manzana de las diez cabeceras municipales y de 532 localidades rurales para evaluar la vulnerabilidad física ante los diversos peligros.
- Realizar un análisis de la vulnerabilidad social del estado considerando la capacidad de respuesta de las autoridades de protección civil, la percepción del riesgo de la población y los indicadores socioeconómicos que se indiquen en la metodología.
- Crear un Sistema de Información Geográfica (SIG) confiable, de fácil manejo y actualización permanente, que sirva a las autoridades en materia de Protección Civil como base para la toma de decisiones, a fin de evitar al máximo las pérdidas económicas y sobre todo la de vidas humanas.
- Promover la participación de los diversos sectores de la sociedad que están involucrados en la respuesta a contingencias, por medio de talleres de comunicación y/o capacitación de riesgos.
- Aportar medidas de mitigación y prevención detectadas en esta primera etapa, a fin de no esperar un determinado tiempo para operarlas y ponerlas en práctica, y así iniciar la reducción de los riesgos de la población, sus bienes y entorno.

1.4 Definiciones y conceptos básicos de la gestión integral de riesgo

1.4.1 Peligro

Probabilidad de ocurrencia de un agente perturbador potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo y en un sitio determinado.¹

1.4.2 Vulnerabilidad

Susceptibilidad o propensión de un agente afectable a sufrir daños o pérdidas ante la presencia de un agente perturbador, determinado por factores físicos, sociales, económicos y ambientales.²

1.4.3 Riesgo

Daños o pérdidas probables sobre un agente afectable, resultado de la interacción entre su vulnerabilidad y la presencia de un agente perturbador.³

1.4.4 Desastre

Al resultado de la ocurrencia de uno o más agentes perturbadores severos y/o extremos, concatenados o no, de origen natural, de la actividad humana o aquellos provenientes del espacio exterior, que cuando acontecen en un tiempo y en una zona determinada, causan daños y que por su magnitud exceden la capacidad de respuesta de la comunidad afectada.⁴

1.5 Bases metodológicas

Para el desarrollo del Atlas Estatal de Riesgo del Estado de Quintana Roo, Fase I: Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo, se emplearon las guías metodológicas oficiales en su versión electrónica 2014 vigentes publicadas por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), tales como:

- Atlas Climatológico de Ciclones Tropicales en México;
- Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligro y Riesgo (Evaluación de la Vulnerabilidad Física y Social);
- Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas;
- Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (Conceptos Básicos sobre Peligros, Riesgos y su Representación Geográfica);
- Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (Fenómenos Hidrometeorológicos);
- Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (Fenómenos Químicos);
- Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (Fenómenos Geológicos);

Por otra parte, se llevó a cabo la recopilación, depuración, análisis e integración de la información proporcionada por dependencias gubernamentales de los tres niveles de gobierno, así como centros de investigación que a continuación se mencionan: Protección civil estatal, Protección civil Othón P. Blanco, Protección civil Bacalar, Protección civil Felipe Carrillo Puerto, Protección civil José María Morelos, Protección civil Tulum, Protección civil Solidaridad, Protección civil Cozumel, Protección civil Benito Juárez, Protección civil Lázaro Cárdenas, Secretaría de Salud del Estado, Instituto Mexicano del Seguro Social, Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de Los Trabajadores del Estado, Secretaría de Educación y Cultura, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Secretaría de Educación Pública Federal, Infraestructura para la Educación Quintana Roo, Delegación Estatal del Consejo Nacional de Fomento Educativo, Universidad de Quintana Roo, Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano, Secretaría de Desarrollo Social, Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda, Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores, Comisión para la Regularización de la Tenencia de la Tierra, Direcciones de Catastro, estatal y municipales, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Rural, Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca, Comisión Nacional Forestal, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Procuraduría Agraria, Secretaría de Comunicaciones y Transporte, Secretaría de Infraestructura y Transporte, Comisión Federal de Electricidad, Administración Portuaria Integral de Quintana Roo, Direcciones de Obras Públicas municipales, Comisión de Agua Potable y Alcantarillado, Secretaría de la Gestión Pública, Secretaría de Desarrollo Económico, Secretaría de Turismo, Secretaría de Trabajo y Previsión Social, Secretaría de Marina, Secretaría de la Defensa Nacional, Secretaría de Seguridad Pública, Secretaría de Gobernación, Secretaría del Medio Ambiente, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Comisión Nacional del Agua, Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, Amigos de Sian Ka'an, PRONATURA, Instituto de Impacto de Riesgo Ambiental, Instituto Quintanarroense de la Mujer, Secretaría de Desarrollo Social e Indígena, Sistema para el Desarrollo Integral para la Familia.

Después de la recopilación de la información, se realizaron salidas al campo para la verificación de la misma y generar nueva bajo un formato estandarizado. En dicha actividad se utilizó un GPS marca Trimble de la serie Juno que se configuró con los parámetros de proyección espacial WGS 1984 en Coordenadas UTM para las Zona 16 Norte.

En cada uno de los capítulos se detalla la metodología empleada y/o modificada según haya sido necesario.

II. Descripción del área de estudio

2.1 Marco físico

2.1.1 Relación Cartográfica

La Tabla 11 enumera la relación cartográfica que se construyó a partir de lo demandado por el Gobierno de Q. Roo en el contrato firmado con GLH, en el, se enlistan los temas a desarrollar, que aspecto de la protección civil cubren (vulnerabilidad, peligro o riesgo); cobertura espacial, la clave cartográfica asignada y la escala del mapa de salida. Cabe aclarar que todos los niveles listados tienen y pueden ser elaborados en un archivo de salida digital a la escala que se requiera y están alojados en la arquitectura de datos espaciales del Sistema de Información Geográfica para su impresión, sin embargo, en color verde están señalados los mapas que fueron construidos y requeridos por la parte contratante ya que su uso era inmediato.

Tabla 11. Relación cartográfica construida.

4 MARCO ESTATAL					
NUMERO	NOMBRE NIVEL INFORMACIÓN	NOMBRE	SHAPE	NOMBRE MAPA DE SALIDA	ESCALA X

1 Ley General de Protección Civil, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de junio de 2012, Últimas reformas publicadas DOF 03-06-2014.

2 Allan Lavell en riesgo y clima: Proceso, patrones y gestión en América, iENOS, patrones de riesgo de desastres y su gestión: elementos conceptuales y bases de la investigación comparativa (LA RED, Oxfam, 2007).

3 Ley General de Protección Civil, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de junio de 2012, Últimas reformas publicadas DOF 03-06-2014.

4 Ibid.

EST/SIG	PRINCIPAL	1000
4.1	Mapa Base (Date Frame)	
	Límite Estatal	Límite_estatal
	Límite Municipal	Límite_municipal
	Cabeceras Municipales	Cabeceras_municipales
	Localidades	Localidades
	Vías de Comunicación	Vías_comunicación
	Cuerpos de Agua	Cuerpos_agua
	Ubicación Geográfica	Ubicación_geográfica
	Ríos	Ríos
	Tipo Hidrología	Hidrología
	Áreas Naturales Protegidas	Áreas_naturales_protegidas
	Zona Nucleos 2015 (Zonas de Reservas)	Zonas_núcleo
	Raster de Relieve	Relieve
	Batimetría "Curvas de Nivel del Mar"	Batimetría
	Zonas Arqueológicas	Zonas_arqueológicas
		QR-Bs-Gn-01-E
		600
4.2	Altimetría (Date Frame)	
	Raster de Relieve	Relieve
	Curvas de Nivel	Curvas_nivel
	Batimetría "Curvas de Nivel del Mar"	Batimetría
	Mapa de Pendientes	Pendientes
		QR-Bs-Alt-02-E
		600
4.3	Pendientes (Date Frame)	
4.4	Geología (Date Frame)	
	Litología	Litología
	Estructuras "Lineamientos Regionales"	Lineamientos_regionales
		QR-Bs-Geo-03-E
		600
4.5	Edafología (Date Frame)	
	Edafología	Edafología
		QR-Bs-Edf-04-E
		600
4.6	Uso de Suelo y Vegetación (Date Frame)	
	Mapa de Uso de Suelo y Vegetación	Uso_suelo_vegetación
	Áreas Naturales Protegidas	Áreas_naturales_protegidas
		QR-Bs-Usv-05-E
		600
4.7	Climatología (Date Frame)	
	Mapa de Climas	Diversos Shape's
	Puntos de Calor	Puntos_calor
		QR-Bs-Clm-06-E
		600
4.8	Fisiografía (Date Frame)	
4.9	Forestal (Date Frame)	
	Inventario Nacional Forestal	Inventario_forestal
	Áreas Naturales Protegidas	Áreas_naturales_protegidas
	Humedales 2015	Humedales
	Zona Nucleos 2015	Zonas_núcleo
		QR-Bs-Fritl-07-E
		600
##	Hidrología (Date Frame)	
##	Marco Geoestadístico (Date Frame)	
##	Cartografía Básica Urbana (Date Frame)	
	Ciudad Bacalar	

	Bienes expuestos BCL		
	BCL		
	Limonos		
	Ciudad Cancún		
	Bienes expuestos BJ		
	Cancun		
	Alfredo V. Bonfil		
	Leona Vicario		
	Puerto Morelos		
	Ciudad Chetumal		
	Bienes expuestos OPB		
	CTM		
	Alvaro Obregón		
	Calderitas		
	Javier Rojo Gómez		
	Nicolas Bravo		
	Sergio Butrón Casas		
	Ciudad Cozumel		
	Bienes expuestos CZL		
	CZL		
	Ciudad Felipe Carrillo Puerto		
	Bienes expuestos FCP		
	FCP		
	Chunhuhub		
	Señor		
	Tepich		
	Ciudad Isla Mujeres		
	Bienes expuestos IM		
	IM		
	Ejido IM		
	Ciudad José María Morelos		
	Bienes expuestos JMM		
	JMM		
	Dziuche		
	Ciudad Kantunilkin		
	Bienes expuestos LC		
	Kantunilkin		
	Ciudad Playa del Carmen		
	Bienes expuestos SLD		
	PDC		
	Puerto Aventuras		
	Ciudad Tulum		
	Bienes expuestos TLM		
	TLM		

		Mapa de Vulnerabilidad Ciudad	QR_VLN_SIS_Kan		
		Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_SIS_LOC_LC	QR-FG-VS-LC-29-Mp	200
		Bienes Expuestos			
		Vulnerabilidad Municipio de Solidaridad (Date Frame)			
		Mapa de Vulnerabilidad Ciudad	QR_VLN_SIS_Pla	QR-FG-VS-SLD-30-Mp	150
		Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_SIS_LOC_SLD		
		Bienes Expuestos			
		Vulnerabilidad Municipio de Tulum (Date Frame)			
		Mapa de Vulnerabilidad Ciudad	QR_VLN_SIS_Tul	QR-FG-VS-TLM-31-Mp	150
		Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_SIS_LOC_TLM		
		Bienes Expuestos			
		Vulnerabilidad Municipio de Bacalar (Date Frame)			
		Mapa de Vulnerabilidad Ciudad	QR_VLN_SIS_Bac	QR-FG-VS-BCL-32-Mp	250
		Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_SIS_LOC_BCL		
		Bienes Expuestos			
5.4	Tsunamis				
			NOMBRE SHAPE		
		Peligro del Estado (Date Frame)		QR-FG-TSM-33-E	600
		Mapa de Peligro	QR_PLG_TS_Q_Roo		
			NOMBRE SHAPE		
		Vulnerabilidad Municipio de Cozumel (Date Frame)			
		Mapa de Vulnerabilidad Ciudad	QR_VLN_SIS_Coz	QR-FG-VT-CZL-34-Mp	70
		Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_SIS_LOC_CZL		
		Bienes Expuestos			
		Vulnerabilidad Municipio de Isla Mujeres (Date Frame)			
		Mapa de Vulnerabilidad Ciudad	QR_VLN_SIS_Isl	QR-FG-VT-IM-35-Mp	80
		Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_SIS_LOC_IM		
		Bienes Expuestos			
		Vulnerabilidad Municipio de Othón P. Blanco (Date Frame)			
		Mapa de Vulnerabilidad Ciudad	QR_VLN_SIS_Che	QR-FG-VT-OPB-36-Mp	300
		Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_SIS_LOC_OPB		
		Bienes Expuestos			
		Vulnerabilidad Municipio de Benito Juárez (Date Frame)			
		Mapa de Vulnerabilidad Ciudad	QR_VLN_SIS_Can	QR-FG-VT-BJ-37-Mp	100
		Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_SIS_LOC_BJ		
		Bienes Expuestos			
		Vulnerabilidad Municipio de Solidaridad (Date Frame)			
		Mapa de Vulnerabilidad Ciudad	QR_VLN_SIS_Pla	QR-FG-VT-SLD-38-Mp	150
		Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_SIS_LOC_SLD		
		Bienes Expuestos			
		Vulnerabilidad Municipio de Isla TuUm (Date Frame)			
		Mapa de Vulnerabilidad Ciudad	QR_VLN_SIS_Tul	QR-FG-VT-TLM-39-Mp	150
		Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_SIS_LOC_TLM		
		Bienes Expuestos			

6	FENÓMENOS HIDROMETEOROLÓGICOS			
6.1	Inundaciones Costeras por Marea de Tormenta			
		NOMBRE SHAPE	NOMBRE MAPA DE SALIDA	CREADO
		Peligro Ciudad de Cozumel (Date Frame)		
		Mapa de Peligro	QR_PLG_ICMT_Coz	QR-FH-PMT-COZ-40-Cd
		Peligro Ciudad de Isla Mujeres (Date Frame)		
		Mapa de Peligro	QR_PLG_ICMT_Isl	QR-FH-PI-MT-ISL-41-Cd
		Peligro Ciudad de Chetumal (Date Frame)		
		Mapa de Peligro	QR_PLG_ICMT_Che	QR-FH-PI-MT-CHE-42-Cd
		Peligro Ciudad de Cancún (Date Frame)		
		Mapa de Peligro	QR_PLG_ICMT_Can	QR-FH-PI-MT-CAN-43-Cd
		Peligro Ciudad de Playa del Carmen (Date Frame)		
		Mapa de Peligro	QR_PLG_ICMT_Pla	QR-FH-PI-MT-PLA-44-Cd
		Peligro Ciudad de Tulum (Date Frame)		
		Mapa de Peligro	QR_PLG_ICMT_Tul	QR-FH-PI-MT-TUL-45-Cd
			NOMBRE SHAPE	
		Vulnerabilidad Ciudad de Cozumel (Date Frame)		
		Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_ICMT_Coz	QR-FH-VI-MT-COZ-46-Cd
		Bienes Expuestos		
		Vulnerabilidad Ciudad de Isla Mujeres (Date Frame)		
		Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_ICMT_Isl	QR-FH-VI-MT-ISL-47-Cd
		Bienes Expuestos		
		Vulnerabilidad Ciudad de Chetumal (Date Frame)		
		Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_ICMT_Che	QR-FH-VI-MT-CHE-48-Cd
		Bienes Expuestos		
		Vulnerabilidad Ciudad de Cancún (Date Frame)		
		Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_ICMT_Can	QR-FH-VI-MT-CAN-49-Cd
		Bienes Expuestos		
		Vulnerabilidad Ciudad de Playa del Carmen (Date Frame)		
		Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_ICMT_Pla	QR-FH-VI-MT-PLA-50-Cd
		Bienes Expuestos		
		Vulnerabilidad Ciudad de Tulum (Date Frame)		
		Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_ICMT_Tul	QR-FH-VI-MT-TUL-51-Cd
		Bienes Expuestos		
			NOMBRE SHAPE	
		Riesgo Ciudad de Cozumel (Date Frame)		
		Mapa de Riesgo	QR_RSG_ICMT_Coz	QR-FH-RI-MT-COZ-52-Cd
		Riesgo Ciudad de Isla Mujeres (Date Frame)		
		Mapa de Riesgo	QR_RSG_ICMT_Isl	QR-FH-RI-MT-ISL-53-Cd
		Riesgo Ciudad de Chetumal (Date Frame)		
		Mapa de Riesgo	QR_RSG_ICMT_Che	QR-FH-RI-MT-CHE-54-Cd
		Riesgo Ciudad de Cancún (Date Frame)		
		Mapa de Riesgo	QR_RSG_ICMT_Can	QR-FH-RI-MT-CAN-55-Cd
		Riesgo Ciudad de Playa del Carmen (Date Frame)		

	Mapa de Riesgo	QR_RSG ICTM_Pla	QR-FH-RI-MT-PLA-56-Cd	
	Riesgo Ciudad de Tulúm (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RSG ICTM_Tul	QR-FH-RI-MT-TUL-57-Cd	
6.2	Inundaciones			
		NOMBRE SHAPE	NOMBRE MAPA DE SALIDA	CREADO
	Peligro Municipio de Felipe Carrillo Puerto (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_INU_FCP	QR-FH-PI-FCP-58-Mp	300
	Peligro Municipio de Othón P. Blanco (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_INU_OPB	QR-FH-PI-OPB-59-Mp	300
	Peligro Municipio de José María Morelos (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_INU_JMM	QR-FH-PI-JMM-60-Mp	200
	Peligro Municipio de Bacalar (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_INU_BCL	QR-FH-PI-BCL-61-Mp	250
		NOMBRE SHAPE		
	Vulnerabilidad Municipio de Felipe Carrillo Puerto (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_PLG_INU_FCP	QR-FH-VI-FCP-62-Mp	300
	Bienes Expuestos			
	Vulnerabilidad Municipio de Othón P. Blanco (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_PLG_INU_OPB	QR-FH-VI-OPB-63-Mp	300
	Bienes Expuestos			
	Vulnerabilidad Municipio de José María Morelos (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_PLG_INU_JMM	QR-FH-VI-JMM-64-Mp	200
	Bienes Expuestos			
	Vulnerabilidad Municipio de Bacalar (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_PLG_INU_BCL	QR-FH-VI-BCL-65-Mp	250
	Bienes Expuestos			
		NOMBRE SHAPE		
	Riesgo Municipio de Felipe Carrillo Puerto (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RSG_INU_FCP	QR-FH-VI-FCP-66-Mp	
	Riesgo Municipio de Othón P. Blanco (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RGS_INU_OPB	QR-FH-VI-OPB-67-Mp	
	Riesgo Municipio de José María Morelos (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RGS_INU_JMM	QR-FH-VI-JMM-68-Mp	
	Riesgo Municipio de Bacalar (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RGS_INU_BCL	QR-FH-VI-BCL-69-Mp	
		NOMBRE SHAPE	NOMBRE MAPA DE SALIDA	CREADO
	Peligro Ciudad de Cozumel (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_INU_Coz	QR-FH-PI-COZ-70-Cd	15
	Peligro Ciudad de Felipe Carrillo Puerto (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_INU_Fel	QR-FH-PI-FEL-71-Cd	6.5
	Peligro Ciudad de Isla Mujeres (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_INU_Isl	QR-FH-PI-ISL-72-Cd	13
	Peligro Ciudad de Chetumal (Date Frame)			

	Mapa de Peligro	QR_PLG_INU_Che	QR-FH-PI-CHE-73-Cd	15
	Peligro Ciudad de Cancún (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_INU_Can	QR-FH-PI-CAN-74-Cd	40
	Peligro Ciudad de Playa del Carmen (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_INU_Pla	QR-FH-PI-PLA-75-Cd	20
	Peligro Ciudad de Bacalar (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_INU_Bac	QR-FH-PI-BAC-76-Cd	7.5
		NOMBRE SHAPE		
	Vulnerabilidad Ciudad de Cozumel (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_INU_Coz	QR-FH-VI-COZ-77-Cd	15
	Bienes Expuestos			
	Vulnerabilidad Ciudad de Felipe Carrillo Puerto (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_INU_Fel	QR-FH-VI-FEL-78-Cd	6.5
	Bienes Expuestos			
	Vulnerabilidad Ciudad de Isla Mujeres (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_INU_Isl	QR-FH-VI-ISL-79-Cd	13
	Bienes Expuestos			
	Vulnerabilidad Ciudad de Chetumal (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_INU_Che	QR-FH-VI-CHE-80-Cd	15
	Bienes Expuestos			
	Vulnerabilidad Ciudad de Cancún (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_INU_Can	QR-FH-VI-CAN-81-Cd	40
	Bienes Expuestos			
	Vulnerabilidad Ciudad de Playa del Carmen (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_INU_Pla	QR-FH-VI-PLA-82-Cd	20
	Bienes Expuestos			
	Vulnerabilidad Ciudad de Bacalar (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_INU_Bac	QR-FH-VI-BAC-83-Cd	8
	Bienes Expuestos			
		NOMBRE SHAPE		
	Riesgo Ciudad de Cozumel (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RSG_INU_Coz	QR-FH-RI-COZ-84-Cd	15
	Riesgo Ciudad de Felipe Carrillo Puerto (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RSG_INU_Fel	QR-FH-RI-FEL-85-Cd	6.5
	Riesgo Ciudad de Isla Mujeres (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RSG_INU_Isl	QR-FH-RI-ISL-86-Cd	13
	Riesgo Ciudad de Chetumal (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RSG_INU_Che	QR-FH-RI-CHE-87-Cd	15
	Riesgo Ciudad de Cancún (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RSG_INU_Can	QR-FH-RI-CAN-88-Cd	40
	Riesgo Ciudad de Playa del Carmen (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RSG_INU_Pla	QR-FH-RI-PLA-89-Cd	20
	Riesgo Ciudad de Bacalar (Date Frame)			

	Mapa de Riesgo	QR_RSG_INU_Bac	QR-FH-RI-BAC-90-Cd	7.5
		NOMBRE SHAPE	NOMBRE MAPA DE SALIDA	CREADO
	Peligro Río Hondo (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_INU_RH	QR-FH-PI-RH-91	85
		NOMBRE SHAPE		
	Vulnerabilidad Río Hondo (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_INU_RH	QR-FH-VI-RH-92	
	Bienes Expuestos	QR_BE_INU_RH		
		NOMBRE SHAPE		
	Riesgo Río Hondo (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RSG_INU_RH	QR-FH-RI-RH-93	
6.3	Vientos			
		NOMBRE SHAPE	NOMBRE MAPA DE SALIDA	CREADO
	Peligro Ciudad de Cozumel (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_VI_Coz	QR-FH-PV-COZ-94-Cd	15
	Peligro Ciudad de Felipe Carrillo Puerto (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_VI_Fel	QR-FH-PV-FEL-95-Cd	6.5
	Peligro Ciudad de Isla Mujeres (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_VI_Isl	QR-FH-PV-ISL-96-Cd	13
	Peligro Ciudad de Chetumal (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_VI_Che	QR-FH-PV-CHE-97-Cd	15
	Peligro Ciudad de Cancún (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_VI_Can	QR-FH-PV-CAN-98-Cd	40
	Peligro Ciudad de José María Morelos (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_VI_Mor	QR-FH-PV-MOR-99-Cd	6.5
	Peligro Ciudad de Kantunilkin (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_VI_Kan	QR-FH-PV-KAN-100-Cd	5.5
	Peligro Ciudad de Playa del Carmen (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_VI_Pla	QR-FH-PV-PLA-101-Cd	20
	Peligro Ciudad de Tulum (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_VI_Tul	QR-FH-PV-TLU-102-Cd	12
	Peligro Ciudad de Bacalar (Date Frame)			
	Mapa de Peligro	QR_PLG_VI_Bac	QR-FH-PV-BAC-103-Cd	7.5
		NOMBRE SHAPE		
	Vulnerabilidad Ciudad de Cozumel (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_VI_Coz	QR-FH-VV-COZ-104-Cd	15
	Bienes Expuestos	QR_BE_VI_Coz		
	Vulnerabilidad Ciudad de Felipe Carrillo Puerto (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_VI_Fel	QR-FH-VV-FEL-105-Cd	6.5
	Bienes Expuestos	QR_BE_VI_Fel		
	Vulnerabilidad Ciudad de Isla Mujeres (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_VI_Isl	QR-FH-VV-ISL-106-Cd	13
	Bienes Expuestos	QR_BE_VI_Isl		

	Vulnerabilidad Ciudad de Chetumal (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_VI_Che	QR-FH-VV-CHE-107-Cd	15
	Bienes Expuestos	QR_BE_VI_Che		
	Vulnerabilidad Ciudad de Cancún (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_VI_Can	QR-FH-VV-CAN-108-Cd	40
	Bienes Expuestos	QR_BE_VI_Can		
	Vulnerabilidad Ciudad de José María Morelos (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_VI_Mor	QR-FH-VV-MOR-109-Cd	6.5
	Bienes Expuestos	QR_BE_VI_Mor		
	Vulnerabilidad Ciudad de Kantunilkin (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_VI_Kan	QR-FH-VV-KAN-110-Cd	5.5
	Bienes Expuestos	QR_BE_VI_Kan		
	Vulnerabilidad Ciudad de Playa del Carmen (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_VI_Pla	QR-FH-VV-PLA-111-Cd	20
	Bienes Expuestos	QR_BE_VI_Pla		
	Vulnerabilidad Ciudad de Tulum (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_VI_Tul	QR-FH-VV-TUL-112-Cd	12
	Bienes Expuestos	QR_BE_VI_Tul		
	Vulnerabilidad Ciudad de Bacalar (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad	QR_VLN_VI_Bac	QR-FH-VV-BAC-113-Cd	8
	Bienes Expuestos	QR_BE_VI_Bac		
		NOMBRE SHAPE		
	Riesgo Ciudad de Cozumel (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RSG_VI_Coz	QR-FH-RV-COZ-114-Cd	
	Riesgo Ciudad de Felipe Carrillo Puerto (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RSG_VI_Fel	QR-FH-RV-FEL-115-Cd	
	Riesgo Ciudad de Isla Mujeres (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RSG_VI_Isl	QR-FH-RV-ISL-116-Cd	
	Riesgo Ciudad de Chetumal (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RSG_VI_Che	QR-FH-RV-CHE-117-Cd	
	Riesgo Ciudad de Cancún (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RSG_VI_Can	QR-FH-RV-CAN-118-Cd	
	Riesgo Ciudad de José María Morelos (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RSG_VI_Mor	QR-FH-RV-MOR-119-Cd	
	Riesgo Ciudad de Kantunilkin (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RSG_VI_Kan	QR-FH-RV-KAN-120-Cd	
	Riesgo Ciudad de Playa del Carmen (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RSG_VI_Pla	QR-FH-RV-PLA-121-Cd	
	Riesgo Ciudad de Tulum (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RSG_VI_Tul	QR-FH-RV-TUL-122-Cd	
	Riesgo Ciudad de Bacalar (Date Frame)			
	Mapa de Riesgo	QR_RSG_VI_Bac	QR-FH-RV-BAC-123-Cd	
6.4	Ciclones Tropicales			
		NOMBRE SHAPE		

		Peligro Municipio del Estado (Date Frame)		
		Mapa de Trayectorias	QR TRAY CT Q. Roo	QR-FH-TRAY-CT-124-E
				600
7	FENÓMENOS QUÍMICOS			
7.1	Almacenamiento			
		NOMBRE SHAPE		
		Peligro Ciudad de Cozumel (Date Frame)		
		Mapa de Peligro por Fuga (Gases)	QR PLG FUG Coz	QR-FQ-PAL-COZ-125-CD
		Mapa de Peligro por Derrame (Gasolina)	QR PLG DER Coz	
		Puntos de Verificación Gasolineras	QR PV GL Bac	
		Puntos de Verificación Gaseras	QR PV GS Bac	
		Peligro Ciudad de Felipe Carrillo Puerto (Date Frame)		
		Mapa de Peligro por Fuga (Gases)	QR PLG FUG Fel	QR-FQ-PAL-FEL-126-CD
		Mapa de Peligro por Derrame (Gasolina)	QR PLG DER Fel	
		Puntos de Verificación Gasolineras	QR PV GL Fel	
		Puntos de Verificación Gaseras	QR PV GS Fel	
		Peligro Ciudad de Isla Mujeres (Date Frame)		
		Mapa de Peligro por Fuga (Gases)	QR PLG FUG Isl	QR-FQ-PAL-ISL-127-CD
		Mapa de Peligro por Derrame (Gasolina)	QR PLG DER Isl	
		Puntos de Verificación Gasolineras	QR PV GL Isl	
		Puntos de Verificación Gaseras	QR PV GS Isl	
		Peligro Ciudad de Chetumal (Date Frame)		
		Mapa de Peligro por Fuga (Gases)	QR PLG FUG Che	QR-FQ-PAL-CHE-128-CD
		Mapa de Peligro por Derrame (Gasolina)	QR PLG DER Che	
		Puntos de Verificación Gasolineras	QR PV GL Che	
		Puntos de Verificación Gaseras	QR PV GS Che	
		Peligro Ciudad de Cancún (Date Frame)		
		Mapa de Peligro por Fuga (Gases)	QR PLG FUG Can	QR-FQ-PAL-CAN-129-CD
		Mapa de Peligro por Derrame (Gasolina)	QR PLG DER Can	
		Puntos de Verificación Gasolineras	QR PV GL Can	
		Puntos de Verificación Gaseras	QR PV GS Can	
		Peligro Ciudad de Playa del Carmel (Date Frame)		
		Mapa de Peligro por Fuga (Gases)	QR PLG FUG Pla	QR-FQ-PAL-PLA-130-CD
		Mapa de Peligro por Derrame (Gasolina)	QR PLG DER Pla	
		Puntos de Verificación Gasolineras	QR PV GL Pla	
		Puntos de Verificación Gaseras	QR PV GS Pla	
		Peligro Ciudad de Bacalar (Date Frame)		
		Mapa de Peligro por Fuga (Gases)	QR PLG FUG Bac	QR-FQ-PAL-BAC-131-CD
		Mapa de Peligro por Derrame (Gasolina)	QR PLG DER Bac	
		Puntos de Verificación Gasolineras	QR PV GL Bac	
		Puntos de Verificación Gaseras	QR PV GS Bac	
		NOMBRE SHAPE		
		Vulnerabilidad Ciudad de Cozumel (Date Frame)		
		Mapa de Vulnerabilidad por Fuga (Gases)	QR_VLN_RCAL_Coz	QR-FQ-VAL-COZ-132-CD
		Mapa de Vulnerabilidad por Derrame (Gasolina)		

		Bienes Expuestos		
		Vulnerabilidad Ciudad de Felipe Carrillo Puerto (Date Frame)		
		Mapa de Vulnerabilidad por Fuga (Gases)	QR_VLN_RCAL_Fel	QR-FQ-VAL-FEL-133-CD
		Mapa de Vulnerabilidad por Derrame (Gasolina)		
		Bienes Expuestos		7
		Vulnerabilidad Ciudad de Isla Mujeres (Date Frame)		
		Mapa de Vulnerabilidad por Fuga (Gases)	QR_VLN_RCAL_Isl	QR-FQ-VAL-ISL-134-CD
		Mapa de Vulnerabilidad por Derrame (Gasolina)		
		Bienes Expuestos		13
		Vulnerabilidad Ciudad de Chetumal (Date Frame)		
		Mapa de Vulnerabilidad por Fuga (Gases)	QR_VLN_RCAL_Che	QR-FQ-VAL-CHE-135-CD
		Mapa de Vulnerabilidad por Derrame (Gasolina)		
		Bienes Expuestos		15
		Vulnerabilidad Ciudad de Cancún (Date Frame)		
		Mapa de Vulnerabilidad por Fuga (Gases)	QR_VLN_RCAL_Can	QR-FQ-VAL-CAN-136-CD
		Mapa de Vulnerabilidad por Derrame (Gasolina)		
		Bienes Expuestos		40
		Vulnerabilidad Ciudad de Playa del Carmen (Date Frame)		
		Mapa de Vulnerabilidad por Fuga (Gases)	QR_VLN_RCAL_Pla	QR-FQ-VAL-PLA-137-CD
		Mapa de Vulnerabilidad por Derrame (Gasolina)		
		Bienes Expuestos		20
		Vulnerabilidad Ciudad de Bacalar (Date Frame)		
		Mapa de Vulnerabilidad por Fuga (Gases)	QR_VLN_RCAL_Bac	QR-FQ-VAL-BAC-138-CD
		Mapa de Vulnerabilidad por Derrame (Gasolina)		
		Bienes Expuestos		8
		7.2	Transportación	
		NOMBRE SHAPE		
		Peligro del Estado (Date Frame)		
		Mapa de Peligro por Derrame (Gasolina)	QR PLG TQ DER	QR-FQ/PTRANS-Q. ROO-139-E
		Mapa de Peligro por Fuga (Gases)	QR PLG TQ FUG	
		NOMBRE SHAPE		600
		Vulnerabilidad Municipio de Cozumel (Date Frame)		
		Mapa de Vulnerabilidad ciudad	QR_VLN_RCAL_Coz	QR-FQ-VTRANS-CZL-140-MP
		Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_RCAL_LOC_CZL	
		Bienes Expuestos		70
		Vulnerabilidad Municipio de Felipe Carrillo Puerto (Date Frame)		
		Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_RCAL_Fel	QR-FQ-VTRANS-CZL-141-MP
		Mapa de Vulnerabilidad ciudad	QR_VLN_RCAL_LOC_FCP	
		Bienes Expuestos		300
		Vulnerabilidad Municipio de Isla Mujeres (Date Frame)		
		Mapa de Vulnerabilidad ciudad	QR_VLN_RCAL_Isl	QR-FQ-VTRANS-CZL-142-MP
		Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_RCAL_LOC_IM	
		Bienes Expuestos		80

	Vulnerabilidad Municipio de Othón P. Blanco (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad ciudad	QR_VLN_RCAL_Che	QR-FQ-VTRANS-CZL-143-MP	300
	Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_RCAL_LOC_OPB		
	Bienes Expuestos			
	Vulnerabilidad Municipio de Benito Juárez (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad ciudad	QR_VLN_RCAL_Can	QR-FQ-VTRANS-CZL-144-MP	100
	Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_RCAL_LOC_BJ		
	Bienes Expuestos			
	Vulnerabilidad Municipio de José María Morelos (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad ciudad	QR_VLN_RCAL_Mor	QR-FQ-VTRANS-CZL-145-MP	200
	Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_RCAL_LOC_JMM		
	Bienes Expuestos			
	Vulnerabilidad Municipio de Lázaro Cardenas (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad ciudad	QR_VLN_RCAL_Kan	QR-FQ-VTRANS-CZL-146-MP	200
	Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_RCAL_LOC_LC		
	Bienes Expuestos			
	Vulnerabilidad Municipio de Solidaridad (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad ciudad	QR_VLN_RCAL_Pla	QR-FQ-VTRANS-CZL-146-MP	150
	Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_RCAL_LOC_SLD		
	Bienes Expuestos			
	Vulnerabilidad Municipio de Tulum (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad ciudad	QR_VLN_RCAL_Tul	QR-FQ-VTRANS-CZL-146-MP	150
	Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_RCAL_TLM		
	Bienes Expuestos			
	Vulnerabilidad Municipio de Bacalar (Date Frame)			
	Mapa de Vulnerabilidad ciudad	QR_VLN_RCAL_Bac	QR-FQ-VTRANS-CZL-146-MP	250
	Mapa de Vulnerabilidad Localidades	QR_VLN_RCAL_BCL		
	Bienes Expuestos			
7.3	Incendios Forestales			
		NOMBRE SHAPE		
	Peligro Municipio de Cozumel (Date Frame)			
	Mapa Historico de Incendios Forestales	IF_CZL_(Año)	QR-FQ-PIF-CZL-150-MP	70
	Mapa Historico de Incidencias Acumuladas			
	Mapa de Peligro	QR_IPIF_IF_CZL (Estación)		
	Puntos de Verificación	QR_PV_IF_CZL		
	Peligro Municipio de Felipe Carrillo Puerto (Date Frame)			
	Mapa Historico de Incendios Forestales	IF_FCP_(Año)	QR-FQ-PIF-FCP-151-MP	300
	Mapa Historico de Incidencias Acumuladas			
	Mapa de Peligro	QR_IPIF_IF_FCP (Estación)		
	Puntos de Verificación	QR_PV_IF_FCP		
	Peligro Municipio de Isla Mujeres (Date Frame)			
	Mapa Historico de Incendios Forestales	IF_IM_(Año)	QR-FQ-PIF-IM-152-MP	80
	Mapa Historico de Incidencias Acumuladas			

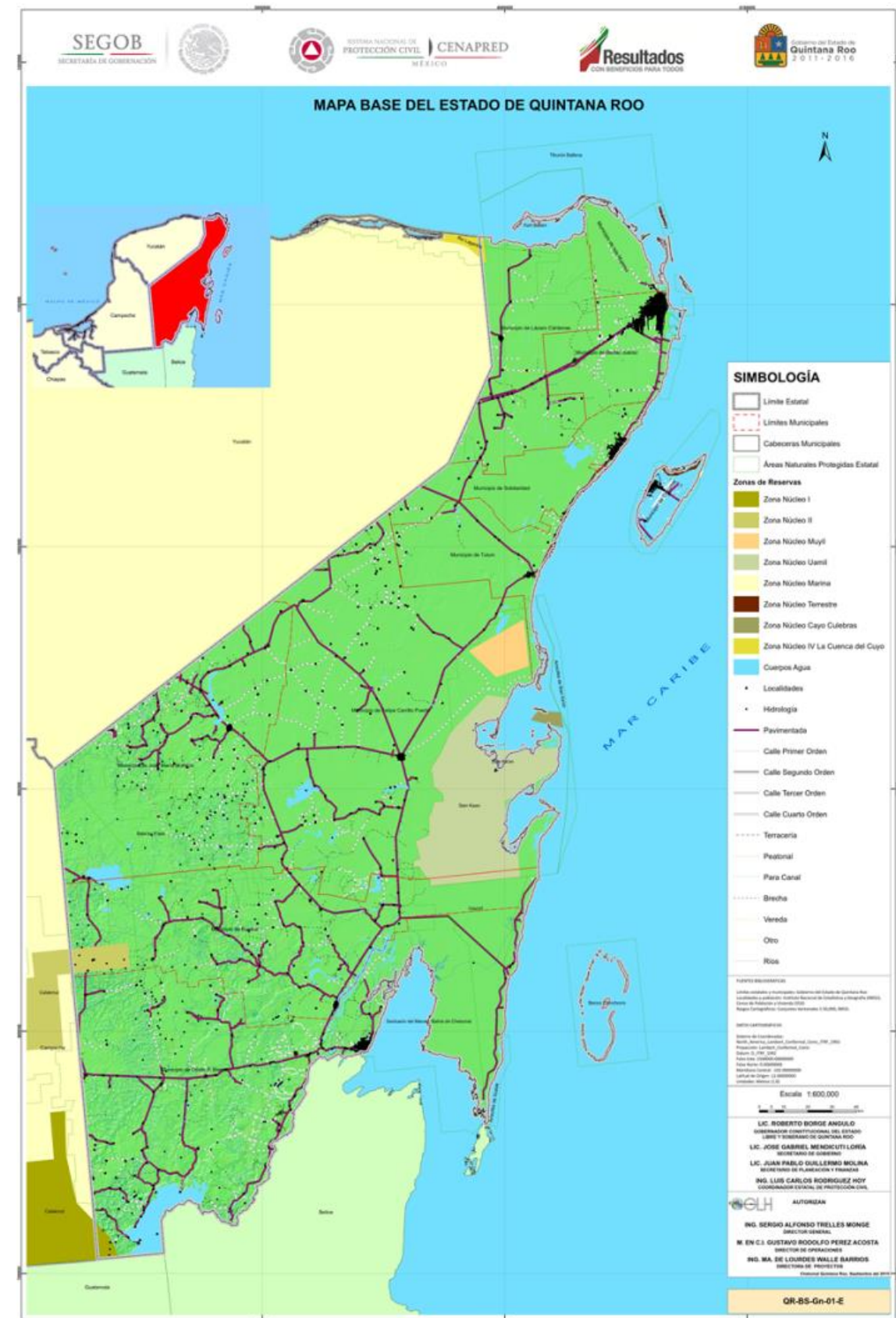
	Mapa de Peligro	QR_IPIF_IF_IM (Estación)		
	Puntos de Verificación	QR_PV_IF_IM		
	Peligro Municipio de Othón P. Blanco (Date Frame)			
	Mapa Historico de Incendios Forestales	IF_OPB_(Año)	QR-FQ-PIF-OPB-153-MP	300
	Mapa Historico de Incidencias Acumuladas			
	Mapa de Peligro	QR_IPIF_IF_OPB (Estación)		
	Puntos de Verificación	QR_PV_IF_OPB		
	Peligro Municipio de Benito Juárez (Date Frame)			
	Mapa Historico de Incendios Forestales	IF_BJ_(Año)	QR-FQ-PIF-BJ-154-MP	100
	Mapa Historico de Incidencias Acumuladas			
	Mapa de Peligro	QR_IPIF_IF_BJ (Estación)		
	Puntos de Verificación	QR_PV_IF_BJ		
	Peligro Municipio de José María Morelos (Date Frame)			
	Mapa Historico de Incendios Forestales	IF_JMM_(Año)	QR-FQ-PIF-JMM-155-MP	200
	Mapa Historico de Incidencias Acumuladas			
	Mapa de Peligro	QR_IPIF_IF_JMM (Estación)		
	Puntos de Verificación	QR_PV_IF_JMM		
	Peligro Municipio de Lázaro Cárdenas (Date Frame)			
	Mapa Historico de Incendios Forestales	IF_LC_(Año)	QR-FQ-PIF-LC-156-MP	200
	Mapa Historico de Incidencias Acumuladas			
	Mapa de Peligro	QR_IPIF_IF_LC (Estación)		
	Puntos de Verificación	QR_PV_IF_LC		
	Peligro Municipio de Solidaridad (Date Frame)			
	Mapa Historico de Incendios Forestales	IF_SLD_(Año)	QR-FQ-PIF-SLD-157-MP	150
	Mapa Historico de Incidencias Acumuladas			
	Mapa de Peligro	QR_IPIF_IF_SLD (Estación)		
	Puntos de Verificación	QR_PV_IF_SLD		
	Peligro Municipio de Tulum (Date Frame)			
	Mapa Historico de Incendios Forestales	IF_TLM_(Año)	QR-FQ-PIF-TLM-158-MP	150
	Mapa Historico de Incidencias Acumuladas			
	Mapa de Peligro	QR_IPIF_IF_TLM (Estación)		
	Puntos de Verificación	QR_PV_IF_TLM		
	Peligro Municipio de Bacalar (Date Frame)			
	Mapa Historico de Incendios Forestales	IF_BCL_(Año)	QR-FQ-PIF-BCL-159-MP	250
	Mapa Historico de Incidencias Acumuladas			
	Mapa de Peligro	QR_IPIF_IF_BCL (Estación)		
	Puntos de Verificación	QR_PV_IF_BCL		
8.0	Vulnerabilidad Social			
		NOMBRE SHAPE		
	Capacidad de Respuesta		QR-VS/GVS-CR-163-MP	600
	Indicadores Socioeconomicos	Varios (17 Layer's)	QR-VS/GVS-ISE-160-MP	600
	Grado Vulnerabilidad Social	GVS Mun	QR-VS/GVS-161-MP	600
	Percepción Local de riesgo		QR-VS/GVS-PLR-162-MP	600
		NOMBRE SHAPE		

	Grado Vulnerabilidad Social Cozumel	GVS_Mza	QR-VS/GVS-COZ-164-CD	15
	Grado Vulnerabilidad Social Felipe Carrillo Puerto	GVS_Mza	QR-VS/GVS-FEL-165-CD	6.5
	Grado Vulnerabilidad Social Isla Mujeres	GVS_Mza	QR-VS/GVS-ISL-166-CD	13
	Grado Vulnerabilidad Social Chetumal	GVS_Mza	QR-VS/GVS-CHE-167-CD	15
	Grado Vulnerabilidad Social Cancún	GVS_Mza	QR-VS/GVS-CAN-168-CD	40
	Grado Vulnerabilidad Social José María Morelos	GVS_Mza	QR-VS/GVS-MOR-169-CD	6.5
	Grado Vulnerabilidad Social Kantunilkin	GVS_Mza	QR-VS/GVS-KAN-170-CD	5.5
	Grado Vulnerabilidad Social Playa del Carmen	GVS_Mza	QR-VS/GVS-PLA-171-CD	20
	Grado Vulnerabilidad Social Tulum	GVS_Mza	QR-VS/GVS-TUL-172-CD	12
	Grado Vulnerabilidad Social Bacalar	GVS_Mza	QR-VS/GVS-BAC-173-CD	8
	Indicadores Socioeconomicos	Varios (13 Layer's)	QR-VS/GVS-ISE-174-CD	15
	NOMBRE SHAPE			
	Grado Vulnerabilidad Social	GVS_LocRou	QR-VS/GVS-176-LOC	600
	Indicadores Socioeconomicos	Varios (15 Layer's)	QR-VS/GVS-ISE-175-LOC	600
	Percepción del Riesgo	Localidades Rurales	QR-VS/GVS-PLR-177-LOC	600
9.0.	Vulnerabilidad Física			
	NOMBRE SHAPE			
	Vulnerabilidad inundaciones	Cabeceras Municipales		
	Vulnerabilidad Radiación Calorífica	Cabeceras Municipales		
	Vulnerabilidad Sismos	Cabeceras Municipales		
	Vulnerabilidad Vientos	Cabeceras Municipales		
	NOMBRE SHAPE			
	Vulnerabilidad inundaciones	Cubrimiento Estatal		
	Vulnerabilidad Radiación Calorífica	Cubrimiento Estatal		
	Vulnerabilidad Sismos	Cubrimiento Estatal		
	Vulnerabilidad Vientos	Cubrimiento Estatal		

2.1.2 Localización

El estado de Q. Roo está localizado al este de la conocida península de Yucatán, colinda hacia el noroeste con Yucatán y al oeste con Campeche; al norte con el golfo de México; al sur con el río Hondo que delimita su frontera con Belice y hacia el suroeste tiene una colindancia con Guatemala, (Mapa 1).

El estado está dividido en diez municipios: Othón P. Blanco, Bacalar, Felipe Carrillo Puerto, José María Morelos, Lázaro Cárdenas, Tulum, Solidaridad, Benito Juárez, Isla Mujeres y Cozumel. La capital es la ciudad de Chetumal y ésta ciudad, al igual que las demás cabeceras municipales, destaca por sus atractivos turísticos.



Mapa 1. Mapa base de Quintana Roo (elaboración propia con información base de INEGI).

Figura 1. Columna estratigráfica del estado de Quintana Roo.

Esta plataforma carbonatada mesozoica y cenozoica fue depositada sobre un complejo basal de posible edad Paleozoica, localizado de 12 a 16 km de profundidad, y que aflora en la Sierra de Chiapas. Campa y Coney (1983) proponen denominar "Terreno Maya" a esta entidad tectónica dentro del marco de la tectónica acrecional.

La secuencia cretácica reconocida a partir de información de subsuelo de núcleos de pozos perforados por PEMEX está constituida principalmente por anhidrita, caliza, dolomía e intercalaciones de bentonita, hacia la base se encuentra formada por las Evaporitas Yucatán.

Las rocas cenozoicas de la Plataforma de Yucatán están representadas por secuencias sedimentarias carbonatadas y dolomíticas con intercalaciones de evaporitas que abarcan un rango desde el Paleoceno al Plioceno. En el Paleoceno se depositaron carbonatos y evaporitas lagunares de la formación Icaiché, sobre una superficie irregular de rocas del Cretácico superior erosionadas, indicando la presencia de un hiatus estratigráfico entre el Cretácico y el Paleógeno.

El Eoceno ha sido referido como la "Formación Chichen Itzá", que consiste de una caliza masiva fosilífera de ambiente de aguas someras, la cual ha sido subdividida de la base a la cima en tres miembros que son: Xcabal, Piste y Chumbec. Hasta la fecha no se conocen registros de depósitos correspondientes al Oligoceno en el territorio quintanarroense. El Mioceno corresponde a las formaciones Bacalar y Estero Franco, que constan de caliza para la primera formación, y de caliza y dolomía para la segunda. La distribución de estas formaciones es mucho más restringida que las anteriormente descritas.

La Formación Carrillo Puerto del Mioceno-Plioceno está constituida por caliza fosilífera, caliza arcillosa y marga, cubre discordantemente a rocas del Mioceno.

El Plioceno-Pleistoceno está caracterizado por *pack Stone* de bioclastos y calcarenitas, así como por arenas mal consolidadas. Durante el Cuaternario se depositaron, cercanos a la actual zona costera, sedimentos de facies litoral, lacustre, palustre y aluvial que cubren las porciones topográficamente más bajas. Los depósitos de litoral están formados por sedimentos no consolidados con presencia de conchas, mientras que los depósitos palustres están constituidos por sedimentos no consolidados de arcillas, limos, sales y material orgánica; los depósitos lacustres contienen lodos calcáreos depositados en lagunas someras formadas en la franja litoral, se encuentran separados del mar por un cordón litoral o por una barrera calcárea; el aluvión contiene arcillas, limos, con algunas gravas calcáreas y se encuentran en planicies al suroccidente del Estado.

Ninguna de las secuencias mencionadas en párrafos anteriores muestran deformaciones significativas y sus estratos conservan una actitud sub horizontal que se extienden y penetran hacia la plataforma marina.⁵

2.1.5 Edafología

Los principales grupos de suelos presentes en el Estado de Quintana Roo, son: Arenosol, Calcisol, Cambisol Fluvisol, Gleysol, Histosol, Leptosol, Luxisol, Luvisol, Nitisol, Phaeozem, Regosol, Solonchak, Vertisol (Mapa 4).

2.1.6 Uso de Suelo y Vegetación

El uso de suelo y vegetación para el Estado presenta los siguientes tipos: Agricultura de riego, agricultura de temporal, agricultura de humedad, asentamientos humanos, manglar, palmar inducido, palmar natural, pastizal halófilo, pastizal inducido, sabana, selva alta, selva baja, selva mediana, tular, dunas costeras y vegetación de Petén (Mapa 5).

2.1.7 Hidrografía

El Estado de Quintana Roo pertenece a dos regiones hidrológicas, RH32 Yucatán Norte (Yucatán) y RH33 Yucatán Este (Quintana Roo). De la primera se derivan dos cuencas: Quintana Roo y Yucatán. De la segunda, se tiene A) Bahía de Chetumal y otras y B) Cuencas Cerradas.

A su vez, cada una de estas cuencas se divide en subcuencas:

Quintana Roo, Mérida, Varias, Bahías La Ascensión y Espíritu Santo, Bahía de Chetumal, Río Hondo, Río Escondido, L. Chunyaxché y varias, Xpechil- Felipe Carrillo Puerto-Chunhuhab, Ycactum, L. Paiyagua, "Becanchén", L. Chichancanab, Loché, Xkanha, sin nombre (Mapa 6).

2.1.8 Áreas Naturales Protegidas

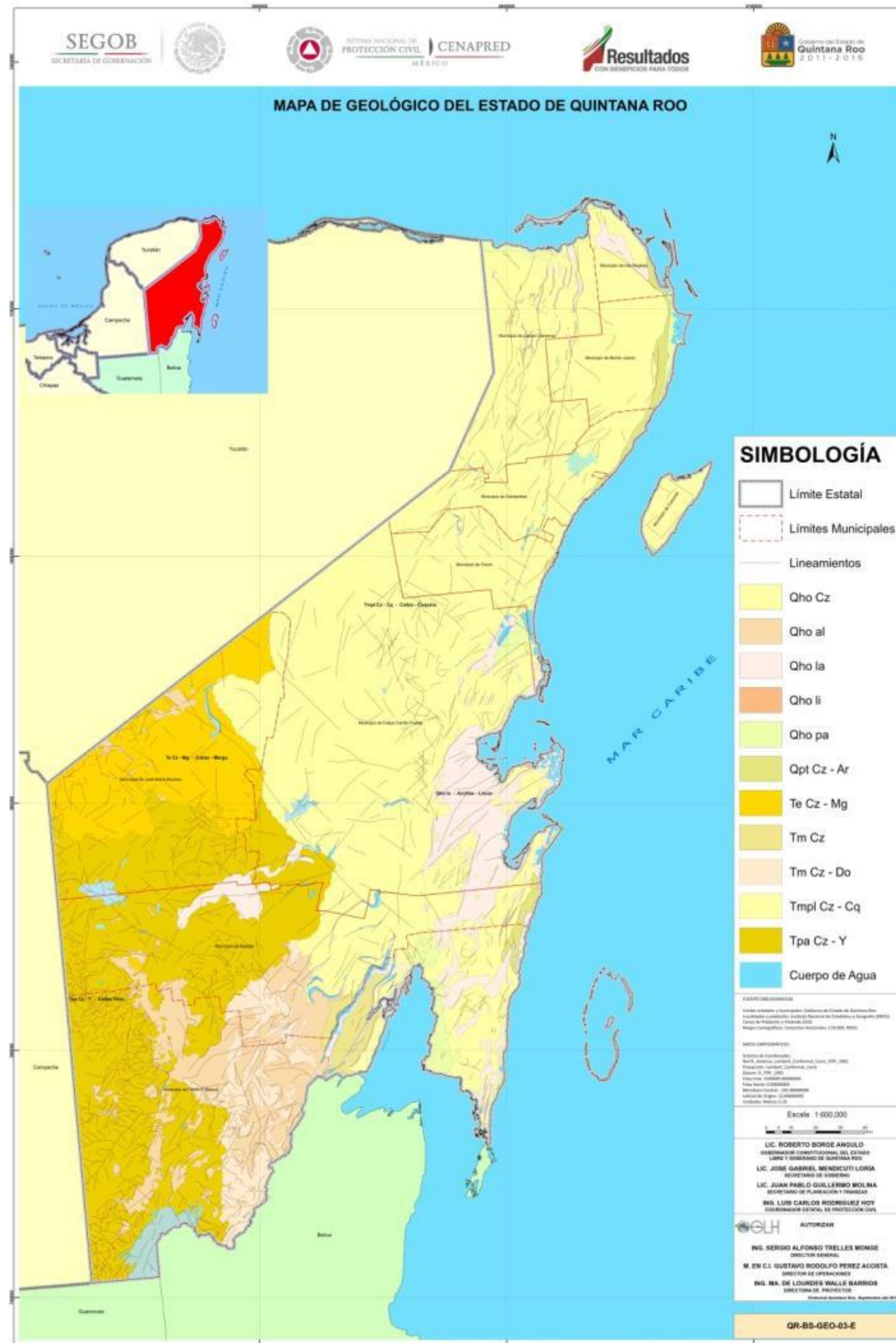
Tabla 12. Áreas Naturales Protegidas Estatales

NOMBRE	TIPO	F DEC	CATEGORIA	FUENTE
Refugio Estatal de Flora y Fauna Sistema Lagunar Chacmochoch	Estatal	09/08/1999	Zona Sujeta a Conservación Ecológica	Decreto LOO
Laguna de Manatí	Estatal	09/08/1999	Zona Sujeta a Conservación Ecológica	Decreto LOO
Santuario de la Tortuga Marina Xcabel - Xcabelito (Terrestre)	Estatal	13/02/1998	Zona Sujeta a Conservación Ecológica	Amigos de Sian Ka'an
Santuario de la Tortuga Marina Xcabel - Xcabelito (Marino)	Estatal	13/02/1998	Zona Sujeta a Conservación Ecológica	Amigos de Sian Ka'an
Refugio Estatal de Flora y Fauna Laguna Colombia	Estatal	10/08/1999	Zona Sujeta a Conservación Ecológica	Aproximación a partir de croquis
Santuario del Manatí, Bahía de Chetumal	Estatal	24/10/1996	Zona Sujeta a Conservación Ecológica	Decreto LOO
Kabah	Estatal	10/11/1995	Parque Urbano	Decreto MCC
Laguna de Chancanaab	Estatal	26/09/1983	Parque Natural	Punto aproximado

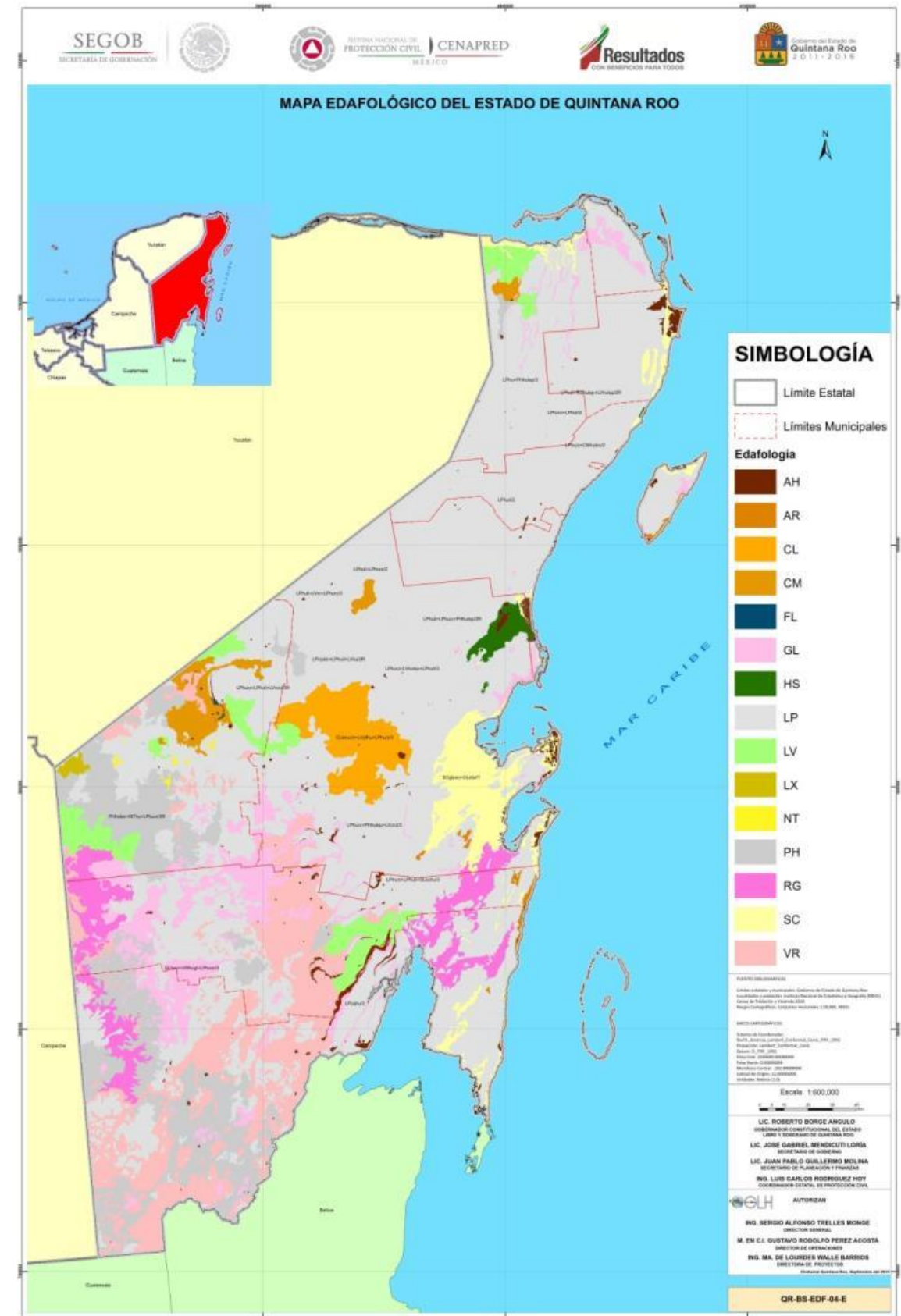
Tabla 13. Áreas Naturales Protegidas Federales

NOMBRE	CAT DECRET
Bala'an Kaax	Área de Protección de Flora y Fauna
Calakmul	Reserva de la Biosfera
Costa Occ. de I. Mujeres, Pta. Cancún y Pta. Nizuc	Parque Marino Nacional
Isla Contoy	Parque Nacional
Manglares de Nichupté	Área de Protección de Flora y Fauna
Otoch Ma'ax Yetel Kooch	Área de Protección de Flora y Fauna
Ría Lagartos	Reserva de la Biosfera
Tiburón Ballena	Reserva de la Biosfera
Tulum	Parque Nacional
Yum Balam	Área de Protección de Flora y Fauna
Arrecifes de Sian Ka'an	Reserva de la Biosfera
Sian Ka'an	Reserva de la Biosfera
Uaymil	Área de Protección de Flora y Fauna
Arrecifes de Xcalak	Parque Nacional
Playa de la Isla Contoy	Santuario
Arrecifes de Cozumel	Parque Marino Nacional
Banco Chinchorro	Reserva de la Biosfera
La porción norte y la franja costera oriental, terrestres y marinas de la Isla de Cozumel	Área de Protección de Flora y Fauna
Arrecife de Puerto Morelos	Parque Nacional

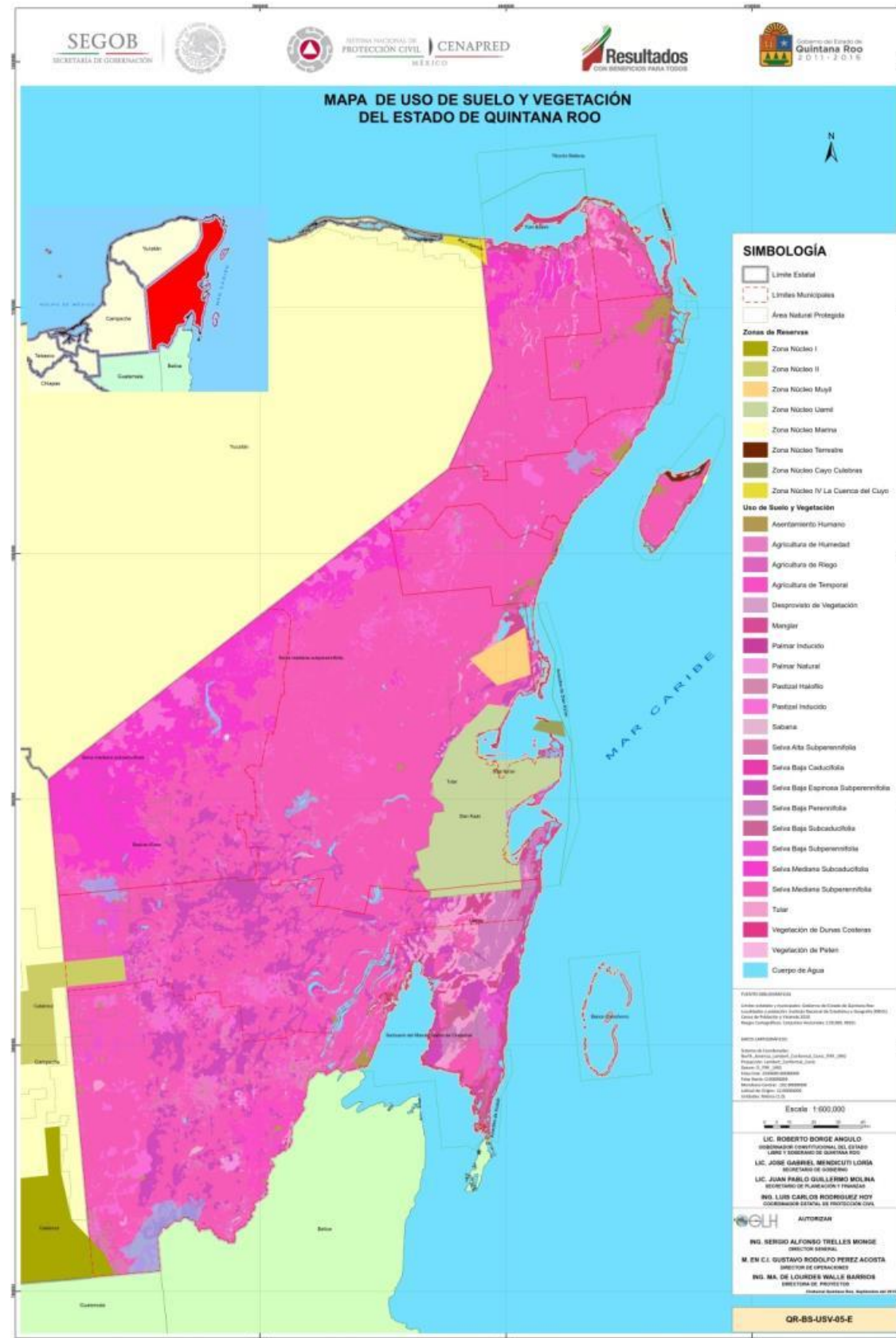
⁵ Síntesis de las Cartas Geológico-Mineras escala 1:250:000 elaboradas por el Consejo de Recursos Minerales, ahora Servicio Geológico Mexicano de la Secretaría de Economía.



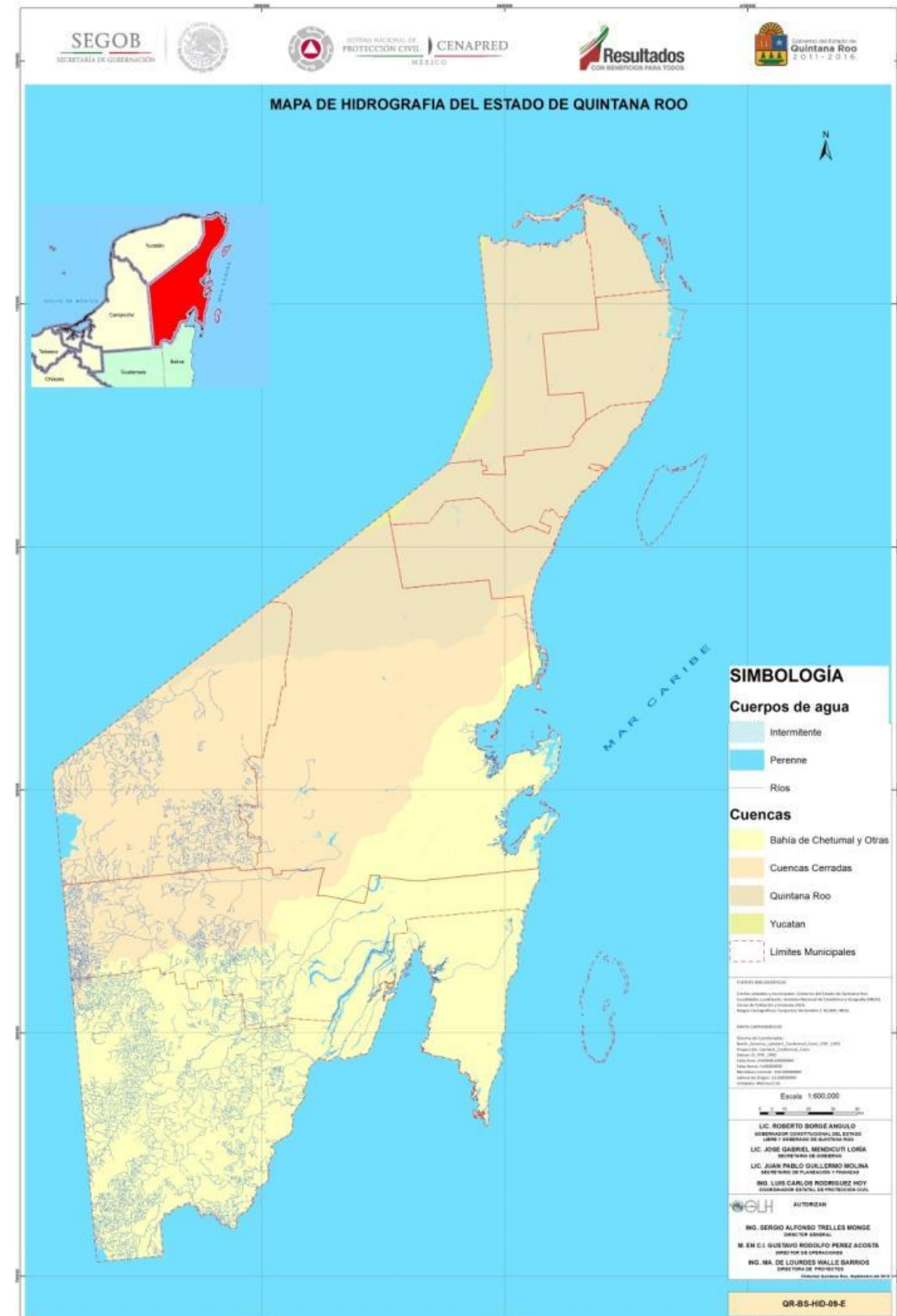
Mapa 3. Geología del estado de Quintana Roo (elaboración propia con información base del SGM).



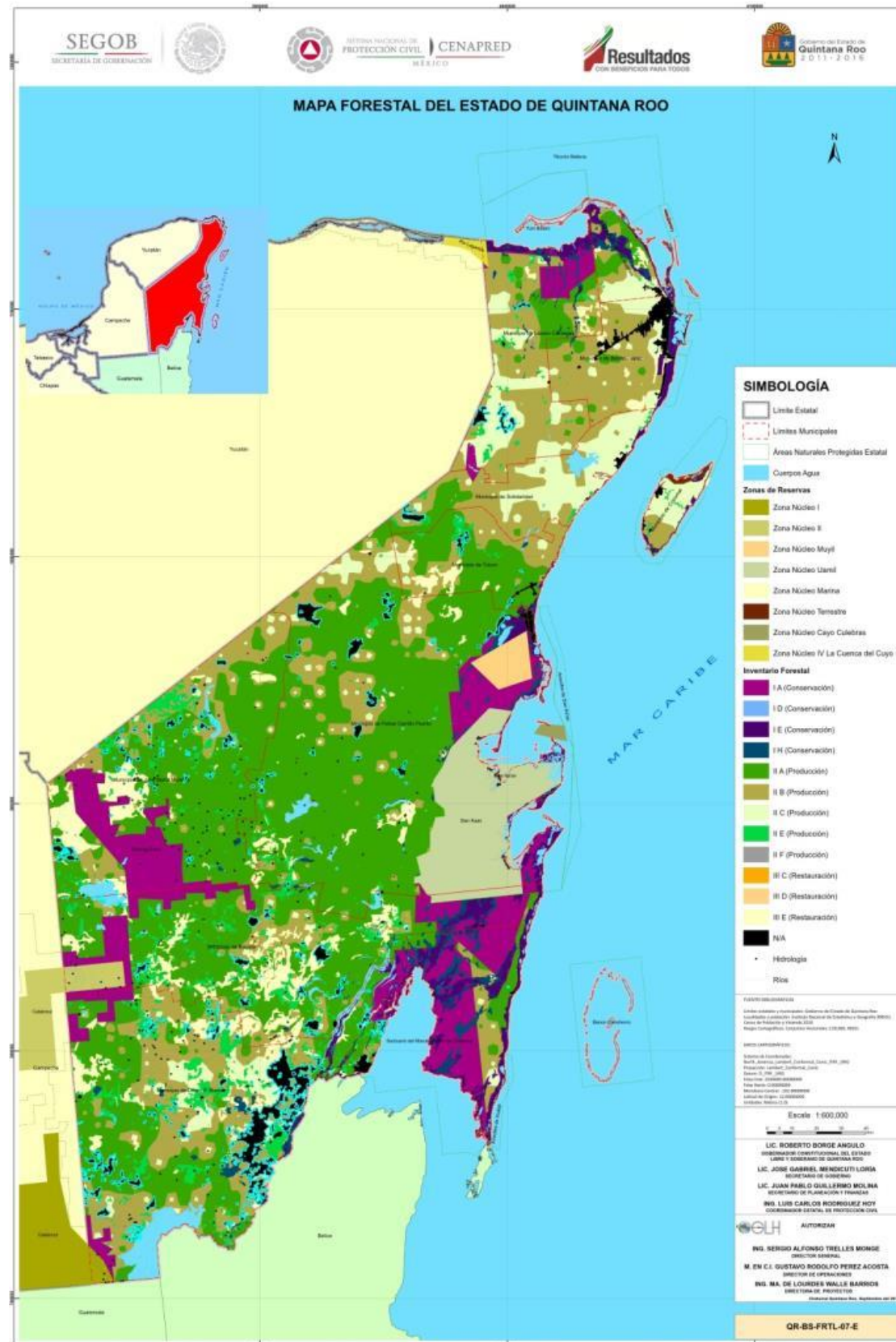
Mapa 4. Edafología del estado de Quintana Roo (elaboración propia con información base de INEGI).



Mapa 5. Uso de Suelo y vegetación del estado de Quintana Roo (elaboración propia con información base de INEGI).



Mapa 6. Hidrografía del estado de Quintana Roo (elaboración propia con información base de INEGI).



Mapa 7. Inventario Estatal Forestal y Áreas Naturales Protegidas (elaboración propia con información base de CONAFOR, CONANP y CONABIO).

2.1.9 Batimetría

Los modelos obtenidos y desarrollados en la representación cartográfica del presente Atlas tuvieron como base la generada por la Secretaría de Marina Armada de México. De acuerdo a la publicación S-32 "Diccionario Hidrográfico", 5ª edición española de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) de 1996, una Catálogo de Cartas y Publicaciones Náuticas Información General 4 carta náutica se define como: "...una carta especialmente destinada para satisfacer los requerimientos de navegación marítima, mostrando profundidades de agua, tipo de fondo, elevaciones, configuración y límites de la costa, peligro y ayudas a la navegación. Durante su construcción, se le asigna escala y uso basándose en la naturaleza de los datos, determinándose el propósito de navegación, la cobertura y la calidad de los datos que en esta se muestra." Las cartas náuticas son consideradas uno de los elementos más importantes para la navegación, porque en ellas se representa de manera gráfica la información relevante para el navegante, permitiendo planear y dar seguimiento a la derrota del buque en cualquier instante, por cualquier procedimiento (astronómico, estima, o marcaciones a la costa, radiogoniométrico, satelital, etc.), para trasladarse de manera segura de un lugar a otro, evitando los peligros indicados en la misma carta.

Algunos conceptos entran en estas cartas náuticas son (<http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/mares/>, 2016):

- Mar Territorial de México constituye la franja del mar adyacente a las costas nacionales, sean continentales o insulares, en la cual la Nación ejerce soberanía, incluyendo el lecho y subsuelo de ese mar, así como el espacio aéreo suprayacente. La anchura es de 12 millas náuticas (22,224 m), medidas a partir de la línea de base, sean normal o rectas o una combinación de las mismas.
- La Zona Contigua de México es una zona adyacente al mar territorial que se extiende hasta las 24 millas náuticas (44,448 m), contadas a partir de las líneas de base, de las cuales se mide la anchura del Mar Territorial.
- La Zona Económica Exclusiva (ZEE) de México es un área situada más allá del mar territorial y adyacente a éste. Comprende la franja de mar que se mide desde el límite exterior del mar territorial hasta una distancia máxima de 200 millas náuticas (370.4 km) mar adentro, contadas a partir de la línea base desde la que se mide la anchura de éste. El límite interior de la ZEE coincide idénticamente con el límite exterior del Mar Territorial. En esta zona la Nación ejerce derechos de soberanía para fines de exploración y explotación económica, es decir, es una zona donde los barcos mexicanos pueden circular libremente con fines de transporte o para aprovechar sus recursos naturales.

Hasta el momento, las guías metodológicas no incluyen conceptos o metodologías que incluyan estas áreas marinas ni como involucrarlas en la gestión de riesgos. Es altamente recomendable que al menos la zona denominada Mar Territorial sea incluida, y que en este Atlas se hizo el ejercicio tanto para los modelos generados como para el inventario de los bienes expuestos.

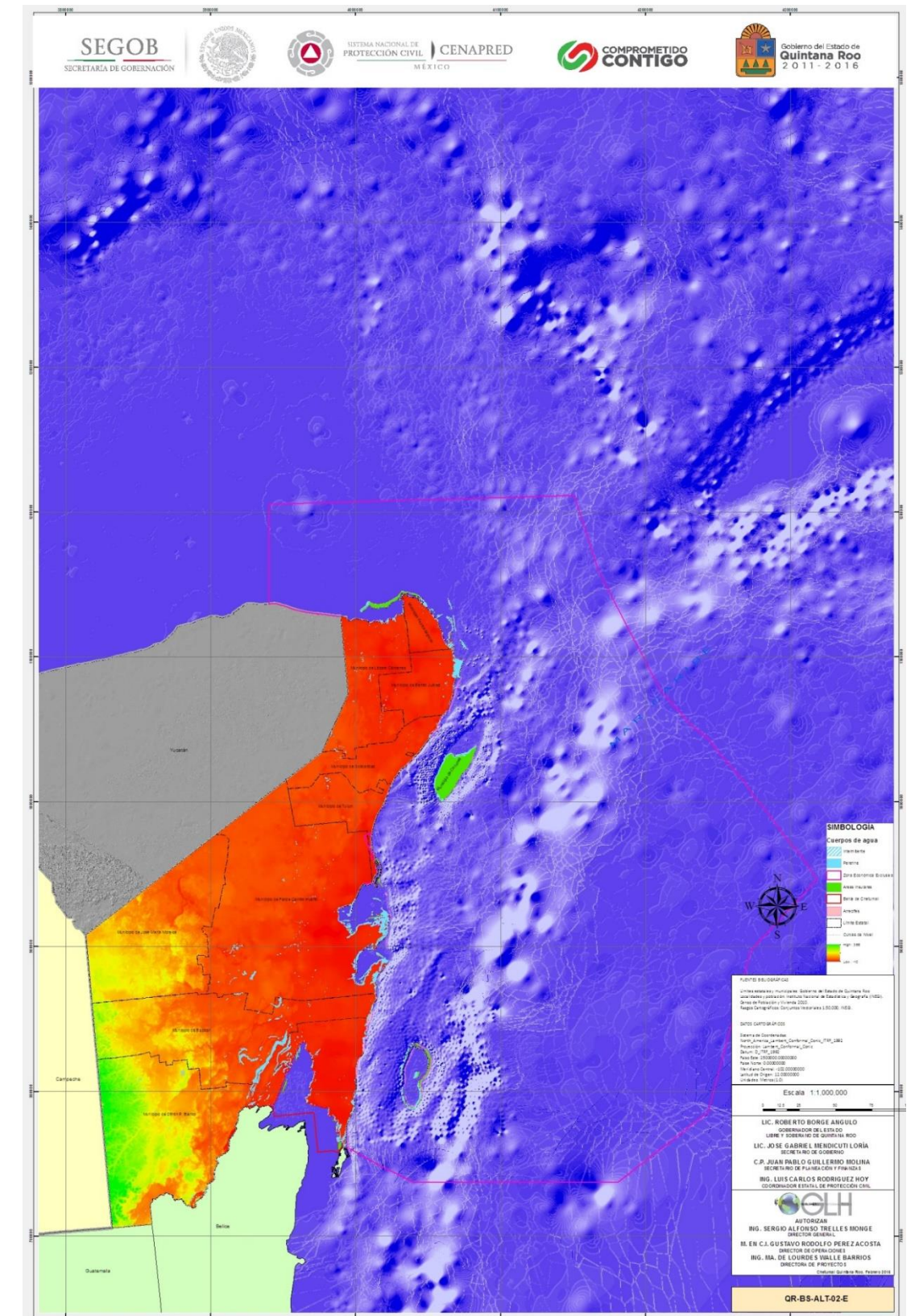
La relación cartográfica náutica es la siguiente.

- S.M. 900 Canal de Yucatán y proximidades. 1:906 530. 5ta. Ed. febrero de 1977 / Reimp. Corr. A.M. (Reimpresión corregida hasta Avisos a los Marineros). Septiembre de 2006. SI WGS84.
- S.M. 922 Isla Mujeres a Isla Cozumel. 1:100 000. 2da. Ed. enero de 2003 / Reimp. Corr. A.M. octubre de 2009. SI WGS84.
- S.M. 922.1 ISLA Mujeres, Cancún y Proximidades. 1:32 500. 3ra. Ed. octubre de 2001 / Reimp. Corr. A.M. mayo de 2010. SI WGS84.

- S. M. 922.2 Bahía Mujeres. 1:17 500. 3ra. Ed. Marzo del 2001 / Reimp. Corr. A.M. mayo de 2010. SI WGS84.
- S. M. 922.2A Isla Mujeres, Q. Roo. 1:4 000. 1ra. Ed. diciembre de 2012. SI WGS84.
- S. M. 922.2B Punta Sam, Q. Roo. 1:4 000. 1ra. Ed. diciembre de 2012. SI WGS84.
- S. M. 922.3 Puerto Morelos, Q. Roo. 1:15 000 1ra. Ed. septiembre de 2006. Reimp. Corr. A.M. mayo 2010. SI WGS84.
- S. M. 922.4 Isla Cozumel 1:60 000 4ta. Ed. Enero del 2013. SI WGS84.
- S. M. 922.5 Portulano San Miguel de Cozumel, Q. Roo. 1:15 000. 3ra. Ed. Noviembre del 2012. SI WGS84.
- S. M. 922.6 Playa Del Carmen, Q. Roo. 1:10 000. 1ra. Ed. Junio del 2003. Reimp. Corr. A.M. mayo del 2010. SI WGS84.
- S. M. 922.7 Puerto Aventuras, Q. Roo. 1:3 500. 1ra. Ed. Julio del 2001. Reimp. Corr. A.M. mayo del 2010. SI WGS84.
- S. M. 922.8 Terminal Marítima Calica. 1:3 500. 1ra. Ed. Diciembre del 2010. SI WGS84.
- S. M. 923.2 Bahía de La Ascensión, Q. Roo. 1:50 000. 1ra. Ed. Abril del 2005. Reimp. Corr. A.M. mayo del 2010. SI WGS84.
- S. M. 924 Bahías Espíritu Santo y La Ascensión, Q. Roo. 1:100 000. 1ra. Ed. Diciembre del 2005. Reimp. Corr. A.M. septiembre del 2006. SI WGS84.
- S. M. 931 Punta Piedra a Mahahual. 1:100 000. 1ra. Ed. Diciembre del 2008. SI WGS84.
- S. M. 931.1 Bahía del Espíritu Santo, Q. Roo. 1:37 500. 1ra. Ed. Septiembre del 2006. SI WGS84.
- S. M. 931.2 Mahahual, Q. Roo. 1:15 000. 2da. Ed. Diciembre del 2003. Reimp. Corr. A.M. septiembre 2006. SI WGS84.
- S. M. 932 Banco Chinchorro y proximidades. 1:100 000. 1ra. Ed. Diciembre del 2008. SI WGS84.
- S. M. 933.1 Bahía de Chetumal. 1:35 000. 1ra. Ed. Octubre del 2007. SI WGS84.
- S. M. 933.2 Chetumal Q. Roo. 1:20 000. 1ra. Ed. Noviembre del 2007. SI WGS84.
- S. M. 933.3 Xcalak, Q. Roo. 1:20 000. 1ra. Ed. Diciembre del 2008. SI WGS84.

La unión de las 21 cartas arrojó 33,428 puntos de profundidad (Z) que fueron modelados en un archivo raster de salida y finalmente un sólido de sombras (Hillshade) a lo que se le denominó Modelo Digital Marino (MDM) (Mapa 8).

El estado de Q. Roo cuenta con 1,556 km que equivale al 35.7% de los estados con vertiente al Golfo de México y Mar Caribe y al 10.6% del total de litorales de mares y costas. Dicho Total se incluyó en el Atlas.



Mapa 8. Modelo Digital Marino del Mar Caribe y de la Zona Económica Exclusiva (elaboración propia GLH)

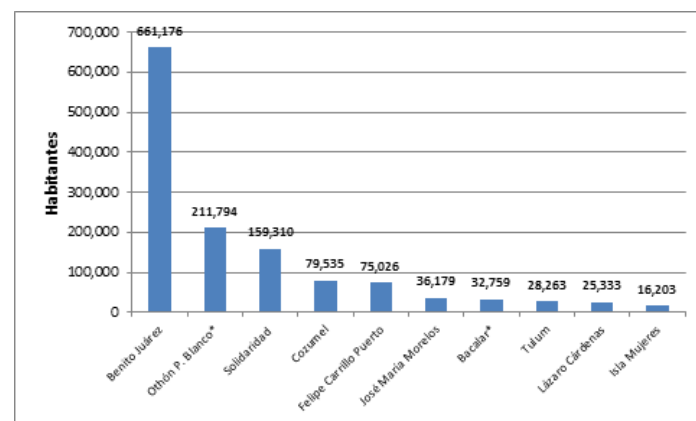
2.2 Marco socio-económico

2.2.1 Dinámica de la población

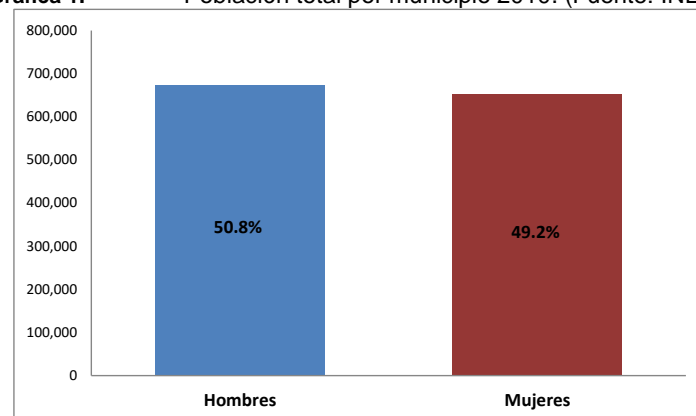
El Estado Q. Roo estuvo conformado por 10 municipios para finales del 2015, actualmente se cuenta con 11 municipios como son: Bacalar, Bacalar, Benito Juárez, Isla Mujeres, Felipe Carrillo Puerto, Cozumel, José María Morelos, Lazaro Cardenas, Othón P. Blanco, Solidaridad, Tulum. La ciudad de Chetumal, ubicada en Othón P. Blanco es la capital y sede de los poderes del Estado.

La entidad se divide en tres regiones de acuerdo con sus características geográficas, económicas, culturales y sociales: La zona norte, conformada por los municipios de Isla Mujeres, Cozumel, Benito Juárez, y las zonas costeras por Puerto Morelos, Solidaridad y Tulum; la zona maya, que abarca los municipios de José María Morelos, Felipe Carrillo Puerto, Lázaro Cárdenas y el territorio interior de Solidaridad y Tulum, y la zona sur, integrada por Othón P. Blanco y Bacalar.

De acuerdo con el Censo de población y vivienda 2010, elaborado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en Quintana Roo habitan 1, 325,578 personas.⁶ El municipio de Benito Juárez es el más poblado con 661,176 habitantes, que representan el 49.9% de la población total de la entidad. El 49.2% son mujeres y el 50.8% hombres. (Gráfica 1 y Gráfica 2).

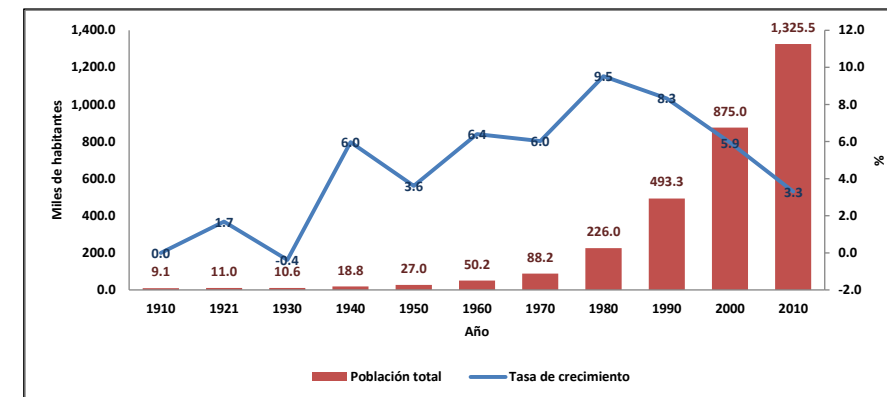


Gráfica 1. Población total por municipio 2010. (Fuente: INEGI)



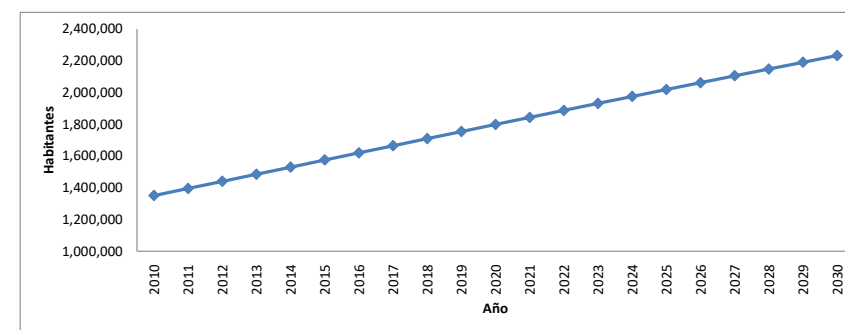
Gráfica 2. Población total según sexo 2010 (Fuente: INEGI).

Quintana Roo es la entidad de la República Mexicana que presenta la mayor tasa de crecimiento a nivel nacional (Gráfica 3), ya que se ha convertido en un importante polo de atracción, tanto para la población de otras entidades del país, como para la de otras naciones. Lo anterior se ve reflejado en el crecimiento poblacional que ha registrado la entidad a partir de 1980, año en el que el número de habitantes era de aproximadamente 226 mil personas; para 1990 creció a alrededor de 493 mil, y para 2010 incrementó exponencialmente a 1, 325,578. Es decir, la población del estado prácticamente incremento seis veces su tamaño en tan solo 30 años.



Gráfica 3. Crecimiento de la población en el estado de Quintana Roo en el periodo 1910-2010. (Fuente: INEGI).

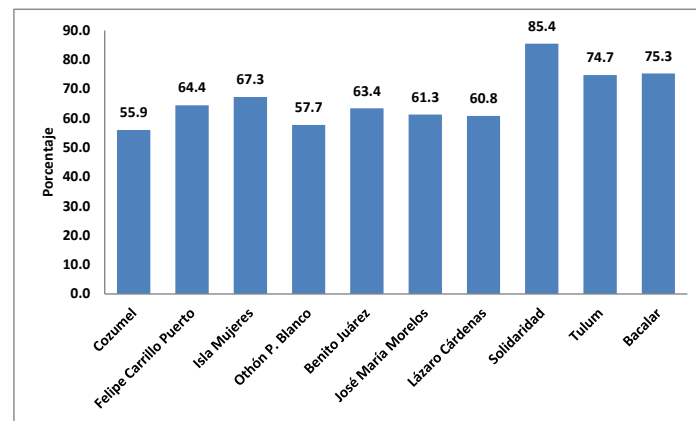
De acuerdo con las proyecciones del Consejo Nacional de Población (CONAPO), la población seguirá aumentando aunque de forma más paulatina, por lo que se espera que para el 2030 el número de habitantes alcance los 2,232,702, lo que se traduce en 68% más de la contabilizada en 2010.



Gráfica 4. Proyecciones de la población para el estado de Quintana Roo. (Fuente: CONAPO).

A nivel municipal, Solidaridad es el municipio que registrará el mayor crecimiento poblacional. De acuerdo con el CONAPO, para 2030 su población será 85.4% mayor que la de 2010 (138,722 habitantes más); Tulum y Bacalar también incrementarán significativamente el número de sus habitantes (Gráfica 5).

⁶ INEGI, Censo de población y vivienda 2010.



Gráfica 5. Proyecciones de crecimiento poblacional en términos porcentuales para el 2030, con respecto al número de habitantes de 2010 a nivel municipal (Fuente: CONAPO).

Las localidades más pobladas del Estado son Cancún, Chetumal, Playa del Carmen y Cozumel, que en conjunto agrupan aproximadamente el 75.9% de la población total de la entidad. De hecho, a nivel estatal, el 88% de la población vive en localidades urbanas y sólo el 12% en rurales.

Tabla 14. Principales localidades del estado de Quintana Roo

Municipio	Cabecera municipal	Habitantes (2010)
Cozumel	Cozumel	79,535
Felipe Carrillo Puerto	Felipe Carrillo Puerto	75,026
Isla Mujeres	Isla Mujeres	16,203
Othón P. Blanco	Chetumal	244,553
Benito Juárez	Cancún	661,176
José María Morelos	José María Morelos	36,179
Lázaro Cárdenas	Kantunilkin	25,333
Solidaridad	Playa del Carmen	159,310
Tulum	Tulum	28,263

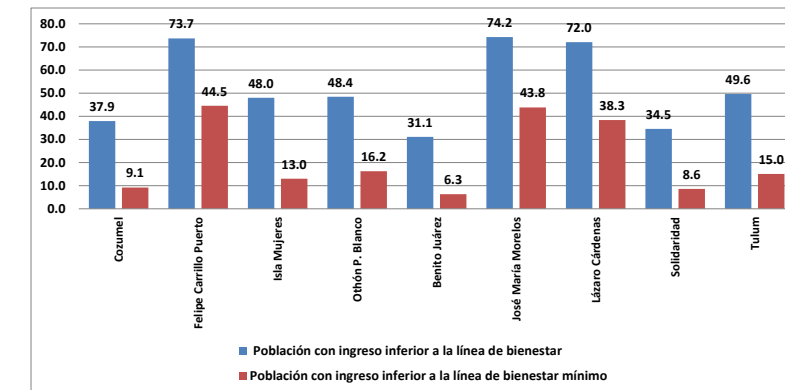
Fuente: INEGI, Censo de Población y Vivienda 2010. En la realización de este ejercicio no se contempló al municipio de Puerto Morelos.

A pesar de que la mayor proporción de habitantes vive en zonas urbanas, la dispersión poblacional es un fenómeno presente en Quintana Roo. El 98.7% de las localidades son consideradas rurales, es decir, con menos de 2,500 habitantes. Debido a lo anterior, es necesario elaborar una planificación adecuada en materia de atención de emergencias, para que sea posible atender ágilmente a la población rural, ya que es justo en estas localidades en donde se presentan los mayores niveles de vulnerabilidad y, en las cuales, el acceso a la infraestructura, los mercados laborales y el equipamiento es menor. De igual forma, un grupo poblacional que requiere especial atención es el indígena. En Quintana Roo, el 16% de los habitantes mayores de 5 años hablan alguna lengua originaria, las más comunes son el maya, tsotsil, chol y kanjobal. En este sentido, es importante que la información en materia de gestión de riesgos se difunda en las diversas lenguas para asegurar el entendimiento de la misma.

2.2.2 Pobreza, marginación y desarrollo humano

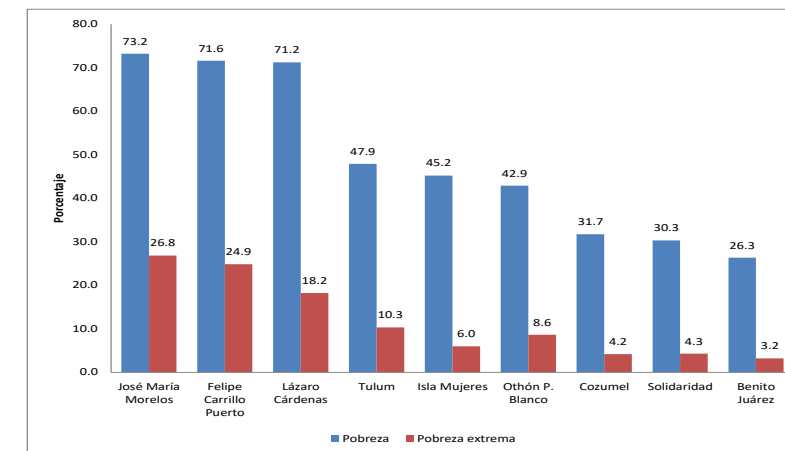
De acuerdo con el INEGI, la población económicamente activa de Quintana Roo sumaba en 2014 alrededor de 745,191 personas, de las cuales, el 5.6% (42,124) se encontraban desocupadas. El 45% de dicha población recibía ingresos menores a la línea de bienestar, es decir, por debajo del valor de la canasta alimentaria y no alimentaria por persona al mes,

que para abril de 2015 se calculó en 1,677 pesos, en el caso de zonas rurales, y en 2,619, en las urbanas.⁷ De igual forma, cerca del 17% de la población estatal recibía ingresos menores al valor de la canasta alimentaria (menos de 907 pesos en localidades rurales y 1,287 en urbanas). Lo anterior influye determinadamente en la resiliencia de la población en caso de ser afectada por algún desastre, ya que con esos ingresos su capacidad de recuperación será mínima y el proceso de vuelta a la normalidad se prolongará considerablemente. Los municipios con mayor proporción de población con dichas características son Felipe Carrillo Puerto, Lázaro Cárdenas y José María Morelos. (Gráfica 6).



Gráfica 6. Porcentaje de población que recibe ingresos por debajo de la línea de bienestar y la línea de bienestar mínimo.

En el Estado de Quintana Roo, el 38.8% de la población se encuentra en situación de pobreza y 8.4% en pobreza extrema.⁸ Las cifras anteriores, a pesar de estar por encima del promedio nacional, son elevadas. Además, existe una enorme brecha entre municipios como Benito Juárez y Solidaridad, en donde el porcentaje de población en situación de pobreza es de alrededor del 30%, con los de José María Morelos, Felipe Carrillo Puerto y Lázaro Cárdenas, en los que 7 de cada 10 habitantes viven en la pobreza; y entre 2 y 3 en la pobreza extrema. (Gráfica 7).



Gráfica 7. Porcentaje de población en situación de pobreza y pobreza extrema a nivel municipal.

Otro indicador que permite conocer cuáles son los municipios y localidades más rezagados del estado, así como la

⁷ CONEVAL, Medición de la pobreza. Indicadores de pobreza por entidad federativa.

⁸ Ídem.

población menos favorecida, es el índice de marginación elaborado por el Consejo Nacional de Población en 2010. Según sus últimos resultados, en el Estado de Quintana Roo existen 86 localidades con un grado de marginación muy alto, 340 con alto, 34 con medio, 20 con bajo y apenas 37 con muy bajo (Figura 2).

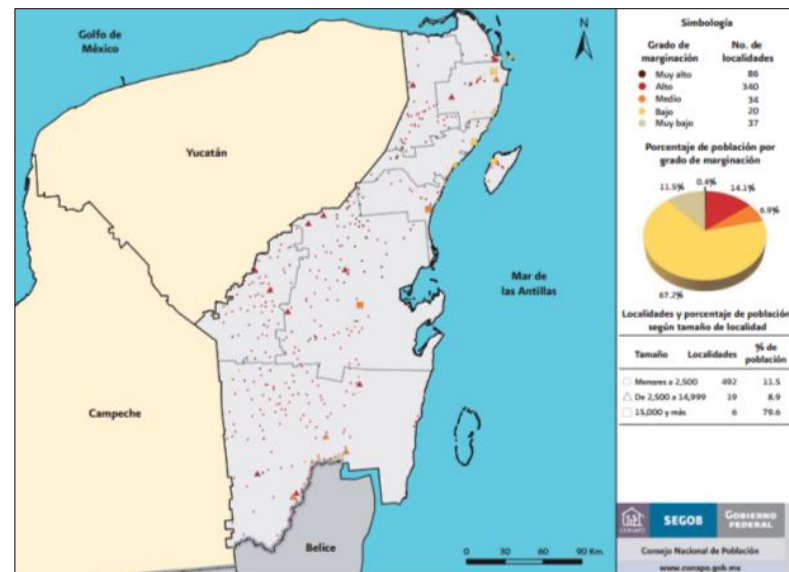


Figura 2. Índice de marginación por localidades. (Fuente CONAPO).

Asimismo, el Índice de Desarrollo Humano (IDH), elaborado por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), permite medir y conocer los principales componentes del desarrollo a nivel local. De acuerdo con el PNUD, “el desarrollo humano supone la expresión de la libertad de las personas para vivir una vida prolongada, saludable y creativa; perseguir objetivos que ellas mismas consideren valiosos; y participar activamente en el desarrollo sostenible y equitativo del planeta que comparten”. En este sentido, Quintana Roo presenta un IDH Alto, lo que lo ubica en el doceavo lugar a nivel nacional. Sin embargo, a nivel municipal Lázaro Cárdenas y José María Morelos son los más rezagados y presentan un IDH Medio. En resumen, se percibe que en Quintana Roo hay una clara brecha entre algunos de sus municipios con relación a los indicadores analizados en el presente apartado. Se observa, por ejemplo, que aquellos municipios con una mayor vocación turística registran mejores condiciones económicas y sociales.

Tabla 15. Indicadores de pobreza, marginación y desarrollo humano

Municipio	Pobreza	Marginación	Desarrollo Humano
Benito Juárez	Menos de 30%	Muy Bajo	Muy Alto
Othón P. Blanco*	Entre 30 y 50%	Bajo	Muy Alto
Solidaridad	Entre 30 y 50%	Muy Bajo	Muy Alto
Cozumel	Entre 30 y 50%	Muy Bajo	Muy Alto
Felipe Carrillo Puerto	Más de 70%	Medio	Alto
José María Morelos	Más de 70%	Medio	Medio
Bacalar*	Entre 30 y 50%	Bajo	Muy Alto
Tulum	Entre 30 y 50%	Bajo	Alto
Lázaro Cárdenas	Más de 70%	Medio	Medio
Isla Mujeres	Entre 30 y 50%	Bajo	Alto

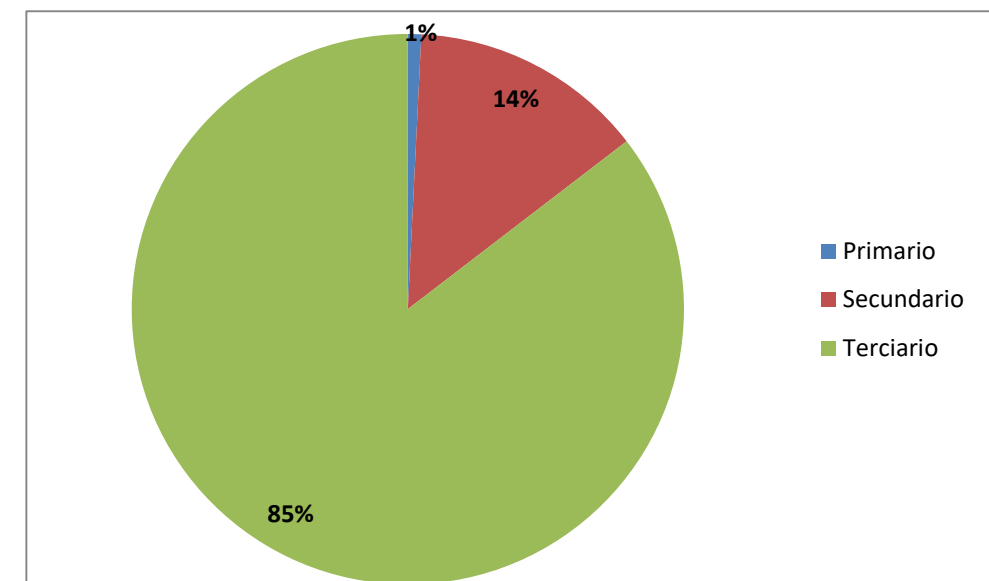
* La información de ambos municipios coincide debido a que Bacalar se separó de Othón P. Blanco en 2011. (Fuente: Elaboración propia con información del CONEVAL, CONAPO y PNUD).

2.2.3 Economía

El Estado de Quintana Roo aporta, aproximadamente, el 1.4% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional. La entidad,

tiene una marcada vocación turística y de servicios, de hecho, el 85.4% del PIB estatal proviene de las actividades terciarias; 13.8% de las secundarias y apenas el 9.8% proviene del sector primario.⁹ (Gráfica 8). Dentro de las actividades terciarias destacan las relacionadas con el comercio, restaurantes y hoteles, que por sí solas representan más de la tercera parte del total de bienes y servicios que produce el estado. Otras actividades relacionadas con la alta vocación turística del estado son el transporte, los servicios inmobiliarios, los recreativos, de esparcimiento y culturales. En lo que se refiere a las actividades secundarias, la industria de la construcción es la que mayor participación en el PIB estatal registra: 11.1%. Este porcentaje es resultado del acelerado crecimiento del estado, así como del auge inmobiliario de ciudades como Cancún y Playa del Carmen.

Si bien el sector primario tiene una participación incipiente en lo que se refiere al PIB estatal, lo cierto es que actividades como la pesca, el aprovechamiento forestal, la agricultura y la ganadería son de gran importancia para alrededor de 90 mil personas que trabajan en dicho sector.



Gráfica 8. Aportación al PIB estatal según sector de actividad económica (Fuente: INEGI).

Como se mencionó anteriormente, el sector terciario (particularmente el turismo y todas las actividades ligadas a él) es donde se encuentra la principal fuente de empleo en la entidad; alrededor del 77% de la población total ocupada del estado labora en este sector. De acuerdo con cifras de la Secretaría de Turismo (SECTUR), los principales destinos del Estado de Quintana Roo recibieron en 2013 alrededor de 9 millones de visitantes; esta cifra es de gran importancia porque permite estimar la cantidad de población flotante del estado, la cual tendría que ser atendida por las autoridades correspondientes en caso de una emergencia. Por ello, resulta indispensable tomar en cuenta esta información al momento de elaborar los planes y programas de protección civil, tanto a nivel municipal como estatal. La infraestructura hotelera de la entidad es de las más grandes a nivel mundial; el número de cuartos disponibles es de 73,445 aproximadamente. El promedio de ocupación en destinos como Cancún y Playa del Carmen superan el 70%, y la estadía promedio va de entre uno a seis días, dependiendo del centro turístico y el lugar de origen. (Figura 3).

⁹ INEGI, Sistema de cuentas nacionales de México. Producto Interno Bruto por Entidad Federativa 2001-2009.

Tabla 16. Actividad hotelera en los principales centros turísticos de Quintana Roo 2013

Destino	Número de cuartos ¹	Turistas nacionales	Turistas extranjeros	Estadía promedio nacionales	Estadía promedio extranjeros	Porcentaje de ocupación
Cancún	30,183	1,600,863	2,816,047	3.75	4.95	70.6
Chetumal	1,791	429,720	13,359	1.03	1.32	35.8
Cozumel	4,490	185,431	262,316	2.65	4.2	46.4
Isla Mujeres	1,260	131,288	137,072	1.14	2.02	47.0
Riviera Maya	35,721	98,244	3,490,900	3.11	6.18	79.0
Total	73,445	2,445,546	6,719,694			

¹ Se refiere al número de cuartos que se encontraban en servicio al mes de diciembre de 2013 (Fuente: SECTUR. Compendio estadístico de turismo 2013).



Figura 3. Principales destinos turísticos de Quintana Roo.

2.3 Sistemas expuestos establecidos y su vulnerabilidad

Los sistemas expuestos suelen asociarse a la cantidad de personas, bienes e infraestructura que son susceptibles a ser dañados por la ocurrencia de un evento; sin embargo, existen otros elementos que también forman parte de ellos y son intangibles: la seguridad, el conocimiento, el prestigio o la imagen de algún destino turístico, las capacidades de satisfacer compromisos adquiridos, etc. Son sólo algunos de estos.

Para realizar el presente estudio se identificaron los principales sistemas expuestos que se encuentran en territorio quintanarroense, aunque la estimación de la vulnerabilidad física únicamente se realizó para la vivienda. Entre la información generada sobre los sistemas expuestos se encuentran: escuelas, vialidades, templos, tanques de agua, puentes, plazas, oficinas de gobierno, mercados, instalaciones deportivas o recreativas, monumentos, museos, centros de salud y hospitales, cementerios, hoteles, tiendas de autoservicio y de conveniencia (Oxxo), centros de almacenamiento de sustancias peligrosas, aeropuertos, aeropistas, helipuertos, unidades económicas y hoteles. Cabe mencionar que toda la información está georreferida y cada capa tiene asociados datos en distinto nivel. En la siguiente tabla se puede observar la desagregación de atributos por cada capa. (Tabla 17).

Tabla 17. Información sobre los sistemas expuestos incluidos en el SIG.

Sistema afectable	Atributos	Fuente
Escuelas	Clave de centro de trabajo, tipo de educación, nivel, subnivel, condición, entidad, municipio, localidad, nombre de centro de trabajo, turno, domicilio, teléfono, director, correo electrónico, página web, aulas en uso, aulas existentes, laboratorios, talleres, docentes totales, personal administrativo y alumnos totales.	INEGI
Vialidades	Código, condición, geográfico, fecha de actualización, nombre, tipo y destino.	INEGI
Templos	Código, condición, geográfico, fecha de actualización, nombre y tipo.	INEGI
Tanques de agua	Código, condición, geográfico, fecha de actualización, nombre y tipo.	INEGI
Puentes	Código, condición, geográfico, fecha de actualización, nombre y tipo.	INEGI
Plazas	Código, condición, geográfico, fecha de actualización, nombre y tipo.	INEGI
Oficinas de gobierno	Código, condición, geográfico, fecha de actualización, nombre y tipo.	INEGI
Mercados	Código, condición, geográfico, fecha de actualización, nombre y tipo.	INEGI
Instalaciones deportivas o recreativas	Código, condición, geográfico, fecha de actualización, nombre y tipo.	INEGI
Monumentos	Código, condición, geográfico, fecha de actualización, nombre y tipo.	INEGI
Museos	Nombre establecimiento, razón social, actividad, número de trabajadores (personas ocupadas), dirección, tipo y nombre, teléfono, correo electrónico, página web, tipo unidad económica y fecha de alta.	INEGI
Hospitales y Centros de salud	Nombre establecimiento, razón social, actividad, número de trabajadores (personas ocupadas), dirección, tipo y nombre, teléfono, correo electrónico, página web, tipo unidad económica y fecha de alta.	INEGI
Cementerios	Código, condición, geográfico, fecha de actualización, nombre y tipo.	INEGI
Hoteles	Nombre establecimiento, razón social, actividad, número de trabajadores (personas ocupadas), dirección, tipo y nombre, teléfono, correo electrónico, página web, tipo unidad económica y fecha de alta.	INEGI
Tiendas de autoservicio	Nombre establecimiento, razón social, actividad, número de trabajadores (personas ocupadas), dirección, tipo y nombre, teléfono, correo electrónico, página web, tipo unidad económica y fecha de alta.	INEGI
OXXO	Nombre establecimiento, razón social, actividad, número de trabajadores (personas ocupadas), dirección, tipo y nombre, teléfono, correo electrónico, página web, tipo unidad económica y fecha de alta.	INEGI
Centros de almacenamiento de sustancias peligrosas	Nombre establecimiento, razón social, actividad, número de trabajadores (personas ocupadas), dirección, tipo y nombre, teléfono, correo electrónico, página web, tipo unidad económica y fecha de alta.	INEGI
Aeropuertos	Código, condición, geográfico, fecha de actualización, nombre y tipo.	INEGI
Aeródromos	Tipo, nombre, propietario, fecha de actualización, vigencia y situación, comandancia y ubicación.	INEGI
Helipuertos	Tipo, nombre, propietario, fecha de actualización, vigencia y situación, comandancia y ubicación.	INEGI
Unidades económicas	Nombre establecimiento, código y nombre actividad, número de trabajadores (personas ocupadas), dirección, tipo y nombre de centro comercial, teléfono, correo electrónico, página web, tipo de unidad económica y fecha de alta.	INEGI
Hoteles	Nombre establecimiento, código y nombre actividad, número de trabajadores (personas ocupadas), dirección, tipo y nombre de centro comercial, teléfono, correo electrónico, página web, tipo de unidad económica y fecha de alta.	GLH

2.3.1 Tipología de la vivienda para estimación de vulnerabilidad

La gestión integral de riesgos se define como el conjunto de acciones encaminadas a la identificación, análisis, evaluación, control y reducción de los riesgos, considerándolos por su origen multifactorial y en un proceso permanente de construcción, que involucra a los tres niveles de gobierno, así como a los sectores de la sociedad, lo que facilita la realización de acciones dirigidas a la creación e implementación de políticas públicas, estrategias y procedimientos integrados al logro de pautas de desarrollo sostenible, que combatan las causas estructurales de los desastres y fortalezcan las capacidades de resiliencia o resistencia de la sociedad. Involucra las etapas de: identificación de los riesgos y/o su proceso de formación,

previsión, prevención, mitigación, preparación, auxilio, recuperación y reconstrucción; La vulnerabilidad física de las viviendas ante el impacto de diversos fenómenos resulta un elemento fundamental para emprender acciones de gestión integral de riesgos. Por ello, se determinó hacer dicha estimación en el Atlas Estatal de Riesgos del Estado de Quintana Roo, tanto para zonas urbanas como rurales. El actual apartado tiene como principal objetivo explicar la metodología utilizada, sin ahondar en los grados de vulnerabilidad para cada tipo de fenómeno. Éstos se desarrollarán en los capítulos correspondientes. Para efectos de este trabajo, la vulnerabilidad física de la vivienda es entendida como: "la susceptibilidad que tiene de presentar algún tipo de daño provocado por la acción de algún fenómeno natural o antrópico".¹⁰

Para las zonas urbanas, el detalle que se alcanzó fue a nivel manzana y se analizaron 10 cabeceras municipales: Cancún, Kantunilkin, Isla Mujeres, Cozumel, Playa del Carmen, Felipe Carrillo Puerto, Bacalar, José María Morelos, Chetumal y Tulum. Antes de llevar a cabo el trabajo de campo, se diseñó una ficha para agilizar y homologar la información que se recopilaría, misma que se dividió en dos apartados generales. El primero consta de los datos generales y la ubicación geográfica, y el segundo está enfocado en conocer los aspectos estructurales, así como los principales materiales encontrados en la región (Figura 4).

Atlas Estatal de Riesgo del Estado de Quintana Roo, Fase I: Peligro, vulnerabilidad y riesgos			
UBICACIÓN			
LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	Inicio Folio: _____ Marginación: _____		
CLAVE DEL PUNTO: QR_VUL_ Mes: _____ Consecutivo: _____	Colocar Foto con las siguientes:		
FECHA: _____ INFORMACION GENERAL:			
ESTADO: 23 AGEB: _____			
MUNICIPIO: _____ MANZANA: _____			
LOCALIDAD: _____ CALLE y No.: _____			
COORDENADAS			
LATITUD X: _____			
LONGITUD Y: _____			
NOMBRE DEL INVESTIGADOR: _____	Numero de Foto: _____		
ASPECTOS ARQUITECTONICOS			
NUMERO DE NIVELES: _____			
MUROS SUFICIENTES EN DOS DIRECCIONES	SI _____ NO _____		
ASPECTOS ESTRUCTURALES			
MUROS			
Piezas de Mampostería			
Con elementos de concreto	1		
Sin elementos de concreto (si tiene castillos pero no tiene dalas)	2		
Si elige alguna de las anteriores, tachar una de las siguientes opciones:			
Tabique de macizo de barro recocido			
Tabique hueco de barro recocido (extruido "tabique aparente")			
Tabique multiperforado de barro recocido			
Tabique macizo de concreto (tabicon de cemento-arena)			
Bloque hueco de concreto			
Piedra sobre piedra (o algun otro tipo de mamposteria sin ningun refuerzo)	3		
Ligeros o debiles			
Lamina (asbesto, metalica, madera, carton u otras) con estructura	4		
Adobe			
Bahareque	5		
Con repellado	6		
Sin repellado	7		
Flexible			
Lamina (asbesto, metalica, madera, carton u otras) sin estructura	8		
Carton y plastico (tambien puede ser palma o fibra vegetal)	9		
Madera	10		
TECHOS			
Flexible			
Carton o plastico (o algun otro material de desecho)	1		
Lamina (carton, plastico, asbesto o galvanizada) u hojas de triplay o madera	2		
Palma	3		
Teja	4		
Rigido			
Losa de concreto sobrepuesta o vigueta y bovedilla. Este ultimo tambien puede incluir vigas de acero con tabique.	5		
Losa de concreto ligada	6		
Geometria			
Plano	A	A dos aguas	C
A un agua	B	Otro:	D
Observaciones:			

Figura 4. Modelo de ficha de campo.

Posteriormente, se realizó una prueba piloto en la ciudad de Chetumal para determinar el nivel de detalle que se podía alcanzar, así como para afinar la metodología y el diseño de la base de datos en la que se almacenaría la información recopilada en campo.

Con base en el ejercicio mencionado, se observó cierta homogeneidad en el tipo de materiales utilizados en cada manzana, por lo que se decidió realizar el análisis a ese nivel, utilizando los siguientes criterios:

- Se marcaron con la letra A, en un mapa impreso, todas aquellas manzanas en las que se encontraba por lo menos una vivienda construida de material endeble, aunque la mayoría fueran de bloque de concreto con techo de vigueta y bovedilla, o losa colada de concreto.
- Con la letra B, se destacaron aquellas manzanas en las cuales había una proporción similar de viviendas construidas con materiales endebles y de bloque de concreto con techo de vigueta y bovedilla, o losa colada de concreto.
- Aquellas manzanas en las que la mayoría de las viviendas eran de materiales endebles se marcaron con la letra C.
- Por último, se dejaron en blanco las manzanas en las que no se encontró ninguna vivienda endeble y todas eran de bloque de concreto con techo de vigueta y bovedilla, o losa colada de concreto.

Además, en cada manzana se identificó el material predominante, tanto en los muros como en los techos, con la finalidad de conformar una tipología con base en los parámetros sugeridos por el CENAPRED.¹¹

Para el caso de las localidades rurales, únicamente se determinó el material predominante, tanto en los muros como en los techos, asignándoles un grado de vulnerabilidad para cada fenómeno solicitado.

Para delimitar el universo de las localidades rurales a estudiar, se definieron diversos criterios para descartar aquellas que por sus características no se consideran rurales. Se partió de la información base del Instituto Nacional de Geografía e Informática (INEGI),¹² modificada a partir de los límites territoriales establecidos por el Gobierno del Estado de Quintana Roo.¹³

A partir de dicha información, se estableció que el número total de localidades en Quintana Roo suman 4,309; de las cuales, el Marco Geoestadístico Nacional ubica a 225 en Yucatán, 203 en Campeche y el resto (3,881) en Quintana Roo, de acuerdo al Marco Geoestadístico del Estado.

El INEGI define como localidad rural a todas aquellas zonas que tienen menos de 2,500 habitantes. Ése fue el primer criterio de selección utilizado. Posteriormente, se realizó un filtrado para descartar a las de menos de 20 habitantes y, por último, se eliminaron las localidades que no contaban con información referente a los tabulados básicos del Censo Nacional de Población y Vivienda 2010. Cabe señalar que la mayoría de estos puntos no son localidades como tales, sino hoteles, atracciones turísticas, campamentos, ranchos particulares y ejidos, entre otros.

10 CENAPRED, *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Evaluación de la vulnerabilidad física y social*, versión electrónica 2014.

11 CENAPRED, *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Evaluación de la vulnerabilidad física y social*, versión electrónica 2014.

12 Se utilizó como punto de partida el Marco Geoestadístico Nacional y la información de la publicación "Principales resultados por localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2010", edición 2011, disponible en www.inegi.org.mx.

13 Desde hace algunas décadas existe un conflicto limítrofe entre los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo sobre la posición del llamado "punto Put", que es el sitio en el que convergen los tres estados y que representa el lugar de referencia para delimitar el territorio. Para mayor información consultar a Molina Suárez, César de Jesús, *Quintana Roo. Límites territoriales. Historia y Referencia Constitucional*.

Una vez realizado el ejercicio anterior se determinó el universo de localidades a trabajar, que resultó de 532 (Mapa 9). Para darle un carácter más dinámico al atlas, se hizo un análisis a partir del grado de marginación calculado por el Consejo Nacional de Población (CONAPO), para asociar dicho indicador (reflejo de diversas carencias socioeconómicas) con los niveles de vulnerabilidad observados en las viviendas y los procesos de urbanización directamente asociados a su edificación.

De las localidades estudiadas, el 16% registraron un grado de marginación muy alto, 64% alto, 6% medio, 4% bajo y únicamente 7% muy bajo. Para el 3% restante no se contó con el mencionado indicador. (Tabla 18).

Tabla 18. Universo de localidades estudiadas y porcentaje según grado de marginación.

Municipio	Número de localidades	Grado de marginación
Bacalar	74	
Benito Juárez	21	
Cozumel	23	
Felipe Carrillo Puerto	104	
Isla Mujeres	14	
José María Morelos	83	
Lázaro Cárdenas	43	
Othón P. Blanco	122	
Solidaridad	26	
Tulum	22	
Total	532	

Fuente: Elaboración propia con información del CONAPO.

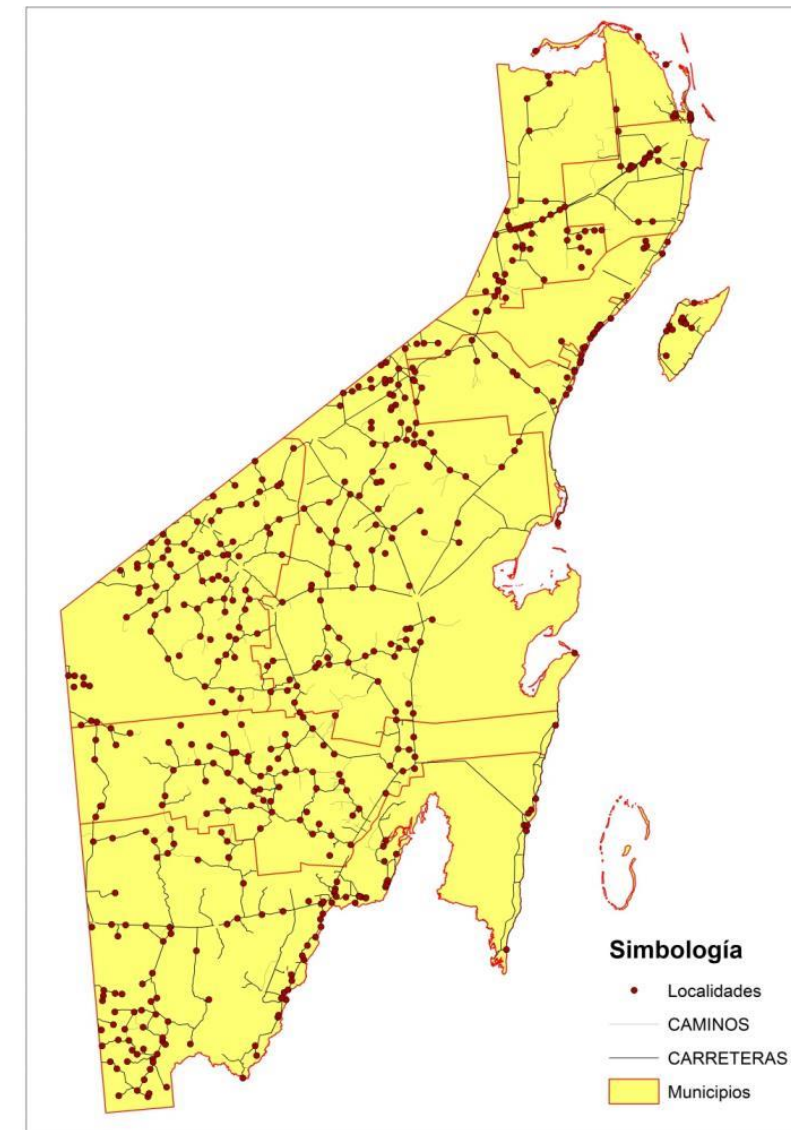
También se elaboró una ficha de campo para que la información fuera procesada más ágilmente. Cada ficha corresponde a una localidad, es decir, en ella se capturaron las características del tipo de vivienda predominante.

El trabajo de campo para zonas urbanas consistió en recorrer todas las manzanas de las 10 cabeceras municipales. Durante ese proceso se visitaron varias empresas inmobiliarias, de las que se obtuvo información acerca de los fraccionamientos que habían desarrollado; así como de los materiales utilizados en pisos y techos; el año de construcción y el nivel de desplante de las viviendas, que en promedio fueron de 40 centímetros.

Lo anterior fue de gran utilidad, porque agilizó la visita de campo y tan sólo fue necesario verificar la información recibida. También es importante mencionar que aquellas manzanas en las que no existían viviendas no fueron analizadas, tal es el caso de las áreas verdes, los centros comerciales, las escuelas, los hospitales, las canchas deportivas con domo, etcétera.

En las localidades rurales el proceso para el levantamiento de información fue similar; se recorrió cada una de ellas y se determinó el material predominante en muros y en techos, para posteriormente asignarles un grado de vulnerabilidad, según la tipología elaborada.

En las siguientes tablas, fueron elaboradas y se muestran los principales materiales encontrados en el estado, tanto en muros como en techos, así como la geometría de estos últimos. (Tabla 19, Tabla 20 y Tabla 21).



Mapa 9. Universo de localidades trabajadas. (elaboración propia con información base de INEGI).

Tabla 19. Materiales predominantes en muros

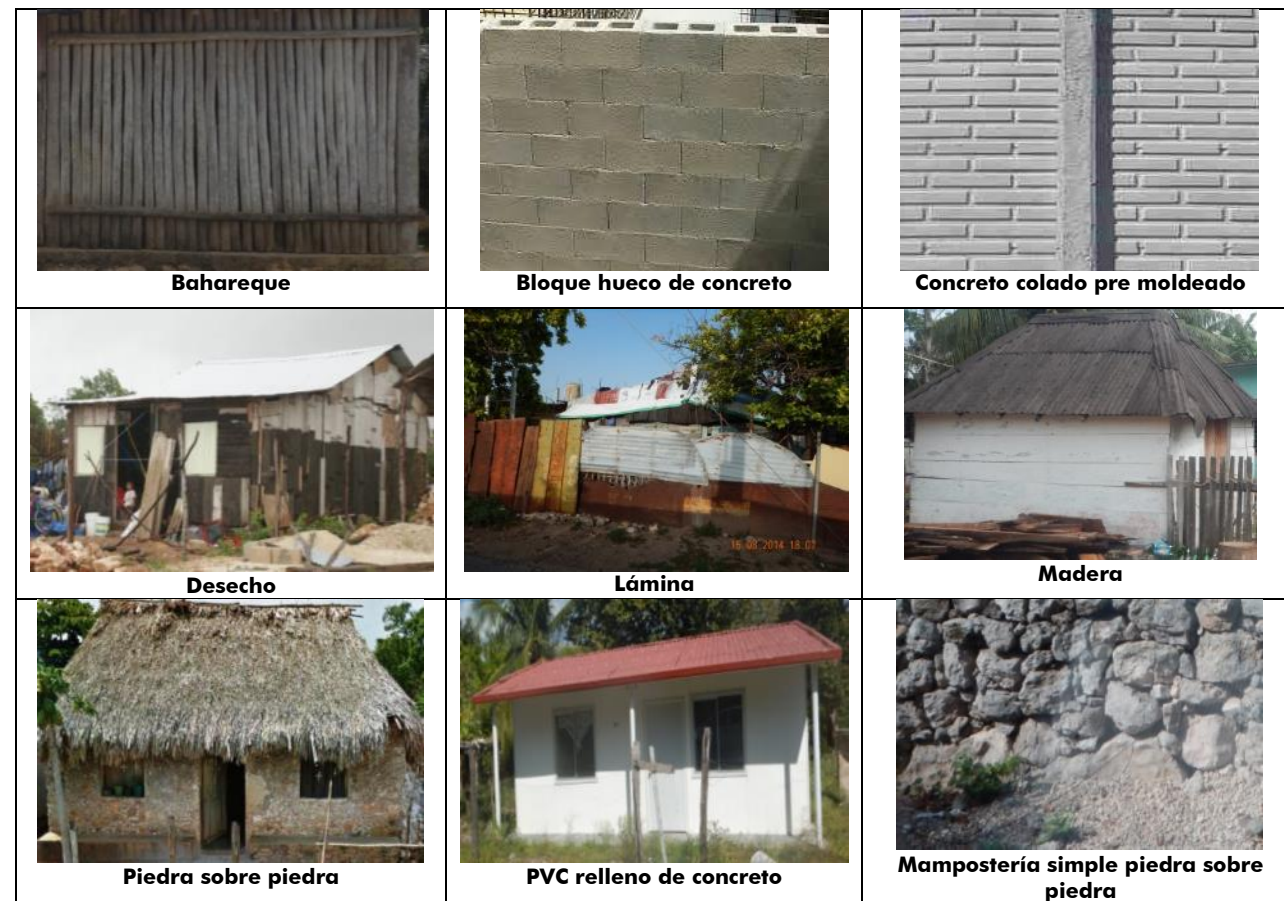


Tabla 20. Materiales predominantes en techos

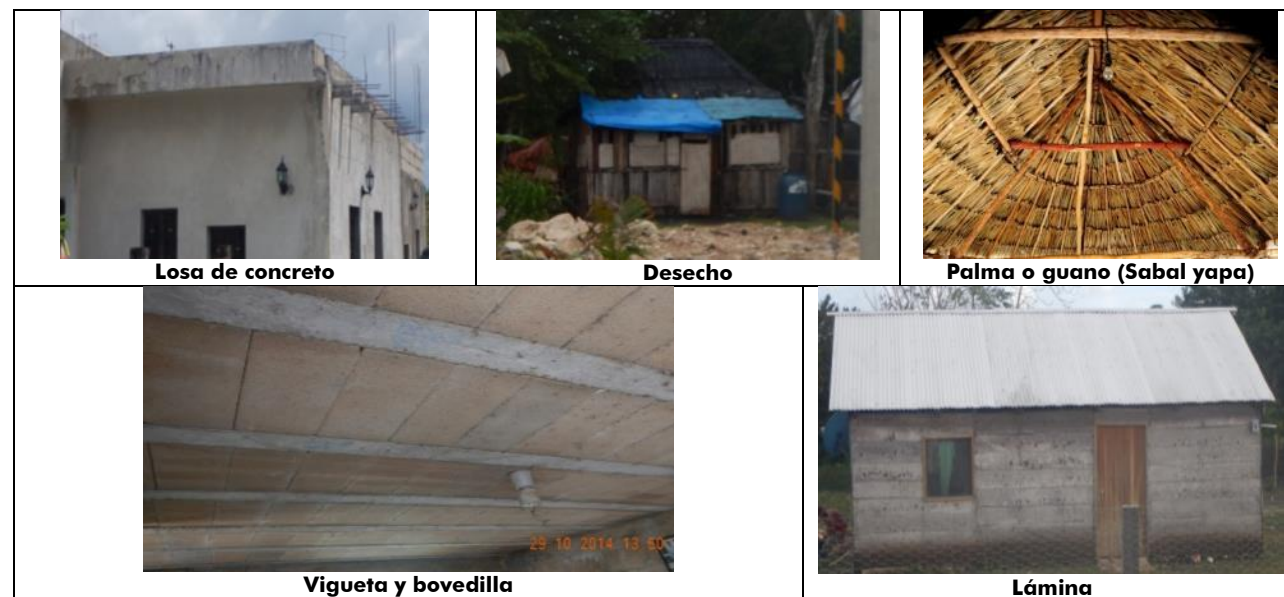


Tabla 21. Geometría de techos



Una vez recopilada la información se crearon dos bases de datos, una para las cabeceras municipales y otra para las localidades rurales, aunque básicamente las dos contienen los mismos atributos, los cuales se pueden observar en la Tabla 22.

Tabla 22. Atributos de la base de datos para conformar la tipología de vivienda

Atributo	Descripción
Clave	Clave de la manzana o localidad
Estado	Quintana Roo
Municipio	Nombre del municipio
Localidad	Nombre de la localidad
Longitud	Coordenada UTM
Latitud	Coordenada UTM
Altitud	Altura sobre el nivel medio del mar
Población total	Número de habitantes
Viviendas habitadas	Total de viviendas habitadas
Materiales en muros	Material predominante en muros
Materiales en techos	Material predominante en techos
Geometría	Geometría del techo (plano, una, dos o cuatro aguas)
Característica del techo	Rígido o flexible
Apoyos recibidos	En caso de que se observen viviendas construidas con apoyos de gobierno
Comentarios	Se identifica el tipo de apoyo o las características de los inmuebles en términos de uso
Observaciones	Características de otro tipo de viviendas observadas en la localidad, así como comentarios generales
Autoridad responsable	En caso de haber logrado entrevistarse con el delegado de la localidad
Tipología	Asignada con base en la guía del CENAPRED

Fuente: Elaboración propia.

En la guía del CENAPRED¹⁴ se establecen 10 tipos de vivienda, de acuerdo con los materiales empleados tanto en muros como en techos. A partir de esta clasificación, se analizaron las combinaciones que se registraron durante el trabajo de campo en el estado de Quintana Roo.

Tabla 23. Tipos de vivienda con base en información técnica.

Tipo	Muros	Techo	Cimentación	Altura
1	Mampostería reforzada con castillos y dalas. Mampostería reforzada con castillos y dalas malla y mortero. Mampostería de piezas huecas con refuerzo interior	Rigido	Zapata de corrida de concreto o mampostería	Uno a cinco niveles
2	Mampostería reforzada con castillos y dalas. Mampostería reforzada con castillos y dalas malla y mortero. Mampostería de piezas huecas con refuerzo interior	Flexible	Zapata corrida de mampostería	Un nivel
3	Mampostería deficientemente reforzada con dalas y castillos	Rigido	Zapata corrida de mampostería	Uno a cinco niveles
4	Mampostería deficientemente reforzada con dalas y castillos	Flexible	Zapata corrida de mampostería	Un nivel
5	Mampostería simple	Rigido	Zapata de mampostería	Uno a tres niveles
6	Mampostería simple	Flexible	Zapata de mampostería	Un nivel
7*	Adobe	Rigido	Cuando existe, zapata de mampostería	Uno a dos niveles
8*	Adobe	Flexible	Cuando existe, zapata de mampostería	Un nivel
9	Madera con cubierta de lámina	Flexible	Cuando existe, zapata de mampostería	Un nivel
10	Material de desecho, lámina, tejamanil, bahareque	Flexible	Cuando existe, zapata de mampostería	Un nivel

*Se observaron muy pocas viviendas de estos materiales y en ninguno de los casos fue predominante. (Fuente: CENAPRED)

Una vez recopilada la información en campo de los materiales utilizados en muros y techos, se obtuvieron 17 combinaciones. A cada una se le asignó un valor, mismo que se obtuvo de la metodología del CENAPRED. (Tabla 23 y Tabla 24).

Tabla 24. Combinación de materiales encontrados en Quintana Roo y tipología asignada.

Combinación	Muros	Techos	Tipología asignada
1	Bahareque	Palma	10
2	Bahareque	Lámina	10
3	Bloque hueco de concreto	Palma	4 Y 2
4	Bloque hueco de concreto	Lámina	4 Y 2
5	Bloque hueco de concreto	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	1 Y 3
6	Concreto colado	Lámina	4
7	Concreto colado	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	3
8	Desecho	Lámina	10
9	Lámina de cartón	Lámina	10
10	Madera	Lámina	9
11	Madera	Palma	9
12	Piedra sobre piedra	Lámina	5
13	Piedra sobre piedra	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	6
14	Piedra sobre piedra	Palma	5
15	PVC relleno de concreto	Lámina	4

16	Simple piedra sobre piedra	Palma	5
17	Simple piedra sobre piedra	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	6

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra una ficha por cada tipo de combinación para su mejor apreciación. Cabe aclarar que todas las tablas fueron elaboradas con datos propios de GLH y verificadas en recorridos de campo a fin de poder constatar las combinaciones.

Tabla 25. Combinación 1.



Materiales		Foto
Muros	Bahareque	
Techos	Palma (guano)	
Geometría	Cuatro aguas	
Tipología	10	
<p>Observaciones: Este tipo de vivienda se encuentra principalmente en las zonas rurales de casi todo el estado, y predomina en aquellos lugares en donde hay mayor presencia de población indígena (José María Morelos y Felipe Carrillo Puerto). A pesar de que la guía del CENAPRED la coloca con tipología 10, se ha demostrado que "por su planta elipsoidal y el techo a dos aguas con esquinas cónicas ofrece poca resistencia al viento, de hecho conducen y desvían el viento de manera que éste las rodea sin mayor problema".¹⁵ Este tipo de viviendas son de un nivel y regularmente cuentan con dos puertas de acceso. En el interior no existen divisiones.</p>		


Tabla 26. Combinación 2.

Materiales		Foto
Muros	Bahareque	
Techos	Lámina	
Geometría	Cuatro aguas	
Tipología	10	
<p>Observaciones: Al igual que la combinación 1, este tipo de viviendas se encuentran en zonas rurales. Debido a la escasez de material, o el acceso a otro tipo de éstos, se ha venido sustituyendo el uso de palma (guano) para los techos, por láminas de cartón, zinc o galvanizadas, lo que resulta en viviendas de menor calidad y, por ende, más vulnerables. La zona rural de los municipios de Tulum, Lázaro Cárdenas y José María Morelos es en la que hay mayor presencia de este tipo de viviendas, así como en la periferia de la ciudad de Cancún y Tulum. Estas casas son únicamente de un nivel.</p>		

14 Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Evaluación de la vulnerabilidad física y social, noviembre 2006, pp. 20-21.

15 Torres Pérez, María Elena, "La vivienda patrimonial ante el huracán Isidoro", en Revista de la Universidad Autónoma de Yucatán, núm. 224, primer trimestre de 2003, pp. 72.

Tabla 27. Combinación 3.

Materiales		Foto
Muros	Bloque hueco de concreto	
Techos	Palma (guano)	
Geometría	Cuatro aguas	
Tipología	4	
Observaciones: Se observó en mayor medida en el municipio de Felipe Carrillo Puerto y en algunas localidades rurales de Cozumel. En la mayoría de los casos se identificaron deficiencias en los refuerzos. Estas viviendas son únicamente de un nivel.		

Tipología	1 y 3
Observaciones: En todas las cabeceras municipales este fue el tipo de vivienda predominante, al igual que en un porcentaje importante de las localidades rurales. En las últimas los acabados eran distintos y se observaron deficiencias en los refuerzos. De igual forma, en algunos fraccionamientos construidos por empresas inmobiliarias la mampostería presentaba deficiencias evidentes. El número de niveles fue muy variable, pero en general en las localidades rurales eran de entre uno a dos, y en las ciudades se encontraron condominios de lujo de más de 20 pisos. Nota: La tipología cambia dependiendo de la mampostería (si es deficiente o no).	

Tabla 30. Combinación 6.

Materiales		Foto
Muros	Concreto colado	
Techos	Lámina	
Geometría	Dos aguas	
Tipología	4	
Observaciones: Este tipo de viviendas predominó en localidades rurales del municipio de Othón P. Blanco, sobre todo en las habitadas por comunidades menonitas. Aunque de lejos pareciera que son de tabique o bloque hueco de concreto, al acercarse se puede observar que para su construcción se utiliza un molde que simula dicha forma. Los techos regularmente son de lámina galvanizada o de zinc, aunque también se encontró un tipo con dos láminas rellenas de unicel.		

Tabla 28. Combinación 4.


Materiales		Foto
Muros	Bloque hueco de concreto	
Techos	Lámina	
Geometría	Dos aguas	
Tipología	4 y 2	
Observaciones: Este tipo de vivienda predominó en zonas semiurbanas y urbanas de Othón P. Blanco, así como en localidades rurales del mismo municipio. El tipo de lámina que se observó en mayor medida fue de cartón y zinc. En la mayoría de los casos se detectaron deficiencias en los refuerzos y en el anclaje de los techos. Estas casas son únicamente de un nivel. Nota: La tipología cambia dependiendo de la mampostería (si es deficiente o no).		

Tabla 31. Combinación 7.



Materiales		Foto
Muros	Concreto colado	
Techos	Losa de concreto o viga y bovedilla	
Geometría	Plano	
Tipología	3	
Observaciones: Las viviendas de concreto colado en muros, y losa de concreto o viga y bovedilla en techos, predominó en las zonas urbanas, particularmente en fraccionamientos desarrollados por empresas inmobiliarias. Así mismo, en las rurales que han recibido apoyos por parte del FONDEN, la SEDESOL, la SEDATU y la SEDUVI, se observaron casas de este tipo. De hecho, en las localidades rurales en las que		

Tabla 29. Combinación 5.

Materiales		Foto
Muros	Bloque hueco de concreto	
Techos	Losa ligada	
Geometría	Plano	

predominó este tipo de vivienda fue debido a los apoyos mencionados. Cabe señalar que la mayor parte de la población rural que recibió ayuda del gobierno, conservó su vivienda tradicional. En su mayoría, son de un nivel en la zona rural y dos niveles máximo en las ciudades.

Tabla 32. Combinación 8.


Materiales		Foto
Muros	Desecho	
Techos	Lámina o desecho	
Geometría	Plano/ irregular	
Tipología	10	
<p>Observaciones: Éste es el tipo de vivienda más endeble. Se localizó principalmente en la periferia de las zonas urbanas y asentamientos irregulares. A nivel rural no se observó gran presencia de esta combinación de materiales; de hecho, únicamente la localidad de Tres de Septiembre, en Isla Mujeres (prácticamente forma parte de la zona conurbada de la ciudad de Cancún), registró predominancia de estos materiales. Son viviendas de un nivel.</p>		

Tabla 33. Combinación 9.


Materiales		Foto
Muros	Lámina	
Techos	Lámina	
Geometría	Plano/ dos aguas	
Tipología	10	
<p>Observaciones: También es de las viviendas más vulnerables. Se localizó en mayor medida en Othón P. Blanco, sobre todo en localidades del sur del municipio, y en algunas zonas de la periferia de las ciudades de Chetumal, Cancún y Playa del Carmen. Son casas de un nivel.</p>		

Tabla 34. Combinación 10.



Materiales		Foto
Muros	Madera	
Techos	Lámina	
Geometría	Una, dos y cuatro aguas	
Tipología	9	
<p>Observaciones: Esta vivienda también es tradicional, sobre todo en el sur del estado. En la ciudad de Chetumal se han conservado algunas de estilo anglo-caribeño, que han sido declaradas patrimonio cultural del estado y que resistieron el impacto del huracán Janet, en 1955. Se trata de viviendas de un sólo nivel.</p>		

Tabla 35. Combinación 11.


Materiales		Foto
Muros	Madera	
Techos	Palma (guano)	
Geometría	Cuatro aguas	
Tipología	9	
<p>Observaciones: Tanto en Bacalar como en Felipe Carrillo Puerto es en donde se encuentra, en mayor medida, este tipo de combinación. A pesar de su similitud con las casas "tipo maya", la base rectangular y el ancho de las tablas de madera ofrecen mayor resistencia al viento, lo que las hace más vulnerables frente a este fenómeno.</p>		

Tabla 36. Combinación 12.

Materiales		Foto
Muros	Piedra sobre piedra	
Techos	Lámina	
Geometría	Un agua	
Tipología	5	


Observaciones: Este tipo de vivienda no es muy común, pero se encontraron algunas localidades rurales en las que predominó. Se observaron deficiencias en el anclaje de los techos, así como en los refuerzos. Son viviendas de un sólo nivel.

Tabla 37. Combinación 13.

Materiales		Foto
Muros	Piedra sobre piedra	
Techos	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	
Geometría	Plano	
Tipología	6	

Observaciones: Este tipo de vivienda se observó sobre todo en la ciudad de Felipe Carrillo Puerto, aunque no fue predominante en la mayoría de los casos. También se encontró en localidades rurales cercanas al estado de Campeche. Las observadas únicamente contaban con un nivel.

Tabla 38. Combinación 14.

Materiales		Foto
Muros	Piedra sobre piedra	
Techos	Palma (guano)	
Geometría	Plano	
Tipología	5	

Observaciones: Son viviendas muy similares a la casa "tipo maya"; sólo se substituye el bahareque por mampostería. Son resistentes a vientos fuertes. Se encontraron en las cabeceras municipales de los municipios de la zona maya y en localidades rurales de Felipe Carrillo Puerto, principalmente. Son casas de un nivel.


Tabla 39. Combinación 15.

Materiales		Foto
Muros	PVC relleno de concreto	
Techos	Lámina	
Geometría	Plano	
Tipología	4	

Observaciones: Se encontró principalmente en los municipios de Bacalar y Othón P. Blanco. De acuerdo con la población que las habita, este tipo de vivienda fue construida con recursos del FONDEN después de los daños ocasionados por el huracán Deán, en la zona sur del estado. Los techos también tienen plafón por la parte interior. Son viviendas de un nivel.


A continuación, se ofrece un breve análisis de los tipos de viviendas encontrados en cada uno de los municipios.

Tabla 40. Combinación 16.

Materiales		Foto
Muros	Simple, piedra sobre piedra	
Techos	Palma (guano)	
Geometría	Plano	
Tipología	5	

Observaciones: Se encontró principalmente en las ciudades de los municipios de Lázaro Cárdenas, José María Morelos y Felipe Carrillo Puerto, así como en las localidades rurales de este último. Son viviendas de un sólo nivel.

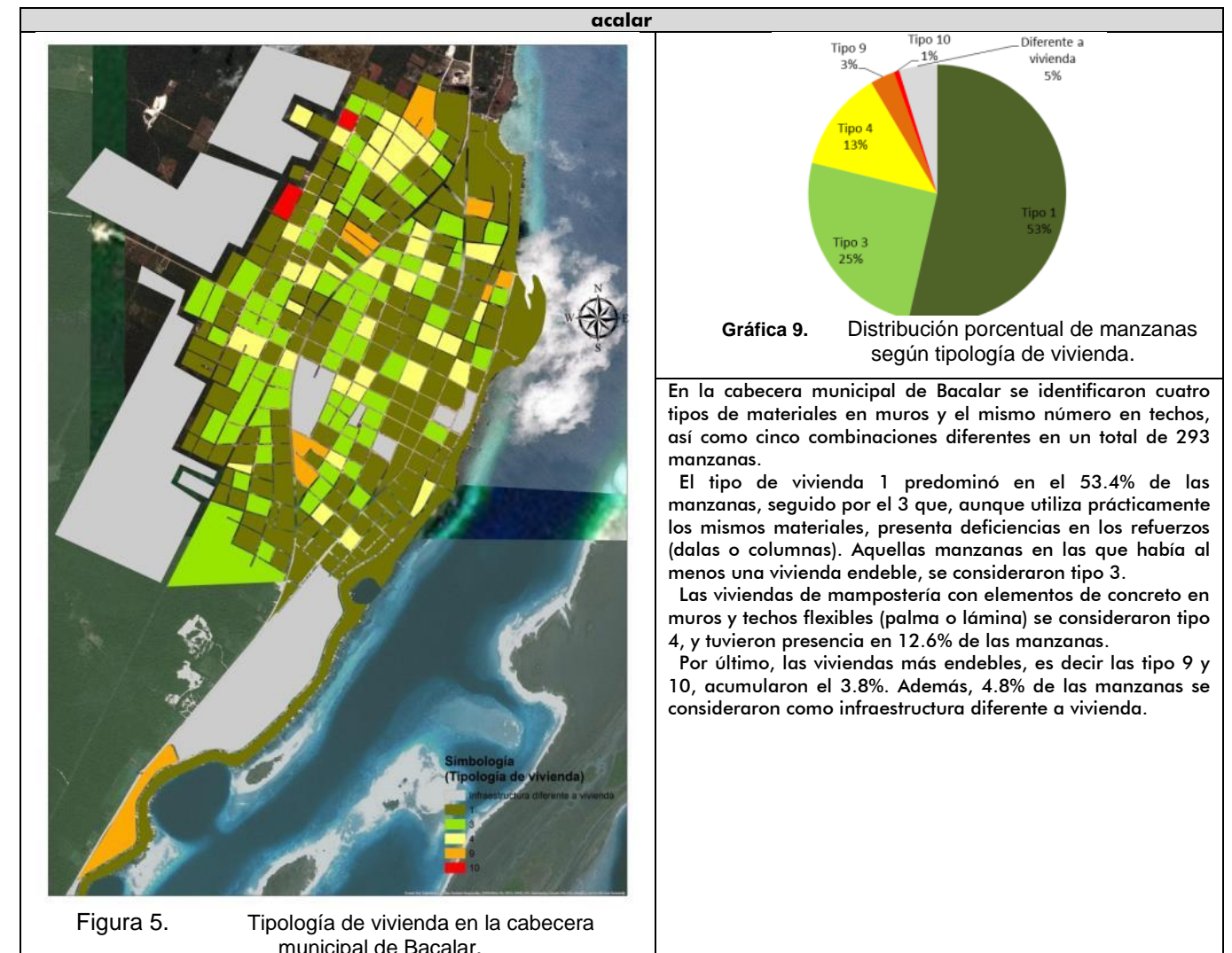
Tabla 41. Combinación 17.

Materiales		Foto
Muros	Simple, piedra sobre piedra	
Techos	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	
Geometría	Plano	
Tipología	6	

Observaciones: Este tipo de vivienda no tiene mucha presencia en el estado; sin embargo, en la ciudad de Felipe Carrillo Puerto se pudieron observar algunas. A nivel rural sólo predominó en la localidad de San Pedro. Las examinadas únicamente tenían un nivel.

En los apartados correspondientes a cada peligro, se profundizará más en la condición de vulnerabilidad de los tipos de vivienda para cada uno de los fenómenos, así como en los criterios utilizados para determinar dicha condición.

Los procesos de urbanización son muy variables en lo que se refiere a la temporalidad, por lo que resulta fundamental actualizar la información. Para tal efecto, es importante destacar que este levantamiento se realizó entre octubre de 2014 y marzo de 2015. A partir de esas fechas se pudieron presentar algunos cambios en las variables utilizadas, entre las más probables sobresale el aumento en el número de viviendas o manzanas; la remodelación o reforzamiento de las mismas y la aplicación de algún programa federal estatal o municipal para mejora de vivienda, que pudiera incidir en la predominancia de algún material en la zona estudiada.



Las características de las viviendas predominantes cambian a nivel rural, únicamente 5.4% de las localidades se consideraron de tipo 1. En contraste, se encontró una mayor presencia de materiales típicos, tal es el caso de la madera y el bahareque en los muros, así como de la palma (guano) en los techos.

En resumen, el 35.1% de estas localidades registró predominancia en las viviendas con tipología 9 (muros de madera y techos flexibles); 27% en el tipo 4; 25.7% el tipo 3; 5.4% el tipo 1, al igual que el tipo 10, y 1.4% el tipo 5. Cabe destacar que al sur del estado el uso de madera en los muros es más común que en el norte.

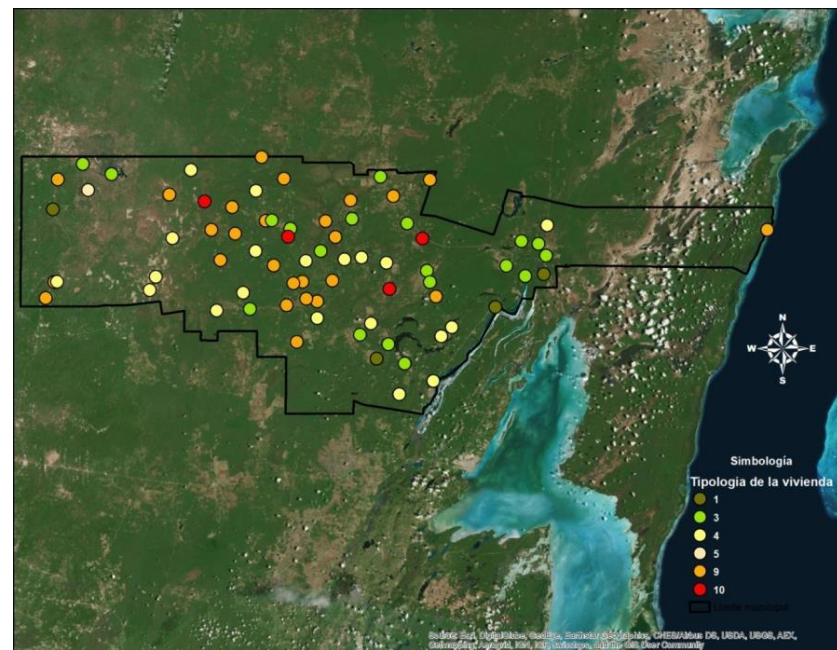
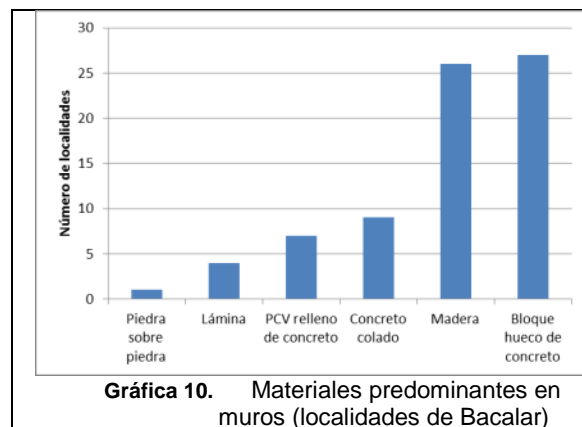
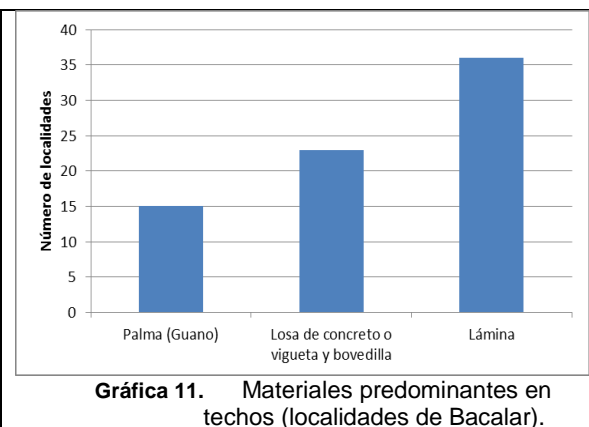


Figura 6. Tipología de vivienda en localidades rurales del municipio de Bacalar.

De las 74 localidades rurales analizadas en Bacalar; en 27 predominan muros de bloque hueco de concreto; en 26, madera; en 9, concreto colado; en 7, PVC relleno de concreto, en 4, lámina; y en una, piedra sobre piedra. En cuanto a los materiales de techos; en 36 localidades predominó la lámina; en 23 la losa de concreto o vigueta y bovedilla; y en 15 palma. (Gráfica 10 y Gráfica 11).



Gráfica 10. Materiales predominantes en muros (localidades de Bacalar)



Gráfica 11. Materiales predominantes en techos (localidades de Bacalar).

En la zona rural del municipio de Benito Juárez se analizaron 21 localidades, en las que predominó el uso del bloque hueco de concreto en muros, y losa colada, o vigueta y bovedilla en techos. Lo anterior se debe, principalmente, a que la mayoría de las localidades analizadas se encuentran relativamente cerca de la ciudad de Cancún, por lo que el acceso a ese tipo de materiales es más fácil que en otras localidades más alejadas. Así, en el 42.9% de las localidades predominó la vivienda tipo 1; en 19% el tipo 3; en el 14.3% el tipo 9, y en 23.8% el tipo 10. Cabe señalar que estas últimas se encuentran en su mayoría sobre la carretera libre con dirección a Mérida, así como en la zona agrícola (Figura 8).

Benito Juárez

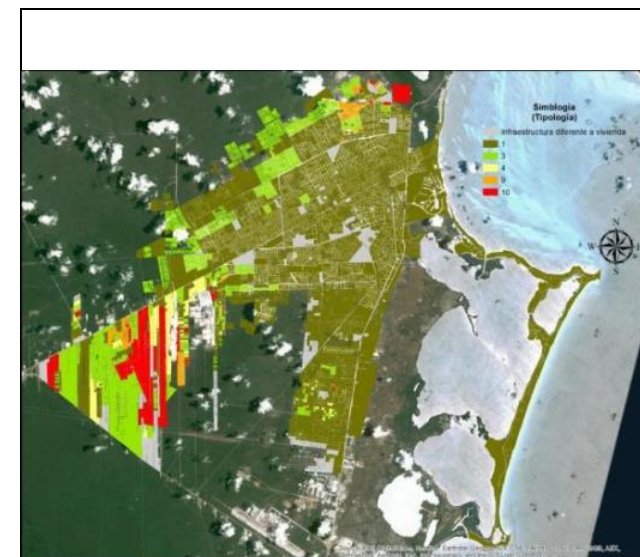
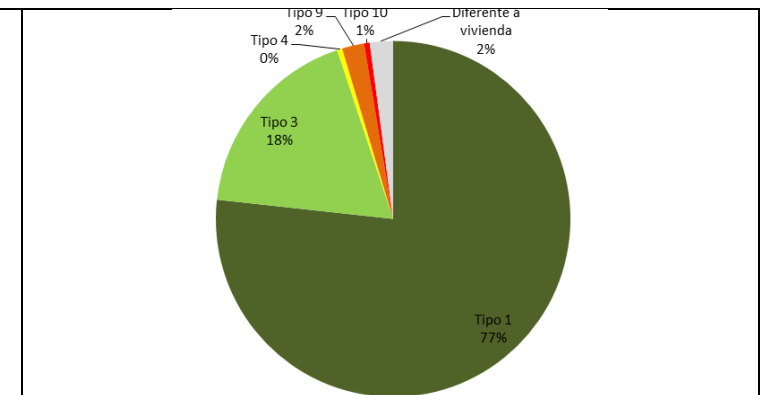


Figura 7. Tipología de vivienda en la ciudad de Cancún.



Gráfica 12. Distribución porcentual de manzanas según tipología de vivienda.

Al igual que en todas las zonas urbanas del estado, en Cancún, que es la ciudad más grande de la entidad, el 77% de las viviendas fueron consideradas tipo 1; el 18% tipo 3, y el restante 3% se distribuyó entre las tipo 4, 9 y 10.

Se analizaron un total de 8,731 manzanas. Aquí, el proceso de urbanización ha ido avanzando considerablemente y sólo en el extremo oeste de la ciudad se observaron materiales endebles. Lo anterior no sólo se debe a que la zona apenas se está urbanizando, sino que también se encontraron algunos asentamientos irregulares. En el norte de la ciudad también se identificaron un par de manzanas en las que predominó el uso de materiales endebles.

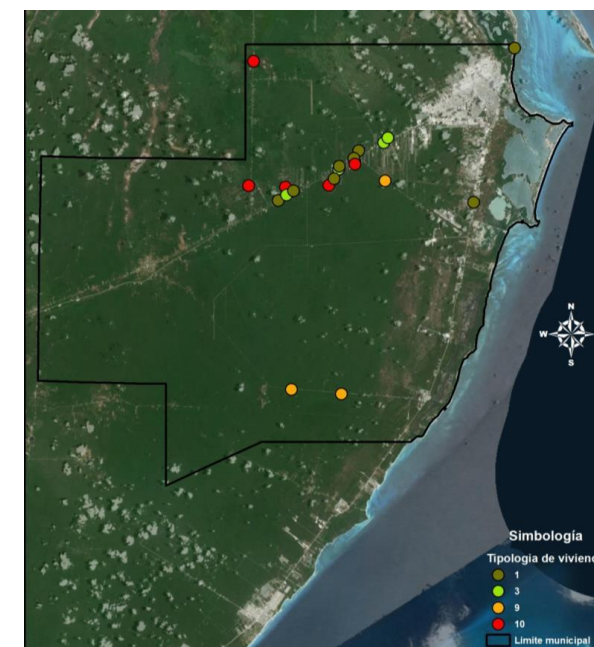
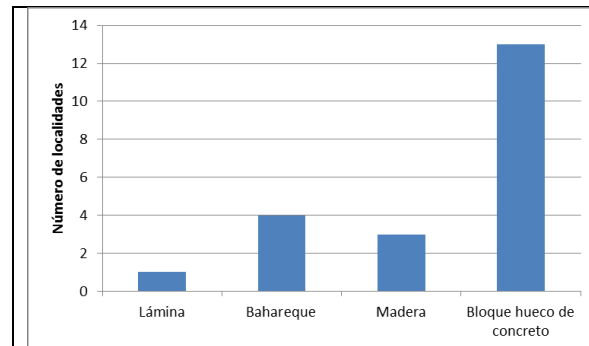
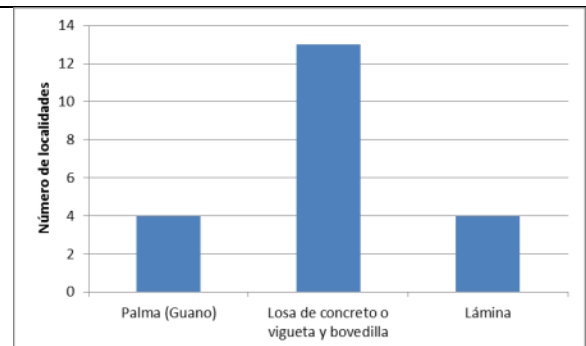


Figura 8. Tipología de vivienda en localidades rurales de Benito Juárez.

Como ya se mencionó, el material predominante en muros fue el bloque hueco de concreto; y en techos la losa colada, o vigueta y bovedilla. A diferencia de otros municipios, en Benito Juárez el uso del bahareque y la palma no es tan común, pues sólo predominó en cuatro localidades (Gráfica 13 y Gráfica 14).



Gráfica 13. Materiales predominantes en muros (localidades de Benito Juárez).



Gráfica 14. Materiales predominantes en techos (localidades de Benito Juárez).

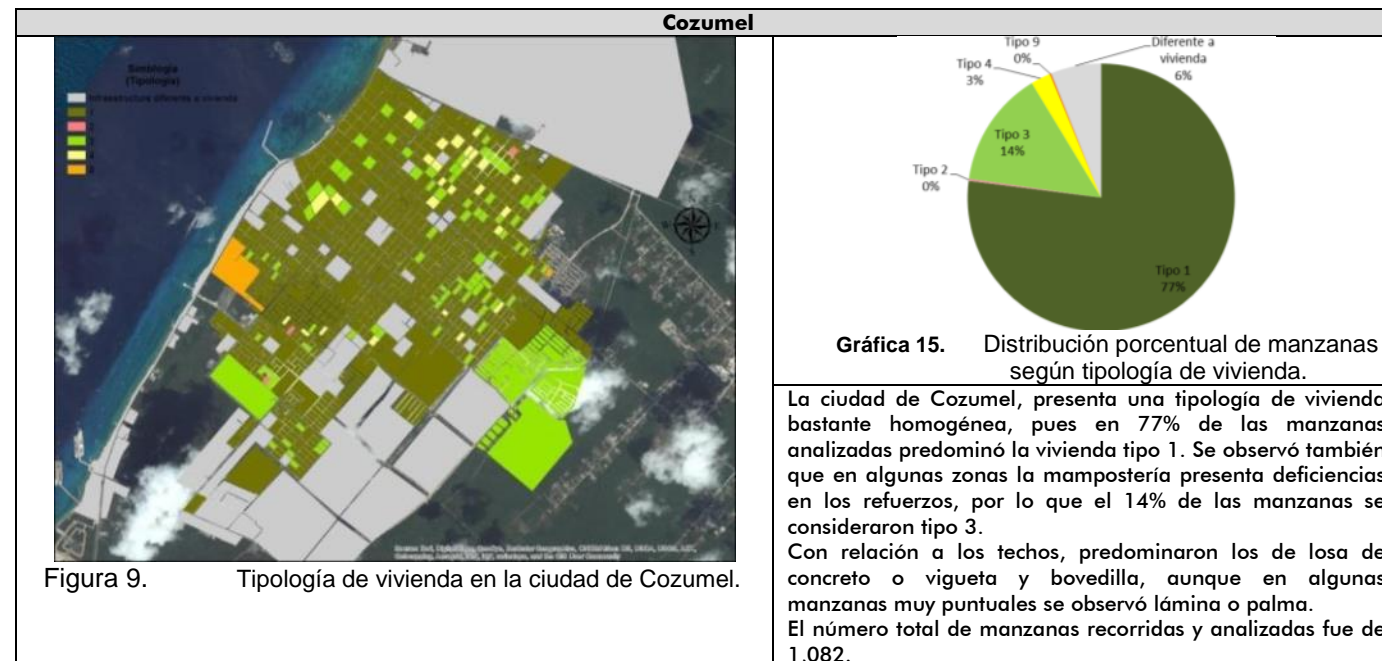


Figura 9. Tipología de vivienda en la ciudad de Cozumel.

Gráfica 15. Distribución porcentual de manzanas según tipología de vivienda.

La ciudad de Cozumel, presenta una tipología de vivienda bastante homogénea, pues en 77% de las manzanas analizadas predominó la vivienda tipo 1. Se observó también que en algunas zonas la mampostería presenta deficiencias en los refuerzos, por lo que el 14% de las manzanas se consideraron tipo 3. Con relación a los techos, predominaron los de losa de concreto o vigueta y bovedilla, aunque en algunas manzanas muy puntuales se observó lámina o palma. El número total de manzanas recorridas y analizadas fue de 1,082.

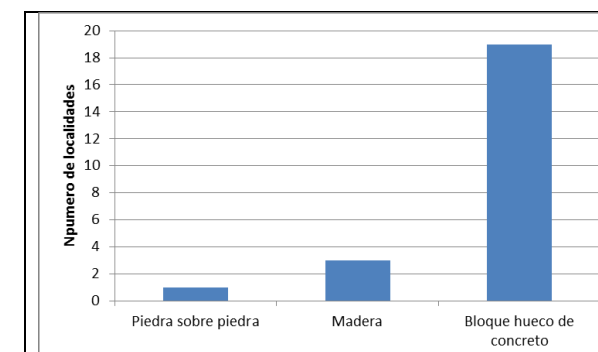
En lo que respecta a las localidades rurales de Cozumel, por la propia condición geográfica del municipio, al ser una isla, también se observó cierta homogeneidad en los materiales de construcción. Cabe destacar que la mayoría de las localidades analizadas se encuentran a muy poca distancia de la ciudad, por lo que se espera que en un futuro éstas sean absorbidas por la mancha urbana (Figura 9).

Por último, y con apoyo del personal de la coordinación municipal de Protección Civil, se pudieron identificar puntualmente las viviendas endebles, pues las conocen por experiencias en evacuaciones.

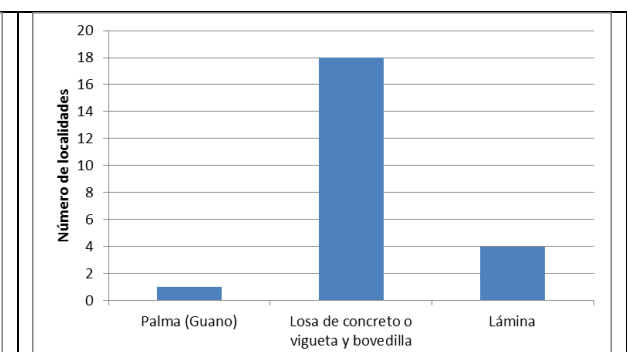


Figura 10. Tipología de vivienda en localidades rurales de Cozumel.

En 18 de las 23 localidades analizadas, predominaron los muros de bloque hueco de concreto, y techos de losa de concreto o vigueta y bovedilla. Se observaron techos flexibles en mayor proporción que en la zona urbana, aunque sólo predominaron en cinco localidades (Gráfica 16 y Gráfica 17).



Gráfica 16. Materiales predominantes en muros (localidades de Cozumel).



Gráfica 17. Materiales predominantes en techos (localidades de Cozumel).

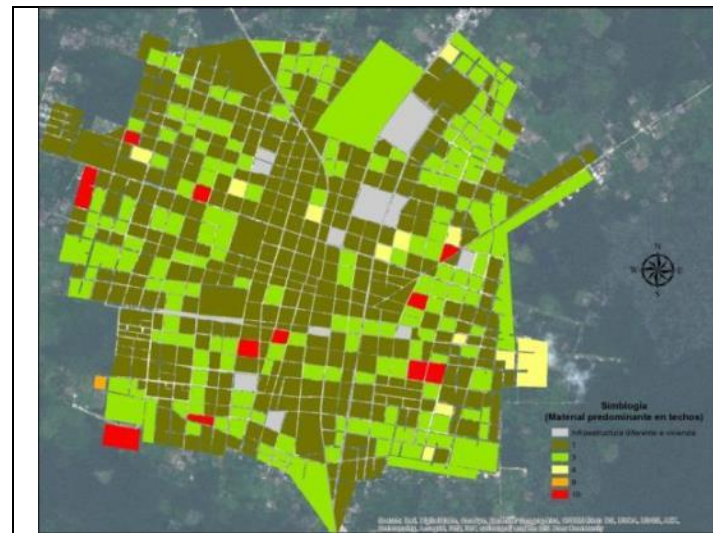
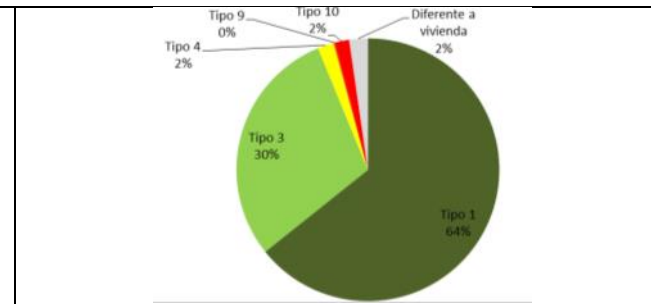


Figura 11. Tipología de vivienda en la ciudad de Felipe Carrillo Puerto.



Gráfica 18. Distribución porcentual de manzanas según tipología de vivienda.

En la ciudad de Felipe Carrillo Puerto se analizaron 613 manzanas, en las cuales predominó el tipo de vivienda 1 (64%). En el 30% se observó, en mayor medida, la vivienda tipo 3. A diferencia de ciudades más densamente pobladas, en Felipe Carrillo Puerto los terrenos de cada predio son más grandes, por lo que el número de viviendas en cada manzana es menor. De igual forma, vale la pena resaltar que si bien la mayoría de las viviendas en la ciudad emplearon materiales resistentes, tanto en muros como en techos, hay presencia de materiales regionales como bahareque o palma en prácticamente todas las manzanas, aunque éstos no predominaron más que en el 2% de las manzanas.

Felipe Carrillo Puerto es uno de los municipios de la entidad que tiene mayor población rural. Para efectos del análisis de la tipología de vivienda a nivel localidad se trabajó en 104 de ellas.

Se encontró mayor diversidad en el número de combinaciones de materiales, lo que arrojó un total de siete tipos de vivienda diferentes. Sobresalen las de materiales de la región, a las que se designaron tipo 9 y 10 (Figura 12).

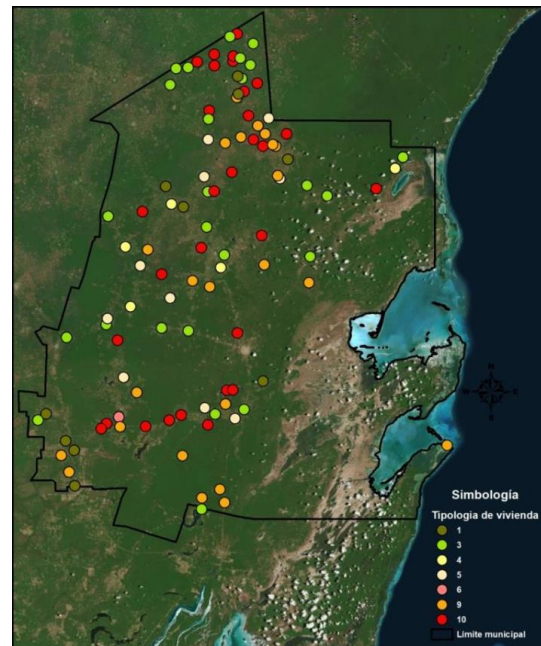
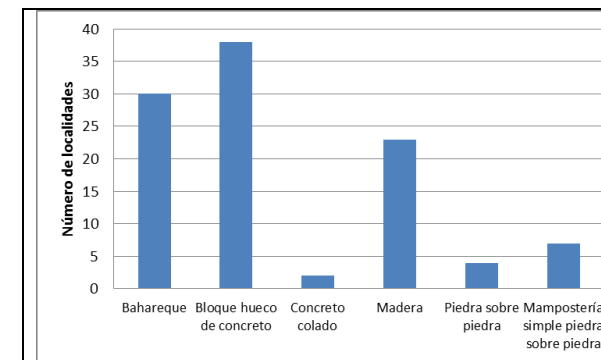


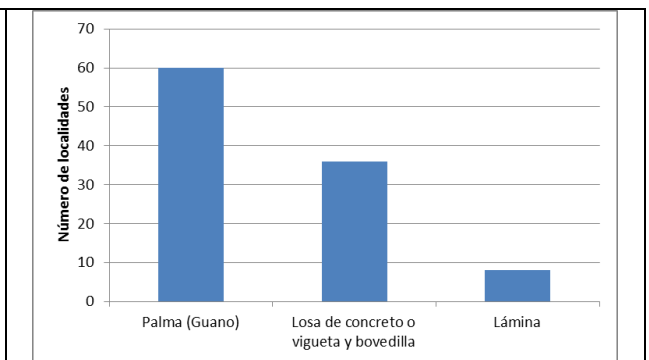
Figura 12. Tipología de vivienda en localidades rurales de Felipe Carrillo Puerto.

El material que más predominó en muros fue el bloque hueco de concreto, mismo que se presentó en 38 localidades; el bahareque y la madera también sobresalieron. En lo referente a los materiales en techos, la palma fue la de mayor uso, ya

que prevaleció en 60 localidades (Gráfica 19 y Gráfica 20).



Gráfica 19. Materiales predominantes en muros (localidades de Felipe Carrillo Puerto).



Gráfica 20. Materiales predominantes en techos (localidades de Felipe Carrillo Puerto).

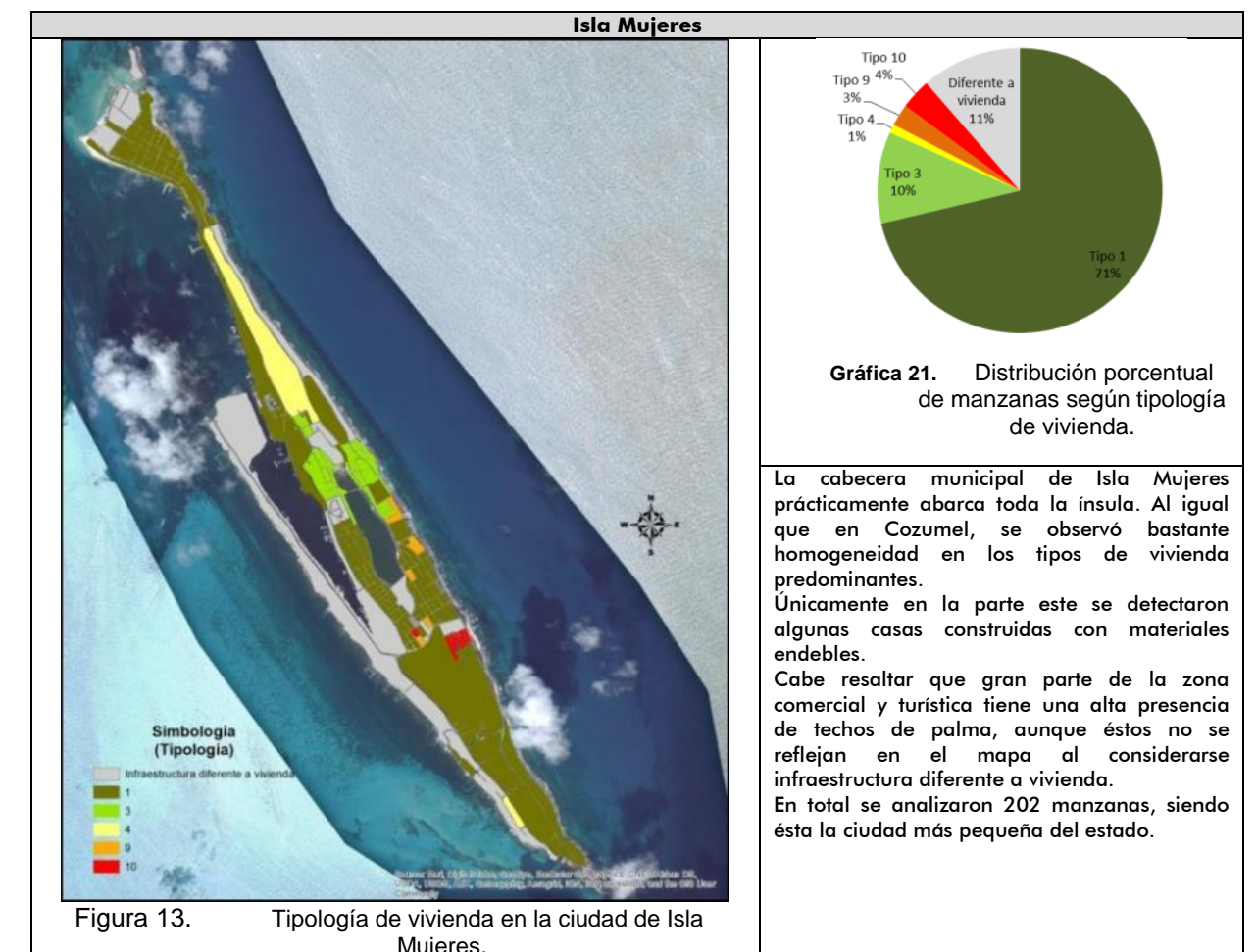
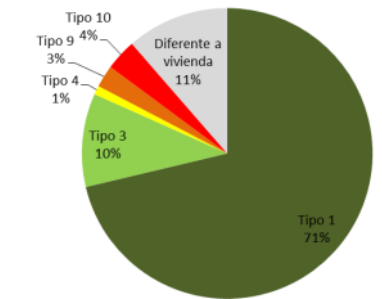


Figura 13. Tipología de vivienda en la ciudad de Isla Mujeres.



Gráfica 21. Distribución porcentual de manzanas según tipología de vivienda.

La cabecera municipal de Isla Mujeres prácticamente abarca toda la ínsula. Al igual que en Cozumel, se observó bastante homogeneidad en los tipos de vivienda predominantes. Únicamente en la parte este se detectaron algunas casas construidas con materiales endebles.

Cabe resaltar que gran parte de la zona comercial y turística tiene una alta presencia de techos de palma, aunque éstos no se reflejan en el mapa al considerarse infraestructura diferente a vivienda.

En total se analizaron 202 manzanas, siendo ésta la ciudad más pequeña del estado.

A nivel rural se analizaron únicamente 14 localidades, todas ubicadas en la parte continental del municipio. En aquellas cercanas a la zona de Puerto Juárez, es decir, colindantes con la ciudad de Cancún, el tipo de vivienda predominante fue el 1. Sin embargo, en las que se encuentran más alejadas (Boca Iglesia, Cayo Sucio y Francisco May) prevaleció el tipo 10.

Cabe destacar que Boca Iglesia y Cayo Sucio son campamentos de pescadores habitados por temporadas, por lo que el tipo de viviendas allí localizadas son de materiales de la región.

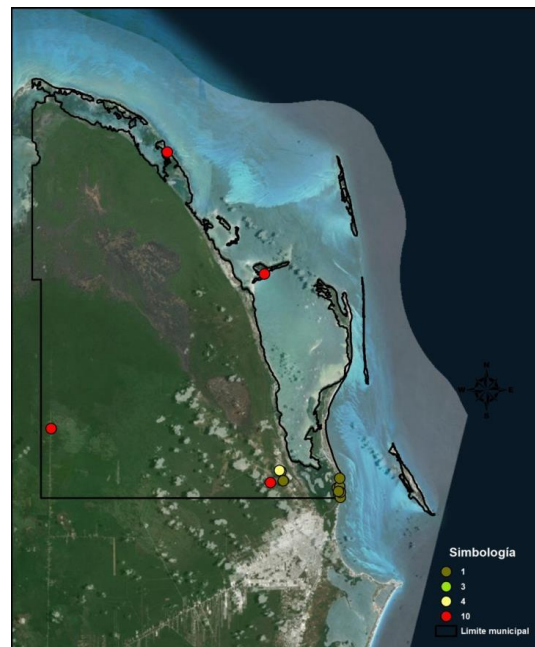
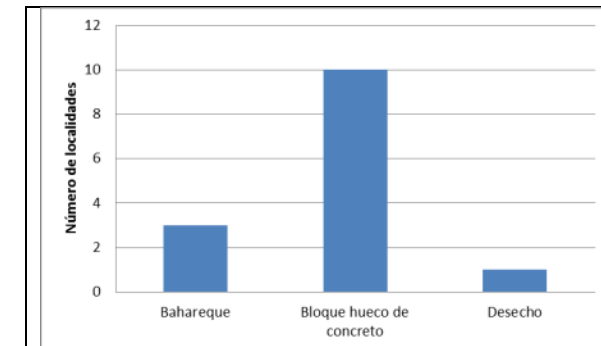
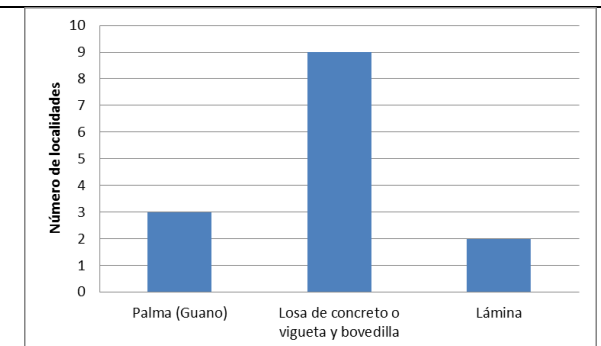


Figura 1. Tipología de vivienda en localidades rurales de Isla Mujeres.

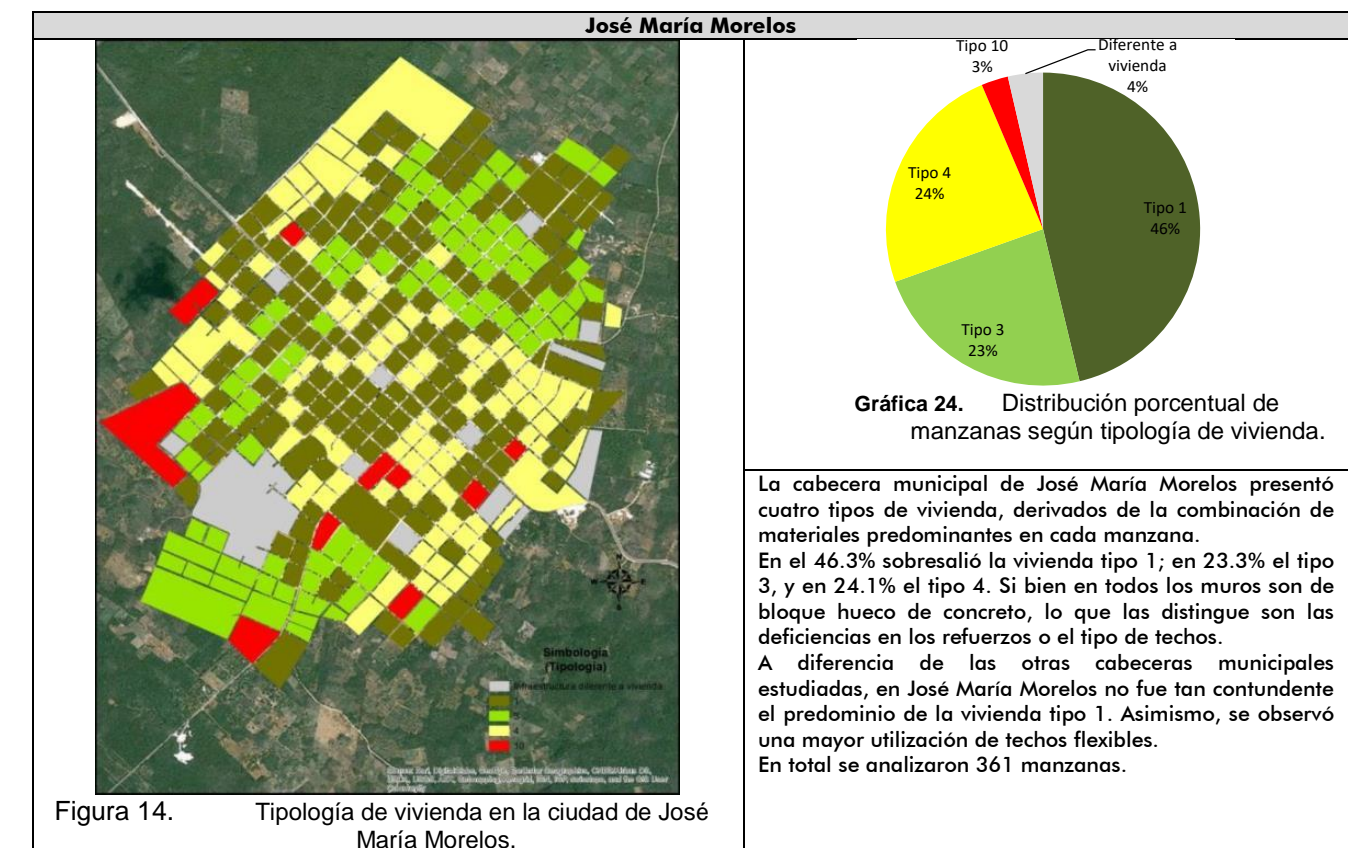
El material predominante en muros fue el bloque hueco de concreto, mismo que se registró en 10 localidades; en techos sobresalió la losa de concreto o vigueta y bovedilla, en nueve localidades. En Tres de Septiembre predominó el desecho en muros, situación que la hace altamente vulnerable ante la mayoría de los fenómenos que se registran en el estado.



Gráfica 22. Materiales predominantes en muros (localidades de Isla Mujeres).



Gráfica 23. Materiales predominantes en techos (localidades de Isla Mujeres).



Gráfica 24. Distribución porcentual de manzanas según tipología de vivienda.

La cabecera municipal de José María Morelos presentó cuatro tipos de vivienda, derivados de la combinación de materiales predominantes en cada manzana. En el 46.3% sobresalió la vivienda tipo 1; en 23.3% el tipo 3, y en 24.1% el tipo 4. Si bien en todos los muros son de bloque hueco de concreto, lo que las distingue son las deficiencias en los refuerzos o el tipo de techos. A diferencia de las otras cabeceras municipales estudiadas, en José María Morelos no fue tan contundente el predominio de la vivienda tipo 1. Asimismo, se observó una mayor utilización de techos flexibles. En total se analizaron 361 manzanas.

Figura 14. Tipología de vivienda en la ciudad de José María Morelos.

A nivel rural también se observa un predominio de viviendas con mampostería deficientemente reforzada, y techos de losa o vigueta y bovedilla. Sin embargo, se observó un amplio uso de materiales de la región, lo que determinó que en 30.1% de las localidades prevaleciera el tipo de vivienda 10. En el occidente del municipio sobresale un área en la que se concentra el tipo de vivienda 4. Esto se debió a que en dicha zona existen varias comunidades menonitas que construyen de manera similar, utilizando muros de concreto colado moldeados de manera que dan la impresión de ser tabiques, y techos de lámina. (Figura 15).

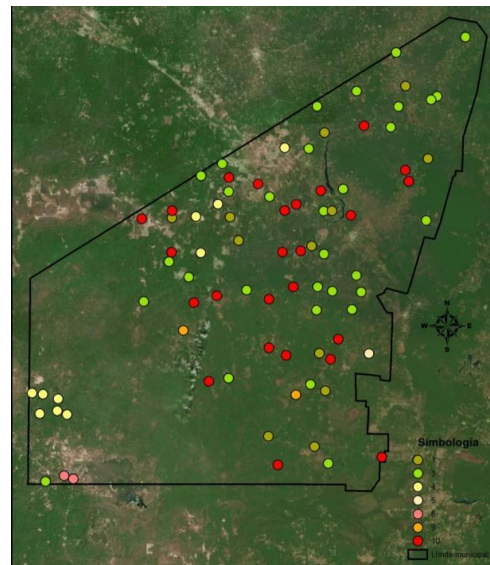
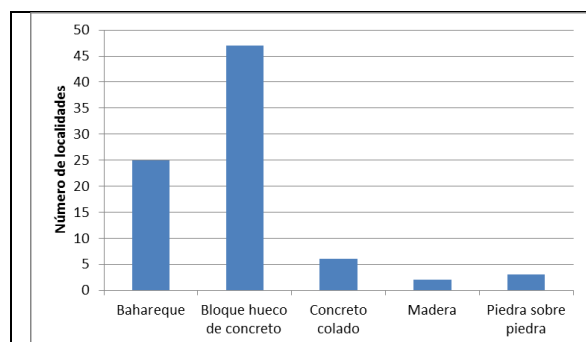


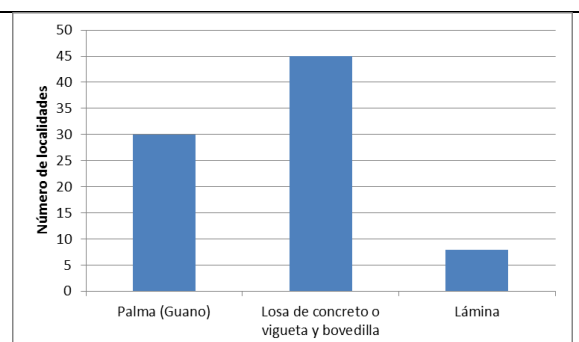
Figura 15. Tipología de vivienda en localidades rurales de José María Morelos.

De las 83 localidades analizadas en José María Morelos, en cerca del 64% prevaleció el uso de muros sólidos, ya sea de bloque hueco de concreto, concreto colado o piedra sobre piedra. También se registró un porcentaje importante de viviendas que emplearon materiales nativos en la construcción, ya que en 30.1% predominó el bahareque como material en muros.

Por otro lado, a pesar de que predominaron los techos rígidos en 45 localidades analizadas, también se observó el uso de paja y lámina en cerca de la mitad (Gráfica 25 y Gráfica 26).



Gráfica 25. Materiales predominantes en muros (localidades de José María Morelos).



Gráfica 26. Materiales predominantes en techos (localidades de José María Morelos).

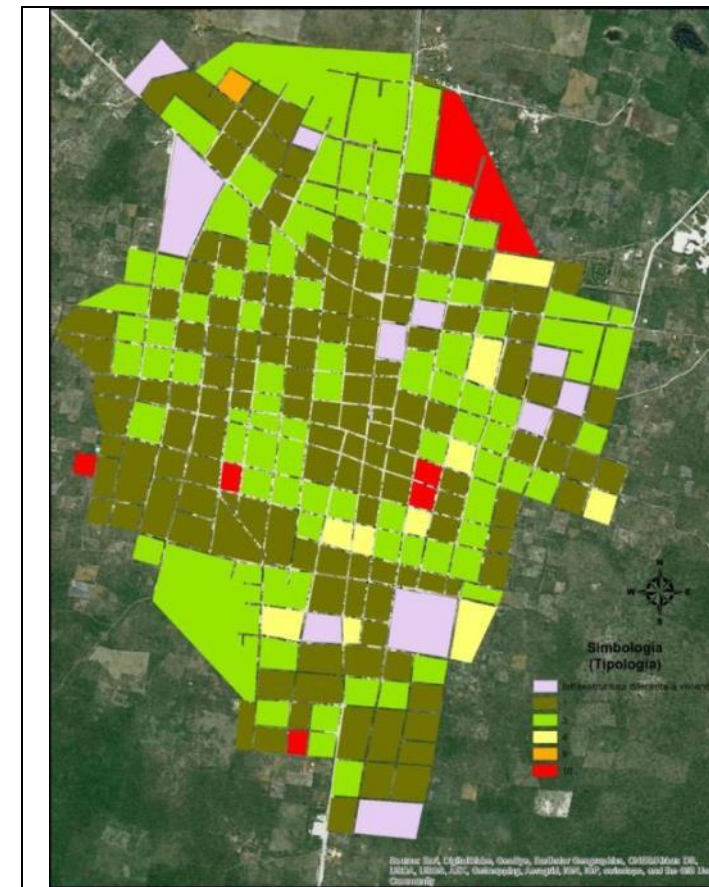
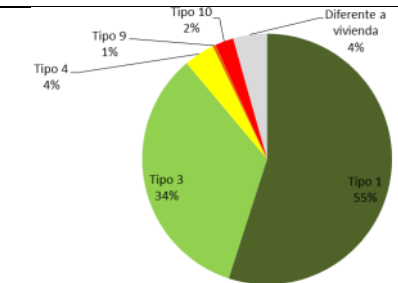


Figura 2. Tipología de vivienda en la ciudad de Kantunilkin.



Gráfica 27. Distribución porcentual de manzanas según tipología de vivienda.

Kantunilkin cuenta con 251 manzanas, lo que la coloca como la segunda ciudad más pequeña del estado, sólo por encima de Isla Mujeres.

De acuerdo con el análisis realizado, en 55% de las manzanas predominó la vivienda tipo 1; en 34% la tipo 3, y en el 4% la tipo 4. Los materiales más endebles en muros apenas predominaron en el 3%.

Al noreste de la cabecera municipal se observó una mayor concentración de viviendas tipo 10. De igual forma, vale la pena mencionar que en la mayoría de las manzanas se observó al menos alguna casa con techos flexibles, y aunque no hayan predominado en la mayoría de las manzanas, hay que poner especial atención, pues son más susceptibles a presentar daños por la ocurrencia de vientos fuertes.

Las localidades rurales analizadas en Lázaro Cárdenas fueron 43. En ellas sí se observó un aumento en el uso de los materiales tradicionales. Únicamente en dos localidades predominó la vivienda tipo 1 (4.7% del total), lo que convirtió al municipio en el de menor porcentaje de localidades rurales en las que destacó el uso de bloque hueco de concreto en muros, con reforzamiento correcto, y losa de concreto o viga y bovedilla en techos.

En 51.2% de las manzanas se percibió una mampostería deficientemente reforzada con techos de losa de concreto o viga y bovedilla, por lo que se les asignó el tipo 3. Es importante mencionar que prácticamente en todas las localidades rurales hay presencia de materiales como bahareque y palma, aunque la proporción es muy variable. En donde sí predominaron este tipo de materiales fue en el 37.2% de las localidades analizadas, la mayoría ubicadas al sur del municipio (Figura 16).

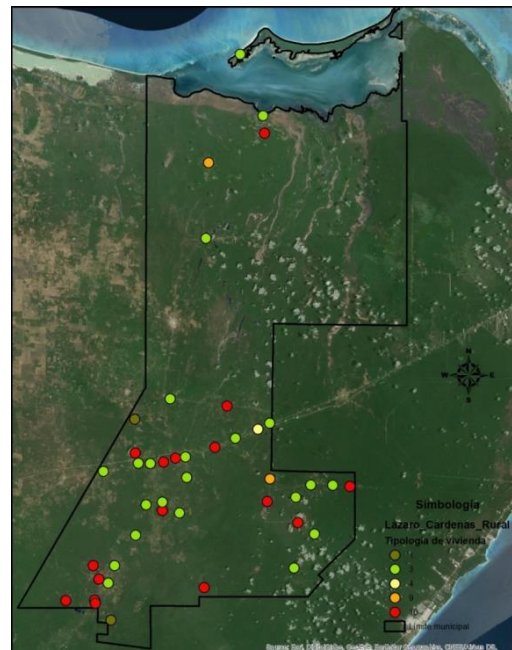
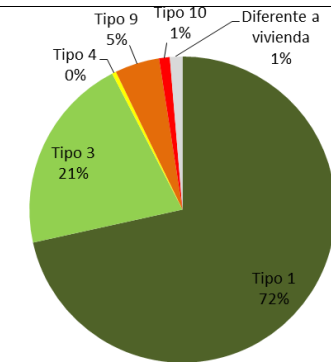


Figura 16. Tipología de vivienda en localidades rurales de Lázaro Cárdenas.



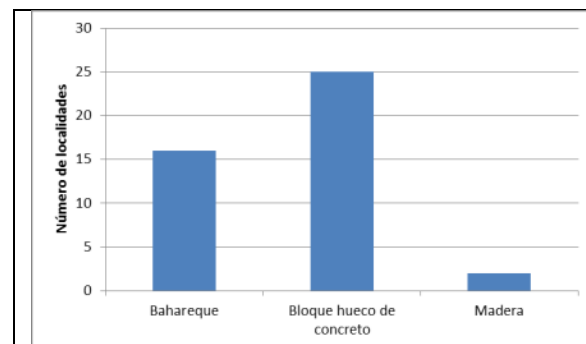
Figura 17. Tipología de vivienda en la ciudad de Chetumal.



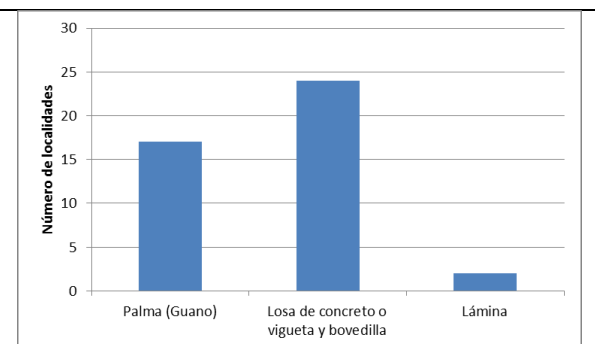
Gráfica 30. Distribución porcentual de manzanas según tipología de vivienda.

La ciudad de Chetumal, capital del estado, registró, como la mayoría de las cabeceras municipales, una predominancia de materiales sólidos en muros y techos. Sin embargo, a diferencia de otras ciudades, el uso de la madera en muros con techos flexibles es más común, incluso en estratos sociales altos. Llama la atención que en la periferia de la ciudad, sobre todo al norte y noroeste, se encuentra la mayor proporción de manzanas con una predominancia de viviendas tipo 10; varios de estos asentamientos son irregulares, por lo que el uso de materiales de desecho o endeblés es más común.

En lo que se refiere a los materiales predominantes en muros, sobresalió el bloque hueco de concreto. Sin embargo, en la mayoría de las edificaciones se observó una mampostería deficientemente reforzada. A diferencia de los municipios del sur del estado, la madera en muros y la lámina en techos se usan marginalmente Gráfica 28 y Gráfica 29.



Gráfica 28. Materiales predominantes en muros (localidades de Lázaro Cárdenas).



Gráfica 29. Materiales predominantes en techos (localidades de Lázaro Cárdenas).

Othón P. Blanco

Othón P. Blanco registró el mayor número de localidades rurales: 122. En el 50% de éstas, aproximadamente, predominó la vivienda tipo 9, que consiste en muros de madera con techos flexibles, las cuales se ubicaron, sobre todo, en el occidente y sur del municipio. En 58 localidades se observó un mayor uso de bloque hueco de concreto, aunque en 22 de éstas se observó una mampostería deficientemente reforzada, y el mismo número techos flexibles. Las viviendas tipo 10 predominaron en el 4.1% de las localidades analizadas.

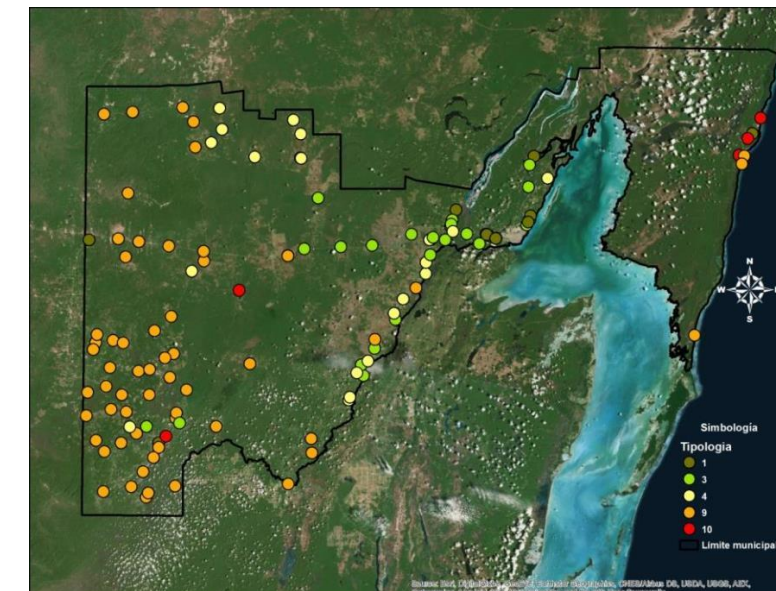
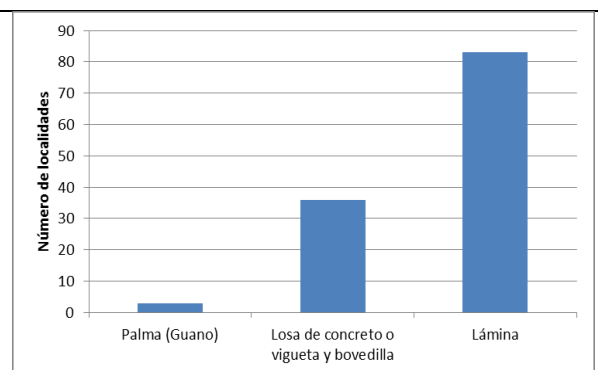
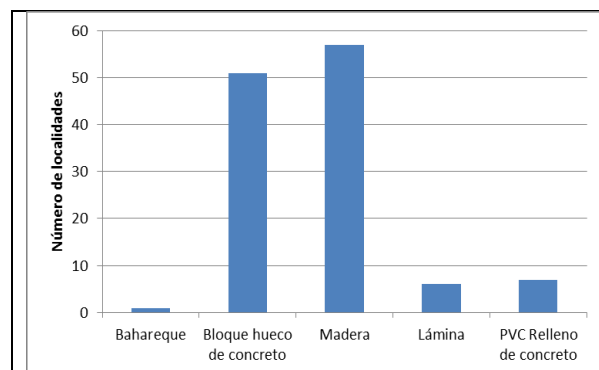


Figura 18. Tipología de vivienda en localidades rurales de Othón P. Blanco.

Como se mencionó, la combinación más común en las localidades del municipio fue la que utiliza muros de madera y

techos de lámina, aunque también existe una proporción importante con muros de bloque hueco de concreto. La lámina sobresale como el material predominante en techos, el cual, con el paso del tiempo, ha venido sustituyendo a la palma (Gráfica 31 y Gráfica 32).

materiales que se utilizan en la construcción: hay una mayor cantidad de viviendas tipo 10 en las localidades más alejadas de la línea de costa, y una mayor concentración del tipo 1 en las cercanas a la playa. (Figura 20)



Gráfica 31. Materiales predominantes en muros (localidades de Othón P. Blanco).

Gráfica 32. Materiales predominantes en techos (localidades de Othón P. Blanco).

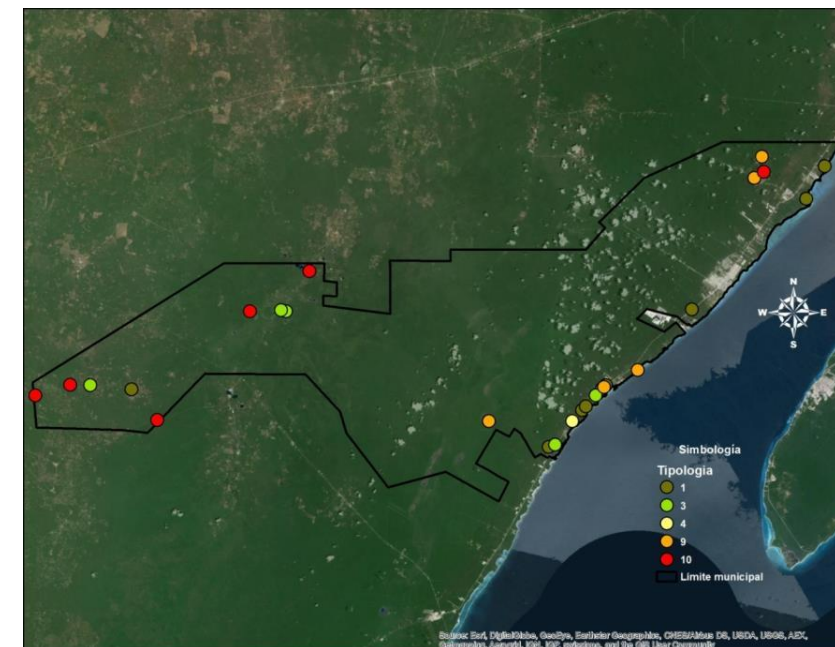
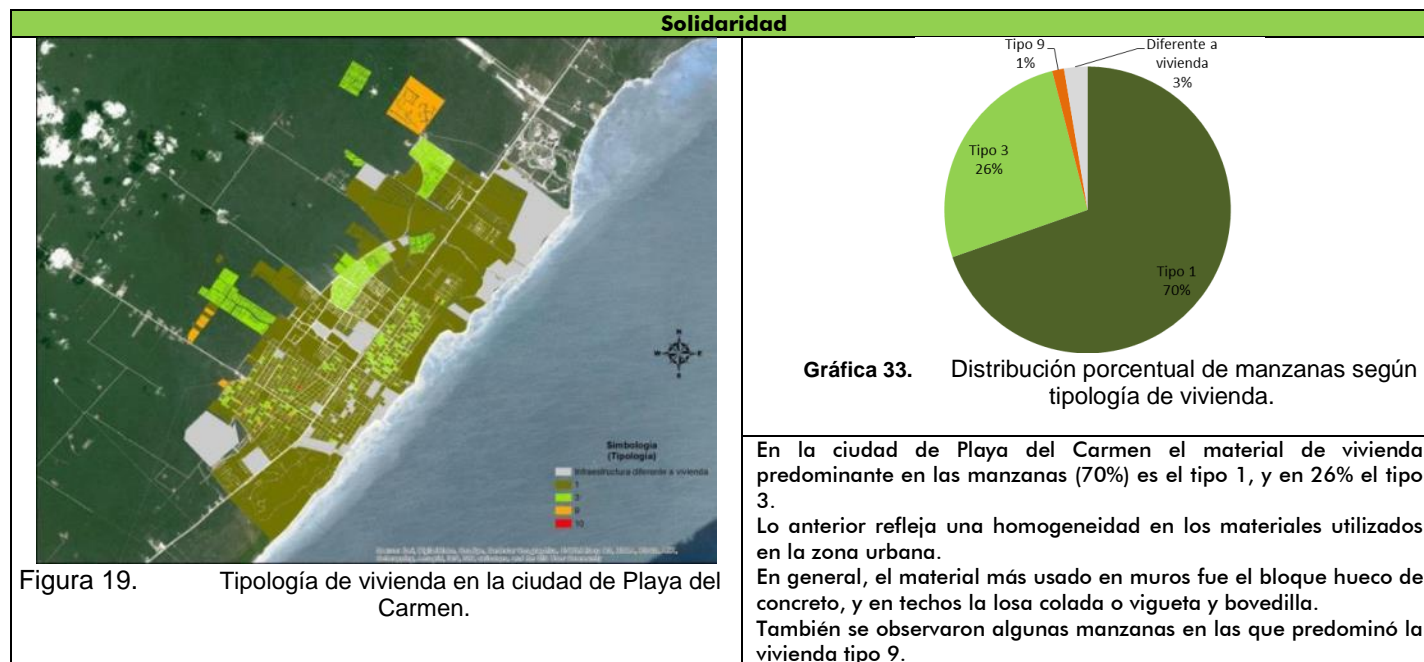


Figura 20. Tipología de vivienda en localidades rurales de Solidaridad.



En Solidaridad, se analizaron un total de 26 localidades rurales. El tipo de vivienda 1 predominó en 9 de ellas, es decir, en el 34.6%. Se observó un mayor uso de materiales tradicionales, sobre todo en el occidente del municipio, lo que arrojó varias localidades en las que predominaron el tipo de vivienda 10 y 9.

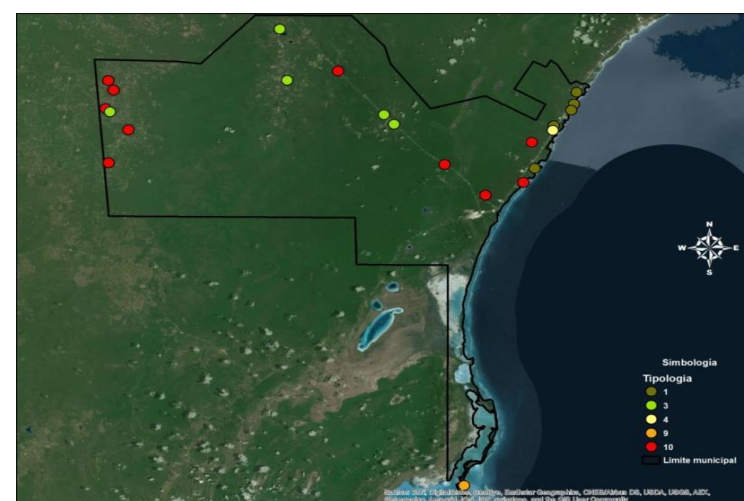
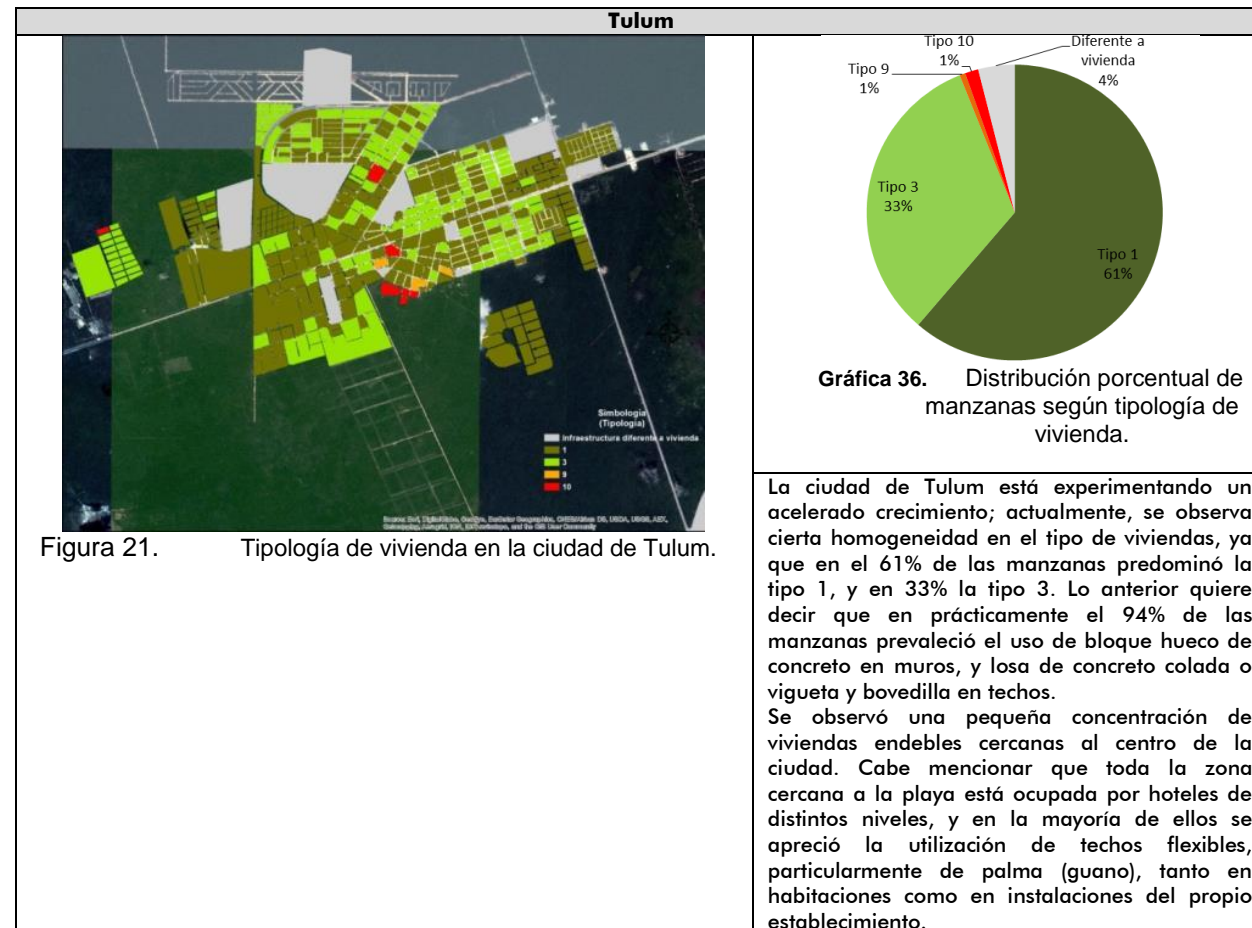
A pesar de que predominó el uso de bloque hueco de concreto en muros, y losa de concreto o vigueta y bovedilla en techos; es a partir de este municipio que hacia el sur y el occidente del estado se comienza a observar un mayor uso de materiales tradicionales. De hecho, en 11 de sus localidades predomina la madera o bahareque en muros, y la palma en techos (Gráfica 34 y Gráfica 35).

En las localidades rurales de Tulum, se observó un patrón similar que en el de Solidaridad: en las zonas más alejadas de la línea de costa se registró un mayor uso de materiales tradicionales y, por ende, una predominancia de viviendas tipo 10.

Al igual que en la mayoría de los municipios de vocación turística, se apreció un patrón interesante en torno al tipo de

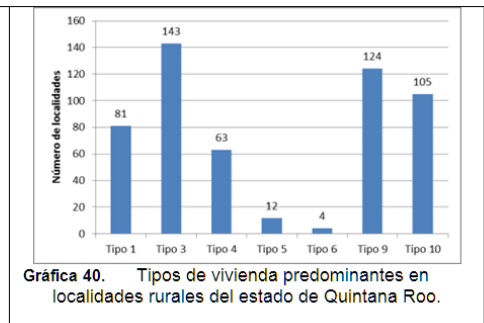
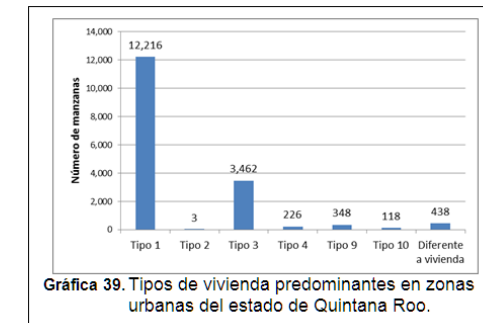
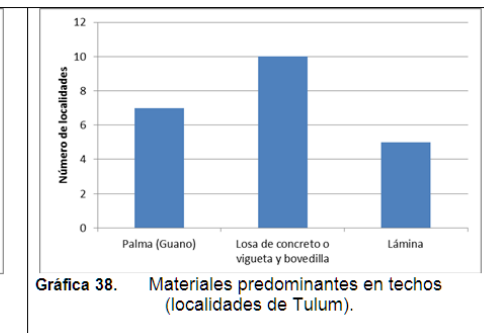
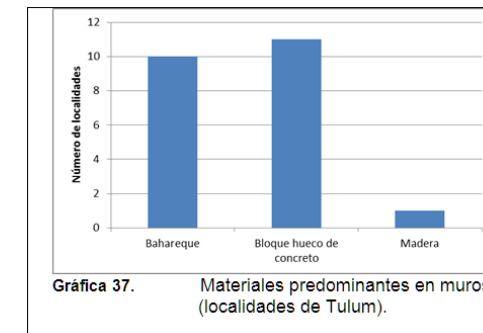
Las localidades en las que sobresalió la vivienda tipo 1 se encuentran, principalmente, a pie de la carretera Tulum-

Felipe Carrillo Puerto. En total se analizaron 22 localidades rurales en Tulum. En 45.5% de ellas predominó la vivienda tipo 10; en 22.7% el tipo 1, y en la misma proporción el tipo 3. En 4.5% de las localidades sobresalió el tipo 4, al igual que el tipo 9 (Figura 21).



Si bien el material predominante en muros fue el bloque hueco de concreto, casi en la misma proporción se observó el bahareque. La madera únicamente prevaleció en la localidad de Javier Rojo Gómez (Punta Allen)

En resumen, a nivel estatal son evidentes las diferencias entre los materiales que se utilizan en las zonas urbanas y las rurales. Mientras que en las primeras predominan ampliamente las viviendas tipo 1 y 3, en las rurales hay una mayor presencia de casas construidas con materiales de la región y techos flexibles, es decir, viviendas tipo 9 y 10 (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).



III. Fenómenos geológicos

3.1 Karsticidad

3.1.1 Inventario de cenotes

3.1.1.1 Introducción

Se conoce como *karst* al "conjunto de formas originales del relieve que se producen en localidades compuestas por rocas fácilmente solubles: yeso, calizas, dolomías o sal. Lo más característico para el *karst* son las formas negativas del relieve (dolinas, poljes, resumideros) y el drenaje subterráneo a través de cuevas (Lugo, 1989). El término "*karst*" proviene del serbocroata y significa "campo de piedras calizas". Aproximadamente un 20% del territorio nacional está conformado por rocas solubles, principalmente calizas y en menor proporción yesos. La mayoría de estas rocas están distribuidas a lo largo de la Sierra Madre Oriental, la Sierra Madre del Sur, Chiapas y la Península de Yucatán.¹⁶

El relieve de estas zonas está condicionado principalmente por la disolución de las rocas; es lo que se denomina

¹⁶ <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/index.php/riesgos-geologicos/hundimientos-regionales-y-locales-agrietamientos>

«karstificación»¹⁷

La península de Yucatán ha sido siempre considerada como un caso que geológicamente no presenta mayor dificultad, hablando tanto en términos petrológicos, sísmico, tectónico, estratigráfico y estructural. Varios han sido los trabajos geológicos desarrollados que mencionan su geología, estratigrafía y algunos leves rasgos estructurales (Aguayo C. J. E., 1980) (Aguilera-Martínez M. A., 2006) (E. L. R., 1973) (Fragoso-Servón P., 2014) (Lemus-Bustos O., 2006) (Loeza-García J. P., 2006) (Lugo-Hubp, 1992) (Mexicanos, 2013) (R. E.-P., Origen y Distribución de las Cavernas de México, 1994) (Sánchez-Rojas L. E., 2007) (Zarate-Barradas R. G., 2006) (Zarate-López J. A.-L. F.-P., 2005) (Zarate-López J. L.-G. J.-G.-H., 2006), sin embargo, uno de los procesos que amerita mayor atención es la karsticidad, cuyos efectos han sido poco estudiados y en algunos ignorados. La karsticidad en el estado de Quintana Roo tiene variables muy propias, como lo son edad y composición de las rocas, extensión, espesor de su cobertura calcárea, espesor de suelos, esfuerzos tectónicos prácticamente ausentes o muy localizados, clima, precipitación, relación o interacción entre aguas continentales y aguas marinas, cobertura vegetal, entre otros, por lo que la hace muy singular.

De acuerdo al presente estudio, la karsticidad en el estado de Quintana Roo se presenta como resultado y asociada directamente a elementos geológicos estructurales de carácter regional y local, por lo que se desarrollan una serie de zonas y corredores kársticos, reflejando una abundancia de estructuras por disolución como son cenotes, dolinas, úvalas, poljes y cavernas subterráneas.

Uno de los objetivos principales del presente estudio en esta temática, fue realizar un inventario de estructuras kársticas de todo el territorio estatal, resultando en un inventario de 7,396 estructuras kársticas entre las que se cuentan cenotes, dolinas, úvalas y poljes, sin contar las estructuras kársticas desarrolladas bajo tierra como son los sistemas de cavernas y galerías kársticas. En este sentido, el inventario realizado es el más completo que se ha realizado en Quintana Roo. También la interpretación estructural realizada es la más completa hasta el momento. Paralelamente, también se mantuvieron los objetivos de realizar inventarios de cenotes y otras estructuras kársticas en las ciudades principales del estado, como son Cancún, Playa del Carmen, Cozumel y Chetumal (ver apartado de peligro por karsticidad y hundimientos). También se llevaron a cabo interpretaciones litológicas, con lo que se tuvieron las bases para realizar una serie de análisis y relaciones existentes entre los procesos kársticos y la litología.

3.1.1.2 Metodología

Aunque para la realización de un inventario de cenotes no existe una metodología definida, (CENAPRED, Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México, 2001) (CENAPRED, Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, 2004) se procedió a tomar algunos aspectos desarrollados en la metodología realizada por Fragoso *et al* (2014) en su caracterización de las depresiones kársticas a escala 1:50,000 en el estado de Quintana Roo.

La metodología de Fragoso (Fragoso-Servón P., 2014) consistió generalmente en la detección de todos los cuerpos de agua, depresiones y zonas de inundación en las cartas topográficas a escala 1: 50,000 que cubren totalmente al estado y presentan curvas de nivel a cada 10 m. Así, todas las depresiones kársticas detectadas fueron clasificadas de acuerdo a su tamaño y forma. Las depresiones mayores a 1 km² fueron clasificadas como poljes, mientras que el resto fueron clasificadas

por el índice de compacidad, el cual sirve para realizar una clasificación morfométrica, así aquellas depresiones con un índice de compacidad entre 1.0 y 1.04 se les clasificó como dolinas, mientras que aquellas con un índice igual o mayor a 1.3 se les clasificó como úvalas. Cabe mencionar que esta misma autora no tomó en consideración las depresiones que conforman las lagunas de Bacalar, Mariscal, Chile Verde, Salada y el Rio Hondo por ser cuerpos de agua sobre fallas. En el presente trabajo estas lagunas se retoman, presentando argumentos en el apartado de resultados. Fragoso complementa la base de datos de depresiones kársticas con la identificación de cuerpos de agua con diámetros mayores a 10 metros y menores a 50 m por medio de imágenes de satélite. En el caso del presente estudio, también se realizó la interpretación de imágenes de satélite de Google, con escalas que van de 1: 5,000 a 1: 50,000.

Tomando en consideración que la porción norte del estado es prácticamente plana, y donde las curvas de nivel a cada 10m no muestran evidencia de formas, ni depresiones topográficas, aunado a una cubierta vegetal considerable, resulta comprensible el porqué en su artículo (Fragoso-Servón P., 2014) en la porción norte del estado, principalmente entre playa del Carmen y Cancún, no aparecen estructuras kársticas. Lo anterior fue resuelto utilizando una metodología propia que consistió en la obtención de imágenes LIDAR del portal de INEGI en la web, al obtener dichos archivos se procesaron con el programa Global Mapper versión 16, del cual resultó la obtención de un Modelo Digital de Terreno (MDT) con curvas de nivel a cada metro. Considerando que cualquier estructura kárstica es reflejada con una forma topográfica negativa, representada por una serie de círculos y semicírculos concéntricos, por lo anterior se procedió a identificar todas las posibles estructuras kársticas que tenían una expresión topográfica similar en el terreno, tomando consideraciones y aplicando un criterio geológico para su reconocimiento, desechando así todos los bancos de material así como otras formas topográficas negativas de origen antropogénico. A cada curva de nivel se le concedió la propiedad de un color, dependiendo de su propiedad altimétrica, así se les concedió colores fríos (azules) para aquellas curvas de baja altitud, colores verdes para los de media y para aquellas que tenían mayores o máximas altitudes se les concedió la propiedad de colores cálidos (rojos). Asignando las anteriores propiedades fue relativamente más fácil detectar aquellas estructuras negativas propias de las estructuras kársticas.

Para tener un control de las áreas ya interpretadas en la identificación e interpretación de estas estructuras kársticas, se generó una malla o red con cuadrículas de 3 km x 3 km, es decir de 9 km², resultando en un total de 5, 807 cuadrículas en todo el estado.

Para la realización de los mapas de densidades de estructuras kársticas, se tomaron varios criterios, siendo el principal de ellos tomar como universo de datos el total de las 7,396 estructuras kársticas detectadas en el estado. Para ello, cada celda fue representada con valores propios, como el número de estructuras kársticas detectadas en ella, así como el valor del área total ocupada por dichas estructuras en la celda correspondiente.

Así se realizó un mapa tomando en cuenta el número de estructuras kársticas en cada celda, es decir, de forma puntual, no importando su tamaño. Sin embargo, el mapa resultante (raster), tuvo una tendencia muy marcada sobre aquellas nubes de estructuras kársticas formadas por cenotes y dolinas, (principalmente en la porción norte del estado), mientras que en las áreas donde existen estructuras de dimensiones mayores o regionales (poljes), esta tendencia fue negativa, por lo que el mapa resultante no representaba las características reales de la distribución de las estructuras kársticas en el Estado.

Por otro lado, se realizó el mismo proceso, pero ahora tomando en cuenta solo el valor del área total ocupada por las estructuras kársticas en la celda correspondiente. En este caso, el *raster* resultante fue un mapa donde se podía observar que los valores más altos se daban en aquellas áreas donde existían estructuras kársticas mayores o regionales (poljes), mientras que las áreas donde existían estructuras kársticas de menores dimensiones como cenotes y dolinas se presentaban carentes de valores, por lo que el resultado no era representativo.

¹⁷ <https://es.wikipedia.org/wiki/Karst>

Así, tomando en cuenta los dos resultados anteriormente descritos, se procedió a limitar el universo de datos de estructuras kársticas a cada municipio, con lo cual los resultados fueron muy satisfactorios, principalmente tomando en cuenta el factor área, por lo que se decidió proceder realizando el proceso para cada uno de los diez municipios que conforman el Estado.

La mayor parte de los autores que han trabajado en el área, así como a los resultados obtenidos en el inventario de cenotes en el estado vecino de Yucatán (SGM, 2013), mencionan que existe una correlación de las estructuras kársticas con lineamientos o planos estructurales, por lo tanto se realizó la metodología en la misma forma, sin embargo, un inconveniente fue que al momento no se contaba con un mapa estructural con el suficiente detalle requerido, los mapas existentes resultaban de una escala regional y carentes de estructuras, por lo que se procedió a realizar una interpretación estructural detallada del Estado. Esta interpretación se realizó utilizando como base los mapas topográficos de escala 1: 50 000 del INEGI, la metodología llevada a cabo es similar a la utilizada en el Atlas de riesgo de Yucatán, donde el producto final son dos mapas: un mapa estructural, y un mapa del grado de fracturamiento. Sin embargo, siendo este factor estructural como uno de los principales factores a considerar en un riesgo o susceptibilidad por karsticidad, se decidió en el presente escrito desarrollar este apartado en el capítulo peligro por karsticidad, en donde se describe detalladamente la metodología para la realización de este producto, por lo que aquí se tomarán algunos aspectos relacionados con este tema solo de manera general y a forma de correlación.

Cabe mencionar que, en este trabajo, solo se manejan e interpretan estructuras kársticas externas o localizadas en superficie, es decir, exokársticas o epikársticas, mientras que las estructuras internas o endokársticas como cavernas, cámaras kársticas, galerías o cavernas kársticas, etc., por su complejidad y técnicas de estudio son tratadas y referidas solo y únicamente en forma bibliográfica, ya que requieren de estudios más especializados.

3.1.1.3 Desarrollo

El proceso para la realización del mapa de inventario de cenotes consistió en cuatro grandes pasos:

El primero fue la recopilación, revisión y análisis de la información bibliocartográfica existente en todo el estado. Esta información consistió en artículos científicos, notas de internet, libros y mapas. Cada una de estas fuentes bibliocartográficas fue revisada y analizada, obteniendo datos valiosos sobre estructuras kárstica y cuerpos de agua, entre estos datos se cuentan coordenadas, longitud, profundidad, entre otros.

Los principales mapas consultados fueron los topográficos de INEGI a escala 1: 50,000, en los cuales se identificaron y delimitaron los cuerpos de agua, los cuales se interpretaron como estructuras kársticas, aunado a lo anterior, con la interpretación de diversas imágenes de satélite (google: *landsat*, *GeoEye*, *Spot* y *global Image*), se identificó y digitalizó cada posible estructura kárstica identificada e interpretada en el territorio estatal. También en esta etapa se definieron los tipos y clases de estructuras kársticas. El resultado de esta etapa fue un mapa base preliminar de estructuras kársticas. Toda la información se manejó en un software de sistemas de información geográfica *ArcGis versión 10.2*. En esta etapa también se realizó la selección de aquellas estructuras kársticas a verificar en campo, la cual estuvo influenciada y en gran medida definida por el acceso a estas, la litología y el tipo de estructura. Así, aquellas estructuras kársticas que se encontraban sin acceso y por estar en un medio selvático no se visitaron, sin embargo, sus datos y formas topográficas se interpretaron de acuerdo a la correlación con los datos recopilados en campo.

El segundo paso consistió en continuar con las actividades de campo, las cuales se realizaron en todo el estado, con la finalidad primordial de confirmar los datos obtenidos, así como obtener otros datos de las estructuras kársticas como son: tipo

o clase, litología, planos estructurales, presencia de agua, profundidad, infraestructura cercana, entre otros. Esta actividad fue realizada en varios momentos de forma cíclica en toda la duración del proyecto.

Durante el reconocimiento en campo de las estructuras kársticas se llenaron fichas para cada una de las estructuras visitadas, tomando datos como: punto de control; fecha; localidad; coordenadas y altitud; así como datos descriptivos propios de la estructura como son tipo de roca; clasificación de la estructura kárstica; espeleotemas; fase de evolución; nivel freático; y dimensiones. Además de aspectos existentes alrededor de dicha estructura y que pudieran estar o ser afectadas por ella, estos aspectos contemplan infraestructura cercana, viviendas y construcciones. Cabe mencionar que esta ficha sufrió modificaciones a lo largo del proceso de este trabajo, esto fue originado por las discusiones que se tuvieron al finalizar cada periodo de actividades de campo con el fin de adecuar de la mejor manera los datos observados con la ficha de trabajo y la metodología.

La ficha de karstificación (Figura 23) se divide en tres grandes apartados: Ubicación, descripción y observaciones. A continuación, se explican los campos considerados en la descripción detallada de los parámetros y datos a tomar en consideración en el levantamiento de las fichas para el tema de karsticidad.

➤ Ubicación

- Punto de control. - Es una etiqueta única e irreplicable que identifica la ficha de cada estructura kárstica visitada. Se asigna con claves predefinidas, las primeras dos letras asignan el estado en el que se encuentra, en este caso Quintana Roo, la siguiente se refiere al municipio.
- Fecha. - Fecha en la cual se realizó el levantamiento de la ficha correspondiente, anotando día, mes y año.
- Estado. - Entidad Federativa de los 32 estados que componen el país. En este caso, por tratarse del atlas del Estado, siempre registra el Estado de Quintana Roo.
- Municipio. - Municipio de Quintana Roo, en el cual se encuentra localizada dicha estructura kárstica, pudiendo ser Tulum, Bacalar, Felipe C. Puerto, Othón P. Blanco, Solidaridad, José María Morelos, Isla Mujeres, Lázaro Cárdenas, Cozumel o Benito Juárez.
- Localidad. - Nombre del poblado, ranchería, comunidad, calle, edificio, cenote, o referencia con nombre, próximo a la estructura kárstica.
- Clave de la carta. - Clave del mapa topográfico 1: 50,000 del INEGI, en la que se encuentra localizada la estructura kárstica reportada.
- Coordenadas UTM. - Coordenadas obtenidas de un GPS, en el formato UTM, siendo X la longitud, mientras que, Y es la latitud, estas coordenadas se reportan con el Datum ITRF 92.
- Altitud. - Metros sobre el nivel del mar en la que se encuentra la estructura kárstica reportada.
- Investigador. - Nombre del técnico o personas que levantaron los datos de la ficha en cuestión.

➤ Descripción

- Litología/Edad. - Tipo de roca y edad de esta en millones de años. El dato de la edad es tomado de las cartas geológicas 1: 250,000 realizadas por el SGM.
- Geomorfología/Clasificación. - En cuanto a la clasificación geomorfológica de las estructuras kársticas tenemos las siguientes opciones, las cuales se describen como sigue:

- **Dolina.** - Es una depresión del terreno con forma circular. La palabra es de origen esloveno que significa valle o depresión y alude a un tipo especial de depresión geológica característico de los relieves kársticos. En este trabajo se define a la dolina como propia de las rocas calcáreas, sin que en su proceso intervengan niveles de suelo o material inconsolidado de edad Reciente. En caso de que la dolina se presente o afecte el nivel o estrato de suelo, este se maneja entonces como hundimiento, los cuales en la península de Yucatán ocurren principalmente donde están los asentamientos humanos (ver apartado de hundimientos).
- **Cenote.**- Un cenote (del maya *dzonoot*: 'hoyo con agua') es una dolina inundada de origen kárstico. En la antigüedad fueron reservas de agua para los mayas que también las utilizaban para la realización de actos rituales como ceremonias y sacrificios. El término cenote solo es utilizado localmente en la península de Yucatán, México.
- **Úvala.**- Las úvalas son geomorfológicamente hablando, formaciones motivadas por la evolución de la dolina. Bajo el nombre de úvalas se conocen aquellas depresiones de planta irregular, generalmente alargadas, originadas con frecuencia mediante la unión de dolinas individuales.

De esta última podemos decir que, algunos autores las designan como dolinas compuestas. De tal manera, la úvala representa un estado avanzado en el desarrollo de las dolinas, lo cual comienza con la captación de las aguas a través de un punto de absorción, continúa con la ampliación y desarrollo de las dolinas y prosigue mediante la unión de las mismas. Indudablemente que las depresiones kársticas representan el estado de desarrollo inmediato anterior a los poljes.


- **Polje.**- Un polje (etimología eslava de polje: campo) es una depresión en un macizo de roca kárstica de grandes dimensiones a modo de valle alargado y cerrado, de fondo plano, de gran tamaño y contornos irregulares.
- **Estructuras internas.** - Espeleotemas presentes y relacionados a la estructura kárstica, estos pueden ser principalmente estalactitas, estalagmitas, columnas, galerías kársticas y cavernas.
- **Presencia de.** - Se refiere a la presencia de agua, vegetación, basura, escombros, etc.
- **Fase de evolución.** - Este fue un punto que sufrió algunas modificaciones en el transcurso de la investigación, ya que contempla dos aspectos importantes, por un lado, toma el aspecto de una clasificación de cenotes/dolina y por otro lado su etapa evolutiva en tiempo e incluso conlleva en estos dos aspectos un grado de peligro, así se clasificaron cuatro tipos de cenotes, los cuales son: formación, pre colapso, colapso y relleno o sedimentación. Cada una de estas fases se describe más adelante de manera detallada en el apartado de resultados.
- **Infraestructura cercana.** - Referencia a construcciones o infraestructura antropogénica, como pueden ser parques, escuelas, edificios, viviendas, autopistas, etc. Y que pudiesen ser afectados por el fenómeno.
- **Dimensiones.** - Refiere al tamaño de la estructura kárstica, las dimensiones están dadas en unidades métricas, como son largo y ancho o diámetro, con su respectiva profundidad.
- **Nivel freático.** - Profundidad a la cual se encuentra el nivel freático o espejo de agua, sus unidades son métricas.
- **Tipo de agua.** - En este caso refiere a si el cuerpo de agua presente es agua salada, dulce o salobre.

- **Evidencia en superficie.** - Evidencias superficiales en el área de influencia de la estructura kárstica, estas pueden ser hundimientos próximos con o sin encharcamientos, fracturamiento sobre el terreno, escalones, fracturas sobre infraestructura, etc.
- **Uso.** - Referido al uso o utilidad que se le da al cuerpo de agua o la estructura kárstica presente, los usos pueden ser múltiples, ya que pueden fungir como fuentes de agua potable, uso agrícola, recreativos, doméstico, depósitos de basura, etc.
- **Observaciones.** - En este apartado se consideran todos aquellos temas que no son considerados en el resto de los apartados, así como algunas observaciones específicas o detalles de interés observados por el técnico.

El tercer paso en el desarrollo de este tema fue la captura; procesos; interpretación y análisis de la recolección de datos de campo; así como correlación con los datos recolectados bibliográficamente. El resultado final de esto fue la elaboración de una clasificación de las estructuras kársticas, además de la definición de sus fases evolutivas, entre otros resultados. Esta etapa, junto con las dos anteriores (recopilación bibliocartográfica y actividades de campo) fueron cíclicas en el transcurso de la duración del proyecto, ya que fueron varios ciclos en los que se tuvieron que discutir resultados y análisis, así como adecuar en el proceso una metodología propia para la detección de las estructuras kársticas presentes, dependiendo claro está, de los medios, insumos e información que se tuvieran para dichas áreas.

Reconsiderando los dos pasos anteriores y teniendo el conocimiento de lo que es e implica el fenómeno de la karsticidad y las estructuras relacionadas a ella, se analizó que realizar un mapa o un inventario de cenotes (en sentido estricto) sería tomar un aspecto parcial de lo que son los procesos kársticos en el estado, por lo que se decidió tomar e identificar todas las estructuras exokársticas presentes, tanto si estas son poljes, úvalas, dolinas o cenotes, ya que no importando que tipo de estructura se trate, conlleva un riesgo o susceptibilidad de colapso o hundimiento.

Los resultados de los diversos ciclos que se dieron en las anteriores etapas se concretaron en una cuarta y última etapa, la cual resultó en unos mapas temáticos finales, y un informe final, en el que se plasmaron los pasos en el desarrollo, resultados, conclusiones y recomendaciones.



KARSTIFICACIÓN Principal	
UBICACIÓN	
PUNTO DE CONTROL:	QR-KA-09-038
FECHA:	Septiembre 9, 2014
ESTADO:	Quintana Roo
MUNICIPIO:	Bacalar
LOCALIDAD:	Bacalar
CLAVE DE LA CARTA:	E16A65
COORDENADAS UTM:	X: 351806.83 E Y: 2063473.39 N
ALTITUD (msnm):	30
INVESTIGADOR:	Alberto Campillo / Diana Gómez
DESCRIPCIÓN	
LITOLOGÍA / EDAD:	Caliza / Mioceno
GEOMORFOLOGÍA/CLASIFICACIÓN:	Dolina/Cenote
ESTRUCTURAS INTERNAS:	Ausentes
PRESENCIA DE:	Agua
FASE DE EVOLUCIÓN:	Relieno
INFRAESTRUCTURA CERCANA:	Carretera, poste de luz, casa
DIMENSIONES (m):	LARGO: 0 ANCHO: 0 DIÁMETRO: 387 PROF.: 45
NIVEL FREÁTICO (m):	0
TIPO DE AGUA:	Dulce
EVIDENCIA EN SUP.	Topografía baja
USO:	Recreativo
OBSERVACIONES	
Colinda con casas y restaurantes al lado oeste	






Figura 23. Ficha utilizada para el levantamiento de estructuras kársticas.

3.1.1.4 Resultados

Uno de los aspectos que surgieron a partir de las observaciones de campo y del análisis de la información recopilada, siendo un factor que es primordial para entender parte de los procesos kársticos, fue la clasificación y evolución de los cenotes, el cual se integró en un solo punto, y fue denominado fase de evolución. Aunque bibliográficamente ya existen clasificaciones, estas clasificaciones informales se basan principalmente sobre la forma, tipo de material, ángulo de inclinación

de paredes y grado de apertura que comunica al exterior. Como ejemplo de ello, es la clasificación de cenotes tomando en cuenta su grado de apertura: cielo abierto, semiabierto, de caverna o antiguo cenote. Mientras que tomando en cuenta su forma y grado de inclinación de paredes se clasifican como: Cueva anquihalina, tipo cántaro lótico, de paredes verticales, tipo lentico, de azolve y hundimiento de paredes y cenote tipo aguada. Estas clasificaciones son de criterios muy relativos y ambiguos para nuestro objetivo por lo que creamos una nueva clasificación. La clasificación aquí mostrada se basa tomando en cuenta la evolución del cenote, así como su grado de peligro y colapso. Es por nuestras observaciones netamente de campo y solo observando estructuras exokársticas, se clasificaron cuatro etapas o fases de evolución en los cenotes:

Primera fase: Formación o Desarrollo. Esta fase corresponde a la etapa "infantil" de un cenote o dolina, etapa en la cual se conjugan todos los factores para su formación, como son tipo de roca, planos de fracturamiento, fallamiento o estratificación, humedad o presencia de agua, profundidad del nivel freático, entre otros. Las características distintivas en esta etapa son la presencia en superficie de dolinas no mayores a 10 m de diámetro, así como la presencia de abundantes huecos o tubos kársticos de dimensiones menores, así como pequeñas cámaras kársticas. No hay intercomunicación entre estas estructuras, o bien, puede estar muy restringida. Pueden o no presentar agua o llegar al nivel freático de la zona (Figura 24 y Figura 25). Comúnmente, cuando se les encuentra con presencia de agua o con alcance al nivel freático se les toma y rehabilita como pozos de agua. Las estructuras en superficie en esta fase evolutiva suelen acumular un sedimento de color rojizo formado por arcillas y limos, así como por un buen porcentaje de materia orgánica, frecuentemente este sedimento es explotado como suelo o tierra por los lugareños cercanos a dicha estructura. Generalmente no presentan un mayor riesgo.

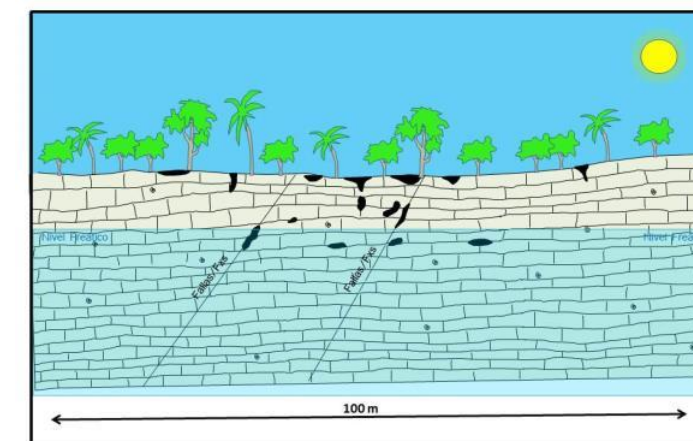


Figura 24. Fase de formación de un cenote.

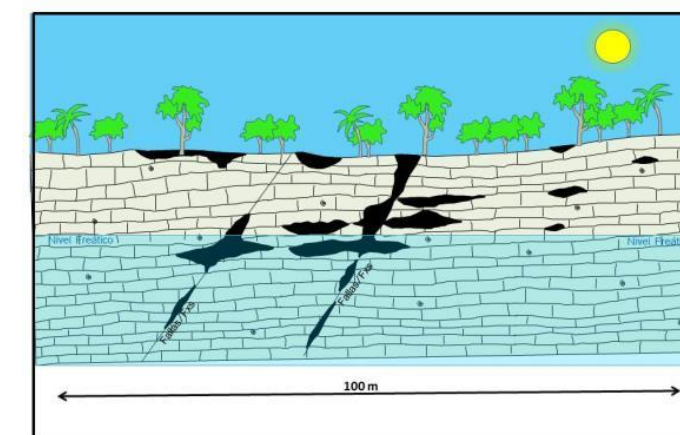


Figura 25. Fase de Formación en un cenote con un grado mayor de disolución.



Fotografía 1. Estructuras kársticas en formación en un terreno próximo a ser habilitado. Playa del Carmen, Quintana Roo.

Ejemplo de esta fase puede apreciarse en la Fotografía 1 en la que puede observarse un hueco kárstico con profundidad de 1.5 m., mientras que al fondo puede observarse una pequeña depresión kárstica (nótese lo irregular del terreno).

Segunda fase: Pre Colapso. En esta etapa más evolucionada, las estructuras kársticas presentan mayores dimensiones, e incluso presentan intercomunicación entre ellas. Una de sus características principales es la presencia de una cámara kárstica que puede alcanzar varias decenas de metros. En esta fase aparecen estructuras kársticas secundarias o espeleotemas como son columnas, estalactitas, estalagmitas, entre otras. Por su naturaleza no tienen un marcado reflejo topográfico en superficie. Puede estar o no conectada al exterior por la presencia de huecos kársticos. Esta fase evolutiva presenta una de las etapas más peligrosas para la construcción o actividades humanas. Generalmente se encuentran intercomunicadas con otras estructuras kársticas por medio de túneles, cavernas o galerías que pueden tener cientos de metros de longitud, y en algunos casos, hasta pueden ser kilométricas. No tienen accesos naturales, es decir para acceder a ellas se tienen que contemplar la construcción de escaleras o instalación de cuerdas. Otro rasgo muy distintivo de este tipo de cenote es la presencia de agua. Esta fase junto con la fase de Colapso resulta en las estructuras o cenotes más atractivos para el turismo (Figura 26 y Figura 27).

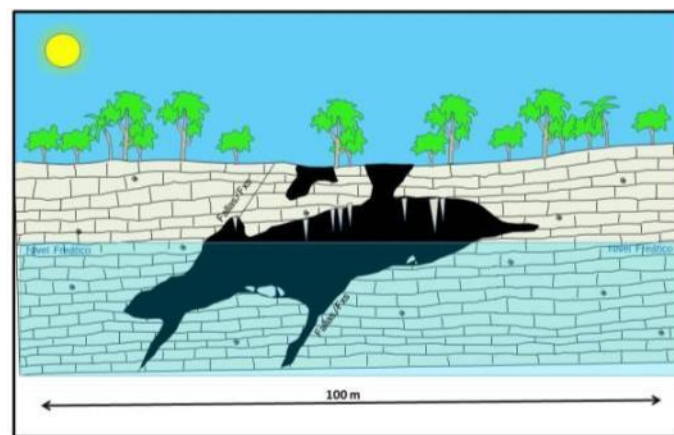


Figura 26. Cenote en fase Pre Colapso con una vía de comunicación al exterior.

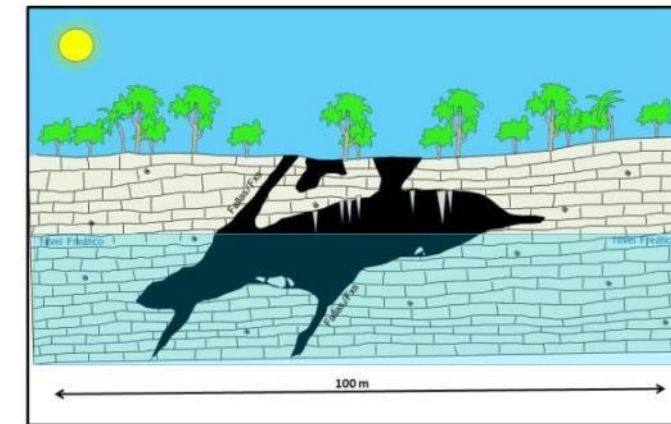


Figura 27. Cenote en fase Pre Colapso con una o más estructuras que comunican al exterior.



Fotografía 2. Interior en cámara kárstica de un cenote en fase pre colapso. Cenote El Zapote, Playa del Carmen, Quintana Roo.

Ejemplo de esta fase se observa en la Fotografía 2, en el cual pueden verse espeleotemas como estalactitas. El acceso a este cenote se realiza por medio de escaleras, las cuales pueden verse reflejadas en el espejo de agua.

Tercera fase: Colapso. Como su nombre lo indica son estructuras kársticas en los cuales su techo o cámara kárstica ya ha sido colapsada, total o parcialmente. Su colapso puede darse de tres formas, puede ser un colapso de la porción central, un colapso lateral o bien un colapso total. Una de sus principales características es la presencia obligada de cavernas o grutas en sus límites, así como por paredes verticales. Pueden observarse bloques colapsados en la mayor parte de su circunferencia. Incluso en esta fase se pueden presentar varias etapas de colapso, dependiendo de su tipo. En las proximidades inmediatas de estas estructuras puede observarse el terreno irregular o escalones, así como presencia regular a abundante de huecos o espacios vacíos, debido a la afectación de fracturas sobre los bloques colapsados. Esta etapa o fase es también una de las más peligrosas para la construcción e infraestructura, ya que por colapso o reacomodo de los bloques colapsados, puede haber hundimientos; agrietamientos; y no se descarta la continuidad en los colapsos. Esta fase, aunada a la anterior, representan las estructuras kársticas con mayor peligro para las actividades de construcción. Estas estructuras siempre presentan cuerpos de agua (Figura 28, Figura 29 y Figura 30).

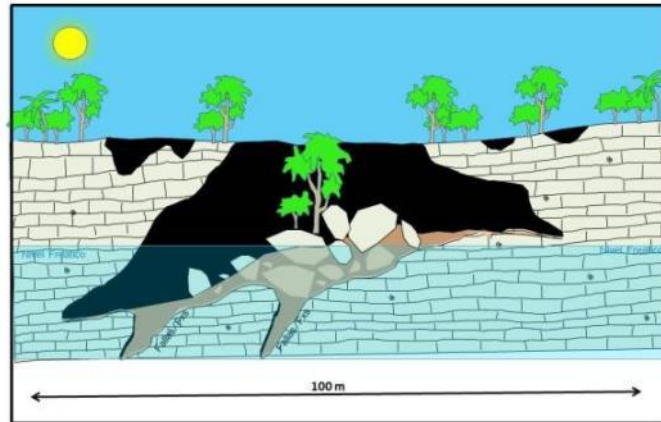


Figura 28. Cenote con colapso central.

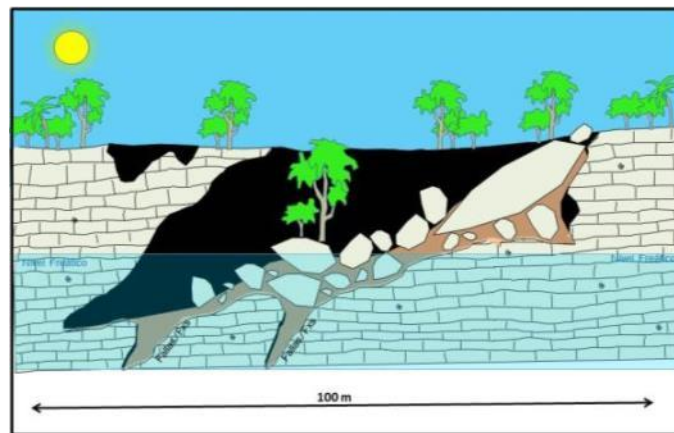


Figura 29. Cenote con colapso lateral.

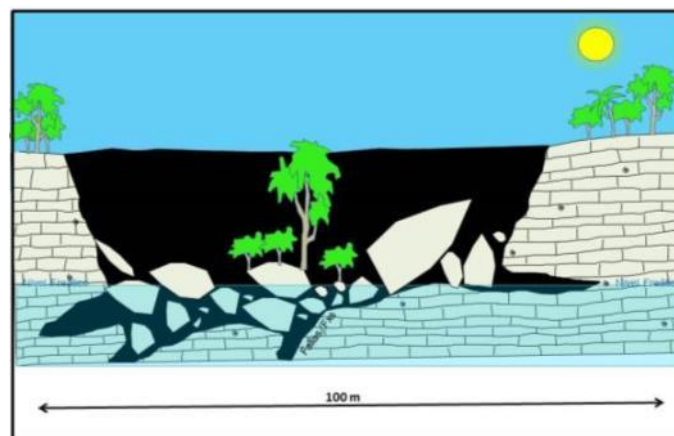


Figura 30. Cenote con colapso total.



Fotografía 3. Cenote en fase de colapso, con tipo de colapso lateral.

En la Fotografía 3, se muestra la porción de un cenote de colapso, en el cual puede observarse que el colapso es de tipo lateral, por lo que los bloques colapsados permiten la entrada a la estructura kárstica. Al fondo puede notarse una caverna de considerables dimensiones, por lo que se esperarían futuros colapsos.



Fotografía 4. Cenote en fase de Colapso.

Otro ejemplo de estructura de colapso es la Fotografía 4, que muestra en primer plano un bloque de colapso, en segundo plano puede observarse una caverna del cenote. Esta caverna comunica a otro cenote que se encuentra aproximadamente a 250 metros. Los bloques de colapso pueden tener diferentes dimensiones, los hay mayores a 10 metros de longitud. En este caso el bloque fotografiado tenía aproximadamente 6 m de longitud, y es geológicamente muy reciente. Localidad: Vivero, Cancún, México.

Cuarta fase: Relleno o Sedimentación. Esta fase es la etapa de "senectud" en el ciclo de vida de un cenote, sus límites o paredes ya se encuentran prácticamente estables, con ángulos de pendientes suaves y menores de 50° (se puede tener acceso al cenote caminando), pueden observarse algunas raras cavernas que son prácticamente rellenas o aterradas por sedimentos de limos, arcillas y materia orgánica, y pueden o no presentar agua. Aunque no parecen presentar peligro alguno, se presentan hundimientos de terrenos principalmente en sus límites. A estas estructuras localmente se les conoce como aguadas (Figura 31 y Figura 32).

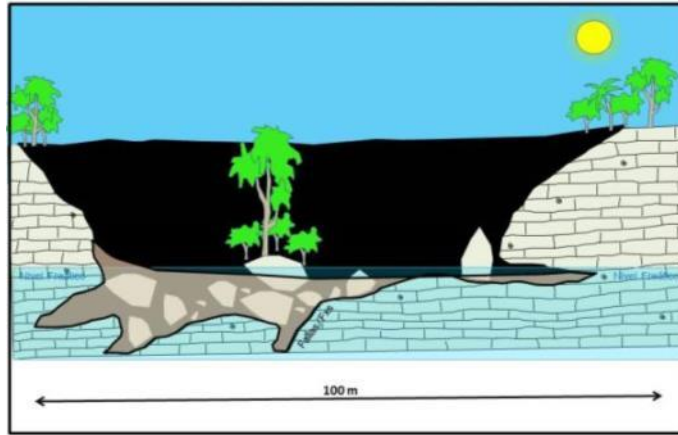


Figura 31. Cenote en sus primeras fases de sedimentación.

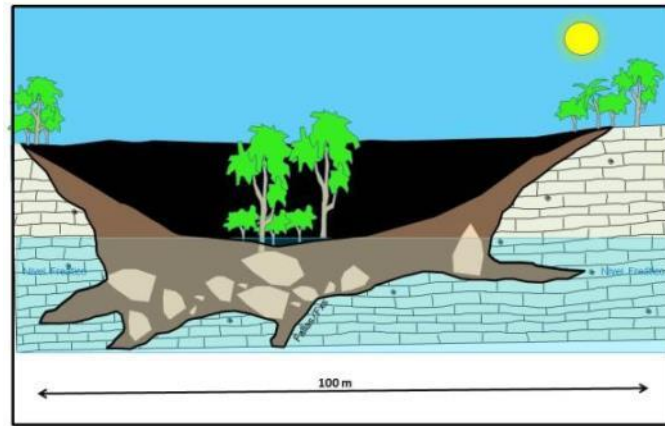


Figura 32. Cenote en fase de sedimentación o relleno.



Fotografía 5. Cenote en fase de sedimentación.

En la Fotografía 5, se observa una panorámica de un cenote en fase de sedimentación, en donde pueden observarse que sus límites o paredes son de pendientes suaves. Al llegar a esta fase se desarrolla una vegetación propia de acuerdo con las condiciones de humedad presentes en la estructura kárstica, tal cual puede observarse en la Fotografía 6.



Fotografía 6. Cenote en fase de sedimentación con zona pantanosa en su porción central.

De acuerdo a la escala trabajada también se realizó una clasificación de las estructuras kársticas de acuerdo a su tamaño o superficie, así se clasificaron en cuatro tipos:

- ◆ Menores: Todas aquellas estructuras entre 0 a 100 m de diámetro.
- ◆ Medianas: Aquellas estructuras que se encuentran entre 100 a 250 m de diámetro.
- ◆ Mayores: Aquellas que se encuentran entre 250 m a 1 km de diámetro.
- ◆ Regionales: Todas aquellas estructuras mayores a 1 km de diámetro.

De acuerdo con las observaciones realizadas en campo, la mayor parte de los cenotes y dolinas presentes se encuentran en la clasificación de estructuras kársticas menores y medianas, y presentan formas que van desde circulares a formas alargadas e irregulares. Las estructuras kársticas mayores corresponden principalmente a úvalas, mientras que las estructuras kársticas regionales se corresponden a poljés o tectono-karst.

Aunque para la realización de un mapa de inventario de estructuras kársticas no fue necesario la intervención de un mapa de lineamientos estructurales, aquí se mencionan solo resultados existentes entre la distribución y densidad de estructuras kársticas y su relación con los lineamientos estructurales del estado. Así, observando el mapa de inventario de estructuras kársticas y el mapa de lineamientos estructural (conformado principalmente por fallas y fracturas) es notable la distribución y densidad de las estructuras kársticas en todo el estado, pero aún es más notable la correlación que estas guardan con los niveles estructurales o bien con el grado de fracturamiento presente. Aunque algunos autores ya habían mencionado esta relación, es en este trabajo donde puede plasmarse y observarse muy claramente, esto es debido a la abundancia de estructuras kársticas inventariadas y a la presencia de sistemas estructurales bien marcados y delimitados.

Esta relación se refleja notablemente en tendencias en forma de franjas o corredores de orientación burdamente N-S y también como nubes de densidades. Lo primero puede observarse muy claramente en la porción norte, centro del estado y lo segundo se observa principalmente al centro del estado. También puede observarse que todo el estado puede separarse en zonas o regiones por tipo de estructura kárstica que coinciden precisamente con las zonas o regiones estructurales delimitadas, Incluso esta misma relación puede corroborarse en las estructuras kársticas subterráneas, tal es el caso de los sistemas de cavernas kársticas en las proximidades del poblado de Tulum, donde estos sistemas kársticos guardan una

estrecha relación con el sistema de fracturamiento NW-SE del área. De acuerdo a lo anteriormente mencionado y relacionando en todo momento la distribución de las estructuras kársticas con el nivel estructural, se definieron 5 zonas kársticas. La conducta típica en la relación de las estructuras kársticas y el nivel estructural es positiva en la mayoría de las 5 regiones estructurales, la excepción o la conducta atípica sería la región estructural 1.

El caso más notable de esta relación positiva es la región estructural 4 llamada informalmente como Chetumal, precisamente localizada en las inmediaciones de la ciudad del mismo nombre, en donde las estructuras kársticas corresponden en su mayor parte a tectono-karst o poljes con longitudes kilométricas, estas estructuras son claramente bien definidas por algunos de los cuerpos de agua que albergan dichas estructuras. Una de las características más notables en estas estructuras es la forma que presentan en planta, son de una forma alargada con notables ondulaciones, lo que les da un aspecto de plegamiento. Mismas estructuras pueden observarse en la mayor parte de la región estructural 5 Planicie Norte, especialmente en la porción septentrional, decreciendo en intensidad hacia el sur, precisamente donde termina o es intersectado por un sistema de orientación NW-SE.

En la región estructural 2, denominada informalmente como Planicie Central, puede observarse en la porción central una red de sistemas de fracturamiento (red de fracturamiento San Pedro y red de fracturamiento Felipe Carrillo Puerto), estos sistemas de fracturamiento son responsables de la formación de abundantes estructuras kársticas, las cuales forman una nube de alta densidad. Aquí las estructuras kársticas son una serie de dolinas y cenotes con tamaños entre 50 y 150 metros de diámetro.

La región estructural 3, también llamada informalmente como Planicie Costera, es la que presenta mayor variabilidad, ya que en la porción centro-sur presenta una zona en formación de tectono-karst o poljes, mientras que la porción norte se encuentra compuesta por una serie de estructuras kársticas menores (de 10 a 150 m de diámetro), estas últimas estructuras conforman una nube densa con un trend de orientación NE-SE, aun cuando en esta área no se interpretó estructura regional alguna, por la presencia de estas dolinas y cenotes bien pueden inferirse planos de estructuras con una orientación NE-SW, siendo este el caso del lineamiento Vallarta. También es notable el hecho de que esta región presenta estructuras kársticas de dimensiones medianas (entre 75 a 500 m de diámetro), estando generalmente espaciadas entre sí. Un rasgo muy notable en esta región estructural, es que el límite oeste, marca la estructura regional llamada falla Tulum-Rio Hondo, en la cual se presenta toda una serie de estructuras kársticas en su traza a lo largo de toda su extensión, se infiere que en toda esta traza se encuentre en desarrollo un tectono-karst.

Como se mencionó anteriormente, la región estructural 1 denominada Tierras Altas del Sur se comporta atípicamente al resto de las regiones estructurales en lo referente a la distribución de estructuras kársticas, y esto ocurre al comparar el grado de fracturamiento con el mapa de inventario de estructuras kársticas, donde se observa que dichas estructuras no se ubican precisamente en las zonas de mayor grado de fracturamiento como sucede con el resto de las regiones estructurales. También es notable el hecho de que estas áreas de mayor grado de fracturamiento coinciden precisamente con las zonas de mayor elevación en el estado. En esta región las estructuras kársticas mayores se ubican en los límites de dichas zonas de alto grado de fracturamiento, mientras que la mayor parte de las estructuras kársticas menores, consideradas como cenotes y dolinas se ubican principalmente en las zonas de bajo grado de fracturamiento, coincidentemente con las áreas topográficamente bajas. Sin embargo, en la traza de los planos estructurales se puede observar que buena parte de las estructuras kársticas se hallan ubicadas en ellas, por lo anteriormente mencionado se infiere que existen estructuras kársticas que se encuentran definiendo, o alineadas a estructuras como fallas y fracturas, y precisamente son estas estructuras kársticas las que se encuentran evidenciando planos estructurales que no han sido definidos ni interpretados, en otras palabras existen

fallas o sistemas de fracturas en las partes bajas que por su naturaleza de poca expresión topográfica no habían sido definidas, sin embargo la densidad de estructuras kársticas (cenotes y dolinas) presentes están evidenciando que existen estructuras que posiblemente se encuentren cubiertas por los depósitos recientes existentes en los valles. Si observamos con mayor detenimiento toda la región estructural 1 Tierras Altas del Sur, podremos encontrar un patrón estructural que resulta en una serie de bloques y valles en el área, siendo estos valles de orientación NE-SW y NW-SE. Así que podemos decir que si bien las estructuras kársticas encontradas e identificadas en la porción sur del estado no guardan relación con las áreas de alto grado de fracturamiento, sí conservan el mismo comportamiento de relación ubicándose en la traza de planos estructurales, sin embargo estos planos por la naturaleza de ser cubiertos por depósitos recientes no tienen una expresión topográfica, lo que resulta en una pobreza en cuanto a su densidad, provocando un bajo índice en el grado de fracturamiento que retoma cada uno de los aspectos estructurales como son longitud, intersección y frecuencia de fracturamiento. Un factor que podría agregar una variable, es que toda la región estructural de Tierras Altas del Sur está compuesta por la secuencia sedimentaria de la Formación Icaiché de edad Paleoceno y formada por caliza y yeso, teniendo este último material un mayor índice de solubilidad ante el agua.

Como puede observarse en el mapa correspondiente existe una gran nube de estructuras kársticas en la porción norte del estado, esto es debido a que la interpretación de curvas de nivel utilizando una topografía a detalle, es por mucho más efectiva que aquella realizada con topografía con curvas de nivel a cada 10 m. En esta porción norte del estado, se encuentran las principales ciudades del estado, y también las que presentan un mayor índice de crecimiento demográfico y turístico, dada estas condiciones, el nivel de detalle se considera necesario.

Como puede observarse en el mapa geológico, la mayor parte de las estructuras kársticas se encuentran desarrolladas en la unidad conocida como Formación Felipe Carrillo Puerto, la cual consiste de una serie de calizas – coquinas de edad Mioceno – Plioceno. Así también, puede apreciarse que las estructuras kársticas de mayores dimensiones como poljes y úvalas ocurren también en esta unidad formacional. La segunda unidad con mayor ocurrencia de estructuras kársticas es la formación Icaiché de edad Paleoceno y compuesta por una intercalación de caliza y yeso.

De acuerdo con todos los datos recabados en el presente estudio, se detectaron aproximadamente 7,396 estructuras kársticas entre las que se cuentan dolinas, cenotes, úvalas y poljes. De esta densidad de estructuras, se visitaron 470, cada una de las cuales cuenta con un registro de ficha kárstica. Las estructuras visitadas representan aproximadamente el 6.35% del total.

De acuerdo con las actividades de campo, se revisaron aproximadamente un porcentaje del 6.35% de estas estructuras interpretadas, obteniéndose un resultado bastante satisfactorio, sin embargo, un detalle de ésta y todas las otras metodologías es que no son capaces de detectar cenotes en su etapa de pre colapso, esto es entendible, ya que estas estructuras presentan una limitada o nula comunicación entre la cámara kárstica y el exterior. En el mejor de los casos, estos huecos kársticos son de diversos tamaños variando entre 0.5 m hasta 6 metros de diámetro. La mayor parte de este tipo de estructuras reportadas aquí se debe a la asociación que presentan con otras estructuras kársticas, así también se debe a la información reportada por los habitantes de las comunidades.

3.1.1.5 Conclusiones

De acuerdo a las características morfoclimáticas en México, la península de Yucatán y por lo tanto el estado de Quintana Roo se encuentra formando parte del karst de plataforma. Mientras que por sus características geotécnicas, y basándose sobre la intensidad con que el terreno ha sido atacado por procesos kársticos, se le clasifica como un karst complejo (R. E.-P. ,

Riesgos Kársticos: El Origen de Cavernas y Cenotes, 12 al 15 de Mayo 2015).

La distribución de estructuras kársticas, ya sean poljes, úvalas, dolinas y cenotes se encuentran en estrecha relación a las zonas estructurales de la región, principalmente a aquellos sistemas de fallas o lineamientos de carácter regional, así como aquellas zonas o sistemas de fracturamiento. Una de las principales estructuras o lineamiento que da origen y tiene una fuerte y marcada influencia sobre las estructuras kársticas es la falla o lineamiento denominado Tulum – Rio Hondo de orientación NNE-SSW, en el cual se infiere que se encuentran actuando procesos kársticos que resultarán en áreas de tectono-karst o poljes.

Se identificaron y clasificaron 4 fases evolutivas en las estructuras kársticas menores (dolinas y cenotes): fase de Formación, fase Pre Colapso, fase Colapso y fase de Relleno o Sedimentación. Cada una de estas fases lleva implícito un peligro. Siendo las fases de evolución de Pre Colapso y Colapso las que mayormente pudieran afectar la infraestructura y actividad humana.

La identificación y localización de estructuras kársticas, usando curvas de nivel igual a un metro o menor, resulta en un fructífero mapa de inventario de estructuras kársticas, principalmente en aquellas áreas que son relativamente planas, además de que con el MDT se elimina la problemática de tener una cubierta de vegetación muy densa, ya que esto dificulta la interpretación adecuada en imágenes de satélite o fotografías aéreas. Esta metodología puede utilizarse en combinación con una adecuada interpretación de imágenes de satélite en estudios a niveles municipales o más detallados.

Al realizar el mapa de inventario de cenotes del estado, utilizando las diversas herramientas como son imágenes de satélite y mapas topográficos detallados, pueden identificarse relativamente fácil las estructuras kársticas que se encuentran marcando una forma topográfica negativa en el terreno, principalmente las estructuras que se encuentran en la fase evolutiva de colapso y sedimentación, así como algunas que se encuentran en su etapa de formación. Esto se explica en que son formas que producen un marcado detalle en el terreno, sin embargo, algunas de las estructuras kársticas que se encuentran en las primeras etapas evolutivas tanto de pre colapso como formación, no son tan fáciles de detectar, por lo que se requiere de una interpretación aún más detallada. Lo anterior tendría un posible resultado positivo en la detección de una cantidad mayor de estructuras de pre colapso, las cuales son una de las fases más peligrosas e inestables en el terreno, esto podría aplicarse muy bien en los trabajos detallados tales como municipales o nivel ciudad.

De acuerdo con el mapa de estructuras kársticas, se identificaron 7,396 estructuras kársticas, de las cuales 5,746 corresponden a estructuras kársticas menores a 100 m de diámetro, es decir a cenotes y dolinas, ocupando un área total de aproximadamente 12.489 km², que representa el 77.69 % de las estructuras detectadas.

Las estructuras kársticas medianas, que son aquellas que se encuentran con un diámetro entre 100 m a 250 m, fueron aproximadamente 969, interpretadas como cenotes grandes y úvalas, ocupando un área total de 17.46 km², y representando un porcentaje del 13.10 % de las estructuras totales reportadas.

La contabilidad de estructuras mayores, que comprenden aquellas estructuras kársticas entre 250 m a 1,000 m de diámetro son 500, representando un porcentaje de 6.76 % del total, sin embargo, el área que ocupan dichas estructuras es de 117.332 km², estas estructuras se interpretan como úvalas.

Las 181 estructuras kársticas regionales, que son aquellas estructuras kársticas mayores a 1,000 m de diámetro solo obtuvieron un 2.45% del total de las estructuras kársticas inventariadas, pero son las que ocupan una mayor área con 948.877 km², estas estructuras son en su mayor parte poljes o tectono-karst.

El área total cubierta por la totalidad de las estructuras kársticas es de aproximadamente 1096.158 km², lo que representa en porcentajes un 1.25% para las estructuras menores, 1.75 % para las estructuras medianas, 12.01 % para las estructuras mayores y 84.96 % para las estructuras kársticas regionales.

3.1.1.6 Medidas de prevención y mitigación

La karsticidad en el estado de Quintana Roo ha permanecido activa por millones de años, por lo cual se interpreta e infiere que seguirá evolucionando mientras las condiciones que permitan su desarrollo se mantengan por otros tantos millones de años más. Los procesos que intervienen en un karst tan peculiar como el de la Península de Yucatán son muy variados y propios. Estos procesos o factores que intervienen no se han considerado en los pocos estudios de karsticidad en la península.

Las relaciones existentes entre el drenaje subterráneo con los sistemas de cavernas, cenotes en superficie, vegetación, nivel freático, así como la interrelación existente entre las aguas continentales y marinas, propiedades geoquímicas del agua y otros factores no deben alterarse. Por lo anterior es necesario un mayor conocimiento en las interrelaciones que guardan cada uno de los factores que interactúan en este gran sistema kárstico.

En este trabajo se tomaron en cuenta la presencia de planos de debilidad geológico-estructurales y tipo de roca, estos factores determinan la densidad o presencia de estructuras kársticas, sin embargo, habría que estudiar otros factores que requieren de una investigación más detallada y con carácter científico, como por ejemplo lo relacionado con el sistema hidrológico en el estado para complementar este estudio.

Aunque desconocemos a detalle las relaciones existentes entre los factores que determinan el paisaje kárstico de la península, se deben tomar las medidas preventivas respecto a los factores que diversos autores consideran relevantes en un karst. Estas medidas son:

- Mantener un nivel freático dentro de lo normal, es decir el nivel freático del acuífero no debe ser explotado más allá de sus límites que ocasionen un descenso de sus cotas normales, de no llevarse a cabo, esto podría resultar en el colapso de algunas estructuras kársticas, tanto epikársticas como endokársticas, estas últimas las cuales aún desconocemos como se encuentran distribuidas en el subsuelo.
- Mantener los niveles geoquímicos normales del agua subterránea, es decir evitar cualquier contaminación de los acuíferos. Los acuíferos kársticos como el propio de la península de Yucatán son muy especiales, ya que tienen una red de distribución subterránea, con velocidades, geoquímica y temperaturas propias, afectar o alterar cualquiera de estos parámetros podría resultar en cambios o afectaciones importantes.

En este sentido, una recomendación es que se debe realizar o fomentar estudios que abarquen todos los factores posibles que se involucre en las relaciones de los procesos kársticos que actúan en la península, con el objetivo de predecir sus consecuencias en la alteración o cambios que ocurran en estas, tal como puede suceder con un posible aumento del nivel del mar causado por el calentamiento global, el cual traería consecuencias y cambios ignorados en los procesos kársticos.

3.1.1.7 Referencias bibliográficas

(SEDESOL), S. d. (2004). *Guía Metodológica para la Elaboración de Atlas de Peligros Naturales a Nivel Ciudad (Identificación y Zonificación)*. Pachuca, Hidalgo, México.

(SEDESOL), S. d. (2004). *Guía para la Identificación Rápida de Peligros Naturales (en zonas urbanas)*. Pachuca, Hidalgo, México.

- (SGM), S.-G.-M. (2013). *Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales del Estado de Yucatán*. México: Gobierno del Estado de Yucatán 2012-2018.
- A., P.-B. (2001). Investigación y Exploración de Acuíferos Kársticos. *Boletín Geológico y Minero*, 112(Especial), 65-76.
- Aguayo C. J. E., B. R. (1980). Estudio Sedimentológico en el Area Tulúm-Cancún-Isla Mujeres, Estado de Quintana Roo, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, XLI(1 y 2), 15-32.
- Aguilar-Duarte Y., B. F. (2013). Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación de Acuíferos Kársticos. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*(16), 243-263.
- Aguilera-Martínez M. A., C.-L. V. (2006). Carta Geológico-Minera Cancún F16-8, Escala 1: 250 000. Yucatán y Quintana Roo, México: Servicio Geológico Mexicano.
- Aparicio, J. (2011). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Mexico: Limusa.
- Bauer-Gottwein P., G. B.-V.-A. (July de 2011). Review: The Yucatán Peninsula Karst Aquifer, México. *Hydrogeology Journal*, 1-18.
- Bautista F., P.-A. G. (2011). Spatial Distribution and Development of Soils in Tropical Karst Areas from The Peninsula of Yucatán. *Geomorphology*(135), 308-321.
- C., R.-S. (s.f.). El Inframundo Maya y los Sistemas Kársticos. *Ciencia y Cultura: Arqueología Subacuática*, 38-41.
- CENAPRED. (2001). *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México* (Primera Edición ed.). (O. Z. Martínez, Ed.) Distrito Federal, México.
- CENAPRED. (2004). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos*. Distrito Federal, México.
- CENAPRED, . (2013). Guía del contenido mínimo para la elaboración del atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. México, D.F.
- CN. (20 de Junio de 2013). Derriban condominio "Sol Maya". Playa del Carmen, Quintana Roo, México.
- CONACYT, C. (2007). *Atlas de Riesgo Oceanográfico*. Chetumal.
- Cozumel, G. M. (2011). *Atlas de Riesgos del Municipio de Cozumel*. Cozumel.
- Del Campo Noticias. (05 de Mayo de 2015). Hundimientos representan la mayor problemática para Chetumal. Chetumal, Quintana Roo, México.
- Desastres), C. (. (2001). *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México* (Primera Edición ed.). (O. Z. Martínez, Ed.) Distrito Federal, México.
- Desastres), C. (. (2004). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos*. Distrito Federal, México.
- E., C. C. (27 de Agosto de 2007). Contaminación de Mantos Freáticos en Cancún. *La Jornada Ecológica*. (L. Angulo, Ed.) México. Obtenido de www.jornada.unam.mx/2007/08/27/eco-c.html: www.jornada.unam.mx/2007/08/27/eco-c.html
- E., L. R. (1973). *Estudio Geológico de la Península de Yucatán*.
- E., W. K. (1995). Geologic Atlas of Fillmore County, Minnesota: Sinkholes and Sinkhole probability. *County Atlas Series Atlas C-8 Part B*. (T. M. Fund, Ed.) State Minnesota, E.U.A.
- Escolero-Fuentes O. A., M.-S. L.-V.-R. (2005). *Programa de Monitoreo de Aguas Subterráneas de la Caleta Xel-Ha y sus alrededores*. Informe Técnico para Grupo Xcaret, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Eslava H., Jiménez M., Salas M. A., García F. (2006). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligro y riesgo, Fenómenos Hidrometeorológicos*. Mexico: Secretaria de Gobernación.
- Espinasa-Pereña R., y. N.-T. (2013). *Mapa de Susceptibilidad a Fenómenos Kársticos*. Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- F., D.-D. O.-A. (2003). Karst Tropical de Colinas, Tipología y Evolución en el Plio-Cuaternario en República Dominicana. *XI Reunión Nacional de Cuaternario*, (págs. 123-128). Oviedo (Asturias).
- F., P. J. (1984). *Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to ground-Water Withdrawal*. UNESCO.
- F., W. W. (November-December de 1992). Hidrogeologic Factors Affecting New Sinkhole Development in the Orlando Area, Florida. *Groundwater*, 30(6), 918-930.
- Festa V., F. A. (August de 2012). Sinkhole Evolution in The Apulian Karst of Southern Italy: A Case Study, with some Considerations on Sinkhole Hazards. *Journal of Cave and Karst Studies*, 74(2), 137-147.
- Fragoso-Servón P., B. F. (2014). Caracterización de las Depresiones Kársticas (Forma, Tamaño y Densidad) a escala 1: 50,000 y sus Tipos de Inundación en el Estado de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 31(1), 127-137.
- Frances Garcia, Félix y otros. (200). *Un ejemplo de análisis regional del riesgo de inundación en el marco de planificación territorial*. España: Serie Grafica.
- Fraustro-Martínez O., I. T. (2010). Vulnerabilidad a la Inundación en Las Formas Exokársticas del Noreste de la Península de Yucatán. *VI Seminario Ibero-Americano de Geografía Física: Universidad de Coimbra*, (págs. 1-16). Portugal.
- G., P. E.-O. (s.f.). Hidrogeology of the Yucatán Peninsula.
- Gaona-Vizcayno S., G.-D. A.-P. (1980). Cenotes, Karst Característico: Mecanismo de Formación. *Revista del Instituto de Geología*, 4(1), 32-36.
- Gil, G. (xxx). Geología.
- Gobernación, S. d. (2015). *CENAPRED MEXICO*. Recuperado el Julio de 2015, de <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/index.php/riesgos-geologicos/hundimientos-regionales-y-locales-agrietamientos>
- Gutiérrez F., C. A. (2008). Identification, Prediction and Mitigation of Sinkhole Hazards in Evaporite Karst Areas. *Geology*, 53, 1007-1022.

- Gutiérrez F., P. M. (s.f.). A Review on Natural and Human-Induced Geohazards and Impacts in Karst. *Earth-Science Reviews*(138), 61-68.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (s.f.). Recuperado el 13 de 06 de 2015, de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoelevaciones.aspx>
- K., B. D. (2014). *Geology and Sinkhole Development of the Hagerstown Valley: Phase Summary Report*. Research Report, State Highway Administration, Maryland Department of Natural Resources, Resources Assessment Service and Maryland Geological Survey.
- L., B. G. (1984). Fracture Mapping and Ground Subsidence Susceptibility Modeling in Covered Karst Terrain: The Example of Dougherty County, Georgia. (C. a. Johnson, Ed.) 595-606.
- L., F. (August de 2005). Using State-Wide GIS Data to Identify the Coincidence Between Sinkhole and Geologic Setting Structure. *Journal of Cave and karst Studies*, 67(2), 120-124.
- Laboratory, N.-J. P. (2003). Anaglyph Yucatán Península México. *Imagen*.
- Lemus-Bustos O., M.-F. J. (2006). Carta Geológico-Minera Cozumel F16-11 Escala 1: 250 000. Quintana Roo y Yucatán, México: Servicio Geológico Mexicano.
- Leonardo s. Nania, Emilio Morelo. (2007). *Manual Basico Hec-Ras 3.1.3 y HecGeo-Ras 3.1.1*. Granada: Leonardo S. Nania Escobar.
- Loeza-García J. P., J.-H. A.-L.-A.-C.-H. (2006). Carta Geológico-Minera Felipe Carrillo Puerto E16-1 Escala 1: 250 000. Campeche, Yucatán y Quintana Roo, México: Servicio Geológico Mexicano.
- Lugo-Hubp, J. A.-Q.-P. (1992). Rasgos Geomorfológicos Mayores de la Península de Yucatan. (UNAM, Ed.) *Revista del Instituto de Geología*, 10(2), 143-150.
- M., D.-R. M. (2002). Karst Subsidence in South-Central Apulia, Southern Italy. *International Journal Espeleology*(31), 181-199.
- M., O.-C. I.-R. (2010). Formas Kársticas Comunes de los Cenotes del Estado de Quintana Roo. *Revista Electronica de Medioambiente UCM*, 1-20.
- M., R.-V. (2009). Aspectos Geológicos de la Cuenca del Caribe. (I. G.-A. Espinoza-Avalos J., Ed.) *El Sistema Ecológico de la Bahía de Chetumal/Corozal: Costa Occidental del Mar Caribe*, 5-11.
- Marco Antonio Salas, Héctor Eslava. (2001). Diagnostico de peligro e identificacion de riesgos de desastre en Mexico. En *Diagnostico de peligro e identificacion de riesgos de desastre en Mexico* (págs. 104,105,105,139). Mexico: Secretaria de Gobernacion.
- Marín-Stillman L. E., P.-A. G.-R. (2005). Hidrogeología de la Península de Yucatán. En J. B. L., *El Agua en México Vista desde La Academia, Academia Mexicana de Ciencias* (pág. 411).
- Mejía-Ortíz L. M., Y. G.-M.-G. (2007). Cenotes (Anchialine) On Cozumel Island, Quintana Roo, México. *Journal of cave and Karst Studies*, 69(2), 250-255.
- Mexicanos, P. (2013). *Provincia Petrolera Plataforma de Yucatán*. Técnico, Petróleos Mexicanos, Subdirección de Exploración y Producción.
- Noticias Caribe. (12 de Enero de 2005). Reportan hundimiento tras sismo: Se resblandece calle de adocreto en zona turística de Playa, a 2 cuadras de edificio colapsado en 2005. Playa del Carmen, Quintana Roo, México.
- Novedades Quintana Roo. (24 de Febrero de 2015). Denuncian más de 100 puntos con hundimientos en la ciudad. Chetumal, Quintana Roo, México.
- P., F. D. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley Editorial.
- Periodistas Quintana Roo. (18 de Enero de 2015). Hartos de los baches. Chetumal, Quintana Roo, México.
- Periodistas Quintana Roo. (11 de Mayo de xx). Surgen más hundimientos en Chetumal. Chetumal, Quintana Roo, México.
- Polémica. (21 de enero de 2015). Mujer cae en un pozo dentro de su casa. Cancún, Quintana Roo, México.
- Por Esto! Quintana Roo. (21 de Diciembre de xxx). Fue hundimiento, no explosión. Tulum, Quintana Roo, México. Obtenido de http://www.poresto.net/ver_noticia.php?zona=qroo&idSeccion=6&idTitulo=61552
- Pueyo-Anchuela O., A.-L. D.-J.-S.-L.-A. (2012). Consideraciones Sobre la Construcción en Zonas Kársticas Activas. Caso de la Avenida de Las Estrellas de Zaragoza. *Geogaceta*(51), 63-66.
- Quintana Roo Al Día. (09 de Enero de 2012). Rebasó expectativas problemas de baches en Chetumal. Chetumal, Quintana Roo, México.
- Quintanarroense PQPALCO. (03 de Febrero de 2015). Desfondes de calles en Chetumal “tragarán” más presupuesto. Chetumal, Quintana Roo, México.
- R., E.-P. (12 al 15 de Mayo 2015). Riesgos Kársticos: El Origen de Cavernas y Cenotes. Playa del Carmen.
- R., E.-P. (Octubre-Noviembre de 1994). Origen y Distribución de las Cavernas de México. *Ciencias*(36), 45-49.
- R., G. (2008). Compilation and Production of a Karst Map of México (abstract). (A. G. Union, Ed.)
- Rodríguez-Velázquez, R.-C. R. (2006). Consecuencias Sociales de un Desastre Inducido, Subsistencia. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(2), 265-269.
- Salina, M. A. (2011). *Metodología para la elaboracion de mapas de riesgo de inundacion en zonas urbanas*. Mexico: Secretaria de Gobernacion.
- Sánchez-Rojas L. E., B.-N. L.-M. (2007). Carta Geológico-Minera Estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán. *Primera Edición*. (S. G. Mexicano, Ed.) Pachuca, Hidalgo, México.
- Sartain N., M. J. (2011). Case Study on The Assessment of Sinkhole Risk for the Development of Infraestructure Over Karstic Ground. (S. S. Vogt, Ed.) *Bundesanstalt fur Wasserbau*.
- Schmitter-Soto J. J., C. F.-B.-S.-M.-E.-A. (2002). Hidrogeochemical and Biological Characetristics of Cenotes in The Yucatán Península (SE México). (A. J. S., Ed.) *Hydrobiología*(467), 215-228.

SEDATU. (2014). "Bases para la Estandarización en la Elaboración de Atlas de Riesgos y Catálogo de Datos Geográficos para Representar el Riesgo 2014". México.

SEDATU. (2016). *Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Tulum Quintana Roo*. Tulum: SEDATU.

Serrano, M. E. (2003). *Identificación de peligros por almacenamiento de sustancias químicas en industrias de alto riesgo en México*. Mexico: Secretaria de Gobernación.

SGM. (2013). "Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales del Estado de Yucatán". Yucatán: xxx.

SIATL simulador de flujos de agua de cuencas hidrograficas. (s.f.). Recuperado el 15 de 09 de 2015, de SIATL simulador de flujos de agua de cuencas hidrograficas: http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/#

Simón J. L., S. M.-A. (2009). Riesgo de Subsistencia Kárstica en Areas Urbanas: El Caso de Zaragoza. *Enseñanza de Las Ciencias de la Tierra*, 17(3), 303-315.

Simón-Gómez J. L., S.-J. M.-C. (Octubre de 1998). Estudio de Riesgos de Hundimientos Kársticos en el Corredor de la Carretera de Logrono. (D. d. Zaragoza, Ed.) *Memoria Informativa*.

Tamaulipas, G. d. (2012). *Atlas de Riesgo del Municipio de Nuevo Laredo*. Nuevo Laredo, Tamaulipas.

Tamulipas, G. d. (2009). *Atlas de Riesgos Municipio de Tampico, Madero y Altamira*. Servicio Geológico Mexicano.

Tulum, G. M. (2015). *Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Tulum, Quintana Roo*.

UQROO. (2011). *Atlas de Riesgo de la ciudad de Chetumal, Municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo 2011*. Chetumal.

Z., W. (May de 1997). The Formation of Sinkhole in Karst Mining Areas in China and Some Methods of Prevention. *Environmental Geology*(31).

Zarate-Barradas R. G., M.-H. A.-B.-F.-P. (2006). Carta Geológico-Minera Mérida F16-10 Escala 1: 250 000. Campeche, Yucatán y Quintana Roo, México: Servicio Geológico Mexicano.

Zarate-López J., A.-L. F.-P. (2005). Carta Geológica-Minera Chetumal E16-4-7 Escala 1:250 000. *Primera Edición*. (S. G. Mexicano, Ed.) Quintana Roo, Campeche, México: Servicio Geológico Mexicano.

Zarate-López J., L.-G. J.-G.-H. (2006). Carta Geológico-Minera Bahía Ascención E16-2-5, Escala 1: 250 000. Quintana Roo, México: Servicio Geológico Mexicano.

3.1.2 Peligro por karsticidad

3.1.2.1 Introducción

La península de Yucatán se considera como una de las plataformas kársticas más grandes del planeta. Por ello el estado de Quintana Roo es susceptible a los peligros kársticos propios de estas zonas. "Los peligros asociados al karst son esencialmente de dos tipos; los asociados a fallos estructurales debidos a la formación de hundimientos o dolinas y/o a la presencia de un relieve importante en la superficie del terreno producido por el desarrollo del epikarst (porción superficial de un terreno kárstico), y el otro tipo, por la contaminación de los acuíferos kársticos. En ambos casos, el desconocimiento de los

fenómenos kársticos por quienes ocupan y utilizan un terreno con estas características puede exacerbar el peligro e incrementar el riesgo."

En las últimas décadas, Quintana Roo ha tenido un gran desarrollo demográfico, económico y turístico lo que conlleva a habilitar nuevos espacios y servicios para los habitantes y visitantes de la región. Los proyectos constructivos sobre zonas con riesgo kárstico pueden presentar serios problemas para la infraestructura, servicios, y la vulnerabilidad humana. En este rápido y caótico desarrollo no hemos comprendido los procesos del medio ambiente natural en el que nos asentamos, sin embargo, si comprendemos los procesos kársticos que se están llevando a cabo, podremos prevenir una serie de problemas relacionados con hundimientos tanto de construcciones, viviendas y vías de comunicación, así como contaminación de acuíferos.

La karsticidad en el estado de Quintana Roo se presenta asociada fuertemente a elementos geológico estructurales de escala regional, con lo que se desarrollan una serie de zonas y corredores kársticos, reflejando una abundancia de estructuras kársticas como son cenotes, dolinas, úvalas y poljés. Lo anterior manifiesta varias zonas de densidad alta o de susceptibilidad a peligros kársticos, estas zonas se encuentran localizadas principalmente en la porción central y norte del Estado, destaca la porción norte, por el tamaño, intensidad y proximidad a poblaciones.

A pesar de que el tema del capítulo es Peligro por Karsticidad, se considera que hasta el momento en la entidad federativa no hay información suficiente para considerar hacer un mapa de peligro como tal, pues esto involucra ya sea periodos de retorno o intensidades, por ello, es importante aclarar que el objetivo real del presente análisis es realizar un mapa de susceptibilidad kárstica, que considera las variables mencionadas en el párrafo anterior.

3.1.2.2 Metodología

En la "Guía de contenido mínimo para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos versión 2014", se menciona que en relación al tema de karsticidad, el CENAPRED carece de una metodología para desarrollar escenarios de peligro, sin embargo, menciona las variables a considerar para llevar a cabo dicho análisis.

Dado lo anterior en este trabajo se tomaron en cuenta los puntos de vista o criterios de diversos autores que han realizado estudios en diversas partes del mundo. En cuanto a determinar los principales factores que conllevan al desarrollo de un peligro por karsticidad, se llegó a la conclusión de que los factores principales que involucran a un peligro por karsticidad son diversos y variados, dependiendo del tipo o clase de karstificación presente.

En general, los factores aceptados que tienen influencia en este tipo de fenómeno son: tipo de roca o litología, presencia y espesor de suelo, cantidad o densidad de estructuras kársticas (cenotes, dolinas, úvalas y poljés), y en cualquiera de sus etapas evolutivas, clima, vegetación, presencia de agua, profundidad del nivel freático, oscilaciones en tiempo del nivel freático, presencia de planos geológicos estructurales (fallas, fracturas o estratificación), red hidrológica subterránea, interacción entre los cuerpos de agua continental y marina, temperatura, química del agua, entre otros.

En nuestro caso, ayudó bastante la metodología utilizada en el Atlas de Riesgo del estado de Yucatán, el cual comparte similares características con el estado de Quintana Roo en cuanto a topografía, geomorfología, geología, geología estructural, presencia de estructuras kársticas, etc. Así se obtuvieron los siguientes productos: Mapa de densidad de estructuras kársticas y Mapa estructural, de este último se generaron los subsiguientes mapas: Mapa de frecuencia de fracturamiento, intensidad de fracturamiento y longitud de fracturamiento. Cabe mencionar que todo el proceso de interpretación y análisis fueron llevados a cabo digitalmente en el software ArcGis 10.3.

En el presente trabajo, se tomaron como factores principales que conllevan a esta susceptibilidad: el tipo de roca, presencia de planos geológico-estructurales y presencia o densidad de estructuras kársticas. Por lo anteriormente mencionado se tomó como base el mapa geológico del estado, se realizó un mapa estructural interpretado y un mapa de estructuras kársticas. Aunque hay un buen número de estudios que consideran el factor suelo, en este estudio no se toma en cuenta, ya que el espesor del suelo es un factor prácticamente despreciable en el estado, particularmente en áreas no pobladas, pues los espesores varían de 0 a 70 cm. Sin embargo, este factor se vuelve de importancia en las áreas urbanas, ya que aquí por actividades antropogénicas, se ha colocado un suelo o relleno de diversa naturaleza. No obstante, este factor se retomará y analizará en el apartado de hundimientos.

3.1.2.3 Desarrollo

El tema de inventario de cenotes y peligro por karsticidad, son dos temas muy vinculados entre sí, por lo cual comparten etapas que fueron realizadas a la par o en común. El desarrollo de la metodología consistió en cuatro etapas, al igual que en el capítulo de Inventario de Cenotes La primera etapa consistió en la recopilación, revisión y análisis de la información bibliocartográfica existente en todo el estado. Esta etapa se realizó en común con el tema de inventario de cenotes. Esta información consistió en artículos científicos, notas de internet, notas periodísticas, libros y mapas. Cada una de estas fuentes bibliocartográficas fue revisada y analizada, obteniendo datos valiosos sobre estructuras kárstica y cuerpos de agua, entre estos datos se cuentan coordenadas, longitud, profundidad, entre otros. Toda la información obtenida se manejó en un software de sistemas de información geográfica ArcGis versión 10.2.

El segundo paso consistió en actividades de campo, con el fin de realizar un mapa de inventario de estructuras kársticas. Estas actividades de campo se realizaron en todo el estado, con la finalidad primordial de confirmar los datos obtenidos bibliográficamente, así como obtener otros datos de las estructuras kársticas como son: tipo o clase, litología, planos estructurales, presencia de agua, profundidad, infraestructura cercana, entre otros. Esta actividad fue realizada primordialmente para la elaboración del mapa de inventario de cenotes o estructuras kársticas, y fue realizada en varios momentos. En el reconocimiento en campo de las estructuras kársticas se llenaron fichas adecuadas para la obtención de datos de las mismas (para más detalles ver apartado de inventario de cenotes).

El tercer paso en el desarrollo de este tema fue la captura, proceso, interpretación y análisis de la recolección de datos de campo y datos bibliográficos. De acuerdo con diversos datos bibliográficos, son muy variados los factores que conllevan al desarrollo de un sitio con peligro kárstico, de acuerdo con estos datos, las principales variables o factores determinantes en un mapa de susceptibilidad a nivel regional o estatal son los siguientes: Densidad de estructuras kársticas, aspectos estructurales o tectónicos y litología del área. Para cada uno de estos factores se realizaron los mapas correspondientes, con lo cual se analizó y determinó su correlación o relaciones existentes entre ellos mismos. A continuación, se describen con mayor detalle los procesos para la obtención de cada uno de los factores considerados en este trabajo:

Densidad de estructuras kársticas

Con respecto a la presencia o densidad de estructuras kársticas, se retoma la siguiente mención "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 este 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"

Para la realización de un mapa de densidad de estructuras kársticas o cenotes, se tomó como base el mapa resultante en el apartado de inventarios de cenotes o estructuras kársticas. Así, teniendo como base el anterior mapa, se procedió a obtener mapas temáticos a partir de este, como son los mapas de densidades de estructuras kársticas (tomando en cuenta datos de área y datos puntuales de cada estructura). Por ser el Estado de Quintana Roo bastante extenso, y tomando en cuenta que se utilizaron dos metodologías diferentes en la obtención e identificación de estructuras kársticas, con un resultado de 7,396 estructuras kársticas, se decidió usar el universo de datos a nivel municipal, con lo cual se evitó la influencia de aquellas áreas donde la concentración de estructuras kársticas fue mayor.

Para la realización de los mapas de densidades kársticas, se tomó una cuadrícula que cubriera en su totalidad al municipio en cuestión, esta cuadrícula se conformó por celdas individuales con dimensiones de 3 x 3 km. Es decir, de 9 km², el número de celdas fue diferente en cada municipio, dependiendo del área de extensión de este. Cada celda fue identificada con un punto central, al cual se le asignaron valores como la cantidad de estructuras kársticas presentes en ella, estas estructuras kársticas fueron cenotes, dolinas, úvalas o poljes. También se le asignaron valores del área total ocupada por estas estructuras en dicha celda. Con los valores anteriores se procedió a realizar una serie de raster con el fin de obtener el mapa de densidad de estructuras kársticas para cada municipio.

Litología

Considerando el aspecto litológico, en este sentido hay que tomar en cuenta que solo ciertas rocas son susceptibles a una karstificación, estas rocas son halita, yeso, caliza y dolomita. Por lo cual, el primer paso en este sentido fue determinar en qué áreas del estado de Q. Roo se presentan este tipo de rocas, por lo anterior se realizó un mapa geológico del Estado, basándose sobre los mapas geológicos ya existentes y elaborados por el servicio geológico mexicano a escala 1: 250,000. En estos mapas se analizó toda su información litológica, obteniéndose así un mapa geológico. El objetivo de lo anterior fue establecer las relaciones existentes con las estructuras kársticas inventariadas.

Estructural

Las fallas y fracturas presentes en un área dada son la respuesta a esfuerzos tectónicos aplicados en una región en específico, estas fallas y fracturas provocan toda una serie de planos estructurales en el terreno, ya sea que se presenten de forma individual o bien en forma de sistemas. Estos planos estructurales provocan una serie de cambios físicos en la roca, reflejados en una mayor porosidad y espacios vacíos, lo que provoca que estos planos sean conductos por donde las aguas meteóricas puedan circular libremente, además de almacenarse en estas, con lo que conlleva a una mayor exposición e interacción con la roca circundante, con la subsecuente karstificación. Aunque la información bibliocartográfica menciona una cierta correlación en la relación de la densidad de las estructuras kársticas con estructuras tectónicas tales como fallas y fracturas, esta no estaba plasmada en mapas o planos, solo era un punto en el que diversos autores solo inferían, debido a que no existía un mapa estructural estatal que delimitara y definiera estas posibles estructuras, una excepción es la falla Ticul, la cual ha sido referida en varios trabajos, sin embargo los mapas estructurales de la región eran ambiguos o carentes de información. Por tal motivo, se propuso como uno de los objetivos principales la elaboración de un mapa de interpretación estructural con el objetivo de encontrar y relacionar estos planos estructurales con la presencia de estructuras kársticas.

El mapa geológico-estructural no figura como un nivel de información requerido por CENAPRED, sin embargo, por ser este de gran relevancia en la interpretación de hundimientos y karsticidad se llevó a cabo a escala 1: 250,000 para un nivel

estatal o regional, mientras que se realizó también a escala 1: 50,000 para su interpretación y análisis a nivel ciudad o municipal (ver apartado de hundimientos).

Para obtener el mapa estructural, el primer paso fue la recopilación de cada mapa geológico-estructural que se realizó en el Estado. En este caso fueron de mucha ayuda los mapas geológicos a escala 1: 250 000, tanto del servicio geológico mexicano como del INEGI, entre otros. Cada uno de los rasgos estructurales que dichos mapas contenían fue plasmado en un mapa único denominado mapa de recopilación bibliográfica estructural.

Posteriormente, al mapa anteriormente mencionado se le integro una interpretación de lineamientos realizado para este mismo propósito. Para obtener dicha interpretación de lineamientos estructurales se realizó la interpretación visual de cada una de las cartas topográficas 1: 50,000 de INEGI, con las que cuenta el estado, haciendo énfasis en el comportamiento de su topografía e hidrografía. El total de cartas topográficas interpretadas fue de 83 cartas.

Paralelamente, se interpretaron las imágenes de satélite provistas por *google earth*, además se consultaron los diversos mosaicos de fotografías aéreas provistas por el INEGI, así como imágenes anáglifo 3D de la NASA, el resultado de la interpretación anterior fue denominado mapa estructural interpretado.

Teniendo entonces el mapa de recopilación bibliográfica estructural y el mapa estructural interpretado, se unificaron en un solo mapa, sin embargo, en este mapa resultante se hallaban algunas estructuras repetidas, tanto por que aparecían en los mapas que se recopilaron como también por que fueron interpretadas, así que fue necesario un proceso de selección y filtro visual de todos los lineamientos presentes, ya realizado dicho filtro y selección se obtuvo un mapa denominado mapa estructural.

Contando con el mapa estructural, y como actividad complementaria, se analizó la distribución y comportamiento de todo el conjunto de lineamientos estructurales interpretados, esto resultó en la división o creación de diversas zonas o regiones estructurales. También se realizaron los gráficos o rosetas de rumbo para cada una de las regiones estructurales obtenidas, con el fin de obtener la orientación preferencial de los lineamientos existentes en cada región estructural.

Obtenido el mapa estructural del estado, se prosiguió con la misma metodología citada en el atlas de riesgo del estado de Yucatán para obtener el grado de fracturamiento. Así el mapa fue procesado y analizado digitalmente con lo cual se obtuvieron tres mapas raster denominados mapa de frecuencia de fracturamiento, mapa de longitud de fracturamiento y mapa de intensidad de fracturamiento. Estos tres mapas fueron obtenidos sobreponiendo y utilizando una misma cuadrícula o malla con celdas de 9 km², el total de celdas obtenidas fue de 5,086 las cuales cubren totalmente al estado, y a la cual se le asignaron valores en el mismo sentido que al obtener el mapa de densidades kársticas mencionado anteriormente. Los valores asignados en este caso fueron: la frecuencia de fracturamiento, que captura la cantidad de lineamientos que contiene cada celda. La longitud de fracturamiento que captura la sumatoria de las longitudes de cada uno de los lineamientos presentes en cada celda, mientras que la intensidad de fracturamiento captura el número de intersecciones de lineamientos resultantes en la celda respectiva. Sobre este último punto también se tuvo que intervenir realizando algunas modificaciones manuales en los valores de la celda, ya que algunos lineamientos se presentaban muy próximos entre sí, sin embargo, no ocasionaban una intersección, por lo que en parte se tuvo que realizar una interpretación visual aplicando un criterio geológico para postular si estos lineamientos tenían o presentaban un punto de intersección.

Posteriormente, los análisis previos se procesan y unen los mapas de frecuencia de fracturamiento, mapa de longitud de fracturamiento y mapa de intensidad de fracturamiento para generar el mapa llamado grado de fracturamiento.

“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 y debido a que concentran el flujo de agua subterránea.” (Atlas Yucatán)

Espesor de suelo

“El mayor peligro para obras de ingeniería es el causado por las dolinas de hundimiento y subsidencia (Waltham et al., 2005). La generación de hundimientos repentinos e instantáneos es el único peligro kárstico que regularmente provoca pérdidas de vidas humanas, la mayoría de los suelos tienen la suficiente cohesión como para que se generen arcos sobre espacios vacíos, hasta que colapsan catastróficamente. Estas dolinas son de tamaños menores y más numerosas en suelos delgados; la mayoría de los problemas ocurren en lugares donde suelos de 2 a 10 m de espesor cubren a calizas bien karstificadas. No existe un límite máximo de espesor de suelos por encima del cual no ocurran este tipo de hundimientos y subsidencias, y se han presentado en suelos con espesores de más de 50 m (Waltham y Fookes, 2003).”

Considerando el párrafo anterior, podemos asegurar que el peligro por karsticidad está directamente relacionado al espesor de la capa de suelo, esto se debe a que cuando existen estructuras kársticas ya se trate de dolinas, cenotes, úvalas o poljes, y sobre ellas se desarrolla un suelo o material inconsolidado, ya sea este natural o antropogénico, ocurren diversos fenómenos, el principal de ellos es la remoción de material de suelo, lo que ocasiona diversos hundimientos.

Con base en nuestras observaciones de campo, se deduce que el espesor de suelo en el estado de Quintana Roo es muy delgado, las observaciones van desde 1 a 70 cm, aunque generalmente el promedio es de 10 a 30 cm, y en algunos casos este es inexistente. Por lo que se deduce que el factor suelo en la susceptibilidad por karsticidad es de poca importancia o su influencia es muy baja.

Si bien el factor suelo es menospreciado en todas las áreas no pobladas del estado, este retoma una notable consideración e importancia en las ciudades, poblados o a lo largo de carreteras, en donde por actividades humanas las estructuras kársticas han sido rellenadas con tierra, escombros, gravas o simplemente basura. Todo este material heterogéneo puede comportarse de diversas formas y conductas si se encuentra sobre estas estructuras kársticas, mas ahora las variables se complican cuando sobre este relleno se realizan construcciones u obras de ingeniería y es en este momento donde vienen los problemas o peligros. Cabe mencionar que de acuerdo a las observaciones de campo no se han observado colapsos propios de las estructuras kársticas, es decir no se han observado en las áreas urbanas bloques de colapso recientes propios de la unidad litológica que las contiene, lo anterior no debe mal interpretarse y esto no significa que no ocurran, si no que la mayor parte de los hundimientos presentes y pasados en las ciudades son atribuibles al depósito de materiales sobre estructuras kársticas, el cual posteriormente es removido por procesos naturales, quedando en su lugar espacios vacíos que a mediano o corto plazo pueden provocar colapsos repentinos o bien hundimientos constantes (para mayor detalle consultar el apartado de hundimientos)

La cuarta y última etapa en el desarrollo de la metodología consistió en plasmar el desarrollo, resultados, conclusiones y recomendaciones en el presente informe final, adjuntándose los mapas resultantes en esta etapa. Uno de los productos principales en este tema y en esta última etapa fueron los mapas de susceptibilidad por karstificación el cual se obtuvo principalmente por la combinación de los dos principales factores que la originan: La densidad de estructuras kársticas y el nivel estructural del área. En este sentido se utilizaron los raster del grado de fracturamiento y el de densidad de estructuras kársticas, realizándose para cada municipio.

3.1.2.4 Resultados

En el aspecto litológico

De acuerdo con la distribución y densidad de las estructuras kársticas, y su relación con el mapa geológico del estado puede interpretarse lo siguiente: En mayor o menor medida todo el Estado de Quintana Roo es susceptible a presentar problemas relacionados a la karsticidad, ya que las rocas que lo conforman son las más propensas a desarrollar este fenómeno, las rocas predominantes en todo el estado son calizas, seguidas de yesos y en menor proporción dolomitas. Claro está que no solo el factor litológico desencadena este tipo de procesos, también deben reunirse otras variables como son presencia de planos estructurales, así como presencia de agua, entre otros.

En el Estado, pueden delimitarse algunas áreas litológicas que por sus características estructurales y litológicas pueden presentar una mayor o menor incidencia de estos procesos.

De acuerdo con los datos de campo, así como a las interpretaciones realizadas se determina que la roca o litología preferencial para que ocurran o se presenten estructuras kársticas o susceptibilidad de riesgos kársticos es la unidad formada por calizas de la formación Felipe Carrillo Puerto, la cual se ubica principalmente en la porción central, noreste y norte del estado, aumentando por mucho esta posibilidad cuando en esta litología se presentan estructuras de fallas, fracturas o sistemas de fracturas. La segunda litología preferente para la ocurrencia de estructuras kársticas es la secuencia de calizas y yesos de la Formación Icaiché, la cual se encuentra ocupando la porción sur del estado, aquí cabe mencionar que los procesos kársticos se realizan con una mayor rapidez en las rocas de yeso, ya que por su naturaleza química y física poseen un mayor índice de disolución.

En el aspecto estructural

De acuerdo a la interpretación estructural, pueden notarse que ciertos lineamientos destacan por su longitud e importancia del resto de los demás lineamientos, en este sentido se realizó un mapa con los principales elementos estructurales de carácter regional o de mayor importancia, los cuales se presentan a continuación:

Lineamiento Tulum – Río Hondo. - De todas las estructuras interpretadas, es esta la de mayor longitud y al parecer de mayor influencia. Se localiza muy próxima a la costa y paralela a esta, desde el noroeste de la ciudad Cancún hasta las proximidades de la ciudad de Chetumal; el cauce del Río Hondo aprovecha esta estructura en el sur del estado. Tiene una orientación de N25°E, con flexiones menores que permiten un cambio en su dirección, de N35°E a N10°E, con una extensión en el estado de poco más de 430 km, aumentando su longitud en su continuidad al sur, en los países vecinos de Belice y Guatemala. Se interpreta como una falla posiblemente de tipo transcurrente con una componente normal. Posiblemente esta falla sea el elemento de un sistema de fallas, que tienen el mismo comportamiento, dirección y flexiones, e incluso dimensiones aproximadas, siendo parte de este sistema la falla que se localiza al este de la península y la cual se encuentra cubierta por las aguas del Mar Caribe. Con el mismo origen se atribuye el sistema de lineamientos Kantunilkin y el lineamiento Felipe Carrillo Puerto, localizados en la porción central y norte del Estado, mientras que, hacia el sur, las estructuras que bien pudieran estar relacionadas a este sistema Tulum-Río Hondo son: lineamiento Tunich, lineamiento La Hoyanca, lineamiento Dzibanche Norte, lineamiento Río Escondido Norte, lineamiento Río Escondido Sur y lineamiento Garrido. El sistema de fallas Mahahual es otro del conjunto de estructuras relacionadas a este sistema. Este sistema o trend Tulum – Río Hondo es el que presenta tanto en su traza como en sus proximidades la mayor cantidad de estructuras kársticas, y de hecho las de mayor dimensión.

Sistema Fallas Kantunilkin. - Este sistema se localiza en la porción norte del estado, es un sistema paralelo al

lineamiento regional Tulum-Río Hondo. Presenta una orientación con rumbos de N40°E a N25°E con ligeras flexiones. Sus elementos tienen una longitud que van de aproximadamente 37 a 70 km de longitud y su longitud se encuentra limitada por una serie de lineamientos de orientación NW-SE, las cuales parecen cortar o limitar a este sistema. Ocupando los planos de este sistema se encuentran toda una serie de tectono-karts o poljés.

Falla Constituyentes. - Localizada en la porción norte del Estado. Es un lineamiento de orientación N60°E con una longitud de aproximadamente 38 km de longitud, es posible que se encuentre relacionada al lineamiento Vallarta, localizado a su lado este.

Falla Vallarta. - Este es un lineamiento que fue parcialmente definido en la interpretación topográfica, sin embargo, se infirió su extensión y traza debido a la gran cantidad de estructuras kársticas alineadas presentes. Se localiza en el margen norte del Estado.

Falla Cancún. - Este lineamiento conecta a las ciudades de Cancún y la ciudad de Playa del Carmen, localizado en la porción norte del estado. Tiene una orientación de N20°E a N25°E y una extensión de aproximadamente 55 km. Este lineamiento se interpreta como un lineamiento originado por un contacto litológico que define los estratos de calcarenitas sobre las calizas de la formación Carrillo Puerto.

Falla Salsipuedes. - Este es un lineamiento de orientación N45W con una longitud aproximada de 35 km, se localiza en la porción norte del Estado.

Sistema de lineamientos de Cavernas de Tulum. - Este sistema se localiza en la porción centro-norte del estado, abarca toda el área que existe entre las ciudades de Tulum y Playa del Carmen. Sus elementos tienen una orientación de N35°W a N40°W, con una longitud de variable entre 9 a 14 km. La información topográfica en escala 1:250 000 y 1: 50 000 en la cual se basó la interpretación no proporcionan mayor evidencia de este sistema, sin embargo, por investigación y exploración espeleológica se reportan toda una serie de sistemas de cavernas paralelas con una marcada orientación NW. Este sistema de cavernas abarca toda el área ya mencionada entre las dos poblaciones, sin embargo, este sistema de lineamientos está limitado por el gran lineamiento regional Tulum – Río Hondo, hasta el momento las exploraciones espeleológicas se han enfocado sobre los alrededores del poblado de Tulum, sin embargo, las áreas que se encuentran al sur de Playa del Carmen parecen indicar que poseen estructuras de iguales características. Cabe mencionar que en esta área se reportan las galerías y cámaras kársticas que se encuentran entre las más grandes a nivel mundial.

Sistema de fallas El Faro. - Localizado en la porción centro-este del Estado, abarcando parcialmente la costa. Son una serie de lineamientos de orientación N45°E a N60°E con una longitud variable que va desde 20 a 25 km, se podría decir que este sistema es el resultado entre la interacción de los dos sistemas de orientación NE-SW llamados Sistema Mahahual y el Sistema de lineamientos Tulum – Río Hondo.

Falla Hobompich. - Ubicado en la porción central del Estado, al noroeste del poblado Felipe Carrillo Puerto, está orientada N40°W con una longitud de aproximadamente 38 km. Este lineamiento posiblemente tenga el mismo comportamiento y características que el lineamiento regional denominado Ticul, ya que posee la misma orientación.

Falla Felipe Carrillo Puerto. - Localizada en la porción central del Estado, al suroeste de la ciudad de Felipe Carrillo Puerto, posee una longitud aproximada de 30 km, con una orientación de N42°E, se interpreta como parte del sistema Tulum – Río Hondo. Se encuentra limitada e intersectada por la falla Ticul de orientación NW-SE.

Sistema de fallas Sian Ka'an. - Este sistema de lineamientos de orientación N55°E a N60°E, con longitudes variables

de 23 a 32 km, se encuentra localizado en la porción costera del centro-este del Estado, se encuentra formando junto con el sistema de lineamientos Mahahual una serie de graben o pequeñas cuencas de orientación NE-SW.

Sistema de fallas Mahahual. - Ocupa parte de la costa este del Estado. Son una serie de lineamientos paralelos al sistema de falla regional Tulum – Río Hondo, presenta una orientación de N15°E a N32°E, con longitudes variables que van desde 17 a 130 km. Se encuentra conformando junto con el sistema de lineamientos de Sian Ka'an una serie de graben o cuencas de orientación NE-SW.

Falla Chetumal. - Ubicada al este de la ciudad del mismo nombre, con un rumbo de N30°E y una extensión de 46 km, se asocia a la falla Ticul – Río Hondo. Se infiere que continúe hacia el sur en el vecino país de Belice.

Falla La Hoyanca. - Posicionada en la porción central del Estado, es un lineamiento que junto con los otros lineamientos próximos a ella se encuentran formando una serie de estructuras kársticas, las cuales albergan los principales cuerpos de agua de la región, posee algunos curvilineamientos en su traza. Tiene una orientación de N60°E con una longitud de 31 km. Se infiere se encuentre relacionada en formación con el lineamiento regional de orientación NE-SW Tulum – Río Hondo.

Falla Tunich. - Lineamiento ubicado en la porción central del Estado, con un rumbo de N55°E y una longitud de 35 km. Se interpreta de igual manera que el lineamiento La Hoyanca.

Falla Ticul. - Este es una estructura muy reconocida en distintos trabajos, y junto con la falla Tulum – Río Hondo, son las estructuras regionales más sobresalientes en el Estado. Posee una extensión en el estado de aproximadamente 153 km con una orientación de N25°W a N50°W, aunque su extensión es de mayores dimensiones tomando en cuenta su continuidad al NW en el vecino estado de Yucatán. Esta estructura es la responsable de delimitar las partes bajas al norte y las partes más altas al sur. También funge como un límite en las zonas o regiones estructurales delimitadas en este mismo trabajo. Por trabajos previos se le reconoce como una falla normal con su piso ubicado al norte.

Falla Bifurcación Ticul. - Tal como su nombre lo indica, se interpreta como una bifurcación al sur de la falla regional Ticul, aunque su origen está más relacionado al sistema de lineamientos Ubre Blanca. Su traza es un notable quiebre topográfico en la región, al igual que el sistema de lineamientos Ubre Blanca.

Falla Chumul. - Este lineamiento se encuentra en la porción centro- oeste del Estado, es el lineamiento más occidental que se encuentra en el estado, posee un rumbo de N58°E, con una longitud de 55 km. Posiblemente se halle relacionado con el sistema de falla Tulum – Río Hondo de orientación NE-SW.

Falla Ubre Blanca. - Se localiza al sur del Estado, al oeste de la ciudad de Chetumal. Es una serie de lineamientos que posiblemente podría ser la continuidad del sistema de lineamientos Nuevo Becak, posee una orientación de N20°W a N35°W con una extensión de aproximadamente 62 km. Este lineamiento es el responsable de delimitar las tierras topográficamente más altas de aquellas más bajas, también se halla delimitando una de las zonas regionales estructurales resultantes en la interpretación estructural del Estado.

Falla Dzibanche Norte. - Se ubica en la porción centro sur del Estado, al oeste de la ciudad de Chetumal. Es un lineamiento de orientación N30°E con una longitud de aproximadamente 33 km. En su traza se encuentran algunas estructuras kársticas mayores, interpretadas como poljes. Se interpreta a este lineamiento como una falla normal, con bloque de piso al SE. Se le relaciona muy estrechamente con el sistema regional Tulum – Río Hondo.

Falla Dzibanche Sur. -Localizado al suroeste de la ciudad de Chetumal, en el sur del Estado. Es un lineamiento de 31

km con una orientación de N15°E a N20°E. Es un lineamiento que se encuentra perpendicular al sistema NE-SW, posiblemente se encuentre relacionado genéticamente al sistema Tulum – Río Hondo.

Falla Kantemol. - Ubicado en la parte central del Estado, con una orientación de N45°E y una extensión de aproximadamente 40 km. Se le relaciona con el sistema Tulum – Río Hondo.

Sistema Nuevo Becak. - Son una serie de lineamientos paralelos, localizados en la porción suroeste del Estado, tiene una orientación de N25°W a N72°W, con longitudes variables de 16 km a 23 km. Es muy posible que se encuentren relacionadas al sistema de falla regional Ticul.

Falla Río Escondido Norte y Falla Río Escondido Sur. - Son lineamientos paralelos ubicados al sur del Estado, delimitan bloques estructurales. Tienen una orientación de N45°E, con una longitud de 30 km aproximadamente. Se infiere que se encuentren relacionados con el origen del sistema de falla regional Tulum - Río Hondo. Continuando con su traza hacia el sur pueden prolongarse en el Estado de Campeche.

Falla Garrido. - Es un lineamiento de orientación N35°E, paralelo a los lineamientos Río Escondido Norte y Sur. Posee una longitud de 30 km, aunque al igual que los lineamientos paralelos a este, su longitud hacia el sur es mayor, ya que el lineamiento se desarrolla hacia el SW, hacia el Estado de Campeche. Se infiere tenga relación con el sistema de falla regional Tulum – Río Hondo.

Red estructural Felipe Carrillo Puerto – San Pedro. - Localizadas en las inmediaciones del poblado de Felipe Carrillo Puerto y la comunidad de San Pedro. Son zonas de sistemas de fracturas perpendiculares entre sí, que conforman zonas de alta densidad de lineamientos formando una especie de cuadrículas o red, los dos trend que intervienen en la formación de esta malla son de orientación NW-SE y NE-SW, los cuales son los dos sistemas predominantes en todo el territorio del estado. Determinan y se encuentran influenciando una muy buena parte de las estructuras kársticas presentes en el estado, tal es su relación con estas estructuras kársticas que producen una serie de nubes de concentración de estas mismas estructuras.

Red Estructural Xkan. - Esta red o malla de lineamientos interpretadas como una serie de fracturas intersectadas entre sí, se encuentra localizada en la porción más sureña del Estado, conformando parte de las principales serranías en el estado. Comprende un bloque con un área aproximada de 20 km x 30 km, continuando su extensión y área hacia el SW, fuera del estado, en el vecino estado de Campeche y muy posiblemente continúa en el país vecino de Guatemala. Se encuentra limitada entre los lineamientos Garrido y Río Escondido Sur. Esta zona o malla estructural se encuentra distribuida en un bloque tectónico de orientación NE.

Red estructural Chacanhacam. - Localizada en el sur del Estado, es una malla de fracturas de orientación NW-SE y NE-SW, las cuales se encuentran intersectadas. Se encuentran en un bloque de orientación NE, delimitado al sur por los lineamientos Río Escondido, mientras que al norte es delimitada por los lineamientos del sistema Nuevo Becak. Presenta un área de aproximadamente 56 km x 62 km, aunque su extensión es mayor, ya que tiene continuidad hacia el SW, hacia el Estado de Campeche.

De acuerdo al mapa estructural generado por interpretación y de acuerdo a las características que presentan los lineamientos, como son orientación, longitud, intersección, y distribución, se clasificaron 5 zonas o regiones estructurales. Las cuales se describen a continuación:

Región Estructural 1 Tierras Altas del Sur. - Se ubica ocupando gran parte de la porción este del Estado. Esta zona comprende la porción sur del municipio de José María Morelos, y la porción oeste de los municipios de Bacalar y Othón P.

Blanco. Su principal característica es la presencia de las mayores altitudes en el Estado, es decir, comprende las serranías de la región. En ella se encuentra la mayor densidad de lineamientos presentes en todo el Estado, estos lineamientos comprenden dos orientaciones principales: NE-SW y NW-SE, correspondiendo el trend NE-SW a los lineamientos más extensos en dicha región. Se interpreta a los lineamientos de menores longitudes como fracturas en el terreno, mientras que aquellos lineamientos mayores y de orientación NE-SW se interpreta como posibles fallas normales, en algunos casos escalonados. Limita esta región hacia el norte con la región estructural número 2, cuyo límite es una evidente y regional falla normal, en donde da inicio hacia el norte la planicie costera y hacia el oriente esta región se encuentra limitando con la región cuatro, en donde sus límites son una serie de fallas normales.

Región Estructural 2 Planicie Central. - Se ubica en la porción central del Estado, abarca buena parte de la porción oeste del municipio de Felipe Carrillo Puerto, así como del municipio de Tulum. También cubre la porción norte del municipio de José María Morelos. Esta región se caracteriza por presentar una densidad media de lineamientos, los cuales son de dos tendencias diferentes orientadas NE-SW y NW-SE. Una característica propia de esta región es la presencia de zonas de fracturamiento en forma de red o mallas dispersas en la región. Limita hacia el sur con la región 1 y 4 a partir de una falla regional ampliamente reconocida y mencionada en diversos artículos, conocida como la falla Ticul, esta falla es de carácter regional y se considera como una falla normal. Hacia el este se encuentra delimitada por una gran falla regional de comportamiento normal que corre en dirección burdamente N-S identificada como lineamiento Tulum – Río Hondo.

Región Estructural 3 Planicie Costera. - Se encuentra ocupando toda la porción costera oriental del Estado, abarca parte de los municipios de Othón P. Blanco, Bacalar, Felipe carrillo Puerto, Tulum, Solidaridad, Benito Juárez, Isla Mujeres y comprendiendo totalmente al municipio de Cozumel. Es la región que presenta las menores elevaciones en el estado, así como también es la de menor densidad de lineamientos. Sus lineamientos son marcadamente NE-SW, los cuales se interpretan como fallas normales, que son las responsables de dar forma a las bahías principales del Estado, así como de formas una serie de valles o cuencas en la región, se encuentra limitada hacia el oeste por una gran estructura regional de orientación burdamente N-S, la cual la coloca en contacto con las regiones 4 al sur, y 2 y 5 en su porción centro-norte.

Región Estructural 4 Chetumal. - Comprende la porción centro-sur del Estado, abarcando la porción este del municipio de Othón P. Blanco, la porción central del municipio de bacalar y la porción sur de Felipe carrillo Puerto. Esta región se caracteriza por sus lineamientos plegados, así como por sus lineamientos de orientación NE-SW, los cuales son ocupados por los mayores cuerpos de agua de la región en estructuras kársticas denominadas poljés. Se encuentra limitada hacia el norte, este y oeste por una serie de fallas normales que la colocan en contacto con las regiones estructurales número 1, 2 y 3.

Región Estructural 5 Planicie del Norte. - Esta zona abarca parte de la porción norte del Estado, comprende gran parte de los municipios de Lázaro Cárdenas y solidaridad, así como una pequeña porción de la porción norte del municipio de Tulum y oeste del municipio de Benito Juárez. Sus lineamientos son marcadamente de orientación NNE-SSW con ligeras flexiones. ¿Estos lineamientos son de extensión longitudinal considerable y son interpretados como posibles planos de fallas normales?, ocupados por estructuras kársticas. También se encuentran de manera secundaria lineamientos de orientación NW-SE. Se encuentra delimitada hacia el este por el lineamiento regional de orientación burdamente norte sur, el cual la coloca en contacto con la región número 3, mientras que hacia el sur se encuentran en contacto con la región número 2.

En el aspecto del grado de fracturamiento

El mapa de grado de fracturamiento resultante del análisis y procesos llevados a cabo sobre el mapa estructural muestra diversas zonas con variados grados de fracturamiento, destacando las zonas de alto a muy alto grado localizadas en

la porción sur del estado y porción centro norte. Áreas de medio a alto grado de fracturamiento son localizadas en la porción centro-sur, mientras que zonas de bajo a medio grado de fracturamiento son ubicadas principalmente en la porción norte del Estado. A continuación, una breve descripción de estas zonas:

Las zonas de mayor grado de fracturamiento se localizan en la porción sur del Estado, estas zonas de alto a muy alto grado son: Zona Xkan y Zona Chacanhacam las cuales delimitan una serie de sistemas de fracturamiento en enrejado.

Zonas de alto grado de fracturamiento muy destacables son las que se encuentran en la porción centro del Estado, en las proximidades del poblado Felipe Carrillo Puerto, estas áreas de medio a alto grado de fracturamiento son una respuesta a los sistemas de fracturamiento en enrejado ahí localizados, estas zonas reciben el nombre de Felipe Carrillo Puerto – San Pedro, con el alto grado de fracturamiento también se presentan una nube de estructuras kársticas, principalmente cenotes/dolinas, las cuales ocasionan una de las mayores densidades en el Estado.

Zonas de medio a alto grado de fracturamiento como la zona llamada Dzibanche, Kantemol y Ubre Blanca pueden localizarse en la parte centro sur del Estado, estas zonas presentan una baja densidad de estructuras kársticas y los sistemas de fracturas presentes en estos están marcados por la influencia de las estructuras regionales: Ticul y Tulum – Río Hondo.

Las zonas de mayores extensiones son aquellas pertenecientes al grado bajo a medio, a las cuales pertenecen las zonas Holbox, Tulum-Río Hondo, El Palmar, Mahahual Norte y Chumul. Las tres primeras ubicadas en la parte norte del Estado, mientras que Mahahual se localiza en la porción este, en la costa, y Chumul se ubica en el margen oeste del estado. De estas sobresalen las dos primeras Holbox y Tulum-Río Hondo que tienen una traza igual a las estructuras regionales que las generan, las cuales son las responsables de contener buena parte de las estructuras kársticas inventariadas, principalmente en forma de poljes o tectono-karts.

Existen otras zonas de bajo grado de fracturamiento importantes, tal como aquellas que se encuentran en la traza de la falla Ticul, situada en la parte central del estado, así como aquella localizada al NW de la ciudad Playa del Carmen, en donde se conjuga con una densidad importante de estructuras kársticas menores, la mayor parte de ellas como cenotes.

En cuanto a la densidad de estructuras kársticas

De acuerdo con todos los datos recabados en el presente estudio, se detectaron aproximadamente 7,396 estructuras kársticas entre las que se cuentan dolinas, cenotes, úvalas y poljes. Resultan en el mapa de densidad las siguientes zonas:

En cuanto al grado de susceptibilidad kárstica.

Los resultados generados en el grado de susceptibilidad kárstica fueron los adecuados tomando en cuenta la escala regional trabajada, los resultados aquí descritos se basan principalmente sobre las zonas de susceptibilidad kárstica de grado medio a muy alto grado, para una mejor comprensión de lo aquí descrito se recomienda encarecidamente consultar los mapas adjuntos de cada municipio en cuestión.

Dos zonas de medio a muy alto grado de susceptibilidad son las zonas principales reportadas para el municipio de Lázaro Cárdenas, estas zonas se encuentran en la parte central y al norte del municipio, mientras que una zona de medio a alto grado se ubica al sur del municipio, todas las zonas de susceptibilidad kárstica coinciden precisamente con la localización de planos estructurales regionales relacionados al sistema NE-SW denominado falla Tulum-Río Hondo, siendo esta estructura la responsable de generar zonas de tectono-karst o zonas de poljes.

Para el municipio de Isla Mujeres, se tienen tres zonas de media a alta susceptibilidad, las cuales se encuentran

ocupando la parte media del municipio en una franja de orientación NW-SE, estas zonas son bien definidas y localizadas.

Una amplia zona de media a muy alta susceptibilidad es reportada al oeste del municipio de Benito Juárez, esta zona se manifiesta en la traza del sistema de falla Tulum-Río Hondo, se infiere que esta zona de susceptibilidad continúe en los municipios vecinos de Lázaro Cárdenas, tanto al norte como hacia el sur. Una zona de media a alta susceptibilidad es reportada en el contacto con los municipios de Solidaridad y Lázaro Cárdenas, mientras que hacia su porción norte y centro-este, se localizan dos zonas de moderada susceptibilidad kárstica, ocupando una de ellas la parte norte de la ciudad de Cancún.

El municipio de Tulum reporta dos zonas de media a muy alta susceptibilidad, una de ellas ocupa todo el margen o zona costera, precisamente en toda la franja donde se tienen reportados una infinidad de sistemas kársticos subterráneos, representados por cavernas y galerías subterráneas, además de seguir la traza en sentido noreste de la estructura Tulum-Río Hondo, siendo esta zona de susceptibilidad una de las de mayor dimensión en el estado. La otra zona se localiza en la porción norte del Estado, continuando en el municipio vecino de Solidaridad.

Solidaridad presenta solo una zona de moderada a muy alta susceptibilidad, esta zona se encuentra bien definida y ocupa gran parte de lo que es la ciudad de Playa del Carmen.

Cozumel presenta una sola zona de moderada a muy alta susceptibilidad, esta zona se localiza en la porción sur de la isla, donde se encuentra la mayor densidad de estructuras kársticas de la isla. Una zona de moderada susceptibilidad es reportada ocupando toda la ciudad de Cozumel y sus alrededores.

El municipio de José María Morelos presenta una zona amplia e importante, localizada al sureste del municipio, muy próxima al límite municipal con Felipe Carrillo Puerto. Otras zonas de moderada a alta susceptibilidad se ubican en los límites estatales con el Estado de Yucatán y Campeche.

Zonas de susceptibilidad kárstica de grado medio a muy alto son localizadas de forma aislada y esparcida en la porción centro y oeste del municipio de Felipe Carrillo Puerto, coincidentemente donde se reportan una red de intersección de sistemas de fracturas.

Para el municipio de Bacalar se reportan tres zonas aisladas de moderado a muy alto grado, distribuidas a lo largo de su límite sur.

Una amplia zona de grado medio a muy alto se localiza en el margen este del municipio de Othón P. Blanco, ocupando áreas de poljes, mientras que otras cinco zonas de menores dimensiones y de grado medio a alto se reportan de forma aislada y distribuidas en su límite municipal norte. Una zona moderadamente amplia y de grado medio a alto se reporta en su porción sur, ubicada en un sistema de fracturas.

3.1.2.5 Conclusiones

Al inicio del tema se comentó que los peligros asociados al *karst* son esencialmente de dos tipos; los asociados a fallas estructurales debidas a la formación de hundimientos o dolinas y el peligro de contaminación de los acuíferos kársticos. En ambos casos, el desconocimiento de los fenómenos kársticos por quienes ocupan y utilizan un terreno con estas características puede exacerbar el peligro e incrementar el riesgo. Estas últimas líneas son de vital importancia para las medidas de prevención, esto implica conocer cómo funciona un sistema kárstico, cuáles son sus procesos, productos, resultados y

evolución.

La roca o litología preferencial, para que ocurran o se presenten estructuras kársticas o susceptibilidad de riesgos kársticos en el Estado, es la unidad formada por calizas de la formación Felipe Carrillo Puerto, aumentando por mucho esta posibilidad cuando en esta litología se presentan estructuras de fallas, fracturas o sistemas de fracturas. La segunda litología preferente para la ocurrencia de estructuras kársticas es la secuencia de calizas y yesos de la Formación Icaiché.

De acuerdo con el mapa estructural que se planteó dentro de los insumos, se definieron 5 zonas o regiones estructurales en el estado: 1 Tierras Altas del Sur, 2 Planicie Central, 3 Planicie Costera, 4 Chetumal y 5 Planicie del Norte. Cada una con características estructurales y kársticas propias.

Se determinó que las estructuras o lineamientos más importantes a nivel regional son: El lineamiento Tulum – Río Hondo (NNE-SSW) y el sistema de fallas Ticul (NW-SE). Siendo el primero de ellos el más importante a nivel regional, teniendo influencia en todo el Estado, y marcando un trend de orientación que va desde aproximadamente el poblado de Holbox, pasando por Leona Vicario, San Martiniano, Tulum, José María Pino Suarez, Felipe Carrillo Puerto, Andrés Quintana Roo, Álvaro Obregón, Xul-Ha y La Unión. Este lineamiento es el responsable de formar una serie de zonas de poljes o tecto-*karst* en la porción centro sur del estado en las inmediaciones del poblado de Bacalar, así como en la parte norte del estado al sur de la localidad de Holbox, además se infiere que sea también responsable de todas las estructuras alineadas en sentido NNE-SSW y ser la causante de una zona de tecto-*karst* en desarrollo o poljes, los cuales se ubican a lo largo de toda su traza. También se infiere que exista una o dos estructuras de iguales características localizada al este de la costa, una que se localiza entre la Isla Cozumel y la costa continental y la segunda localizada al este de la misma isla.

La zona de moderada a muy alto grado de fracturamiento, se encuentra distribuida principalmente al sur del Estado, en donde coincide la intersección de sistemas de fracturamiento que originan una red ortogonal de fracturamiento. La misma situación se presenta con las zonas de moderado a fuerte grado de fracturamiento localizadas en la porción central del estado, donde coinciden con la red de fracturamiento llamada Felipe Carrillo Puerto – San Andrés. Hacia el norte del Estado, destacan las zonas de poljes o tectonokarst, responsables directos de originar zonas de moderado grado de fracturamiento. El lineamiento regional Tulum – Río Hondo presenta un débil a moderado grado de fracturamiento el cual débilmente denota su presencia.

Teniendo en cuenta los datos recabados en la etapa de recopilación, así como a los abundantes datos y observaciones tomadas en las actividades de campo, se puede concluir que las principales estructuras kársticas que pueden detonar un peligro, son aquellas estructuras denominadas cenotes o dolinas, así como las cavernas o galerías subterráneas, por lo que se debe estar atento a los factores que se interrelacionan en ellas.

Los acuíferos kársticos son los de mayor exposición a contaminantes. La contaminación de acuíferos kársticos es un problema ambiental grave a nivel mundial. Las aguas subterráneas de acuíferos kársticos abastecen alrededor del 25% de la población mundial; los acuíferos kársticos tienen características muy particulares (Perrin, 2003; Bakalowicz, 2005) que ocasionan su mayor exposición a contaminantes. La urbanización, industria y las actividades agropecuarias que se realizan en la superficie del *karst* son grandes amenazas de contaminación debido a los residuos que son vertidos hacia los acuíferos. En este punto el estado de Quintana Roo no queda exento, uno de los puntos críticos más fuertes en este sentido fue la contaminación presente en las estructuras kársticas localizadas en las diversas ciudades y poblados que se encuentran a lo largo de todo el Estado, ya sean cenotes o dolinas, la contaminación observada en las actividades de campo ocurre con mayor incidencia e intensidad en aquellas ubicadas en los mayores centros urbanos, y esta fue desde basura hasta aguas negras.

Entre los diversos materiales observados en los cenotes se encuentran llantas, bolsas y envases de plásticos, envases de cristal, cuerpos de animales muertos, aguas negras, madera, escombros, electrodomésticos, baterías, pilas, etc. En vista de lo anterior, es necesario llevar a cabo un muestreo químico de los diversos cuerpos de agua presentes en los cenotes de las diversas ciudades y poblados del estado, con el fin de tomar las medidas de prevención, así como llevar o iniciar un registro histórico de estas aguas.

3.1.2.6 Medidas de prevención y mitigación

Para determinar las medidas de prevención y mitigación, aparte de conocer el funcionamiento del sistema kárstico propio de la península, se deben conocer los factores detonantes que son muy variados, esto depende de las condiciones tan variadas que pueda presentar una zona kárstica. Aunque en el desarrollo de este trabajo se tomaron solo en consideración factores formadores propios de zonas kársticas, no se mencionaron factores detonantes que pueden desencadenar una serie de eventos o tener una alta influencia o aceleración en el proceso de algunos de los productos propios de la karstificación. En este sentido y por lo observado en las actividades de campo, así como a la bibliografía existente, se puede concluir que las principales estructuras kársticas que pueden detonar un peligro son aquellas denominadas cenotes-dolinas, por lo que se deben estar atentos a los factores que se interrelacionan en ellas.

Se ha comprobado que las fluctuaciones en los niveles freáticos pueden ocasionar colapsos repentinos, ya sea por la presencia o carencia de agua. Tomando en cuenta el crecimiento demográfico tan alto así como la fuerte demanda en servicios turísticos, hasta el momento no se ha llevado un registro adecuado de los niveles históricos ni actuales de estos niveles de agua, por lo que se sugiere un control adecuado en tiempo y forma, contando además con otros datos como velocidad de corriente, química, etc., lo que permita obtener el modelo del sistema kárstico subterráneo, sin él, los estudios superficiales de los karst están dificultados por el hecho que sus rasgos superficiales están controlados por el movimiento de las aguas subterráneas, sin todo este conocimiento es imposible interpretar apropiadamente los rasgos superficiales. El control y muestreo de acuerdo con especialistas debe de llevarse una vez por mes, o al menos sugieren una vez por estación.

Por la proximidad de habitaciones o viviendas en la mayor parte de los cenotes o dolinas localizadas en las áreas urbanas, podrían esperarse colapsos repentinos o bien pueden esperarse hundimientos lentos pero constantes en el transcurso del tiempo y posiblemente con una mayor probabilidad de detonarse o acelerarse en épocas de fuertes precipitaciones o inundaciones, por lo que se sugiere como medida de prevención que las construcciones de cualquier tipo, ya sean viviendas o sean vías de comunicación sean construidas en un radio mínimo próximo a dicha estructura kárstica, claro, esto dependerá del tipo y fase evolutiva de la estructura kárstica presente (para ver más detalles véase el apartado de hundimientos).

El plan de desarrollo urbano debe de excluir completamente las áreas o terrenos que presenten o se sospeche de poseer estructuras kársticas, en cualquiera de sus fases evolutivas, así como establecer un cordón o área de amortiguamiento o de seguridad, estas áreas bien pueden tomarse como áreas verdes o recreativas.

Es obvio que toda el área del Estado de Quintana Roo está bajo los efectos y procesos de karsticidad, este fenómeno geológico ha estado actuando hace millones de años. Las medidas legislativas o requisitos para la construcción en este tipo de terrenos deben estar muy bien regulada con requisitos de estudios geológicos, geotécnicos y geofísicos, muy especialmente en aquellas zonas donde exista la evidencia de una karstificación activa, la institución responsable de aplicar estas medidas precautorias deberá ser y cumplir de una manera muy responsable, para evitar pérdidas económicas innecesarias. También deberán adoptarse modelos constructivos que minimicen los riesgos de hundimientos.

En las áreas urbanas donde ya se han detectado estructuras kársticas, se recomienda ampliamente llevar un control

de estas, así como de aquellas áreas donde estas estructuras fueron cubiertas antropogénicamente, este registro de frecuencia y evolución de hundimientos resultara en medidas preventivas para evitar o minimizar los riesgos a la exposición de dichas estructuras.

Promover el apoyo a estudios especializados, tanto geoquímicos, espeleológicos y geológicos que contribuyan a enriquecer el conocimiento del sistema kárstico, lo que conllevara a un mejor entendimiento y dimensión del sistema.

Aunque se ha considerado a la península de Yucatán, y por ende, al Estado de Quintana Roo como una zona asísmica, se ha observado que existen algunos fenómenos sísmicos que si bien no pueden ocasionar grandes daños sí podrían intervenir o influenciar junto con otros fenómenos (tal como lluvias o inundaciones intensas) un colapso en las áreas inmediatas o próximas a estructuras kársticas, de ahí que se desprenda una recomendación de prevención en las áreas inmediatas a estas estructuras retomando lo considerado en cuanto a delimitar áreas de amortiguamiento en párrafos anteriores.

Las vías de transporte son una de las principales infraestructuras que se encuentran afectadas por los fenómenos kársticos, los cuales no son percibidos por la comunidad, el desembolso o partidas asignadas en el mantenimiento correctivo en estas pueden ser millonarias, en este sentido se recomienda la acción de técnicos especializados que se aboquen en la detección de las zonas más propensas a hundimientos en las vías carreteras como en las nuevas zonas de crecimiento de las ciudades con el fin de prevenir a tiempo y forma el gasto y pérdidas innecesarias que pueden resultar en cantidades millonarias.

Las instituciones encargadas del plan de desarrollo urbano, y aquellas que se encarguen de supervisar a las empresas constructoras, deben contar con técnicos especializados con el fin de que estas empresas lleven a cabo los estudios pertinentes en las áreas o terrenos a habilitar y acatar dichas medidas en un sentido inflexible, con el fin de que las medidas y métodos de construcción sean los más adecuados al terreno en cuestión.

3.1.2.7 Referencias bibliográficas

(SEDESOL), S. d. (2004). Guía Metodológica para la Elaboración de Atlas de Peligros Naturales a Nivel Ciudad (Identificación y Zonificación). Pachuca, Hidalgo, México.

(SEDESOL), S. d. (2004). Guía para la Identificación Rápida de Peligros Naturales (en zonas urbanas). Pachuca, Hidalgo, México.

(SGM), S.-G.-M. (2013). Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales del Estado de Yucatán. México: Gobierno del Estado de Yucatán 2012-2018.

A., P.-B. (2001). Investigación y Exploración de Acuíferos Kársticos. Boletín Geológico y Minero, 112(Especial), 65-76.

Aguayo C. J. E., B. R. (1980). Estudio Sedimentológico en el Área Tulum-Cancún-Isla Mujeres, Estado de Quintana Roo, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, XLI(1 y 2), 15-32.

Aguilar-Duarte Y., B. F. (2013). Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación de Acuíferos Kársticos. Tropical and Subtropical Agroecosystems (16), 243-263.

Aguilera-Martínez M. A., C.-L. V. (2006). Carta Geológico-Minera Cancún F16-8, Escala 1: 250 000. Yucatán y Quintana Roo, México: Servicio Geológico Mexicano.

Bauer-Gottwein P., G. B.-V.-A. (July de 2011). Review: The Yucatán Peninsula Karst Aquifer, México. Hydrogeology

Journal, 1-18.

Bautista F., P.-A. G. (2011). Spatial Distribution and Development of Soils in Tropical Karst Areas from The Peninsula of Yucatán. *Geomorphology*(135), 308-321.

C., R.-S. (s.f.). El Inframundo Maya y los Sistemas Kársticos. *Ciencia y Cultura: Arqueología Subacuática*, 38-41.

Cozumel, G. M. (2011). Atlas de Riesgos del Municipio de Cozumel. Cozumel.

Desastres, C. (. (2001). Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México (Primera Edición ed.). (O. Z. Martínez, Ed.) Distrito Federal, México.

Desastres, C. (. (2004). Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Distrito Federal, México.

E., C. C. (27 de Agosto de 2007). Contaminación de Mantos Freáticos en Cancún. *La Jornada Ecológica*. (L. Angulo, Ed.) México. Obtenido de www.jornada.unam.mx/2007/08/27/eco-c.html: www.jornada.unam.mx/2007/08/27/eco-c.html

E., L. R. (1973). Estudio Geológico de la Península de Yucatán.

E., W. K. (1995). Geologic Atlas of Fillmore County, Minnesota: Sinkholes and Sinkhole probability. County Atlas Series Atlas C-8 Part B. (T. M. Fund, Ed.) State Minnesota, E.U.A.

Escolero-Fuentes O. A., M.-S. L.-V.-R. (2005). Programa de Monitoreo de Aguas Subterráneas de la Caleta Xel-Ha y sus alrededores. Informe Técnico para Grupo Xcaret, Universidad Nacional Autónoma de México.

Espinasa-Pereña R., y. N.-T. (2013). Mapa de Susceptibilidad a Fenómenos Kársticos. Centro Nacional de Prevención de Desastres.

F., D.-D. O.-A. (2003). Karst Tropical de Colinas, Tipología y Evolución en el Plio-Cuaternario en República Dominicana. XI Reunión Nacional de Cuaternario, (págs. 123-128). Oviedo (Asturias).

F., P. J. (1984). Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to ground-Water Withdrawal. UNESCO.

F., W. W. (November-December de 1992). Hidrogeologic Factors Affecting New Sinkhole Development in the Orlando Area, Florida. *Groundwater*, 30(6), 918-930.

Festa V., F. A. (August de 2012). Sinkhole Evolution in The Apulian Karst of Southern Italy: A Case Study, with some Considerations on Sinkhole Hazards. *Journal of Cave and Karst Studies*, 74(2), 137-147.

Fragoso-Servón P., B. F. (2014). Caracterización de las Depresiones Kársticas (Forma, Tamaño y Densidad) a escala 1: 50,000 y sus Tipos de Inundación en el Estado de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 31(1), 127-137.

Fraustro-Martínez O., I. T. (2010). Vulnerabilidad a la Inundación en Las Formas Exokársticas del Noreste de la Península de Yucatán. VI Seminario Ibero-Americano de Geografía Física: Universidad de Coimbra, (págs. 1-16). Portugal.

G., P. E.-O. (s.f.). Hidrogeology of the Yucatán Peninsula.

Gaona-Vizcayno S., G.-D. A.-P. (1980). Cenotes, Karst Característico: Mecanismo de Formación. *Revista del Instituto de Geología*, 4(1), 32-36.

Gobernación, S. d. (2015). CENAPRED MEXICO. Recuperado el Julio de 2015, de

<http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/index.php/riesgos-geologicos/hundimientos-regionales-y-locales-agrietamientos>

Gutiérrez F., C. A. (2008). Identification, Prediction and Mitigation of Sinkhole Hazards in Evaporite Karst Areas. *Geology*, 53, 1007-1022.

Gutiérrez F., P. M. (s.f.). A Review on Natural and Human-Induced Geohazards and Impacts in Karst. *Earth-Science Reviews* (138), 61-68.

K., B. D. (2014). Geology and Sinkhole Development of the Hagerstown Valley: Phase Summary Report. Research Report, State Highway Administration, Maryland Department of Natural Resources, Resources Assessment Service and Maryland Geological Survey.

L., B. G. (1984). Fracture Mapping and Ground Subsidence Susceptibility Modeling in Covered Karst Terrain: The Example of Dougherty County, Georgia. (C. a. Johnson, Ed.) 595-606.

L., F. (August de 2005). Using State-Wide GIS Data to Identify the Coincidence Between Sinkhole and Geologic Setting Structure. *Journal of Cave and karst Studies*, 67(2), 120-124.

Laboratory, N.-J. P. (2003). Anaglyph Yucatán Península México. Imagen.

Lemus-Bustos O., M.-F. J. (2006). Carta Geológico-Minera Cozumel F16-11 Escala 1: 250 000. Quintana Roo y Yucatán, México: Servicio Geológico Mexicano.

Loeza-García J. P., J.-H. A.-L.-A.-C.-H. (2006). Carta Geológico-Minera Felipe Carrillo Puerto E16-1 Escala 1: 250 000. Campeche, Yucatán y Quintana Roo, México: Servicio Geológico Mexicano.

Lugo-Hubp, J. A.-Q.-P. (1992). Rasgos Geomorfológicos Mayores de la Península de Yucatan. (UNAM, Ed.) *Revista del Instituto de Geología*, 10(2), 143-150.

M., D.-R. M. (2002). Karst Subsidence in South-Central Apulia, Southern Italy. *International Journal Espeleology* (31), 181-199.

M., O.-C. I.-R. (2010). Formas Kársticas Comunes de los Cenotes del Estado de Quintana Roo. *Revista Electronica de Medioambiente UCM*, 1-20.

M., R.-V. (2009). Aspectos Geológicos de la Cuenca del Caribe. (I. G.-A. Espinoza-Avalos J., Ed.) *El Sistema Ecológico de la Bahía de Chetumal/Corozal: Costa Occidental del Mar Caribe*, 5-11.

Marín-Stillman L. E., P.-A. G.-R. (2005). Hidrogeología de la Península de Yucatán. En J. B. L., *El Agua en México Vista desde La Academia*, Academia Mexicana de Ciencias (pág. 411).

Mejía-Ortiz L. M., Y. G.-M.-G. (2007). Cenotes (Anchialine) On Cozumel Island, Quintana Roo, México. *Journal of cave and Karst Studies*, 69(2), 250-255.

Mexicanos, P. (2013). Provincia Petrolera Plataforma de Yucatán. Técnico, *Petróleos Mexicanos*, Subdirección de Exploración y Producción.

P., F. D. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley Editorial.

Pueyo-Anchuela O., A.-L. D.-J.-S.-L.-A. (2012). Consideraciones Sobre la Construcción en Zonas Kársticas Activas. Caso de la Avenida de Las Estrellas de Zaragoza. *Geogaceta* (51), 63-66.

- R., E.-P. (12 al 15 de Mayo 2015). Riesgos Kársticos: El Origen de Cavernas y Cenotes. Playa del Carmen.
- R., E.-P. (Octubre-Noviembre de 1994). Origen y Distribución de las Cavernas de México. *Ciencias* (36), 45-49.
- R., G. (2008). *Compilation and Production of a Karst Map of México* (abstract). (A. G. Union, Ed.)
- Rodríguez-Velázquez, R.-C. R. (2006). Consecuencias Sociales de un Desastre Inducido, Subsistencia. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(2), 265-269.
- Sánchez-Rojas L. E., B.-N. L.-M. (2007). Carta Geológico-Minera Estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán. Primera Edición. (S. G. Mexicano, Ed.) Pachuca, Hidalgo, México.
- Sartain N., M. J. (2011). Case Study on The Assessment of Sinkhole Risk for the Development of Infrastructure Over Karstic Ground. (S. S. Vogt, Ed.) *Bundesanstalt fur Wasserbau*.
- Schmitter-Soto J. J., C. F.-B.-S.-M.-E.-A. (2002). Hidrogeochemical and Biological Characteristics of Cenotes in The Yucatán Peninsula (SE México). (A. J. S., Ed.) *Hydrobiologia* (467), 215-228.
- Simón J. L., S. M.-A. (2009). Riesgo de Subsistencia Kárstica en Areas Urbanas: El Caso de Zaragoza. *Enseñanza de Las Ciencias de la Tierra*, 17(3), 303-315.
- Simón-Gómez J. L., S.-J. M.-C. (Octubre de 1998). Estudio de Riesgos de Hundimientos Kársticos en el Corredor de la Carretera de Logrono. (D. d. Zaragoza, Ed.) *Memoria Informativa*.
- Tamaulipas, G. d. (2012). Atlas de Riesgo del Municipio de Nuevo Laredo. Nuevo Laredo, Tamaulipas.
- Tamaulipas, G. d. (2009). Atlas de Riesgos Municipio de Tampico, Madero y Altamira. Servicio Geológico Mexicano.
- Tulum, G. M. (2015). Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Tulum, Quintana Roo.
- Z., W. (May de 1997). The Formation of Sinkhole in Karst Mining Areas in China and Some Methods of Prevention. *Environmental Geology* (31).
- Zarate-Barradas R. G., M.-H. A.-B.-F.-P. (2006). Carta Geológico-Minera Mérida F16-10 Escala 1: 250 000. Campeche, Yucatán y Quintana Roo, México: Servicio Geológico Mexicano.
- Zarate-López J., A.-L. F.-P. (2005). Carta Geológica-Minera Chetumal E16-4-7 Escala 1:250 000. Primera Edición. (S. G. Mexicano, Ed.) Quintana Roo, Campeche, México: Servicio Geológico Mexicano.
- Zarate-López J., L.-G. J.-G.-H. (2006). Carta Geológico-Minera Bahía Ascención E16-2-5, Escala 1: 250 000. Quintana Roo, México: Servicio Geológico Mexicano.

3.1.3 Inestabilidad de laderas, el caso de Tulum

En el Estado de Quintana Roo, el sector turístico propicia un acelerado crecimiento poblacional, que demanda servicios sanitarios que rebasan la capacidad de servicio de los municipios. De acuerdo con el censo de INEGI 2005, la población del estado de Quintana Roo era de 1'135,309 habitantes, mientras que las proyecciones de crecimiento del CONAPO, estiman que esta entidad crecerá al 2012 en 324,385 habitantes; y se proyecta una población al año 2020 de 1'880,019 habitantes, lo que representa un incremento de 947,290 habitantes (83%) respecto de la población del 2005. A este respecto, el plan de desarrollo urbano de Tulum, con un alto índice de crecimiento, tiene una presión adicional sobre los insumos y satisfactores tanto para el turismo como para la población. Lo anterior, plantea un extraordinario desafío para el

desarrollo de la infraestructura de servicios de abastecimiento de agua potable y de sistemas de recolección, tratamiento y disposición de las aguas residuales de la región, además de lograr un desarrollo urbano adecuado y sustentable.

La Península de Yucatán presenta rasgos estructurales característicos de formaciones kársticas, los cuales evolucionan como resultado de la acción erosiva del agua sobre las formaciones calizas que actúan sobre la piedra, disolviéndola, lo cual, tras largos periodos de tiempo, deriva en la formación de cámaras o cavidades subterráneas, conocidas como conductos de disolución. Estas condiciones no permiten la presencia de corrientes superficiales importantes, por lo que gran parte de la precipitación pluvial se evapotranspira y el resto se infiltra al manto subterráneo a través de fracturas, oquedades y conductos kársticos de las calizas. Derivado de esta estructura, el acuífero de la región se ve favorecido por la recarga del agua de lluvia (25,000 hm³), y a su vez es altamente vulnerable a la contaminación que se genera en la superficie. La vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, va de extrema (costa), a alta (interior de la península), propiciado por el origen geológico de la roca que almacena el agua, donde la fracturación, la porosidad de la roca calcárea y la presencia de oquedades, contribuyen a una alta permeabilidad y conductividad hidráulica, lo cual facilita la entrada de contaminantes y su rápida propagación.

La importancia de la protección y conservación de estas formaciones geológicas y su hidrodinámica, estriba en que en los estratos superiores de su interior, se almacena el agua subterránea aprovechable, que es la principal fuente de abastecimiento de todas las actividades de los sectores productivos de la Península, y constituye la principal opción como fuente de abastecimiento para el uso público-urbano.

En los acuíferos costeros, existe una cuña de agua salada que subyace al acuífero dulce, esta condición limita el espesor de agua aprovechable, así como el gasto de explotación que se pueden extraer sin deteriorar la calidad del agua. En esta zona, el flujo subterráneo se encuentra conectado directa o indirectamente con lagunas de aguas marinas interiores y el mar; transportando subsecuentemente al medio marino, diversos nutrientes y elementos producto de las actividades en tierra. Los flujos de aguas subterráneas al mar son conocidos como "ojos de agua", que son grietas o fisuras en el subsuelo marino donde sale continuamente agua salobre

Dada la fragilidad del acuífero costero y su zona arrecifal, se requieren de acciones coordinadas y corresponsables de sociedad y gobierno, para impulsar las acciones de saneamiento de las aguas contaminadas, así como el manejo adecuado de residuos y sustancias contaminantes, tendientes a la conservación del recurso hídrico, propiciando su manejo integral y sustentable.

La problemática identificada en el municipio de Tulum, Quintana Roo, que afecta directamente al sistema acuífero y que se traslada al medio marino, corresponde principalmente a: falta de un sistema de colección y tratamiento de aguas residuales, disposición final inadecuada de aguas residuales, cambio de uso de suelo y pérdida de cobertura forestal, fuentes de recarga urbana, deficiencia de depósitos y tratamiento de residuos sólidos (rellenos sanitarios), falta de control y planeación de desarrollo de granjas porcícolas y avícolas, falta de control en el uso de fertilizantes y pesticidas, y contaminación de los acuíferos por agua salada debido a la sobre explotación

El fenómeno de Remoción en Masas, también conocido como Inestabilidad de Laderas, es uno de los riesgos más importantes, ya que tiene un impacto importante en cuanto a daños materiales y vidas humanas. Las pérdidas socioeconómicas son cada vez más cuantiosas, debido a la expansión de asentamientos humanos en zonas de laderas inestables, estos eventos ocurren particularmente en zonas donde el relieve es accidentado. Existen factores que controlan y detonan el evento; tales como el tipo de roca; las condiciones geométricas y estructurales del macizo de roca; la incidencia de lluvias extremas; el clima; actividades antrópicas; y asentamientos irregulares; lo que contribuye a acelerar el proceso de

inestabilidad de laderas.

La Remoción en Masa o movimientos de ladera ocurre cuando se rompe el equilibrio de una porción de los materiales que componen una ladera o talud y se deslizan bajo la acción de la gravedad. Engloba procesos como deslizamientos, flujos, caída de bloques, reptaciones, avalanchas y movimientos complejos (CENAPRED, 2006).

En general, la península de Yucatán presenta un riesgo bajo por inestabilidad de laderas de acuerdo con una regionalización de deslizamientos del país que establece cuatro niveles, muy alto, alto, medio y bajo (Herrera, 2002). Esta clasificación está basada en la presencia de una morfología del terreno pene-plana, producto de la disposición prácticamente horizontal de un sustrato formado de rocas carbonatadas que conforman la mayor parte del territorio estatal de Quintana Roo.

En la porción meridional, la continuidad de los estratos es interrumpida por fallas que dan al terreno una configuración escalonada. Estas fallas, de decenas de kilómetros, se manifiestan en escarpes con desniveles poco perceptibles localmente, algunas de ellas han dado origen a fosas convertidas en pantanos, lagos y lagunas. Otra característica de la Península de Yucatán es la ausencia de escurrimientos superficiales, ya que la elevada precipitación pluvial, aunada a la elevada, con un nivel freático actual muy próximo a la superficie del terreno y que ha tenido grandes oscilaciones en los últimos 20,000 años (Ordoñez y García, 2010), así como la capacidad de infiltración del terreno y la reducida pendiente topográfica, favorecen la recarga del agua subterránea en toda su superficie y entonces propicia que los escurrimientos superficiales sean escasos, de régimen transitorio, bajo caudal y muy corto recorrido (Gobierno Municipal de Solidaridad, Estado de Q. Roo, 2007).

Por todo lo señalado en los párrafos anteriores, en el Estado de Quintana Roo, las afectaciones por el fenómeno de Remoción de Masas representan un impacto mínimo en la población, en infraestructura material y en las actividades productivas de la región.

El recién elaborado Atlas de Riesgo del Municipio de Tulum (2015), señala que en las inmediaciones de los edificios arqueológicos de Tulum y en general, a lo largo de toda la costa de ese municipio, se presentan bloques y caídos provocados por abrasión y erosión costera. En estos sitios, la costa está clasificada como de tipo abrasivo y presenta características de playa con pendiente abrupta o en porciones con cortes de pequeños acantilados (3 a 9 metros de altura) que propician la erosión química y mecánica de la roca, que al socavar la base produce, por gravedad, el desprendimiento y caída de fragmentos rocosos de diferentes dimensiones (Atlas de Riesgo del Municipio de Tulum, 2015). Este fenómeno ocurre también en el proceso de colapso de los cenotes (ver capítulo correspondiente de este trabajo). Por otra parte, la intensa actividad turística, es decir, la actividad antrópica en esas zonas, aceleran el proceso de erosión costera.

Si bien el efecto de la gravedad es un factor importante en la producción de los caídos, no pueden ser considerados como producto del fenómeno de Remoción de Masas, como se señaló en el principio de este apartado, la acción del acuífero y de las corrientes marinas por presión osmótica es un factor muy importante a considerar. Es conveniente realizar un estudio específico que permita conocer la acción concreta en tiempo y espacio de los factores que producen la erosión costera y evaluar su efecto para conocer el grado de peligro que estaría presente a lo largo de las costas con estas características. Otro factor a considerar es la acción producida por la karsticidad en la región.



Fotografía 7. Detalles de la erosión eólica e hídrica provocada por las mareas bajo el castillo de Tulum.

Por otra parte y complementando lo anterior el Atlas de riesgos naturales del municipio de Tulum Quintana Roo 2015 (Pérez Moreno, 2016), menciona en el capítulo de hundimientos:

5.2.9. HUNDIMIENTOS.

Los hundimientos pueden definirse como movimientos lentos o rápidos descendentes del terreno, provocados por condiciones de inestabilidad de los materiales subyacentes, generando la apertura de oquedades en la superficie de dimensiones y geometría variable, que puede ser colmatada generando formas del relieve embudiformes, como es el caso de los procesos con mayor presencia dentro del territorio Municipal de Tulum.

Los hundimientos se pueden generar por causas fundamentalmente naturales, pero eventualmente pueden ser generados por actividades humanas. Para el caso del hundimiento observado en el territorio tulumense, se trata sobre todo de hundimientos por el desarrollo de procesos de karstificación, ya que las rocas carbonatadas conforman prácticamente todo el terreno municipal, lo que determina el desarrollo de formas, tales como dolinas, úvalas, cenotes y de numerosas cavidades en el subsuelo. Con el paso del tiempo, el techo de estas cavidades puede ceder, desarrollándose dolinas "pozo" o incluso simas de tamaño y morfología sumamente variable. Una característica sobresaliente que se presenta dentro del terreno del Municipio de Tulum, es que estas formas kársticas alcanzaron el nivel de aguas freáticas configurando los cenotes y las dolinas inundadas algunas como las lagunas Verde y La Unión, en la zona de Cobá, o las lagunas La Unión y Chumkopo, ubicadas dentro de la depresión donde se ubica la Ciudad de Tulum. El hundimiento se puede acelerar o desencadenarse si se construye sobre terrenos kársticos, ya que se produce una sobrecarga inducida lo que puede estar registrándose en zonas de la costa y dentro del límite urbano principalmente de la Ciudad de Tulum.

Como es posible observar en la figura 36, este proceso se registra principalmente hacia la zona costera del Municipio de Tulum, donde se determinó como zona con MUY ALTO GRADO DE RIESGO (en color rojo), teniendo una superficie de 428.02 kilómetros cuadrados, lo que representa el 20,97% del territorio, esta zona comienza su desarrollo a partir de la cota 14.00 m.s.n.m., su importancia radica en que en esta zona se encuentra prácticamente el 75.67% de la población del municipio, así mismo, se localiza la zona con el desarrollo turístico y la mayor infraestructura urbana y de comunicación, por lo que se debe desarrollar cuanto antes las políticas de prevención de riesgos por hundimientos, debiendo considerar que dentro de los factores causales de este tipo de fenómenos perturbadores tenemos que las construcciones pueden acelerar al proceso.

Otra zona de importancia, es la señalada como de Alto Riesgo (en color naranja), es la depresión de Cobá, zona con 218.85 kilómetros cuadrados, el 10.72% de la superficie municipal, con una altura que va de los 26.00 m.s.n.m. hasta los 6.00 m.s.n.m., su importancia radica en que en esta depresión se localiza la importante Zona Arqueológica de Cobá. Así mismo, en esta depresión se localizan dos cuerpos de agua de dimensiones importantes, los cuales, desbordan sus agua inundando una superficie considerable de la Ciudad de Cobá, así como a la carretera que comunica a esta localidad con la carretera 109, proceso de inundación que se verá en desarrollo debido a que se debe considerar que el hundimiento de esta depresión se debe acelerar, ya que actualmente se está llevando a cabo la tala de la selva motivando una mayor afectación por karsticidad y su consecuente colapso del terreno. Es urgente considerar implementar medidas que mitiguen tanto la karsticidad, como la inundación, ya que la acumulación de agua provocará la presencia de zonas de colapso con desarrollo rápido poniendo en riesgo a la población y sus diferentes actividades sociales y económicas. De acuerdo al Anuario Estadístico para Quintana Roo, los habitantes registrados para las dos poblaciones ubicadas dentro de esta depresión, Cobá y San Juan de Dios, fue de 1,877 habitantes, lo que representa el 6.64%. Por lo que, entre la zona costera y esta depresión, se estima que se encuentran en riesgo el 82.31% de la población municipal.

De no menos importancia, se observa a las zonas bajo procesos de hundimiento con niveles de riesgo medio, bajo y muy bajo, en colores, naranja, verde claro y verde correspondientemente, cuyas superficies son de 228.46, 278.46 y 887.11 kilómetros cuadrados representando el 11.20%, 13.64% y 43.47% del territorio municipal.

A pesar de que el 43.47% de la superficie municipal se registra como con muy bajo nivel de riesgo por hundimiento, es importante hacer mención que el proceso de hundimiento que se registra en el territorio municipal de Tulum, se está acelerando por la falta de medidas preventivas que tienen que ver para este caso en específico, con la tala de la selva y su consecuente descubrimiento del lecho rocosos, aumentando la superficie de intemperización y por lo tanto acelerando la generación de karsticidad y por lo tanto, mayores superficies de ser susceptibles de hundirse o colapsarse.

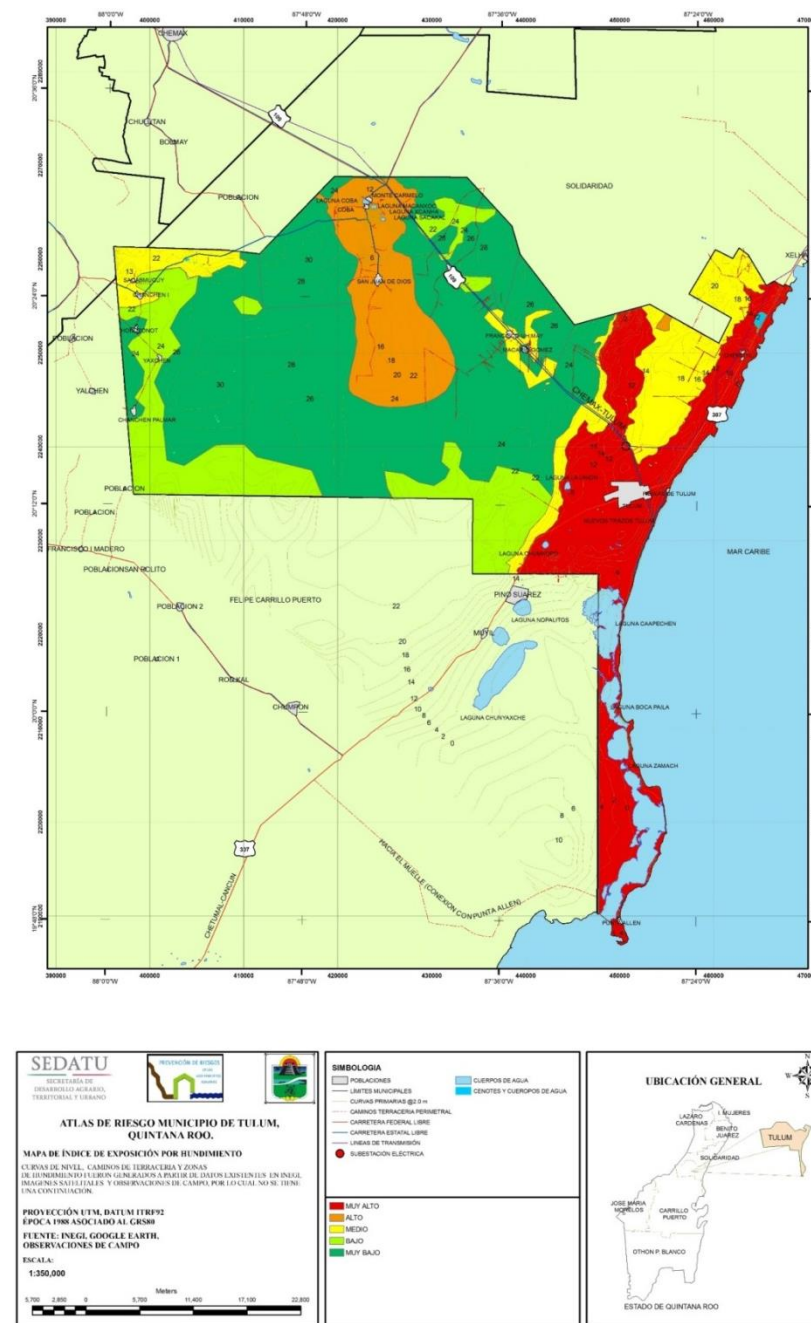


Figura 33. Mapa de Índice de exposición a hundimientos (Fuente: Atlas de riesgos naturales del municipio de Tulum).

De acuerdo a lo observado durante los recorridos para la elaboración del presente Atlas, fue posible evidenciar que las calles de la Ciudad de Tulum, las carreteras y los caminos, pero sobre todo el camino que va de Tulum a Punta Allen, presentan serios rasgos de averías por hundimiento del terreno, lo que hace pensar que se está desarrollando una etapa de aceleración del proceso de riesgo por hundimiento, por lo que es urgente se desarrollen trabajos de campo que permitan evaluar de mejor manera a este proceso buscando establecer las medidas para prever o mitigar los efectos de este fenómeno perturbador.

3.1.4 Hundimientos en ciudad

3.1.4.1 Introducción

Un hundimiento es representado por una topografía negativa, debido al asentamiento que experimenta el terreno por efecto de la acción de cargas o fuerzas que alteran el estado de equilibrio del terreno natural y su escala de observación varía dependiendo del tamaño de hundimiento (UQ. ROO, 2011; CENAPRED, 2013).

De acuerdo con CENAPRED, los hundimientos presentes en el estado son de carácter local, los cuales son causados por el colapso del subsuelo o de la roca en zonas donde existen huecos o cavidades producidas por excavaciones, obras subterráneas, erosión interna o karsticidad.

Si bien los hundimientos generalmente se asocian principalmente a la sobreexplotación de los mantos acuíferos, en el caso de las ciudades de la península de Yucatán, y enfocando al estado de Quintana Roo, son otros factores los que los propician, en este caso son los fenómenos relacionados al proceso de karstificación y sus procesos relacionados los responsables directos de los hundimientos reportados.

Si se comprende el origen y procesos de los hundimientos se pueden predecir áreas susceptibles a hundimientos y por lo tanto tener herramientas que permitan la toma de decisiones en el diseño y crecimiento de la ciudad, así como sus vías de comunicación, aunado a la protección de sus habitantes.

Aunque en el Estado se presentan hundimientos en todas las ciudades y poblados, por sus características demográficas y desarrollo se implementaron estudios sobre las 4 ciudades principales que son: Cancún, Playa del Carmen, Tulum y Chetumal.

Con respecto a las ciudades citadas, se tiene una abundante bibliografía en cuanto a hundimientos históricos y actuales, no obstante, la existencia de esta información, no se han llevado a cabo estudios detallados sobre este fenómeno.

El resultado de este trabajo fue la delimitación de zonas de susceptibilidad a hundimientos en cada ciudad, así como el análisis a profundidad de cada una de las variables o factores principales que ocasionan tales hundimientos, como son su contexto geológico-estructural, entre otros, así como los factores detonantes de estos procesos.

3.1.4.2 Metodología

Hasta el momento no hay una metodología para la elaboración de mapas de peligro por hundimiento. Para el desarrollo de los mapas por hundimiento del presente Atlas se consideró elementos y variables que ha tomado en cuenta CENAPRED, SEDATU y SGM.

En el caso de la metodología aplicada para la obtención de un mapa de susceptibilidad de hundimientos, se tomaron en cuenta los siguientes factores que a consideración son los más importantes para la generación de hundimientos. Sin embargo, antes de elaborar cualquier mapa se consideraron las definiciones de lo que es un hundimiento, sus tipos, evolución y factores detonantes.

Cada ciudad fue interpretada individualmente, desde su contexto geológico, topográfico, estructural y kárstico. Las escalas trabajadas en ellas fueron variables desde 1: 5,000 hasta 1: 25,000, dependiendo de la extensión de dicha ciudad, también fueron interpretadas y estudiadas las áreas circundantes a cada ciudad, con el fin de que los mapas resultantes pudieran ser útiles en la toma de decisiones en aspectos de desarrollo urbano.

Para la elaboración de los distintos mapas, fue necesaria la utilización de una malla o retícula para cada ciudad, esta retícula está formada por celdas individuales de 300 m x 300 m con un punto central o centroide como identificador y el cual tomaba las propiedades de los diversos valores de cada celda, como son número de estructuras kársticas, hundimientos, intensidad de fracturamiento, entre otros.

El mapa final resultante, denominado mapa de susceptibilidad por hundimientos, resultado de la integración de los siguientes mapas o factores que fueron mapa geológico, densidad de estructuras kársticas, nivel estructural, hundimientos y en algunos casos de depresiones topográficas.

3.1.4.3 Desarrollo

Al igual que en los otros dos temas, el tema de hundimientos no puede ser desvinculado del proceso de karsticidad, el cual lo origina. Por lo tanto, este tema comparte mucho en el desarrollo con los temas de inventario por karsticidad y peligro por karsticidad. Al igual que en los temas de inventario de cenotes y peligro por karsticidad el tema fue desarrollado en cuatro etapas, las cuales se describen a continuación:

La primera etapa consistió en la recopilación, revisión y análisis de los reportes de hundimientos para cada ciudad en cuestión. Esta etapa se realizó en común con el tema de inventario de cenotes y peligro por karsticidad. La información recopilada para este tema consistió en artículos científicos, notas de internet, notas periodísticas locales, libros y mapas. Cada una de estas fuentes bibliocartográficas fue revisada y analizada, obteniendo datos valiosos sobre estos hundimientos, entre estos datos se cuentan coordenadas, dirección, dimensiones, profundidad, entre otros. Toda la información obtenida se manejó en un software de sistemas de información geográfica ArcGis versión 10.2.

También en esta etapa se generaron los mapas bases de cada ciudad, en este caso las ciudades elegidas para este estudio fueron: Cancún, Playa del Carmen, Tulum y Chetumal. El mapa base consistió en prácticamente un mapa de toda la ciudad con toda la infraestructura que estas tienen, como son calles, manzanas, fraccionamientos, parques, instalaciones eléctricas, entre otros, además de plasmar en cada uno de ellos una topografía a detalle con curvas de nivel a cada metro. Las escalas de trabajo fueron variables desde 1:5,000 a 1: 25,000. Dependiendo de lo extenso de la ciudad o poblado.

La segunda etapa consistió en actividades de campo, con el fin de realizar un mapa de inventario de cenotes y hundimientos en cada ciudad. Estas actividades de campo se realizaron en diferentes tiempos para cada ciudad, con la finalidad primordial de confirmar los datos obtenidos bibliográficamente, así como obtener otros datos de las estructuras kársticas y hundimientos como son: tipo o clase, litología, planos estructurales, presencia de agua, profundidad, infraestructura cercana, infraestructura afectada, entre otros. En el reconocimiento en campo de las estructuras kársticas y hundimientos, se llenaron fichas adecuadas para la obtención de datos de las mismas (para más detalles ver apartado de inventario de cenotes).

El tercer paso en el desarrollo de este tema fue la captura, proceso, interpretación y análisis de la recolección de datos de campo y datos bibliográficos. Para realizar un mapa de susceptibilidad por hundimientos, es necesario tener en cuenta factores como densidad de estructuras kársticas, litología, planos geológico-estructurales y hundimientos, para lo cual se generaron mapas de cada uno de ellos. Aunque un mapa topográfico a detalle con curvas de nivel a cada metro o medio metro no es un factor que conlleve a un hundimiento, estos son una herramienta de grandísima ayuda, por lo cual también se menciona el desarrollo de su obtención. El desarrollo para la obtención de cada producto se describe a continuación, cabe mencionar que cada producto fue elaborado para cada ciudad en específico.

Mapas topográficos a detalle. - En las ciudades de Cancún y Playa del Carmen se utilizó topografía a detalle obtenida

de imágenes LIDAR. Estas imágenes se procesaron en el programa Global Mapper 15.2 para obtener curvas de nivel a medio metro. Este procedimiento consistió en desplegar las imágenes LIDAR en este programa, se le especificó que generara un modelo de elevación a partir de los puntos de altitud (Elevación Gris from 3D Point Data) y que el resultado fuera en coordenadas UTM. Una vez teniendo el modelo de elevación se procedió a generar las curvas de nivel, para lo cual desplegamos la ventana "análisis", generamos contornos a partir de un modelo de elevación de terreno (Generate counturs (from Terrain Grid), y finalmente especificamos curvas a cada medio metro (interval countour). La capa de curvas de nivel generada en este programa se exportó en formato vectorial tipo *shapefile* para trabajar esta información en ArcMap 10.2.

Para la interpretación de lineamientos de la ciudad de Tulum y Chetumal, se utilizó la topografía generada cada medio metro a partir del modelo de elevación del servidor *SRTM WorlWide Elevation Data (3 Arc Second Resolution)*. Para generar esta topografía se abrió el *shapefile* del límite del municipio de Tulum en el programa Global Mapper, posteriormente se desplego el modelo de elevación SRTM que se encuentra disponible en este programa en los datos del relieve en línea (terrain data). Una vez desplegado este modelo se generaron las curvas de nivel a medio metro siguiendo la metodología que se realizó para generar la topografía a partir de imágenes de radar, teniendo como resultado curvas de nivel en formato vectorial tipo *shapefile*.

Otros usos muy efectivos para estos mapas de topografía a detalle fue la identificación de estructuras kársticas, las cuales se verificaron en las salidas de campo. También otro uso muy útil fue la identificación de zonas bajas o depresiones locales, las cuales como se verá más adelante están fuertemente relacionadas con la concentración de estructuras kársticas y hundimientos.

Mapa estructural. - Para realizar el mapa estructural, se utilizaron como base los mapas topográficos a detalle realizados en el paso anterior. Cada ciudad y sus alrededores fue interpretada visualmente, haciendo énfasis en el comportamiento de las líneas o curvas de nivel además de su red hidrológica. Paralelamente también se interpretaron las imágenes de satélite provistas por google earth, además se consultaron los diversos mosaicos de fotografías aéreas provistas por el INEGI. El resultado de esta interpretación fue un mapa de lineamientos interpretados (mapa estructural), el cual fue la base o suministro para realizar y obtener el grado de fracturamiento de cada poblado.

De esta forma, el mapa fue procesado y analizado digitalmente, con lo cual se obtuvieron tres mapas raster denominados Mapa de Frecuencia de Fracturamiento; Mapa de Longitud de Fracturamiento; y Mapa de Intensidad de Fracturamiento. Estos tres mapas fueron obtenidos sobreponiendo y utilizando una misma cuadrícula o malla con celdas de 300 m x 300 m, es decir, de 90,000 m² el total de celdas obtenidas fue variable, dependiendo directamente del tamaño de la ciudad en cuestión. Cada celda fue identificada por un punto central o centroide, al cual se le asignaron valores. Los valores asignados en este caso fueron: la frecuencia de fracturamiento, que captura la cantidad de lineamientos que contiene cada celda. La longitud de fracturamiento que captura la sumatoria de las longitudes de cada uno de los lineamientos presentes en cada celda, mientras que la intensidad de fracturamiento captura el número de intersecciones de lineamientos resultantes en la celda respectiva. Posteriormente, con los valores en todas las celdas fue realizado un raster, produciendo así un mapa respectivo para cada caso. Después se unen los mapas o raster de frecuencia de fracturamiento, mapa de longitud de fracturamiento y mapa de intensidad de fracturamiento para generar un raster definitivo llamado Grado de Fracturamiento.

Mapa de hundimientos.-. Para la obtención de este mapa, se realizaron actividades alternadas de gabinete y campo, con el fin de obtener un mapa de hundimientos históricos bibliográfico y un mapa de campo con los hundimientos más recientes.

El mapa de hundimientos histórico se realizó en base a toda la información recopilada en notas, principalmente periodísticas, de las cuales se obtenían fechas, lugar, dirección, y otros datos que pudieran servir para este fin.

El mapa de hundimientos actualizado se realizó con actividades de campo. La etapa de campo en la que se levantaron los hundimientos de forma puntual se efectuó realizando caminamientos a lo largo de las calles de las ciudades, observando y buscando rasgos que delataran presencia de hundimientos, estos rasgos son fracturas (tanto en calles, banquetas, edificios, canchas, etc.), hundimientos y ondulaciones en pavimento, encharcamientos, desniveles, presencia de edificios o casas con ligeras inclinaciones, presencia de banquetas no alineadas, hundidas o dislocadas, despegue de estructuras como banquetas separadas, pisos separados de edificios, vitropisos despegados y fracturados, desnivel del terreno, etc. Cada punto de hundimiento fue levantado usando equipos de GPS y una cámara Nikon (con GPS integrado). Este tipo de cámara permitió obtener fotos geo posicionadas espacialmente. Todos estos datos fueron capturados en una ficha previamente diseñada para ello.

Los mapas generados de la cartografía de hundimientos fueron el mapa de densidad de hundimientos. Para elaborar este mapa, se utilizó la misma malla con celdas de 300 m x 300 m, a la cual se le identifico con un punto central o centroide, al cual se le asignaron los valores de la cantidad de hundimientos presentes en la celda respectiva, posteriormente de estos datos se obtuvo un raster, el cual se denominó mapa de densidad de hundimientos.

Mapa de inventario de estructuras kársticas. - Para este caso, se utilizó el mapa de inventario de cenotes realizado en este mismo estudio, del cual se obtuvieron las áreas correspondientes a las ciudades en cuestión. Los datos obtenidos de las estructuras kársticas de las cuales la mayor parte fueron cenotes/dolinas, fueron sobrepuestas en una malla de 300 m x 300 m, la cual ya ha sido mencionada anteriormente, a cada celda se le asignó un valor correspondiente al número de estructuras kársticas que se encuentran en dicha celda y posteriormente se generó un raster. Para más detalles de la identificación y elaboración del mapa de inventario de cenotes se recomienda consultar el apartado correspondiente en el cual se detalla su metodología y desarrollo.

Cada ciudad fue analizada en los diferentes aspectos anteriormente mencionados, los resultados de este análisis pueden verse en el apartado de resultados. El mapa resultante de la integración de los mapas de inventario de cenotes, mapa de densidad de hundimientos, mapa del grado de fracturamiento, mapa geológico y zonas bajas o depresiones kársticas fue el mapa de susceptibilidad de hundimientos, el cual también fue analizado y revisado.

La última etapa del desarrollo de este estudio lo compone la elaboración de este informe final en el cual se plasman todos los pasos, procesos, análisis, y la producción de los mapas finales resultantes.

3.1.4.4 Resultados

Para iniciar este tema es necesario entender los términos y textos descritos más adelante, por lo cual comprender los siguientes términos y definiciones para lograr una mayor comprensión del tema es necesario.

El subsuelo o terreno en Quintana Roo se encuentra formado por dos unidades, capas u horizontes litológicas principales, uno superior y otro inferior: El horizonte inferior es la roca calcárea y el superior es el horizonte de suelo. La roca calcárea es generalmente sólida y compacta, aunque en ocasiones se encuentra conteniendo o formando huecos o espacios vacíos, estos espacios vacíos son de diversos tamaños, algunos llegan a ser tan grandes que conforman estructuras kársticas como son cenotes, dolinas o cavernas subterráneas, entre otros. Esta roca calcárea es cubierta en su mayor parte por la capa o el horizonte de suelo, el cual se presenta de diferentes espesores, los cuales van desde 1 hasta 70 cm, este suelo generalmente suele ser inconsolidado y formado por limos y arcillas, así como por arenas de grano fino a grueso. En

ocasiones el humano puede ser capaz de depositar o formar este horizonte de suelo en algunas áreas, principalmente en las áreas donde se construyen viviendas, así como infraestructura, es decir en las ciudades o poblaciones. Pues bien, cuando el terreno se hunde puede afectar o darse en estos dos niveles u horizontes, afectando tanto a la roca calcárea como al horizonte de suelo, o bien afectar a solamente uno de ellos.

De acuerdo a lo revisado y analizado, así como a los datos bibliográficos y de campo, se pueden determinar que en el estado ocurren dos tipos o clases de hundimientos. Dependiendo si en el hundimiento implicado existe o no existe suelo, que es el factor clave en el mayor número de casos de hundimientos en las ciudades. Así tenemos que los hundimientos pueden clasificarse como: Hundimientos de Colapso y Hundimientos por Subsistencia.

Los hundimientos de colapso son hundimientos repentinos que ocurren en lapsos de tiempo muy cortos (segundos a minutos), mientras que los hundimientos por subsistencia son movimientos lentos que transcurren a través de un lapso de tiempo considerable.

Los hundimientos locales por colapso pueden darse en dos modalidades, ya que pueden ocurrir en aquellos terrenos kársticos con horizontes de suelo y sin horizontes de suelo. En los terrenos kársticos sin suelo estos hundimientos solo afectan a la roca calcárea en donde se presenta la karsticidad, es decir con estos colapsos se desarrollan y evolucionan los muy conocidos cenotes o estructuras kársticas llamadas también dolinas. Mientras que en terrenos kársticos con una cubierta de suelo moderadamente consolidada se presentan principalmente en las poblaciones o ciudades y generalmente solo afectando el horizonte de suelo, el cual en la mayor parte de los casos funciona con el propósito humano de cubrir alguna estructura kárstica en la roca calcárea. Sin embargo, los procesos evolucionan al grado de remover el suelo en el contacto con la roca, provocando un espacio vacío que poco a poco tomara dimensiones mayores, hasta llegar el momento de colapsar ante la presión de algún objeto, persona o auto, siempre y cuando se den los factores detonantes para ello, siendo el principal de ellos una fuerte precipitación o la presencia de agua, lo cual provoca cambios en las propiedades de los materiales en cuestión.

Un buen ejemplo de un hundimiento de colapso puede verse en las fotografías siguientes, donde una vialidad colapso al no soportar el peso sobre un hueco o espacio vacío formado bajo la carpeta asfáltica.



Fotografía 8. Evidencias de hundimientos por colapso en la ciudad de Chetumal.

Esa es la característica principal de un hundimiento por colapso, la formación de una caverna o espacio vacío que con el tiempo va tomando mayores dimensiones a lo largo, ancho y en altura, hasta llegar el momento de tener un espesor muy delgado, el cual por efecto de gravedad colapsara. Cabe mencionar que los hundimientos por colapso en donde solo se

implique la roca calcárea son raros, sin embargo estos son de una dimensión bastante amplia, los cuales pueden ir desde 1 m hasta más de 60 m, mientras que los hundimientos por colapso en suelos consolidados sobre una superficie calcárea son de menores dimensiones, siendo proporcionales al espesor de suelo sobre el horizonte de roca calcárea y el grado de karsticidad que está presente, esto último representado por el tamaño de las estructuras kársticas presentes en la roca calcárea.

El otro escenario de hundimiento local es aquel en donde se encuentra un horizonte de suelo inconsolidado sobre una superficie de roca calcárea, el hundimiento que resulta es de subsidencia, en la cual el suelo se va amoldando a la superficie del terreno con movimientos muy lentos pero constantes a lo largo de un lapso de tiempo relativamente largo.



Fotografía 9. Evidencias de hundimientos locales en la ciudad de Playa del Carmén

Independientemente del tipo de hundimiento que se trate, ya sea de subsidencia o de colapso, la escala en la que se presentan es muy amplia, se presentan desde estructuras que van desde algunos decímetros, hasta estructuras con decenas y muy posiblemente de cientos de metros, esto último aplicado a los hundimientos que ocurren directamente sobre roca calcárea o caliza.

En este estudio, cada ciudad presenta características muy propias en cuanto a hundimientos, esto se ve como resultado de las litologías, esquema estructural, depresiones topográficas y densidad de estructuras kársticas en las cuales fueron construidas las ciudades.

La proximidad de estructuras kársticas es otro factor importantísimo en la generación de hundimientos, por regla general se tiene que entre más próximo se encuentre un punto a una estructura kárstica, sea un cenote, una dolina o un polje, este tendrá una mayor probabilidad de presentar hundimientos, tal es el caso de algunas áreas de Cancún, Playa del Carmen y Tulum.

Otro de los factores muy importantes en la generación de hundimientos, es la presencia de suelos depositados por el hombre, que en el caso del estado de Quintana Roo se puede inferir que la mayor parte de las ciudades se encuentran en este caso, estos suelos depositados por el hombre tienen diferentes naturalezas, ya que se han observado suelos en donde existen estructuras kársticas o cenotes que fueron rellenos por basura vegetal u hojarasca, plásticos, madera, vidrio, ramas, troncos, vegetales, plásticos de todo tipo, arenas, gravas, rocas y pedazos de concreto, entre otros desechos. Todo esto tiene un

comportamiento muy heterogéneo e incluso al ser el relleno de una naturaleza tan variable estos tienden a formar espacios vacíos entre ellos, los cuales son aprovechados por las corrientes de agua que poco a poco irán transportando el material degradado y fino para crear un espacio vacío el cual colapsará a futuro.

El agua es un factor esencial y detonante para generar un hundimiento, tanto en suelos consolidados y no consolidados. Es un agente que cambia las características físicas de resistencia del suelo ante una fuerza y cambia poco a poco las propiedades químicas de los materiales con los cuales entra en contacto. El proceso de percolación del agua a través de un suelo no consolidado y consolidado, es arrastrar partículas del suelo o relleno que con el paso del tiempo la ausencia de este material generara espacios vacíos, dando pie al reacomodo del material y al surgimiento de hundimientos. La introducción de la presencia de agua se da por factores que suelen ser desde el rompimiento de una tubería o una fuga de agua, la cual ha estado activa durante un periodo corto, mediano o largo de tiempo, tiempo en el cual ya ha surtido los efectos necesarios en el suelo para propiciar rápidamente su hundimiento. Los encharcamientos también cumplen esta función para la generación de un hundimiento, de hecho, entre mayor sea la cantidad de agua y mayor el tiempo en contacto con los suelos, mayor será la rapidez que actúe en el hundimiento. Para la generación de un hundimiento también entran otros factores como son el movimiento de tierras, es decir el quitar y colocar la tierra o suelo en un mismo sitio genera cambios como una mayor permeabilidad, esto se genera por los espacios vacíos que se da a nivel intergranular, así también esto genera una menor resistencia a los esfuerzos que se dan sobre ellos, ejemplo de ello podemos apreciarlo en todas las ciudades del estado, cuando en algunas áreas o calles se realizan instalaciones como colocar cableado o instalaciones de drenaje, en los cuales hay que quitar y colocar tierra en un mismo punto, agregando que estos volúmenes de tierra o suelo no son compactados lo suficiente, aunado a que algunos de ellos o parcialmente permanecen abiertos y mal cubiertos, entonces ocurre infiltración de agua en ellos con la subsecuente generación de espacios vacíos o ablandamiento del terreno, lo que genera hundimientos. La profundidad del nivel freático presente en una región o zona también juega un papel importante en la generación de hundimientos, un caso especial es el que presentan las partes bajas de la ciudad de Chetumal, que conjugado con otros factores como los litológicos generan una cantidad mayor de hundimientos.

Los resultados del análisis en cada variable que interviene en la generación de hundimientos para cada ciudad se describen a continuación.

Ciudad de Cancún:

Antecedentes

Aunque no es un hundimiento localizado propiamente en la ciudad, su aparición en una de las arterias vitales para esta ciudad y Playa del Carmen, lo ubican como uno de los fenómenos de este tipo que mayor afectación han tenido en la historia de ambas ciudades, generando caos y trastornando en cierta manera la actividad turística de estas. Este antecedente de hundimiento, el más reciente e importante, se reporta el día 27 de agosto del 2015, en el tramo carretero Playa del Carmen - Cancún, a la altura del km 309, donde una gran parte del terreno colapsó, inhabilitando por completo el tránsito de vehículos en ambos sentidos además de complicar las actividades de miles de turistas y trabajadores. Este hundimiento tuvo una longitud de poco más de 40 m, con una profundidad de más de 2 m. Pocas semanas después el tramo carretero fue rehabilitado con un costo total de más de 15 millones de pesos sin contar pérdidas ocasionadas al servicio turístico, como son vuelos, reservaciones, horas laborales de empleados, etc.

Otro evento de la misma naturaleza, ocurrió el 21 de enero del 2015 en la ciudad de Cancún. Un hundimiento súbito

en la colonia Chac Kin, ubicada en la región 92 sobre la calle 50 Poniente entre 79 y 83 ocurrió en el piso de una vivienda, el cual se desplomó llevándose con él a una persona que caminaba a tiempo en esta área de la casa. La persona cayó a una profundidad de 3 metros bajo el subsuelo y escaló para regresar a la superficie. Actualmente esta área es declarada como no apta para habitar (Polémica, 2015).

Interpretación Estructural

De acuerdo al mapa estructural interpretado pueden notarse una serie de grupos de lineamientos existentes en la ciudad, los cuales pueden analizarse por grupo o clase, de acuerdo a sus características y relación con los otros lineamientos.

Los lineamientos más destacados son aquellos de orientación NNE-SSW, los cuales tienen longitudes considerables, de algunas decenas de km, se presentan en gran parte de la ciudad, abarcando parte de los sectores SE y NE. Son lineamientos que guardan un paralelismo entre sí, y confluyen en un punto en el NE de la ciudad, con lo que parecen formar en planta una especie de cuna. Son estos lineamientos los que ocupan las partes más bajas de la ciudad. Se les correlaciona con los lineamientos de igual orientación en la ciudad de Playa del Carmen (ver interpretación estructural en Playa del Carmen) y así mismo se les infiere el mismo origen, es decir se les interpreta como lineamientos no estructurales, ocasionados por contactos litológicos entre litologías diferentes, se les interpreta como posibles depósitos de playa, paleo dunas o bien paleoterrazas. Este grupo de lineamientos se encuentra intersectando a todos los grupos restantes e incluso el resto de los lineamientos desaparecen al interceptar este sistema.

El segundo grupo de lineamientos en importancia es el WNW-SE, el cual se encuentra en buena medida en el sector NW de la ciudad, así como en los márgenes del sector SW donde se presenta en mayor abundancia y densidad, mientras que en el sector NE también se presenta, pero en menor cantidad. El sector SE carece completamente de ellos. Estos lineamientos se encuentran en longitudes variables que van desde los 400 a 3,500 m de longitud, aunque los predominantes no sobrepasan los 1500 m. Se interpreta que estos lineamientos se encuentren relacionados en origen al sistema estructural NW-SE de la falla Ticul.

El tercer grupo de lineamientos en importancia es aquel que tiene una orientación burdamente N-S, y se encuentra principalmente distribuido en toda la porción SE de la ciudad. Son de diversas longitudes, que van desde los 400 hasta los 2,000 m. Se interpreta que este grupo de lineamientos tenga su origen en el sistema regional de orientación NNW-SSW llamada Tulum-Rio Hondo.

El último grupo de lineamientos presentes y con muy pocos que lo representen, lo es el grupo NE-SW, el cual se conforma con una serie de lineamientos de poca longitud y localizados principalmente en la porción central de la ciudad.

Interpretación Grado de Fracturamiento

Las principales zonas de alto y medio grado de fracturamiento fueron localizadas en la traza de los lineamientos no estructurales, esto puede resultar comprensible ya que estos lineamientos de carácter netamente litológico son abundantes, por lo cual una correlación del grado de fracturamiento con densidades de estructuras kársticas, así como densidades de hundimientos debe ser tomada con reservas. Por lo que se sugiere que sea mejor tomar correlaciones directamente desde la interpretación de lineamientos estructurales.

Interpretación Litológica

La ciudad de Cancún se encuentra ubicada sobre tres litologías que poseen características diferentes entre sí, así como propiedades físicas y químicas que conllevan un comportamiento diferente ante los procesos naturales que ocurren en el

medio. Las litologías sobre las que se asienta la ciudad son:

Formación Carrillo Puerto (Caliza-Coquina).- Esta secuencia de rocas de caliza y caliza coquina se encuentran distribuidas en la mayor parte de la ciudad, abarcando la totalidad del sector NW, y parcialmente a los sectores NE y SW.

Se presenta de color beige a amarillo claro con tonos blanquecinos en superficies frescas, compacta, muy porosa, con abundantes fragmentos y enteros de fósiles marinos que son principalmente moluscos bivalvos y gasterópodos, así como en menor medida de coral, se presenta bien estratificada con estratos de espesores variables que van de los 30 a 80 cm, sus estratos se encuentran con ligeras inclinaciones que van desde los 01° a 05° de inclinación, por lo que se puede interpretar que son prácticamente horizontales.

Esta unidad litológica es la más antigua aflorando en la ciudad. Se encuentra cubierta de forma discordante por los depósitos de Caliza-Arenisca de edad Pleistoceno, y no se observa la unidad en la cual sobre yace.

Esta unidad por ser la más antigua ha estado sujeta en mayor medida a las condiciones o factores formadores de estructuras kársticas, por lo que en ella se presentan la mayor cantidad de estructuras kársticas inventariadas en esta ciudad, el espesor total de esta formación no se observó, sin embargo por observaciones de campo se le estima un espesor mayor a los 30 m. Caliza – Arenisca.- Esta unidad se encuentra distribuida a lo largo del margen costero de la ciudad, en una franja de orientación burdamente NE-SW Ocupa parcialmente los sectores NE y SW. Una buena extensión de la ciudad se encuentra sobre esta unidad. Se presenta de color beige a crema con tonos blanquecinos, generalmente es semicompacta, muy porosa, compuesta principalmente por granos o bioclastos de moluscos, gasterópodos, corales y otros. Se presenta estratificada con estratos de espesor variables los cuales van de 10 a 30 cm, también presenta en algunos puntos estratificación cruzada, así como estratificación laminar. Se le asigna una edad relativa del Pleistoceno y se encuentra cubriendo de manera discordante a la unidad litológica descrita anteriormente. Se le estima un espesor entre 2 a 10 m.

Esta unidad presenta exclusivamente los lineamientos más extensos y paralelos del grupo NNE-SSW, por lo cual se les interpreta como lineamientos litológicos, que no son de origen estructural o tectónico.

Esta unidad, al ser de edad más reciente y encontrarse cubriendo a la unidad anterior, no se encuentra expuesta, o bien, su exposición a los factores que detonan karsticidad son limitados, aunado a que su espesor es relativamente delgado. Otro factor limitante es que, por su relación estratigráfica, se encuentra ocupando los espacios superiores, por lo que su relación con el nivel freático es reducida.

Depósitos Recientes Palustres (Qho Pa). Estos depósitos se encuentran distribuidos en las partes más bajas y próximas al mar, delimitan una franja de orientación burdamente norte sur. Se encuentran ocupando las porciones costeras de la ciudad, ocupando parcialmente los sectores NE y SE.

Esta unidad litológica se presenta de forman inconsolidado formada por sedimentos limo-arcillosos de color café a oscuro, fétidos y con abundante material orgánico, propio de zonas pantanosas y de manglar.

Como puede verse en las descripciones anteriores, es notable la diferencia entre cada una de estas litologías. Así, algunas presentan mayor susceptibilidad a fenómenos kársticos mientras que otras presentan mayor susceptibilidad a hundimientos por subsidencia.

Distribución de Estructuras Kársticas

Aunque a simple vista la distribución de las estructuras kársticas no parecen guardar o definir algún patrón, vistas y

analizadas con detalle puede observarse cierta tendencia en ellas. Su distribución en la ciudad de Cancún y sus alrededores se presentan en tres áreas o regiones generales. La cantidad de cenotes o estructuras kársticas depende directamente de su litología, topografía y planos estructurales presentes. La zona de mayor importancia y por ende con una mayor presencia de cenotes es la denominada zona norte, la cual ocupa la parte norte, oeste y suroeste de la ciudad, formando una franja de orientación NE-SW. Esta área contiene cenotes que van de 10 a 75 m de diámetro.

Otra zona de estructuras kársticas se localiza en las partes bajas de la ciudad de Cancún, ocupando las zonas costeras. Esta zona abarca la porción sureste y este de Cancún, así como parcialmente la porción noreste. Ahí pueden observarse algunas pocas estructuras kársticas, sin embargo, se interpreta que algunas de las lagunas presentes pueden ser estructuras kársticas de dimensiones mayores, algunas de ellas sobrepasando los 2.5 km de diámetro.

La última zona de cenotes se encuentra localizada entre las dos zonas anteriormente descritas, esta zona ocupa una franja de orientación NE-SW acunándose hacia su extremo NE, ahí se presentan relativamente pocos cenotes, con dimensiones variables que van desde 10 m hasta 250 m de diámetro, predominando los de 10 a 100 m.

Distribución de Hundimientos

Los hundimientos presentes en la ciudad se encuentran dispersos y de forma aislada en la ciudad, por lo que no pueden delimitarse áreas o zonas de hundimientos, sin embargo, destacan por su tamaño los ubicados en la porción NE de la ciudad, los cuales van desde 10 m a poco más de 20 m. Los hundimientos se presentan muy relacionados a estructuras kársticas o cenotes.

Ciudad Playa del Carmen:

Antecedentes

El caso de mayor relevancia reportado en Playa del Carmen tuvo lugar en la zona turística, en la calle Flamingos, entre 42 y 44, donde un edificio de 50 departamentos de lujo fue construido sobre cavernas kársticas, por lo que antes de ser habitado ya presentaba graves problemas estructurales y tuvo que ser demolido en el año 2005. Se infiere que las pérdidas en este caso fueron mayores a los 5 millones de dólares. Se cree que este suceso está asociado al colapsamiento de una caverna ubicada bajo el inmueble.

Interpretación Estructural

De acuerdo a la interpretación estructural realizada (ver mapa: Ciudad Playa del Carmen) en la ciudad, puede observarse que se encuentran una serie de lineamientos que pueden agruparse o clasificarse de acuerdo a su longitud y orientación, así como intersección con respecto a otras estructuras o lineamientos, las características que presentan cada uno de estos grupos son las siguientes:

Existen una serie de grandes lineamientos de orientación NE-SW que se encuentran paralelos a la línea de costa y se presentan con una alta densidad, estos lineamientos no se intersectan entre ellos y tienen longitudes de algunas decenas de kilómetros, posiblemente alcancen el centenar de km o más, ya que continúan fuera de los límites del área interpretada. La densidad y paralelismo de estos lineamientos es muy notable y con una distancia de separación de la costa muy uniforme, sin embargo, al alcanzar los límites de la ciudad tanto al NE como al SW estos lineamientos tienden a separarse en forma de abanico o cola de caballo. Estos lineamientos corresponden en cierta medida con las cotas de nivel más bajas de la ciudad. Estos lineamientos se encuentran intersectando a todos los demás grupos de lineamientos. De acuerdo a la interpretación, así como a las relaciones existentes con los otros lineamientos presentes, estos lineamientos se interpretan no propiamente como

lineamientos estructurales, si no que se interpretan como lineamientos que son contactos litológicos, es decir son lineamientos producidos por una litología diferente, estos mismos lineamientos también se presentan en otras áreas como es en la ciudad de Cancún, además de identificarse en la isla de Cozumel, razón por la cual se interpreta que estos lineamientos sean litologías correspondientes a una antigua línea de costa, por lo cual se interpreta que sean de escala regional. Se infiere también que hayan sido originadas en obviamente un ambiente costero, posiblemente como depósitos de playa o dunas, o bien paleo terrazas marinas. Esta interpretación también esta soportada por que los otros grupos de lineamientos presentes cuando intersectan a estos lineamientos de orientación NE-SW desaparecen, no continúan o son cubiertos en su traza, esto se interpreta como que los lineamiento de orientación NE-SW al ser lineamientos litológicos, fueron formados, o bien en este caso, fue la litología que los origina depositada posteriormente, es decir, estos depósitos de línea de costa son más recientes que la unidad litológica que los subyace.

Otro grupo de lineamientos destacable son aquellos de orientación NNW-SSE y NW-SE, los cuales se encuentran representados por una serie de lineamientos que van desde 1 hasta los 6 o 7 km de longitud y fuertemente asociados a lo que parecen ser una serie de partes bajas o depresiones topográficas, entre ellos destaca dos en especial, uno que se encuentra localizado en la porción sureste y este de la ciudad, mientras que el otro se localiza en la porción norte de la misma y adentrándose en ella. De acuerdo a nuestro criterio y a las relaciones que estos lineamientos presentan, así como la relación existente entre las curvas de nivel topográficas que los reflejan, se interpreta que estos lineamientos sean una serie de planos estructurales de fallas normales, los cuales originan una serie de fosas o horst, sin embargo, por el ambiente geológico en el que nos encontramos, se interpreta que estas estructuras nos delimiten una serie de poljes, los cuales son estructuras kársticas producidas por disolución de rocas calcáreas, que aprovechan estos planos de debilidad en el terreno para originarse. Observando toda el área de estudio puede observarse que este grupo de lineamientos tiene una orientación relativa, ya que en conjunto presentan un control netamente NNE-SSW. Esto puede explicarse que en esta área ocurre o se está dando la formación de una estructura kárstica de escala semi regional, la cual presentan una serie de flexiones, lo que vista a otras escalas podría ser engañoso.

El último grupo de lineamientos presentes se encuentran formado por aquellos lineamientos de orientación NNE-SSW, generalmente son los que presentan una mayor distribución en la ciudad y son de poca extensión, su longitud está entre los 400 m y 2,000 m. Se les encuentra principalmente en la porción este de la ciudad. así como al norte. La mayor parte de estos lineamientos se encuentran delimitando las fosas u horst anteriormente mencionados.

Interpretación del Grado de Fracturamiento

El grado de fracturamiento obtenido en el área de la ciudad de Playa del Carmen debe tomarse con precaución, debido a que los lineamientos litológicos presentes en la zona costera ocasionan que puedan interpretarse de forma incorrecta. Las únicas zonas resultantes en la obtención del grado de fracturamiento que pueden tomarse como válidas son aquellas localizadas en los sectores NW y parte de los sectores que son adyacentes a este. Por la razón de que en esta zona se tiene la certeza de que estos lineamientos son de origen geológico-estructural.

Interpretación Litológica

Al igual que en la ciudad de Cancún, en la ciudad de Playa del Carmen se presentan similares condiciones litológicas. Las unidades litológicas detectadas en esta ciudad son las siguientes:

Formación Carrillo Puerto (Caliza-Coquina).- Esta secuencia de rocas de caliza y caliza coquina se encuentran distribuidas en la mayor parte de la ciudad, abarcando la totalidad del sector NW, y parcialmente a los sectores NE y SW. Se

presenta de color beige a amarillo claro con tonos blanquecinos en superficies frescas, compacta, muy porosa, con abundantes fragmentos y enteros de fósiles marinos que son principalmente moluscos bivalvos y gasterópodos, así como en menor medida de coral, se presenta bien estratificada con estratos de espesores variables que van de los 30 a 80 cm. Sus estratos se encuentran con ligeras inclinaciones que van desde los 01° a 05° de inclinación, por lo que se puede interpretar que son prácticamente horizontales.

Esta unidad litológica es la más antigua aflorando en la ciudad. Se encuentra cubierta de forma discordante por los depósitos de Caliza-Arenisca de edad Pleistoceno, y no se observa la unidad a la cual sobreyace, el espesor total de esta formación no se observó, sin embargo, por observaciones de campo se le estima un espesor mayor a los 30 m.

Caliza – Arenisca. - Esta unidad se encuentra distribuida a lo largo del margen costero de la ciudad, en una franja de orientación burdamente NE-SW. Ocupa parcialmente los sectores NE y SW. Una buena extensión de la ciudad se encuentra sobre esta unidad, se presenta de color beige a crema con tonos blanquecinos, generalmente es semicompacta, muy porosa, compuesta principalmente por granos o bioclastos de moluscos, gasterópodos, corales y otros. Se presenta estratificada con estratos de espesor variables los cuales van de 10 cm a 30 cm, también presenta en algunos puntos estratificación cruzada, así como estratificación laminar.

Se le asigna una edad relativa del Pleistoceno, y se encuentra cubriendo de manera discordante a la unidad litológica descrita anteriormente, se le estima un espesor entre 2 a 10 m, esta unidad presenta exclusivamente los lineamientos más extensos y paralelos del grupo NE-SW, por lo cual se les interpreta como lineamientos no estructurales si no litológicos.

En el pasado, el área entre la Quinta Avenida y la línea de costa estaba poblada por manglar. Actualmente es una zona turística con desarrollo de condominios y hoteles de dos a tres pisos. En esta área hay hundimientos continuos en el adocroto y se considera que son a causa de ocupar suelos inestables. Además, el hundimiento repentino que se generó en el hotel Sol Maya en el 2005, pone en manifiesto que es una zona kárstica con cavernas subterráneas.

Distribución de Estructuras Kársticas

La distribución de estructuras kársticas en la ciudad de Playa del Carmen, es influenciada por las zonas de depresiones topográficas, planos estructurales y tipo de litología. Al igual que en la ciudad de Cancún, la distribución de las estructuras kársticas formadas por cenotes y dolinas no parecen tener un patrón de distribución, sin embargo, observando a detalle su distribución, puede notarse un patrón que se encuentra fuertemente relacionado a sistemas estructurales de fallas y fracturas, así como a zonas de depresiones topográficas. Las estructuras kársticas e distribuyen en toda la ciudad y son muy variables en cuanto a su tamaño, pues van de 5 a 150 m, predominando los de 5 a 75 m, se contabilizaron más de 100 cenotes en la ciudad incluyendo las áreas próximas o inmediatas a ella.

Como anteriormente se mencionó, los cenotes se distribuyen en las partes bajas, en este caso existe una gran zona baja en el sector NW de la ciudad, la cual se le denominado Las Flores, esta área ha sido formada principalmente por la influencia de diversos lineamientos estructurales, en esta área que tiene una orientación burdamente norte sur, bordea toda la porción SW y oeste da la ciudad, con una longitud de aproximadamente 11 km y un ancho de 1.5 a 2 km. Esta área inicia cerca del área costera en Playacar, continuando hacia la colonia Bellavista, siguiendo la colonia Misión de Las Flores, Villas del Sol y continuando unos kilómetros más hacia el norte, en zona despoblada donde se une a la zona Norte. Esta área contiene poco más de 50 cenotes que van desde 5 a 50 m de diámetro.

Otra zona que puede delimitarse muy bien en cuanto a la distribución de cenotes es la zona Norte, la cual se compone de un área con orientación burdamente norte sur, con una longitud de aproximadamente 7 km, continuando su

longitud hacia el norte otros tantos kilómetros más, donde se une con la zona Las Flores. Esta zona inicia en las inmediaciones de la Universidad Tecnológica de la Riviera Maya, continuando hacia la colonia La Guadalupana, y tomando rumbo hacia el basurero municipal. Su ancho es variable en un rango de 600 m a 2.5 km en su porción norte, donde es más ancha. Esta área es notable por la presencia de cenotes de dimensiones más grandes, los cenotes en esta área van desde los 5 m hasta los 150 m, predominando los de 25 a 150 m, destacando 9 cenotes que van desde los 75 a 150 m.

Otra zona importante en cuanto al contenido de cenotes, además de posibles cavernas o galerías kársticas subterráneas, es una zona que no se encuentra en la ciudad, sin embargo, se encuentra muy próxima, esta zona es la zona SW, la cual contiene más de 50 cenotes, además de abundantes galerías kársticas con longitudes variables. Esta zona tiene una orientación NE-SW, siguiendo la traza de la carretera Tulum-Playa del Carmen, con una longitud de aproximadamente 8 km y un ancho de 850 m a 2 km. Aquí se observan cenotes que van desde los 5 a los 150 m de diámetro, predominando los de 5 m a los 50 m.

Se encuentran otras áreas que tienen una orientación NE-SW, las cuales aparecen de forma intermitente siguiendo la orientación de la línea costera. Aquí los cenotes se presentan de una forma más errática, esto puede ser debido a que precisamente en estas zonas se encuentra una de las unidades más recientes que cubre discordantemente a las rocas de la formación Carrillo Puerto, por lo que no permite expresar en su totalidad a las estructuras kársticas presentes en esa unidad, sin embargo un hecho muy notable es la presencia de abundantes hundimientos a lo largo de todo el corredor costero, estos hundimientos se verán con más detalle en la sección siguiente.

Un punto importante en la ciudad de Playa del Carmen con respecto a la presencia de estructuras kársticas, es que su porción SW puede estar influenciada por el sistema de lineamientos NW-SE, el cual se encuentra distribuido uniformemente en toda la zona desde Tulum hasta los límites de la Ciudad de Playa del Carmen, siendo este el responsable directo de la formación de las abundantes cavernas y galerías subterráneas presentes, por lo que no se descarta que bajo la ciudad de Playa del Carmen se encuentren cavernas kársticas con longitudes posiblemente kilométricas.

Distribución de Hundimientos

Los hundimientos en la ciudad Playa del Carmen se encuentran distribuidos en cinco zonas, y la mayor parte de ellos se presentan próximos a la costa.

La zona más importante en cuanto a densidad de hundimientos lo es la zona Tohoku, se ubica en la porción próxima a la costa, la cual comprende buena medida a lo largo de las avenidas 5 Norte, 10 Norte, 15 Norte y 20 Norte. Ocupando las colonias Centro, Calica, Gonzalo Guerrero, Paraíso del Carmen, Tohoku, Zalzi-Ha, Luis Donaldo Colosio y Nichte-Ha. Los hundimientos en esta zona van desde los 5 cm a 2 metros de profundidad. En la porción sur se encuentran los hundimientos más someros, que van desde 5 a 10 cm de profundidad, mientras que en la porción central de la zona se presentan predominando con profundidades de 5 a 50 cm, y algunos esporádicos mayores a 1 m de profundidad. La porción norte de esta Zona de Hundimientos presenta los hundimientos más profundos, estos van desde 10 cm a mayores de 1 m, predominando los de 10 cm a 1 m. En cuanto al tamaño de estos hundimientos estos van desde 25 cm hasta mayores de 10 m, predominando los de 25 cm a 5 m de diámetro o longitud.

Otra zona es la Arco Vial, ubicada precisamente en la vialidad de dicho nombre, abarcando las colonias Santa Fe del Carmen, Bosque Real, Mundo Hábitat, La Toscana y parte de las colonias 28 de julio y Misión del Carmen. Esta zona, al igual que las anteriores, se presenta en una orientación NE-SW, aquí los hundimientos van de 5 cm a mayor de 1 m de profundidad, predominando los de 5 a 50 cm de profundidad. En cuanto a tamaño generalmente estos son de 25 cm a 50 cm

de diámetro, sin embargo, destacan los que se encuentran en el cruce del Hospital General de Zona No 18, del IMSS, en la misma vialidad Arco Vial.

La zona de hundimientos 65 Sur, se encuentra a lo largo de la calle del mismo nombre, con una extensión de aproximadamente 5.5 km. Posee pocos hundimientos, que van desde los 5 cm a mayores de 1 m, predominando los de 5 cm a 1 m, ubicándose los de mayor profundidad hacia el margen suroeste de la zona. En cuanto a tamaño estos van desde 25 cm hasta 25 m, predominando los de 25 cm a 5 m.

Una zona de hundimientos menor es la zona Villas Riviera, ocupando el fraccionamiento del mismo nombre. Los hundimientos de esta zona son pocos, su profundidad general es de 5 a 10 cm, mientras que su diámetro es de 5 a 25 cm.

Existen otros hundimientos de forma aislada y dispersa en la ciudad, sin embargo, estos son de menores dimensiones.

Ciudad de Tulum:

Antecedentes

En la ciudad de Tulum se reportó un hundimiento de 30 m en la zona turística, sobre la carretera de Tulum-Boca Paila enfrente al Hotel Zamas. Estas grietas afectaron la mitad de la calle, los baños del hotel y un tanque elevado. De acuerdo con vecinos del establecimiento, durante la construcción del inmueble se rellenó un cenote y se taparon ríos.

Interpretación Estructural

Por la naturaleza del terreno en la ciudad de Tulum (ver mapa: Ciudad de Tulum), y por su poca elevación, hay poco que interpretar en cuanto al mapa topográfico. Lo poco que se pudo interpretar fue lo siguiente: La ciudad de Tulum se encuentra dentro de un sistema estructural marcadamente NW-SE, el cual se encuentra influenciando la formación de los sistemas de cavernas y galerías subterráneas que se encuentran en el área. El anterior sistema es el de mayor predominancia y riesgo, mientras que un segundo sistema de menor importancia es aquel de orientación NNE-SSW, este sistema es el reflejo del sistema regional de misma orientación llamado Tulum – Rio Hondo, el cual tiene su traza al noroeste de la ciudad aproximadamente a 5 km, y el cual también tiene un reflejo en los sistemas subterráneos del área, aunque esta influencia no es la principal. Se infiere que este lineamiento actúe como límite al desarrollo de los sistemas kársticos subterráneos.

Interpretación Litológica

La ciudad de Tulum se encuentra asentada exclusivamente sobre rocas calcáreas de la formación Carrillo Puerto.

Formación Carrillo Puerto (Caliza-Coquina). - Esta secuencia de rocas de caliza y caliza coquina se encuentra distribuida en toda la ciudad, se presenta de color beige a amarillo claro con tonos blanquecinos en superficies frescas, compacta, muy porosa, con abundantes fragmentos y enteros de fósiles marinos que son principalmente moluscos bivalvos y gasterópodos, así como en menor medida de coral, se presenta bien estratificada con estratos de espesores variables que van de los 30 a 80 cm. Sus estratos se encuentran con ligeras inclinaciones que van desde los 01° a 05° de inclinación, por lo que se puede interpretar que son prácticamente horizontales. El espesor total de esta formación no se observó, sin embargo, por observaciones de campo se le estima un espesor mayor a los 30 m.

Depósitos de Litoral. - Estos depósitos inconsolidados, formados por blancas arenas, compuestas de fragmentos de organismos marinos como gasterópodos, bivalvos, foraminíferos, erizos, corales, etc. Se encuentran ocupando la porción costera, formando playas y dunas. Esta unidad se encuentra cubriendo de forma discordante a la unidad descrita anteriormente.

Distribución de Estructuras Kársticas

Aunque se observan abundantes cenotes en la mayor parte de las ciudades localizadas en la porción norte del estado de Quintana Roo, la ciudad de Tulum presenta solo algunos esporádicos cenotes. Sin embargo, alrededor de esta ciudad se presentan en abundancia. Los cenotes que se encuentran en la ciudad se presentan distribuidos en una marcada orientación NW-SW, que coincidentemente resulta en la misma orientación preferente de las estructuras subterráneas que se encuentran bajo la ciudad. Sin embargo, en la zona donde aparecen estos cenotes no se tiene reportes de galerías o cuevas subterráneas.

Las estructuras kársticas que se encuentran alrededor o en las proximidades de la ciudad de Tulum, son una serie de cenotes que van desde un par de metros de diámetro hasta llegar a un poco más del km de diámetro. Los cenotes de mayor tamaño se encuentran al oeste y noroeste de la ciudad, aproximadamente a unos 5-6 km de distancia, donde estas estructuras están formadas por el sistema NNE-SSW Tulum-Río Hondo que es de carácter regional. El resto de las estructuras o cenotes existentes alrededor o en las proximidades de Tulum son generalmente menores de 250 metros, predominando las de 5 a 100 m de diámetro y están relacionados al sistema NW-SE, por lo cual se encuentran alineados en esa dirección, sin descartar que algunos de ellos pertenezcan a estos sistemas subterráneos y los cenotes aquí encontrados funcionan como conductos al exterior.

Un caso muy especial en el área de los alrededores de Tulum y toda la zona que comprende desde Tulum a Playa del Carmen, son la serie de cavernas o galerías kársticas, que incluyen algunos records mundiales, siendo uno de los sistemas de mayor longitud en el mundo.

Observando el mapa de galerías kársticas o cavernas subterráneas en el poblado de Tulum, y si analizamos con detalle la orientación y distribución de estos sistemas de cavernas, nos damos cuenta que se encuentran con una marcada y preferente orientación NW-SE. También se observan algunos pocos sistemas de cavernas de orientación NE-SW, siendo estos últimos la conexión entre los sistemas predominantes. Estos mapas de cavernas se han realizado principalmente por actividades espeleológicas en la región, la cual ha sido llevada a cabo principalmente por extranjeros.

Otra área que guarda similares características, y sin embargo no ha sido estudiada con mayor detalle a nivel espeleológico, es la observada al SW del poblado de Playa del Carmen, en donde se tienen una serie de posibles cavernas colapsadas, las cuales fueron interpretadas de acuerdo a su expresión topográfica, y a su vez fue basada en mapas topográficos a detalle, con curvas de nivel a cada metro. Estas estructuras o galerías identificadas al SW de Playa del Carmen parecen tener una mayor extensión que las detectadas en Tulum, esto puede ser factible, ya que la estructura o sistema de fallas Tulum-Río Hondo de orientación NNE-SSW parece estar limitando estas estructuras hacia el oeste. Las galerías que se presentan en las proximidades de Playa del Carmen se encuentran en partes colapsadas, por lo que se infiere de acuerdo a la topografía reflejada que estas puedan continuar y conectarse en el subsuelo.

Teniendo en cuenta la presencia de galerías prácticamente ya confirmadas y estudiadas en el área de Tulum, y tomando en cuenta que aquellas galerías kársticas o cavernas interpretadas en el SW de la ciudad de Playa del Carmen, podríamos estar hablando de un gran sistema compuesto por subsistemas que abarcan todo el corredor existente entre estas dos ciudades, e incluso se podrían encontrar algunas galerías kársticas en la ciudad de Playa del Carmen, principalmente en su porción SW, donde se conjugan diversos factores para su formación, así como en la porción NE, todo esto dependiendo de los factores estructurales presentes, que como se observó anteriormente tal parece ser que el sistema estructural predominante en la formación de estas galerías es el sistema de orientación NW-SE.

Distribución de Hundimientos

Los hundimientos en Tulum se encuentran distribuidos principalmente en la porción este de la ciudad. Estos hundimientos son principalmente de 30 cm a 25 m de diámetro o longitud, aunque predominan los de 30 cm a 5 m de diámetro, mientras que hundimientos mayores a 5 m son poco abundantes. Con respecto a su profundidad estos van desde un par de cm hasta 2 m, predominando por mucho los de 5 a 50 cm de profundidad, hundimientos mayores a 50 cm de profundidad son relativamente muy pocos.

Observando la cantidad de cuevas o galerías kársticas subterráneas, se esperaría una mayor cantidad de hundimientos, sin embargo, los aquí reportados son pocos, esto se debe a que la ciudad de Tulum tiene muchas calles sin revestimiento asfáltico, por lo que los hundimientos no pueden interpretarse adecuadamente. También es una ciudad muy joven, con muy alto crecimiento demográfico, por lo que existen áreas o zonas de la ciudad relativamente nuevas, en donde no existen aún evidencias que puedan demostrar o inferir la presencia de estructuras kársticas. Sin embargo, los estudios espeleológicos aquí reportados se han llevado de forma sistemática y formal.

Los principales hundimientos detectados en la ciudad de Tulum se encuentran fuertemente distribuidos y relacionados a estructuras kársticas, principalmente alrededor de ellas.

Ciudad de Chetumal:

Antecedentes

El problema de hundimientos en la ciudad de Chetumal es ampliamente conocido, ya que año tras año se invierten de cincuenta a setenta millones de pesos para rehabilitar el pavimento, reparar desfondes "hundimientos" y baches (Quintanarroense PQPalco, 2015). Se tiene identificado alrededor de 100 áreas con problemas de hundimientos, dentro de las cuales se encuentran las calles de Benito Juárez, Miguel Hidalgo, Carmen Ochoa de Merino, 5 de Mayo, Othón P. Blanco entre otras (Novedades Quintana Roo, 2015; Periodistas Quintana Roo; Del Campo Noticias, 2015; Del Campo Noticias, 2015). En las colonias más antiguas como Barrio Bravo y Barrio Viejo se reportan viviendas que presentan cuarteaduras, hoyos en el patio y dentro de las casas. También el Palacio de Gobierno es afectado por hundimiento, cuya infraestructura ya ha sido reparada anteriormente, ya que es uno de los edificios más antiguos (Del Campo Noticias, 2015).

Interpretación Estructural

Con respecto a la situación estructural en la que la ciudad de Chetumal se encuentra, es de especial interés, ya que se encuentra en medio de una zona donde estructuralmente se intersectan una serie de sistemas regionales, compuesta por el sistema Tulum-Río Hondo y el sistema Falla Ticul.

De acuerdo al mapa de interpretación estructural realizado en el área de la ciudad de Chetumal, pueden destacarse dos grupos de lineamientos; el primero de ellos NNE-SSW es el predominante, con una mayor abundancia y densidad, estos se encuentran distribuidos principalmente en los sectores SW, SE y NE de la ciudad, aunque cabe mencionar que estos lineamientos se encuentran alrededor de toda la región, rodeando a la ciudad y son los responsables directos de dar forma a los cuerpos superficiales de agua en la región. Sus longitudes son de 1.5 a 6 km, se interpreta que estos lineamientos sean originados por la influencia de la estructura regional de orientación NNE-SSW Tulum-Río Hondo, la cual su traza inferida se encuentra aproximadamente a 20 km al oeste de la ciudad. ES de destacar que la ciudad de Chetumal se encuentra prácticamente en la parte central de todo un sistema de lineamientos de orientación NNE-SSW, los cuales están conformados al oeste de la ciudad por el lineamiento regional anteriormente mencionado, y hacia el este por el sistema de lineamientos con la misma orientación llamado sistema Mahahual. Observando los mapas también puede observarse que el origen de la bahía de Chetumal se debe a estos sistemas estructurales.

Otro grupo de lineamientos detectado en el mapa estructural, pero de menor densidad, es el grupo NW-SE el cual se encuentra escasamente representado y solo se encuentra en los sectores NW y NE de la ciudad, aunque puede ser observado al este de la ciudad. Este sistema se atribuye por influencia o cercanía con la estructura regional de orientación NW-SE falla Ticul, la cual se interpreta que su extensión o traza se localiza al este y sur de la ciudad.

Interpretación Litológica

Son muy pocas las litologías sobre las que se asienta la ciudad de Chetumal, la principal litología que abarca gran parte de la ciudad está formada por calizas y coquinas de la Formación Carrillo, en menor medida y bordeando parte de la ciudad se encuentra aflorando la formación Bacalar, así mismo también se presentan e interpretan una serie de depósitos inconsolidados de edad Reciente. Todas estas unidades se describen a continuación:

Formación Bacalar (Caliza Arenosa).- Aunque esta unidad no se encuentra formando las cimentaciones de la ciudad, conviene citarla para darse una idea de las rocas que se encuentren alrededor de la ciudad. Esta unidad se encuentra distribuida en los límites inmediatos SE y NW de la ciudad. Se encuentra compuesta por una serie de calizas arenosas, que cambian de facies a una unidad más calcárea denominada Estero Franco, formada por calizas, estas unidades subyacen concordantemente a la unidad formacional Carrillo Puerto.

Formación Carrillo Puerto (Caliza-Coquina).- Esta secuencia de rocas de caliza y caliza coquina se encuentran distribuidas en la mayor parte de la ciudad, los afloramientos de esta unidad son muy escasos en la ciudad, sin embargo se retoma las anteriores descripciones realizadas en las ciudades de Cancún, Playa del Carmen y Tulum, se presenta de colores claros con tonos blanquecinos, compacta, muy porosa, con abundantes fragmentos y enteros de fósiles marinos, se presenta bien estratificada con estratos de espesores variables que van de los 30 a 80 cm. Sus estratos se encuentran con ligeras inclinaciones que van desde los 01° a 05° de inclinación, por lo que se puede interpretar que son prácticamente horizontales.

Depósitos inconsolidados Lacustres (Qho la).- Esta unidad se encuentra formada por depósitos inconsolidados de edad reciente, formados principalmente por limos y arcillas, los cuales se encuentran distribuidos en toda la traza de la laguna que se encuentra limitando a la ciudad en su porción NE. Esta unidad se encuentra descansando discordantemente sobre todas las unidades litológicas anteriormente descritas.

Aunque no se reportan otras litologías recientes en el mapa geológico consultado, se interpreta que al menos la porción costera de la ciudad de Chetumal se encuentra asentada sobre terrenos que originalmente fueron pantanos o zonas de manglar donde el sedimento está formado por limos arcillosos con abundante material orgánico, con el paso del tiempo y tratando de ganar más espacio, la ciudad de Chetumal le fue ganando terreno al mar o a la bahía, por lo que las construcciones ahí asentadas están sobre suelos de origen pantanoso o limo-arcilloso además de suelos depositados antropogénicamente y los cuales pueden ser de distinta naturaleza. Entonces al realizar el análisis en conjunto hay que tener a conciencia lo anteriormente mencionado. Estos lugares son la colonia Barrio Bravo, Primera Legislatura, Aarón Merino Fernández, Plutarco Alias Calles, Centro y ciudad universitaria. Aunado a lo anterior se sospecha de estructuras kársticas que pueden complicar la situación de algunas viviendas y edificios.

Distribución de Estructuras Kársticas

En la ciudad de Chetumal no se tienen registros de cenotes o dolinas, sin embargo, la ciudad se encuentra localizada entre estructuras kársticas mayores, es decir entre poljes o en este caso tectono-karst. Hacia el oeste de la ciudad, en el poblado de Santa Elena se tienen registradas algunas estructuras kársticas formadas principalmente por cenotes. Hacia la porción o zona costera se tiene conocimiento de forma oral de cuevas o cavernas, sin embargo, estos datos no han sido

confirmados, por lo que no se descarta la posibilidad de estructuras kársticas en esta área.

Distribución de Hundimientos

El mayor número de hundimientos reportados de las cuatro ciudades visitadas, lo ocupa la ciudad Chetumal, con más de 1,000 hundimientos registrados. Estos se presentan generalmente en dos áreas, en la zona costera y en la zona centro norte. El área o zona costera presentan una densidad bastante alta de este fenómeno, ocupando un 90% de los hundimientos reportados en esta ciudad. Esta zona se encuentra ocupada por las colonias Centro, Plutarco Elías Calles, Barrio Bravo, Primera Legislatura y Aarón Merino Fernández. La zona está definida por la menor altitud en la ciudad, ocupando toda la porción costera de esta. Los hundimientos presentes en esta área van desde 1 hasta 200 cm de profundidad, predominando los hundimientos de 10 a 50 cm de profundidad. Los hundimientos de 50 a 100 cm son relativamente poco abundantes, mientras que los hundimientos mayores a 1 m, son muy poco frecuentes o raros. Delimitando los hundimientos de la zona Costera, se observa que su porción sur se encuentra formada por hundimientos entre 10 a 50 cm de profundidad, con algunos escasos hundimientos mayores a 50 cm, mientras que su porción norte (a partir de la calle Héroes de Chapultepec) también presenta las mismas características en cuanto a hundimientos entre 10 a 50 cm de profundidad, mientras que los hundimientos mayores a 50 cm son regularmente abundantes, presentándose algunos con profundidad mayor a 1 m, tomando en cuenta el tamaño o longitud de los hundimientos, se establece lo siguiente: En la zona costera, su porción sur se encuentra conformada por abundantes hundimientos que varían entre 30 cm a mayores de 25 m, sin embargo predominan aquellos entre 30 cm a 5 m, por lo que aquellos hundimientos mayores de 5 m de longitud son poco frecuentes. En la porción norte de la zona costera se observan hundimientos que van desde los 30 cm hasta mayores de 25 m de longitud, sin embargo, los predominantes son entre 30 a 2.5 m, mientras que mayores a 2.5 m son escasos, a excepción de la porción más septentrional, en donde se ubica la Universidad de Quintana Roo, donde se encuentran unos pocos hundimientos que van desde los 60 cm a 10 m de longitud.

La zona de hundimientos Centro Norte abarca las colonias 17 de Octubre, 20 de Noviembre, SAHOP, Andrés Quintana Roo, Comité Pro territorio, Isabel Tenorio y Pro territorio. Esta zona contiene pocos hundimientos y la mayor cantidad de estos hundimientos se presentan en la colonia Comité Pro territorio. Aquí, los hundimientos generalmente van de 10cm a 50 cm de profundidad, mientras que los de mayor profundidad son escasos. La longitud de estos hundimientos va desde 10 cm a 5 m, sin embargo, predominan aquellos entre 10 cm a 2.5 m, mientras que aquellos mayores a 2.5 m son raros. Al parecer esta zona tiene una continuidad hacia el SW, hacia la colonia 8 de Octubre, donde se presentan algunos hundimientos aislados menores.

Existen escasamente y de forma aislada otros hundimientos en la ciudad que se encuentran dentro del promedio de 10 a 50 cm de profundidad, a excepción del hundimiento localizado en la intersección de la avenida 4 de Marzo y Celul, en la colonia Payo Obispo.

3.1.4.5 Conclusiones

El hundimiento y el agrietamiento del terreno son fenómenos difíciles de predecir debido a que su determinación requiere del conocimiento preciso de las propiedades mecánicas de resistencia y deformación del subsuelo, de su distribución estratigráfica, del conocimiento de las variaciones o anomalías subterráneas, de la determinación de la forma y distribución del basamento, del conocimiento del nivel freático y de su variación con el tiempo y de la determinación de las propiedades hidráulicas del terreno, entre otras (2). <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/index.php/riesgos-geologicos/hundimientos-regionales-y-locales-agrietamientos>.

de supervisar las áreas en donde se llevaran a cabo construcciones de fraccionamientos, entre otros.

El plan de desarrollo urbano debe tomar en cuenta las áreas donde existen estructuras kársticas como dolinas, cenotes y úvalas, delimitando la extensión de dichas áreas para su uso como parques recreacionales o áreas verdes, no permitiendo por ningún motivo la construcción de habitaciones, edificios, e infraestructura pública que pueda ser afectada por los hundimientos.

Uno de los principales factores en la generación de hundimientos, es la ocupación de áreas de pantanos y manglares en las áreas costeras de la entidad, en algunos casos se ha ganado terreno al mar, y se ha hecho uso de estas áreas para la construcción de edificios, arterias viales, etc. Esta modalidad debe de reinvertirse, ya que existen una mayor probabilidad de hundimiento, ya sea tanto por el factor de las características del suelo limo-arcilloso, nivel del agua (ya sea marina o continental) así como la presencia de estructuras kársticas, que en las áreas de pantanos y manglares suelen estar ocultas.

3.1.4.7 Referencias bibliográficas

(SEDESOL), S. d. (2004). Guía Metodológica para la Elaboración de Atlas de Peligros Naturales a Nivel Ciudad (Identificación y Zonificación). Pachuca, Hidalgo, México.

(SEDESOL), S. d. (2004). Guía para la Identificación Rápida de Peligros Naturales (en zonas urbanas). Pachuca, Hidalgo, México.

(SGM), S.-G.-M. (2013). Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales del Estado de Yucatán. México: Gobierno del Estado de Yucatán 2012-2018.

A., P.-B. (2001). Investigación y Exploración de Acuíferos Kársticos. Boletín Geológico y Minero, 112(Especial), 65-76.

Aguayo C. J. E., B. R. (1980). Estudio Sedimentológico en el Area Tulúm-Cancún-Isla Mujeres, Estado de Quintana Roo, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, XLI (1 y 2), 15-32.

Aguilar-Duarte Y., B. F. (2013). Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación de Acuíferos Kársticos. Tropical and SUBtropical Agroecosystems (16), 243-263.

Aguilera-Martínez M. A., C.-L. V. (2006). Carta Geológico-Minera Cancún F16-8, Escala 1: 250 000. Yucatán y Quintana Roo, México: Servicio Geológico Mexicano.

Bauer-Gottwein P., G. B.-V.-A. (July de 2011). Review: The Yucatán Peninsula Karst Aquifer, México. Hydrogeology Journal, 1-18.

Bautista F., P.-A. G. (2011). Spatial Distribution and Development of Soils in Tropical Karst Areas from The Peninsula of Yucatán. Geomorphology (135), 308-321.

C., R.-S. (s.f.). El Inframundo Maya y los Sistemas Kársticos. Ciencia y Cultura: Arqueología Subacuática, 38-41.

CENAPRED, (2013). Guía del contenido mínimo para la elaboración del atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. México, D.F.

CN. (20 de Junio de 2013). Derriban condominio "Sol Maya". Playa del Carmen, Quintana Roo, México.

CONACYT, C. (2007). Atlas de Riesgo Oceanográfico. Chetumal.

Cozumel, G. M. (2011). Atlas de Riesgos del Municipio de Cozumel. Cozumel.

Del Campo Noticias. (05 de Mayo de 2015). Hundimientos representan la mayor problemática para Chetumal. Chetumal, Quintana Roo, México.

Desastres), C. (. (2001). Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México (Primera Edición ed.). (O. Z. Martínez, Ed.) Distrito Federal, México.

Desastres), C. (. (2004). Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Distrito Federal, México.

E., C. C. (27 de Agosto de 2007). Contaminación de Mantos Freáticos en Cancún. La Jornada Ecológica. (L. Angulo, Ed.) México. Obtenido de www.jornada.unam.mx/2007/08/27/eco-c.html: www.jornada.unam.mx/2007/08/27/eco-c.html

E., L. R. (1973). Estudio Geológico de la Península de Yucatán.

E., W. K. (1995). Geologic Atlas of Fillmore County, Minnesota: Sinkholes and Sinkhole probability. County Atlas Series Atlas C-8 Part B. (T. M. Fund, Ed.) State Minnesota, E.U.A.

Escolero-Fuentes O. A., M.-S. L.-V.-R. (2005). Programa de Monitoreo de Aguas Subterráneas de la Caleta Xel-Ha y sus alrededores. Informe Técnico para Grupo Xcaret, Universidad Nacional Autónoma de México.

Espinasa-Pereña R., y. N.-T. (2013). Mapa de Susceptibilidad a Fenómenos Kársticos. Centro Nacional de Prevención de Desastres.

F., D.-D. O.-A. (2003). Karst Tropical de Colinas, Tipología y Evolución en el Plio-Cuaternario en República Dominicana. XI Reunión Nacional de Cuaternario, (págs. 123-128). Oviedo (Asturias).

F., P. J. (1984). Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to ground-Water Withdrawal. UNESCO.

F., W. W. (November-December de 1992). Hidrogeologic Factors Affecting New Sinkhole Development in the Orlando Area, Florida. Groundwater, 30(6), 918-930.

Festa V., F. A. (August de 2012). Sinkhole Evolution in The Apulian Karst of Southern Italy: A Case Study, with some Considerations on Sinkhole Hazards. Journal of Cave and Karst Studies, 74(2), 137-147.

Fragoso-Servón P., B. F. (2014). Caracterización de las Depresiones Kársticas (Forma, Tamaño y Densidad) a escala 1: 50,000 y sus Tipos de Inundación en el Estado de Quintana Roo, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 31(1), 127-137.

Fraustro-Martínez O., I. T. (2010). Vulnerabilidad a la Inundación en Las Formas Exokársticas del Noreste de la Península de Yucatán. VI Seminario Ibero-Americano de Geografía Física: Universidad de Coimbra, (págs. 1-16). Portugal.

G., P. E.-O. (s.f.). Hidrogeología de la Yucatán Península.

Gaona-Vizcayno S., G.-D. A.-P. (1980). Cenotes, Karst Característico: Mecanismo de Formación. Revista del Instituto de Geología, 4(1), 32-36.

Gil, G. (xxx). Geología.

Gobernación, S. d. (2015). CENAPRED MEXICO. Recuperado el Julio de 2015, de <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/index.php/riesgos-geologicos/hundimientos-regionales-y-locales-agrietamientos>

Gutiérrez F., C. A. (2008). Identification, Prediction and Mitigation of Sinkhole Hazards in Evaporite Karst Areas. Geology, 53, 1007-1022.

- Gutiérrez F., P. M. (s.f.). A Review on Natural and Human-Induced Geohazards and Impacts in Karst. *Earth-Science Reviews* (138), 61-68.
- K., B. D. (2014). *Geology and Sinkhole Development of the Hagerstown Valley: Phase Summary Report*. Research Report, State Highway Administration, Maryland Department of Natural Resources, Resources Assessment Service and Maryland Geological Survey.
- L., B. G. (1984). Fracture Mapping and Ground Subsidence Susceptibility Modeling in Covered Karst Terrain: The Example of Dougherty County, Georgia. (C. a. Johnson, Ed.) 595-606.
- L., F. (August de 2005). Using State-Wide GIS Data to Identify the Coincidence Between Sinkhole and Geologic Setting Structure. *Journal of Cave and karst Studies*, 67(2), 120-124.
- Laboratory, N.-J. P. (2003). *Anaglyph Yucatán Península México*. Imagen.
- Lemus-Bustos O., M.-F. J. (2006). Carta Geológico-Minera Cozumel F16-11 Escala 1: 250 000. Quintana Roo y Yucatán, México: Servicio Geológico Mexicano.
- Loeza-García J. P., J.-H. A.-L.-A.-C.-H. (2006). Carta Geológico-Minera Felipe Carrillo Puerto E16-1 Escala 1: 250 000. Campeche, Yucatán y Quintana Roo, México: Servicio Geológico Mexicano.
- Lugo-Hubp, J. A.-Q.-P. (1992). Rasgos Geomorfológicos Mayores de la Península de Yucatan. (UNAM, Ed.) *Revista del Instituto de Geología*, 10(2), 143-150.
- M., D.-R. M. (2002). Karst Subsidence in South-Central Apulia, Southern Italy. *International Journal Espeleology* (31), 181-199.
- M., O.-C. I.-R. (2010). Formas Kársticas Comunes de los Cenotes del Estado de Quintana Roo. *Revista Electronica de Medioambiente UCM*, 1-20.
- M., R.-V. (2009). Aspectos Geológicos de la Cuenca del Caribe. (I. G.-A. Espinoza-Avalos J., Ed.) *El Sistema Ecológico de la Bahía de Chetumal/Corozal: Costa Occidental del Mar Caribe*, 5-11.
- Marín-Stillman L. E., P.-A. G.-R. (2005). Hidrogeología de la Península de Yucatán. En J. B. L., *El Agua en México Vista desde La Academia*, Academia Mexicana de Ciencias (pág. 411).
- Mejía-Ortiz L. M., Y. G.-M.-G. (2007). Cenotes (Anchialine) On Cozumel Island, Quintana Roo, México. *Journal of cave and Karst Studies*, 69(2), 250-255.
- Mexicanos, P. (2013). Provincia Petrolera Plataforma de Yucatán. Técnico, Petróleos Mexicanos, Subdirección de Exploración y Producción.
- NoticiasCaribe. (12 de Enero de 2005). Reportan hundimiento tras sismo: Se resblandece calle de adocreto en zona turística de Playa, a 2 cuadas de edificio colapsado en 2005. Playa del Carmen, Quintana Roo, México.
- Novedades Quintana Roo. (24 de Febrero de 2015). Denuncian más de 100 puntos con hundimientos en la ciudad. Chetumal, Quintana Roo, México.
- P., F. D. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley Editorial.
- Periodistas Quintana Roo. (18 de Enero de 2015). Hartos de los baches. Chetumal, Quintana Roo, México.
- Polémica. (21 de enero de 2015). Mujer cae en un pozo dentro de su casa. Cancún, Quintana Roo, México.
- Pueyo-Anchuela O., A.-L. D.-J.-S.-L.-A. (2012). Consideraciones Sobre la Construcción en Zonas Kársticas Activas. Caso de la Avenida de Las Estrellas de Zaragoza. *Geogaceta* (51), 63-66.
- Quintana Roo Al Día. (09 de Enero de 2012). Rebasó expectativas problemas de baches en Chetumal. Chetumal, Quintana Roo, México.
- Quintanarroense PQPalco. (03 de Febrero de 2015). Desfondes de calles en Chetumal "tragarán" más presupuesto. Chetumal, Quintana Roo, México.
- R., E.-P. (12 al 15 de Mayo 2015). Riesgos Kársticos: El Origen de Cavernas y Cenotes. Playa del Carmen.
- R., E.-P. (Octubre-Noviembre de 1994). Origen y Distribución de las Cavernas de México. *Ciencias* (36), 45-49.
- R., G. (2008). *Compilation and Production of a Karst Map of México (abstract)*. (A. G. Union, Ed.)
- Rodríguez-Velázquez, R.-C. R. (2006). Consecuencias Sociales de un Desastre Inducido, Subsistencia. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(2), 265-269.
- Sánchez-Rojas L. E., B.-N. L.-M. (2007). Carta Geológico-Minera Estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán. Primera Edición. (S. G. Mexicano, Ed.) Pachuca, Hidalgo, México.
- Sartain N., M. J. (2011). Case Study on The Assessment of Sinkhole Risk for the Development of Infraestructure Over Karstic Ground. (S. S. Vogt, Ed.) *Bundesanstalt fur Wasserbau*.
- Schmitter-Soto J. J., C. F.-B.-S.-M.-E.-A. (2002). Hidrogeochemical and Biological Characetristics of Cenotes in The Yucatán Península (SE México). (A. J. S., Ed.) *Hydrobiología* (467), 215-228.
- SEDATU. (2014). "Bases para la Estandarización en la Elaboración de Atlas de Riesgos y Catálogo de Datos Geográficos para Representar el Riesgo 2014". México.
- SGM. (2013). "Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales del Estado de Yucatán". Yucatán: 2012.
- Simón J. L., S. M.-A. (2009). Riesgo de Subsistencia Kárstica en Areas Urbanas: El Caso de Zaragoza. *Enseñanza de Las Ciencias de la Tierra*, 17(3), 303-315.
- Simón-Gómez J. L., S.-J. M.-C. (Octubre de 1998). Estudio de Riesgos de Hundimientos Kársticos en el Corredor de la Carretera de Logrono. (D. d. Zaragoza, Ed.) *Memoria Informativa*.
- Tamaulipas, G. d. (2012). *Atlas de Riesgo del Municipio de Nuevo Laredo*. Nuevo Laredo, Tamaulipas.
- Tamulipas, G. d. (2009). *Atlas de Riesgos Municipio de Tampico, Madero y Altamira*. Servicio Geológico Mexicano.
- Tulúm, G. M. (2015). *Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Tulúm, Quintana Roo*.
- UQ. ROO. (2011). *Atlas de Riesgo de la ciudad de Chetumal, Municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo 2011*. Chetumal.
- Z., W. (May de 1997). The Formation of Sinkhole in Karst Mining Areas in China and Some Methods of Prevention. *Environmental Geology* (31).
- Zarate-Barradas R. G., M.-H. A.-B.-F.-P. (2006). Carta Geológico-Minera Mérida F16-10 Escala 1: 250 000. Campeche, Yucatán y Quintana Roo, México: Servicio Geológico Mexicano.
- Zarate-López J., A.-L. F.-P. (2005). Carta Geológica-Minera Chetumal E16-4-7 Escala 1:250 000. Primera Edición. (S. G.

Mexicano, Ed.) Quintana Roo, Campeche, México: Servicio Geológico Mexicano.

Zarate-López J., L.-G. J.-G.-H. (2006). Carta Geológico-Minera Bahía Ascención E16-2-5, Escala 1: 250 000. Quintana Roo, México: Servicio Geológico Mexicano.

3.2 Sismicidad

3.2.1 Introducción

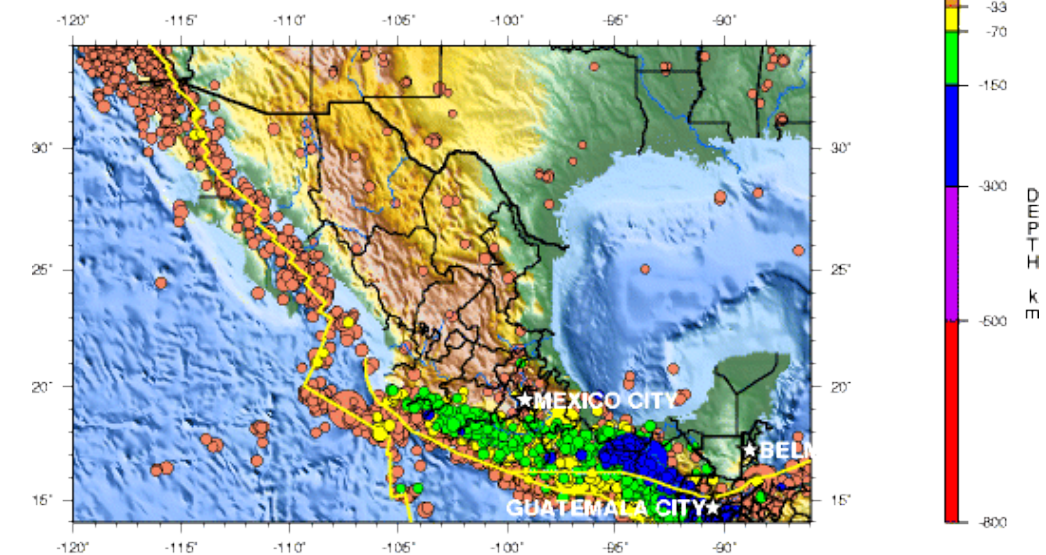
La dinámica intrínseca del interior de nuestro planeta produce un fenómeno impredecible denominado sismicidad. Siendo éste un evento natural, está presente en la evolución geológica de nuestro planeta de manera perenne. El nivel de daño que este fenómeno tiene en la sociedad es muy alto en algunas zonas bien localizadas de la Tierra. El grado de exposición de la población y sus obras civiles a los sismos es elevado en esas regiones ya que su impacto puede alcanzar importantes niveles de daño, aún en distancias mayores a las esperadas. Un ejemplo significativo es el efecto destructor del sismo por subducción ocurrido el 19 de septiembre de 1985 en la ciudad de México, distante aproximadamente 365 km del epicentro localizado a 15 kilómetros de profundidad y que produjo un terremoto trepidatorio y oscilatorio de magnitud 8.1 grados Mw con una duración de 2 minutos. Los daños causados por tal evento son aún controvertidos. Las cifras de personas muertas varían de 6,000 a 20,000 según diferentes fuentes, mientras que el número de inmuebles afectados se estima en 2831 y la suma de daños materiales llegó a 5 mil millones de pesos.¹⁸

Según registros del Servicio Sismológico Nacional, durante el siglo pasado ocurrieron, en el territorio nacional, 71 sismos con magnitud mayor o igual a 7, de los cuales el 77% se originaron a profundidades menores de 40 kms (CENAPRED, 2015). Con estos datos históricos se deduce que el grado de exposición de la población y sus obras civiles a los sismos es alto.

Hasta hoy no se ha conseguido establecer un método que permita predecir con exactitud la fecha, la localización geográfica, la profundidad y/o la magnitud de un sismo, aunque estos eventos están presentes en regiones bien definidas a nivel nacional y pueden estimarse sus magnitudes máximas tomando en cuenta los antecedentes históricos y el conocimiento geológico y geofísico.

Existe la percepción en ciertos sectores de la sociedad de que los sismos son más frecuentes, o que son de mayor intensidad que en el pasado. Sin embargo, una revisión a los registros sísmicos mundiales o nacionales en un período de 50 o 100 años permite definir que no existe variación en el número de temblores por unidad de tiempo (CENAPRED, 2006-2015), aunque sí un importante crecimiento de áreas ocupadas por asentamientos humanos en zonas inapropiadas, sin planeación adecuada, construidos con técnicas ineficientes sobre terrenos propicios a la ampliación de los movimientos sísmicos. Además, con el paso de los años y el avance tecnológico y científico, el número de estaciones de registros sísmico está aumentando constantemente, lo que permite documentar un mayor número de eventos sísmicos, particularmente los de menor intensidad.

Es necesario que todas las regiones del país (y el Estado de Quintana Roo no es la excepción) cuenten con información adecuada y actualizada que permita conocer acerca de la frecuencia, la intensidad con la que se presentan estos eventos; el tamaño del área, la cantidad de población y la infraestructura afectable, entre otros parámetros que permitan dar la importancia adecuada a intervenciones y reglamentos que definan y planifiquen acciones de prevención y organización pertinentes. Esta cultura permite atenuar el impacto ante una posible emergencia.



Seismicity of Mexico, 1990 - 2000

Figura 34. Sismicidad en la República Mexicana tomado de Zúñiga et al 2000.

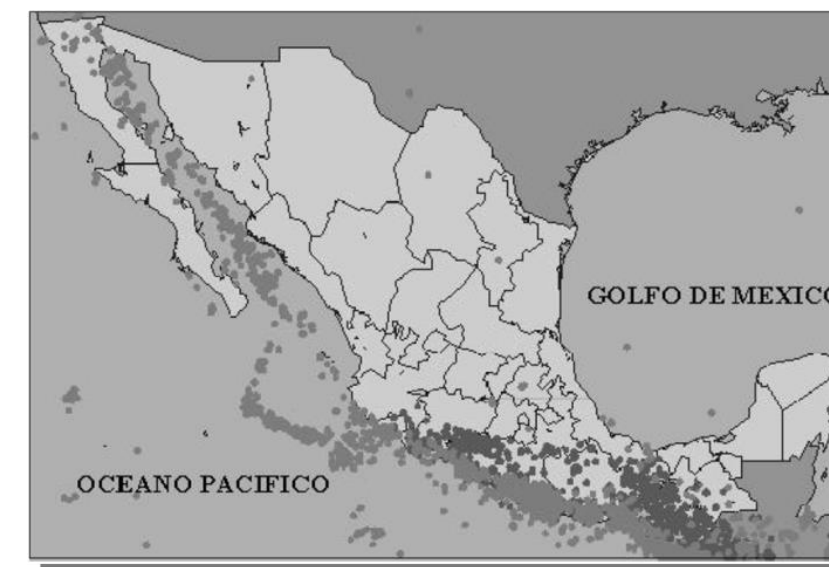


Figura 35. Epicentros de sismos con magnitudes mayores o iguales a 4.5 en la República Mexicana entre 1964 y 1995. Los puntos claros representan sismos con profundidades menores a 50 Km, los puntos oscuros representan sismos con profundidades superiores a 50 km (Fuente SSN), (Tomado de CENAPRED, 2005)

La sismicidad se debe a la interacción de la placa del Caribe con, por lo menos, cuatro placas: Norteamérica (en el Atlántico), América del Sur (Atlántico y Pacífico) y Cocos y Nazca (Pacífico). Dentro del Caribe, la velocidad de movimiento entre las placas es de unos 20 mm/año, mientras que en el Pacífico alcanza unos 80 mm/año. El peligro latente que tiene el litoral de Q. Roo es la Fosa de las Caimán que es la unión de las Placas Caribe/Norteamérica y de donde suman a la constante actividad volcánica de las islas caribeñas (Antillas) mayores y menores que se podría dar y que cuenta con uno de los arcos volcánicos más activos del mundo y que la mayoría son estratovolcanes que suelen generar domos de lava y casi sin evidencia efectos submarinos. Es decir a menos que la cuenca de Yucatán se hunda es difícil que haya sismos en la costa de Q. Roo.

¹⁸ (http://www.cires.org.mx/1985_es.php)

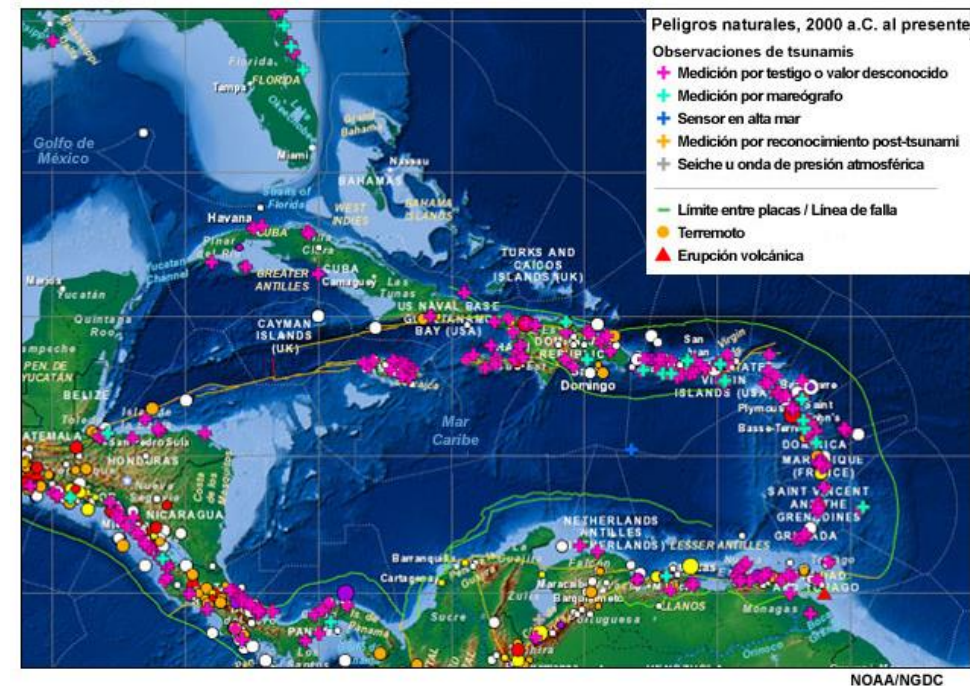


Figura 36. Peligros Naturales en los últimos 2000 años. (Fuente: NOAA, 2016).

3.2.2 Metodología

La "Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligro y Riesgo. Fenómenos Geológicos" (CENAPRED, 2006-2015), plantea considerar la información histórica de sismos durante períodos amplios de tiempo, en cuanto a magnitudes y ubicación, basados en información instrumental. Asimismo, el documento citado proporciona mapas de peligro generados por especialistas. La información se refiere a aceleraciones máximas del terreno y períodos de retorno para una intensidad asociada a la ocurrencia de daños en construcciones. Estas herramientas son muy importantes para la generación de mapas de peligro sísmico que permitan estar prevenido ante una eventualidad de esta naturaleza. El camino seguido para este capítulo se muestra en el esquema siguiente:



El peligro sísmico está definido como la probabilidad de que ocurra un fenómeno físico como consecuencia de un sismo (Mena, 2003) o como la probabilidad de ocurrencia de un movimiento telúrico de determinada magnitud en una cierta área (SGM, 2010). Debido a que no puede predecirse con certeza la ocurrencia de sismos futuros, el fenómeno sísmico no puede modelarse completamente. El análisis estadístico de sismos pasados y su aceleración determinada en diferentes sitios, permitiría obtener la probabilidad de ocurrencia de ciertas aceleraciones en el futuro. Muchos de los aspectos de los sismos y su ocurrencia son desconocidos, asumiendo lo anterior se puede entender que este fenómeno es un proceso aleatorio en el tiempo.

3.2.3 Peligro

El territorio que ocupa el Estado de Quintana Roo pertenece a una de las regiones con menos actividad sísmica registrada en el país. Lo anterior es en parte porque la ubicación tectónica de la entidad lo sitúa en una zona relativamente menos activa que la región de la costa del Pacífico, pero tampoco existen suficientes estaciones sismológicas que registren los eventos de este tipo en el Estado. En este contexto se ha monitoreado la actividad sísmica y se realizó la regionalización sísmica del país ubicando al estado en la zona A (Figura 37).

Sin embargo, el límite tectónico de la Placa del Caribe (Figura 38) con respecto a la Placa de Norteamérica es activo a través del Sistema Polochic-Motahua y se ubica relativamente cerca del sur del estado de Quintana Roo. El movimiento transcurrente, de cinemática anti-horaria de ese sistema, registrado en la Fosa Caimán, es de entre 17 y 21 milímetros por año (CFE, 2008), lo que implica que debe reforzarse el monitoreo en la zona mexicana, y observar la dinámica del desplazamiento de estas placas.

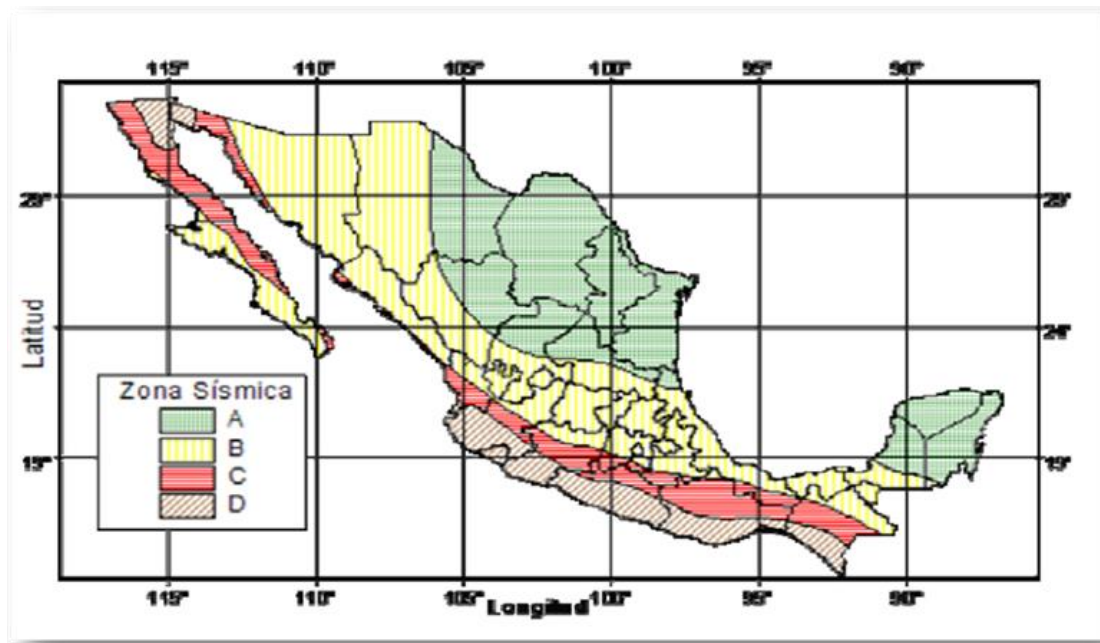


Figura 37. Regionalización sísmica de la República Mexicana (Manual de Obras Civiles CFE, 1993).

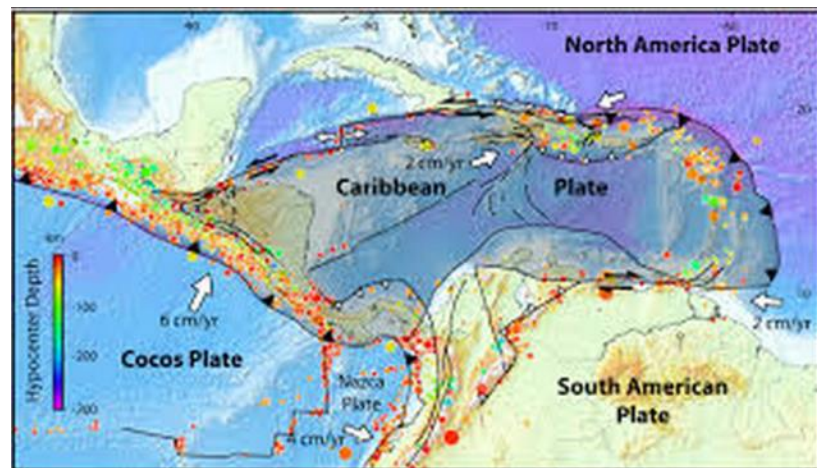


Figura 38. Desplazamiento relativo de la placa Caribe con a las placas Norteamericana y Cocos.

El Instituto de Investigaciones Eléctricas (IEE, 2005) realizó una regionalización sísmica del país para periodos de retorno de 100, 200 y 500 años (Figura 39). En esa regionalización se observa que la región del estado de Quintana Roo en todos los casos se ubica en la región de retorno más baja. Los valores para retorno en 100 años son de 0.423684, para 200 años es de 1.146507 y en 500 años el valor es de 2.616271.

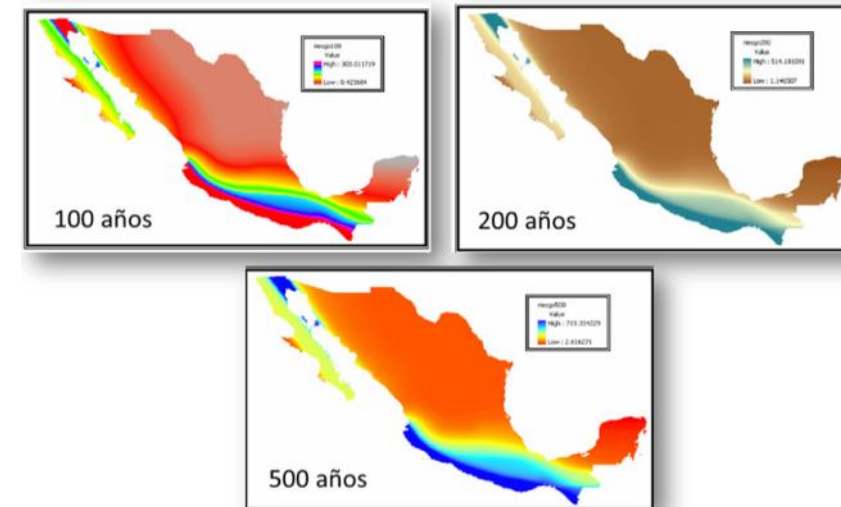


Figura 39. Regionalización Sísmica del país, para periodos de retorno de 100, 200 y 500 años respectivamente (Tomado IIE,2005).

El Servicio Sismológico Nacional cuenta con 56 estaciones de banda ancha en operación, la mayoría instaladas a lo largo de la costa pacífica y en el Eje Volcánico Transmexicano. Solo dos se ubican en la península de Yucatán, una en el Estado de Campeche y otra en Yucatán (Figura 40).



Figura 40. Distribución de estación de red sismológica de banda ancha en operación del todo el país

Como puede observarse, es evidente la insuficiente cantidad de estaciones sismológicas que registran la actividad sísmica en esta zona del país.

Estos equipos han detectado, desde hace 13 años, apenas 6 eventos someros de magnitud entre 4.2 y 5 (Tabla 42). De los cuales solo 2, uno en el año 2002 y otro en año 2015, muestran un epicentro localizado en territorio quintanarooense (Figura 41), aunque el primero a una profundidad mucho mayor que el segundo. Los demás epicentros se localizaron en la traza de estructuras del Sistema Polochic-Motahua (Figura 42).

Tabla 42. Eventos detectados por la Red Sismológica Nacional en los últimos 13 años. (Fuente SSN, 2015).

Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Prof.(km)	Mag.	Zona
10/06/2002	00:36:40	19.99	-88.25	134	4.7	Quintana Roo
10/12/2011	08:08:04	16.98	-86.46	5	5	258 km al Sureste de Chetumal, QR
11/05/2012	01:14:57	15.8	-88.32	10	4.4	299 km al Sur de Chetumal, QR
10/04/2013	14:13:55	15.96	-86.52	20	5.4	339 km al Sureste de Chetumal, QR
24/08/2013	13:58:47	15.57	-86.03	10	5	405 km al Sureste de Chetumal, QR
11/01/2015	21:49:17	20.2	-87.53	3	4.2	67 km al Suroeste de Playa del Carmen, QR



Figura 43. Red Acelerográfica de México (Tomada de Zuñiga y Guzmán 1994).

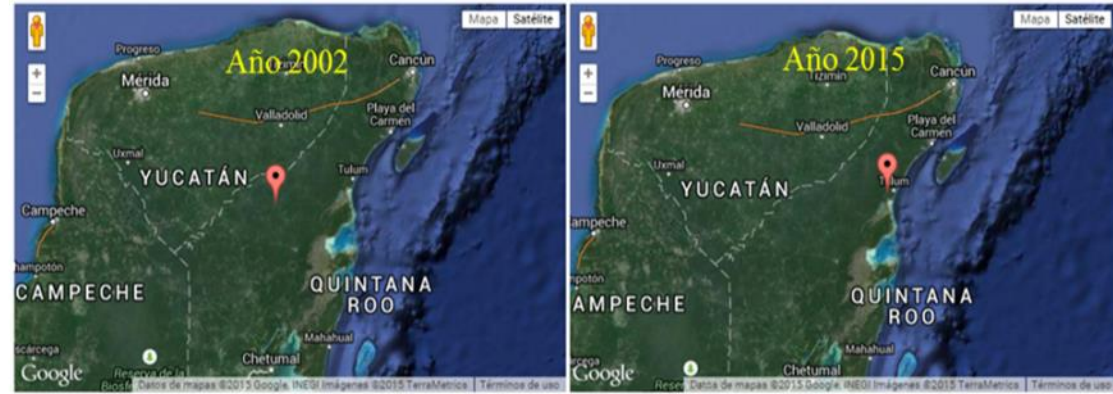


Figura 41. Sismos registrados en territorio del estado de Quintana Roo. (Fuente SSN, 2015).

Sin embargo CENAPRED (2006 – 2014) publicó datos de valores de aceleración máxima del terreno correspondientes a períodos de retorno de 10, 100 y 500 para cada municipio de la República Mexicana, en la Tabla 43 se presentan los valores para los municipios del Estado de Quintana Roo, donde se observa que el municipio Othón P. Blanco es el territorio muestra los mayores valores del estado en los períodos de retorno de 100 y 500 años.

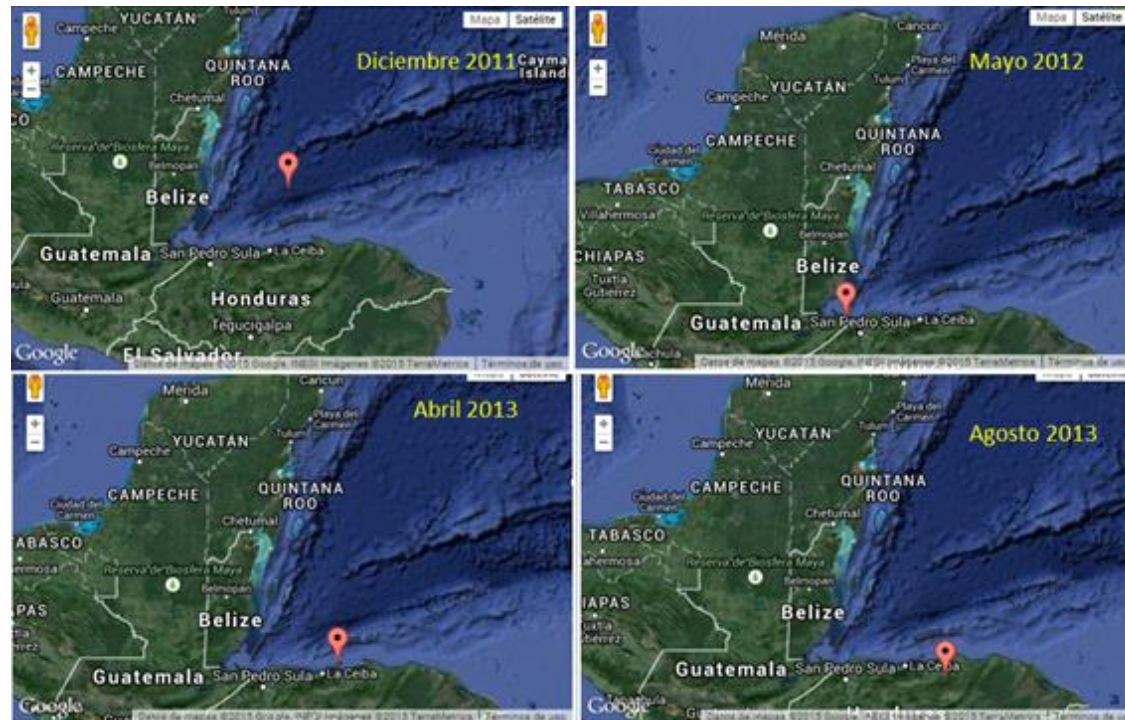


Figura 42. Sismos registrados en la cercanía estatal (Fuente SSN, 2015).

Tabla 43. Valores de aceleración máxima del terreno, correspondiente a periodo de retorno de 10, 100 y 500 años para los municipios de Quintana Roo (CENAPRED 2006-2014).

N°	ESTADO/MUNICIPIO	A max (gal) para Tr = 10 años	A max (gal) para Tr = 100 años	A max (gal) para Tr = 500 años
001	COZUMEL (QTR)	11	27	45
002	FELIPE CARRILLO PUERTO (QTR)	11	27	45
003	ISLA MUJERES (QTR)	11	27	45
004	OTHON P. BLANCO (QTR)	11	27-81	45-135
005	BENITO JUAREZ (QTR)	11	27	45
006	JOSE MARIA MORELOS (QTR)	11	27	45
007	LAZARO CARDENAS (QTR)	11	27	45
008	SOLIDARIDAD (QTR)	11	27	45

Los períodos de retorno para aceleración del terreno de 0.15 g (aceleración de la gravedad) o mayores se muestran en la 0.

Tabla 44. Periodo de retorno (Tr) para aceleración de 0.15g o mayores en los municipio del estado de Quintana Roo (CENAPRED 2006-2014).

Por otro lado, la Red Acelerográfica de México (Figura 43) tiene sus equipos más cercanos en el Estado de Chiapas y no existe ningún equipo en la península de Yucatán.

ESTADO	MUNICIPIO	LOCALIDAD	LONG °N	LAT °W	ALT (m.)	POB	TR (años)
QUINTANA ROO	BENITO JUAREZ	CANCUN	-86.8336	21.1611	8	397191	10000
	COZUMEL	COZUMEL	-86.9417	20.5167	5	59225	10000
	FELIPE CARRILLO PUERTO	FELIPE CARRILLO PUERTO	-86.0453	19.5766	30	16545	10000
	ISLA MUJERES	ISLA MUJERES	-86.7517	21.2561	5	10024	10000
	OTHON P. BLANCO	CHETUMAL	-88.3053	18.5036	10	121602	10000
	SOLIDARIDAD	PLAYA DEL CARMEN	-87.0767	20.6239	15	43613	10000

3.2.4 Vulnerabilidad

De acuerdo con la zonificación sísmica elaborada por la Comisión Federal de Electricidad, la mayor parte de Quintana Roo se encuentra en la Zona A, que es la de menor peligro, y únicamente una pequeña porción al Sur de la entidad, en el municipio de Othón P. Blanco, se ubica en la Zona B, de peligro medio (Figura 44).

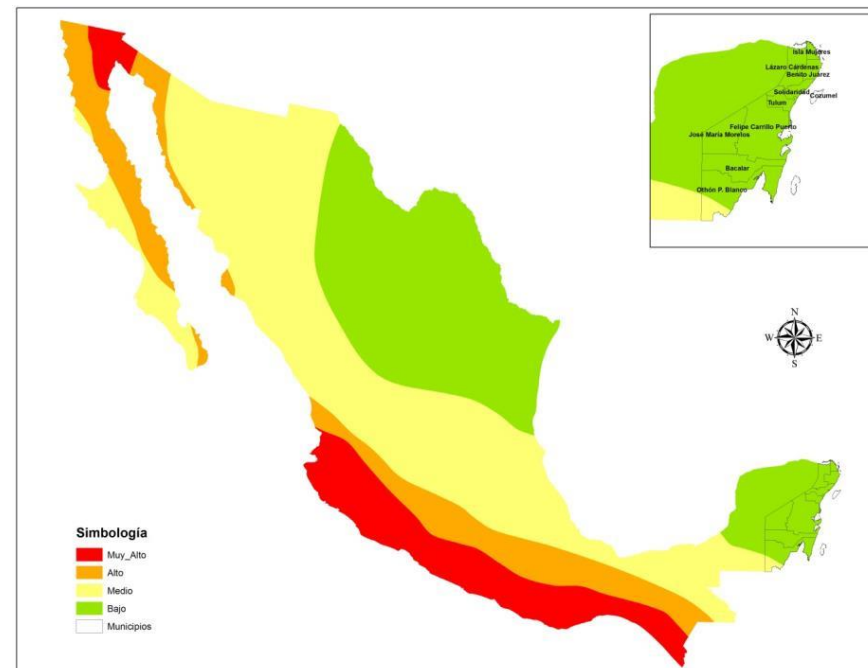


Figura 44. Zonificación sísmica CFE.

De acuerdo con el Servicio Sismológico Nacional, la actividad sísmica en la Península de Yucatán es poco frecuente y de baja magnitud, de hecho, en los últimos 15 años, el SSN únicamente tiene registrados dos eventos. El primero fue un sismo de 4.7 grados en la escala de Richter con epicentro a 17 kilómetros de San Andrés, Felipe Carrillo Puerto ocurrido el 6 de junio de 2002. Posteriormente, el 12 de enero de 2015, se reportó un sismo de 4.2 grados a 67 kilómetros al Suroeste de Playa del Carmen¹⁹. Si bien ninguno de estos eventos causó daños o pérdidas, si ocasionó preocupación en la población del Estado que no está familiarizada con este tipo de fenómenos.

De acuerdo con la publicación "Los sismos en la historia de México", existe información histórica de otro sismo ocurrido en la región "el 15 de noviembre de 1908 a las 9:25 horas, que fue sentido fuertemente en un amplio territorio de la zona de Quintana Roo y Yucatán"²⁰.

Derivado de lo anterior, y aunque no se tiene registro de afectaciones en la vivienda a causa de eventos sísmicos, se aprovechó la información recopilada en campo para calcular la vulnerabilidad física de la vivienda ante este tipo de fenómenos, para lo cual se tomó como base el índice que mide la vulnerabilidad física de la vivienda (I_{vf})²¹, propuesto por el Cenapred, mismo que se estimó para cada combinación de materiales identificados en la región.

La expresión utilizada para su cálculo fue la siguiente:

$$I_{vf} = \frac{V_i P_i}{V_p P_m}$$

Dónde:

I_{vf} = Representa el índice que mide la vulnerabilidad física

V_i = Representa la calificación según el tipo de vivienda de acuerdo con la tabla**

V_p = Es la vivienda con el peor desempeño en relación a su vulnerabilidad

P_i = Es el nivel de peligro por sismo en la zona de estudio²²

P_m = Es el nivel de peligro máximo por sismo²³

Al igual que en el caso de sismo, las 17 combinaciones de materiales presentes en el estado se agruparon en 7 tipologías de acuerdo con las características constructivas y los materiales utilizados tanto en techos como en muros (Tabla 45).

Tabla 45. Combinación de materiales encontrados en el estado de Quintana Roo y tipología asignada.

Combinación	Muros	Techos	Tipología asignada
1	Bahareque	Palma	10
2	Bahareque	Lámina	10
3	Bloque hueco de concreto	Palma	4 Y 2
4	Bloque hueco de concreto	Lámina	4 Y 2
5	Bloque hueco de concreto	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	1 Y 3
6	Concreto colado	Lámina	4
7	Concreto colado	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	3
8	Desecho	Lámina	10
9	Lámina de cartón	Lámina	10
10	Madera	Lámina	9
11	Madera	Palma	9

¹⁹ Servicio Sismológico Nacional. Reporte del sismo del 12 de enero de 2015, Quintana Roo (M 4.2). http://www.ssn.unam.mx/jsp/reportesEspeciales/Sismo_QR_12ene2015.pdf

²⁰ García Acosta Virginia y Suárez Reynoso Gerardo. "Los sismos en la historia de México", tomo I. Fondo de Cultura Económica, 1996

²¹ Cenapred. Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Evaluación de la vulnerabilidad física y social. 2006.

²² Los valores se definen más adelante.

²³ Idem.

12	Piedra sobre piedra	Lámina	5
13	Piedra sobre piedra	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	6
14	Piedra sobre piedra	Palma	5
15	PVC relleno de concreto	Lámina	4
16	Simple Piedra sobre piedra	Palma	5
17	Simple Piedra sobre piedra	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	6

Fuente: Elaboración propia

Nota: Para las combinaciones 3, 4 y 5 la tipología asignada depende de si la mampostería está o no deficientemente reforzada.

Con base en lo anterior, a cada tipo de vivienda predominante en el Estado le fue asignada una calificación obtenida de la información técnica que establece el Cenapred en su guía metodológica²⁴, lo que nos arrojó la variable V_i . La vivienda con el peor comportamiento fue el tipo 6, a la cual se le asignó una calificación de 3.2, misma que representó el valor de la variable V_p .

Para obtener P_i se utilizó la zonificación sísmica de la Comisión Federal de Electricidad, misma que ubica en Quintana Roo dos zonas de peligro, una de nivel bajo y otra de nivel medio. De acuerdo con las especificaciones del Cenapred, el valor asignado para la Zona A fue de 0.08 y para la Zona B de 0.14. La variable P_m corresponde al nivel máximo de peligro por sismo, que es de 0.80.

Una vez obtenidas todas las variables se procedió a calcular el Índice de vulnerabilidad física para cada tipo de vivienda según la zona de peligro en la que se encontrara, lo que arrojó los resultados que se observan en la Tabla 46.

Tabla 46. Índice de vulnerabilidad física ante sismos para cada tipo de vivienda según zona de peligro.

Tipo de vivienda	Calificación de la vivienda para viento (V_i)	Zona de peligro Bajo Valor de P_i	Zona de Peligro Medio Valor de P_i	Nivel Máximo de peligro (P_m)	Vivienda con el peor desempeño en relación a su vulnerabilidad (V_p)	Índice de vulnerabilidad física zona de peligro Bajo sismo (I_{vf})	Índice de vulnerabilidad física Zona de peligro Medio sismo (I_{vf})
1	1	0.08	0.14	0.80	3.2	0.031	0.055
2	1.5	0.08	0.14	0.80	3.2	0.047	0.082
3	2	0.08	0.14	0.80	3.2	0.063	0.109
4	2.2	0.08	0.14	0.80	3.2	0.069	0.120
5	3	0.08	0.14	0.80	3.2	0.094	0.164
6	3.2	0.08	0.14	0.80	3.2	0.100	0.175
9	2.5	0.08	0.14	0.80	3.2	0.078	0.137
10	2.7	0.08	0.14	0.80	3.2	0.084	0.148

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidos los valores para cada tipo de vivienda y para ambas zonas de peligro, se asignó el valor correspondiente a las localidades o manzanas según el tipo de vivienda predominante en cada una de ellas.

Si bien el peligro sísmico en el Estado es relativamente bajo, se decidió utilizar el método de intervalos naturales para determinar grados de vulnerabilidad de la vivienda, con el fin de identificar aquellas zonas en las cuales se presentan los niveles más altos de vulnerabilidad y tener una perspectiva regional. Evidentemente, los valores obtenidos para Quintana Roo son más bajos que los que se presentan a nivel nacional, por lo que si se realizará este mismo ejercicio incluyendo otras entidades de la República Mexicana como Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Michoacán, etc., seguramente la mayoría del territorio quintanarroense obtendría valores muy bajos de vulnerabilidad física.

Una vez explicado lo anterior, los rangos quedaron definidos de la siguiente manera (Tabla 47).

Tabla 47. Intervalos utilizados para determinar el grado de vulnerabilidad física ante sismo.

Grado de vulnerabilidad física ante sismo	Intervalos del I_{vf}
Muy baja	De 0.000 a 0.031
Baja	De 0.032 a 0.069
Media	De 0.070 a 0.084
Alta	De 0.085 a 0.109
Muy Alta	0.110 ó más

Fuente: Elaboración propia.

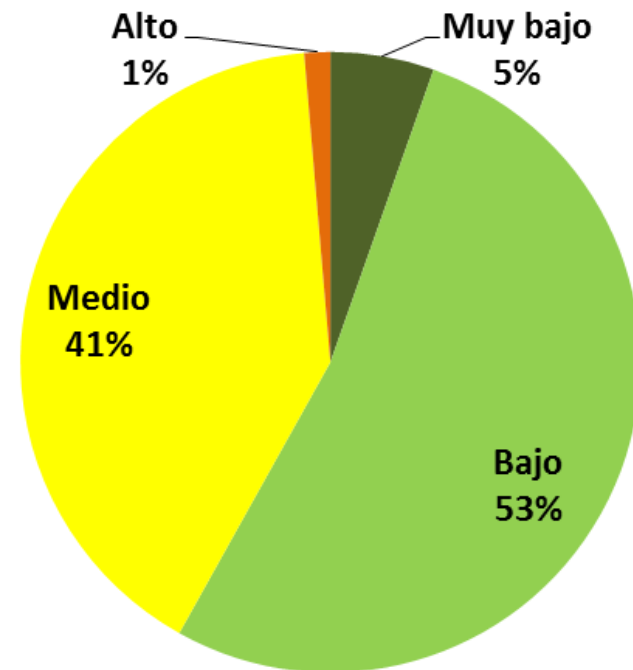
Con base en los parámetros anteriores, se crearon los mapas de vulnerabilidad física ante sismo de las 10 cabeceras municipales, así como de 533 localidades rurales con base al tipo de vivienda predominante en cada manzana, en el caso de las primeras, y en toda la localidad para las segundas.

A continuación, se presenta un breve análisis de cada municipio.

➔ Bacalar

De acuerdo con la información recopilada en Bacalar, a nivel rural únicamente la localidad de Pachuitz registró niveles altos de vulnerabilidad física ante sismos, ésta se ubica en el Occidente del municipio. En general, en todo el territorio predominaron las localidades con niveles bajos y medios de vulnerabilidad con 53% y 41% respectivamente (Gráfica 37).

²⁴ Cenapred. Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Evaluación de la vulnerabilidad física y social. 2006. P. 317 y 318



Gráfica 37. Porcentaje de localidades rurales según grado de vulnerabilidad física ante sismo

Es importante mencionar que todo el municipio de Bacalar se encuentra en la Zona A, que es la de menor peligro a nivel nacional, lo anterior influyó en que, a pesar de existir algunas viviendas con materiales endebles, en ninguna localidad predominaron viviendas que por sus características constructivas se consideraran con niveles muy altos de vulnerabilidad física. (Figura 45).



Figura 45. Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en las localidades rurales del municipio de Bacalar

En lo que se refiere a la cabecera municipal, únicamente se registraron niveles muy bajos, bajos y medios de vulnerabilidad física ante sismo. La colonia Luis Donaldo Colosio, al Norte de la ciudad, es en donde se registraron los mayores niveles (Figura 46).

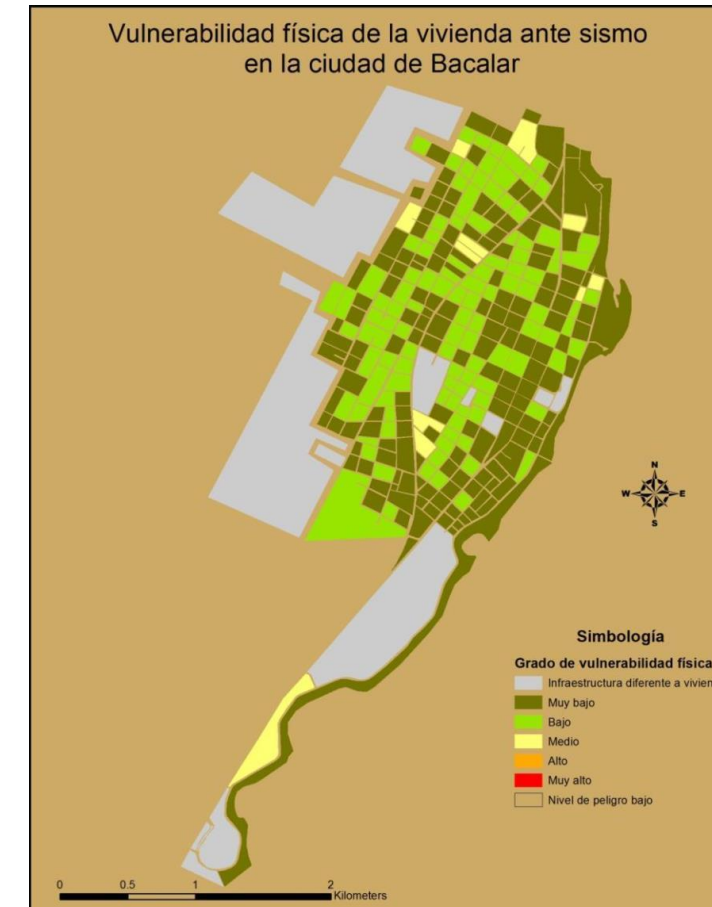


Figura 46. Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en la ciudad de Bacalar

➡ Benito Juárez

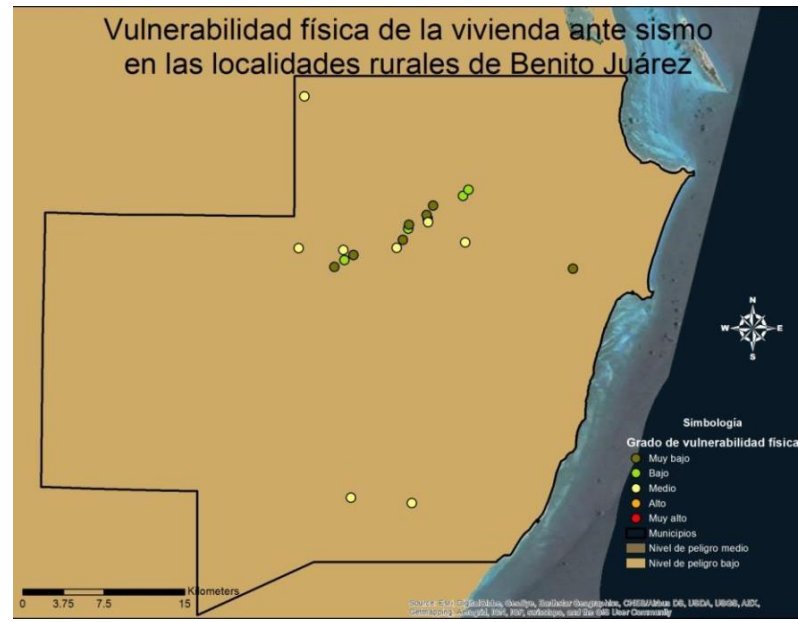


Figura 47. Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en las localidades rurales del municipio de Benito Juárez.



Figura 50. Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en las localidades rurales del municipio de Cozumel.

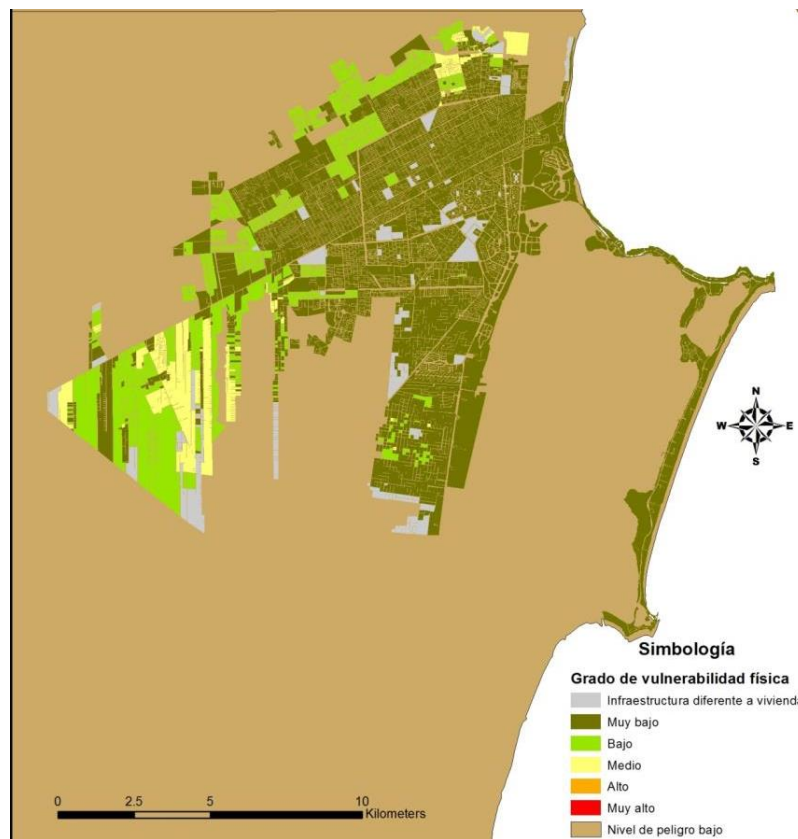


Figura 48. Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en la ciudad de Cancún.

Figura 49.

➔ Cozumel

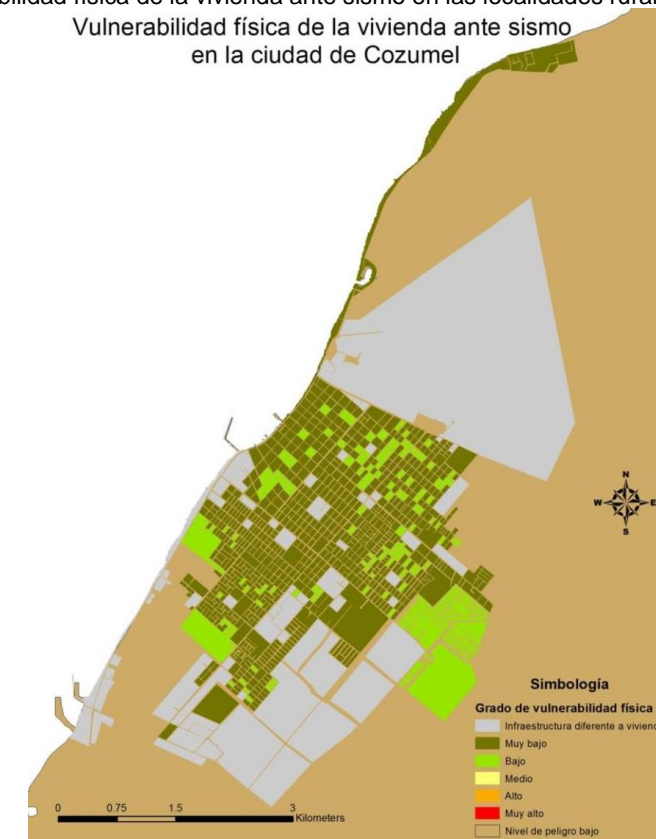


Figura 51.

Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en la ciudad de Cozumel.

➔ Felipe Carrillo Puerto.

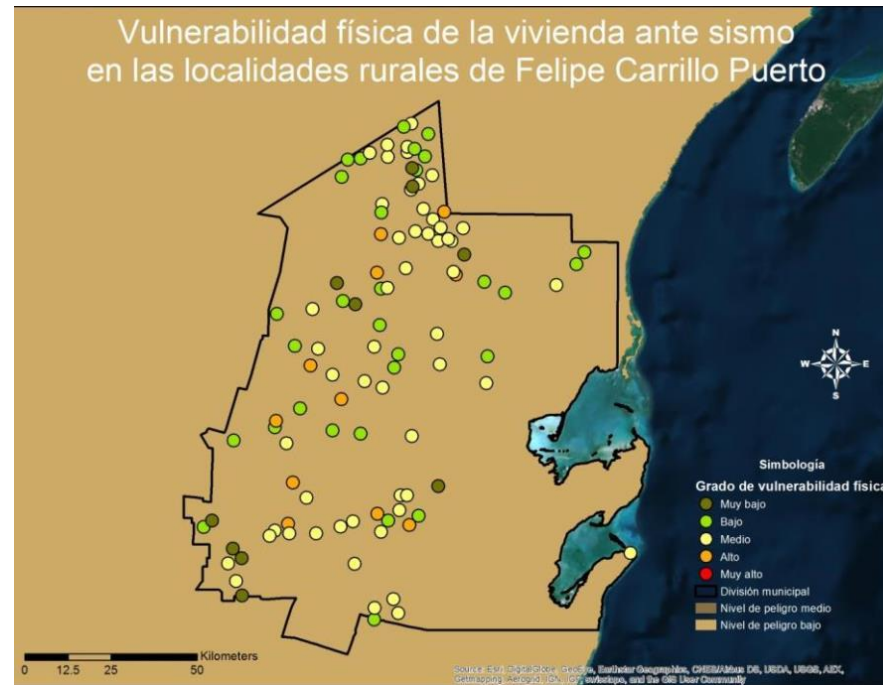


Figura 52. Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en las localidades rurales del municipio de Felipe Carrillo Puerto.

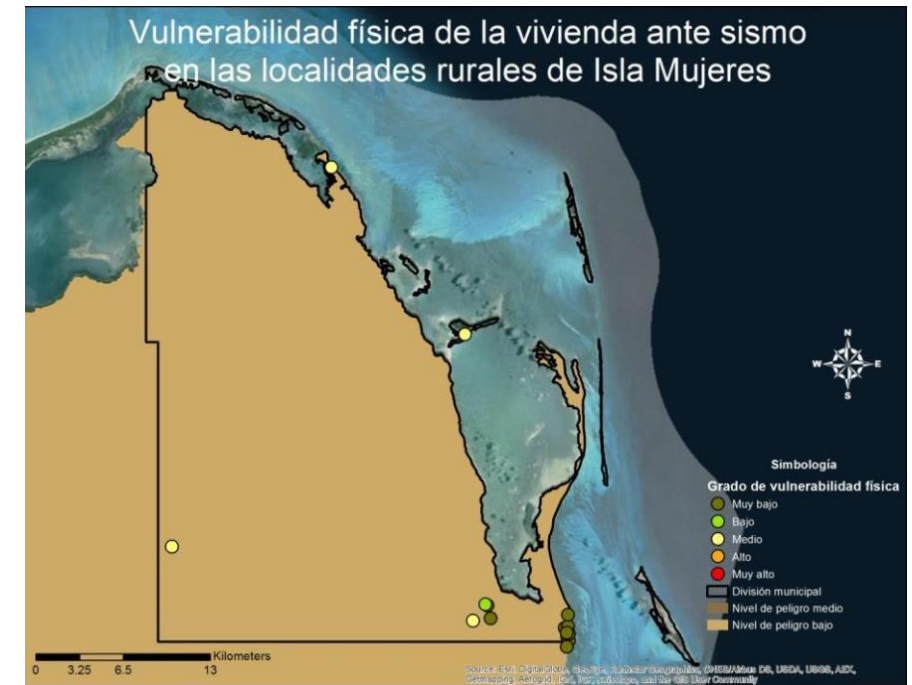


Figura 54. Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en las localidades rurales del municipio de Isla Mujeres.

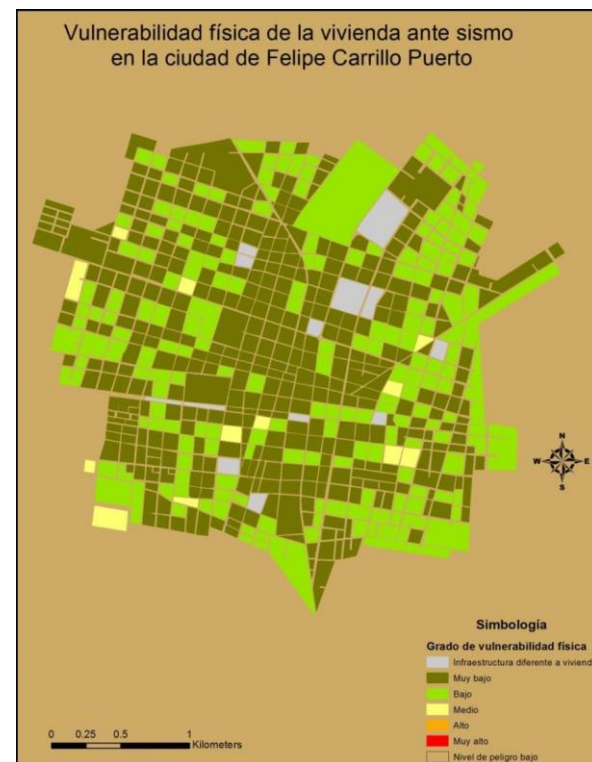


Figura 53. Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en ciudad de Felipe Carrillo Puerto.

➔ Isla Mujeres

Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en la ciudad de Isla Mujeres

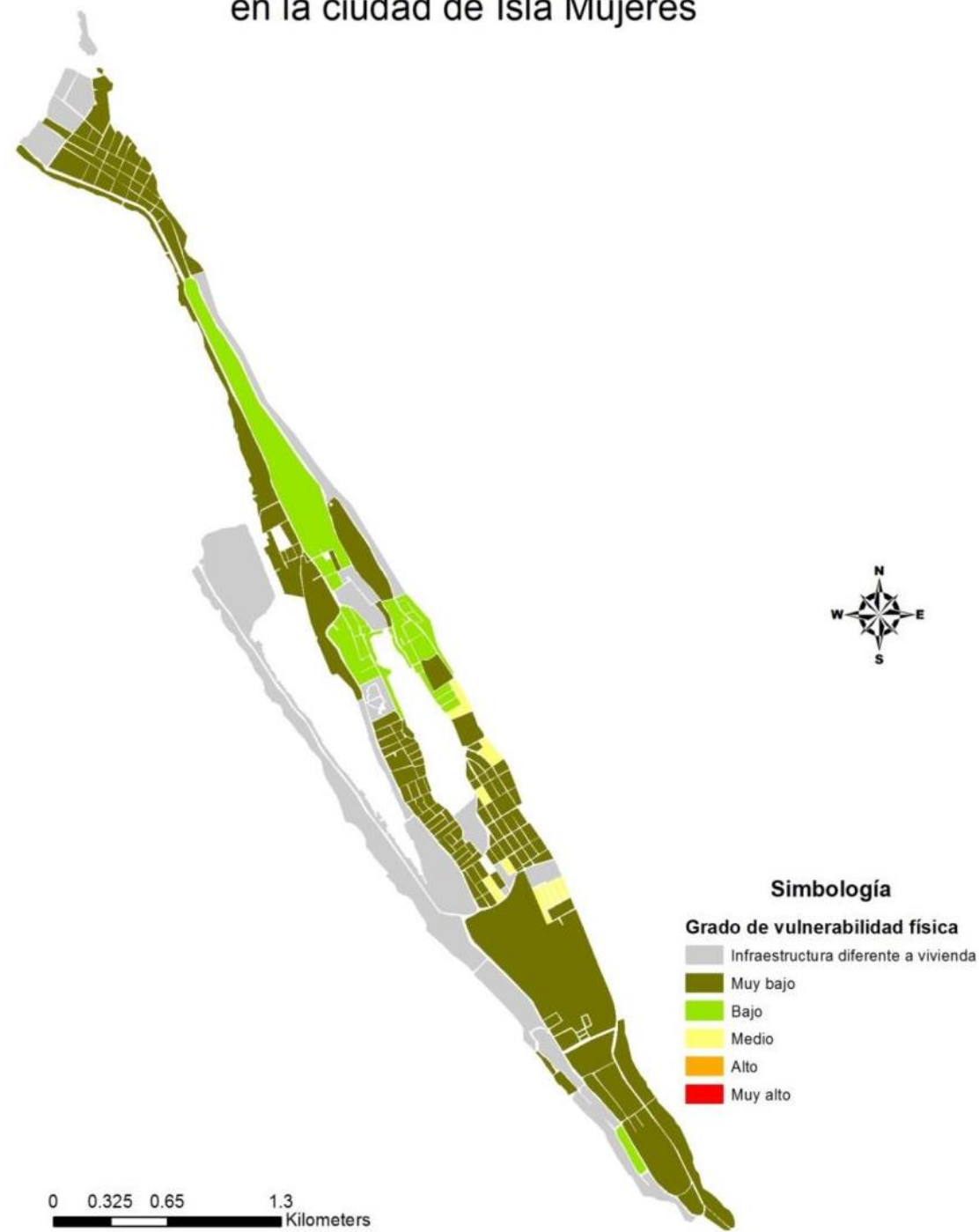


Figura 55. Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en la ciudad de Isla Mujeres.

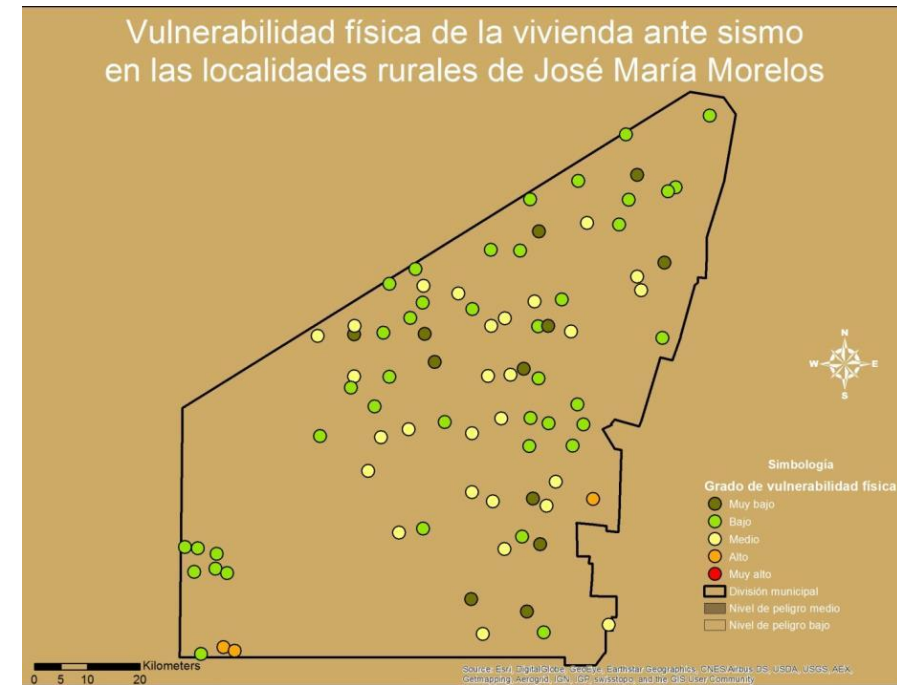


Figura 56. Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en las localidades rurales del municipio de José María Morelos.



Figura 57. Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en la ciudad de José María Morelos.



Figura 58. Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en las localidades rurales del municipio de Lázaro Cárdenas.

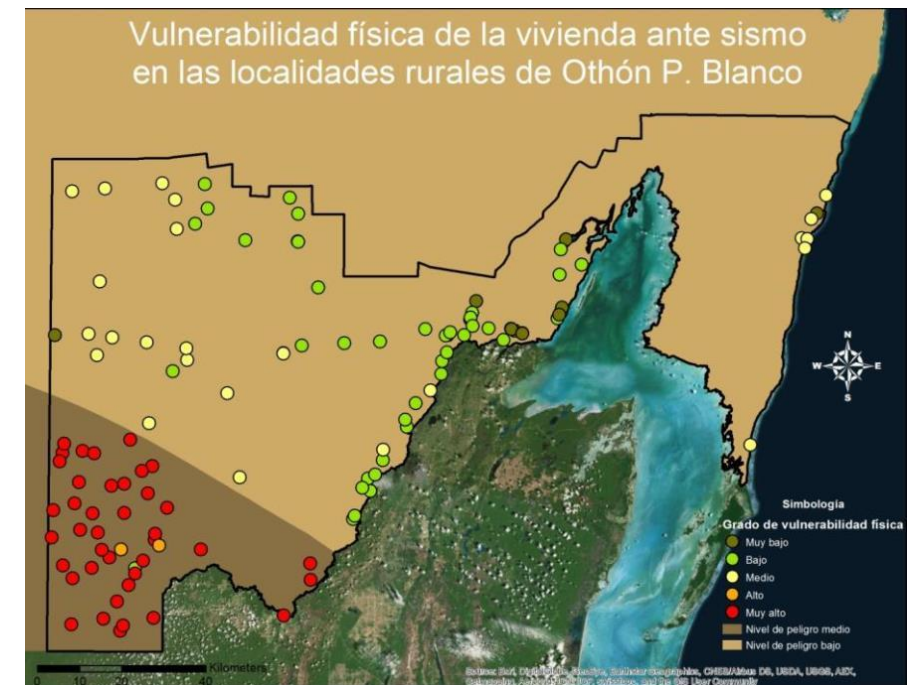


Figura 60. Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en las localidades rurales del municipio de Othón P. Blanco.

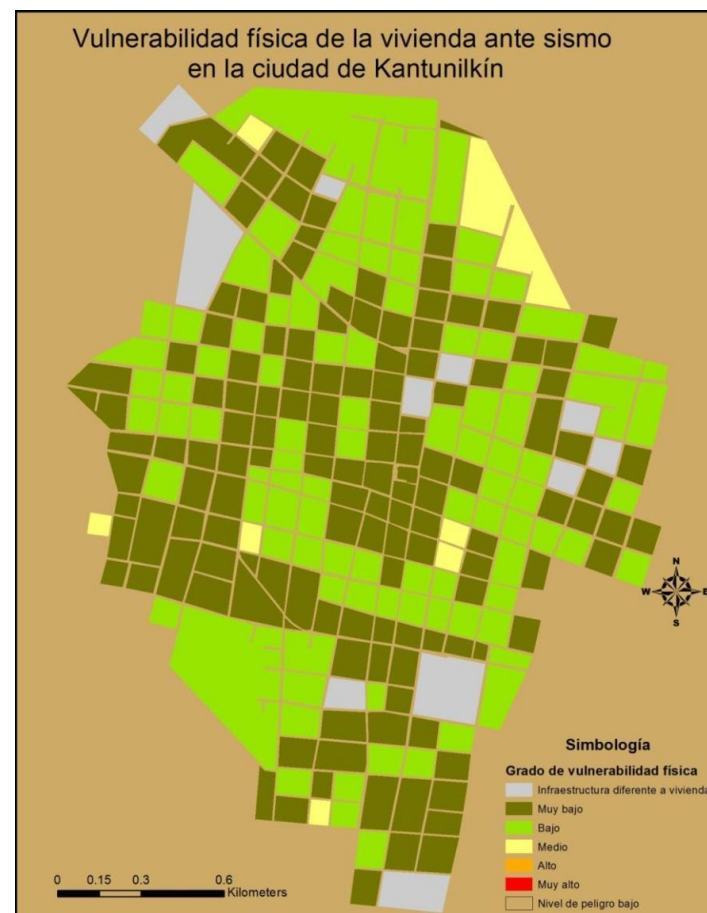


Figura 59. Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en ciudad de Kantunilkin.

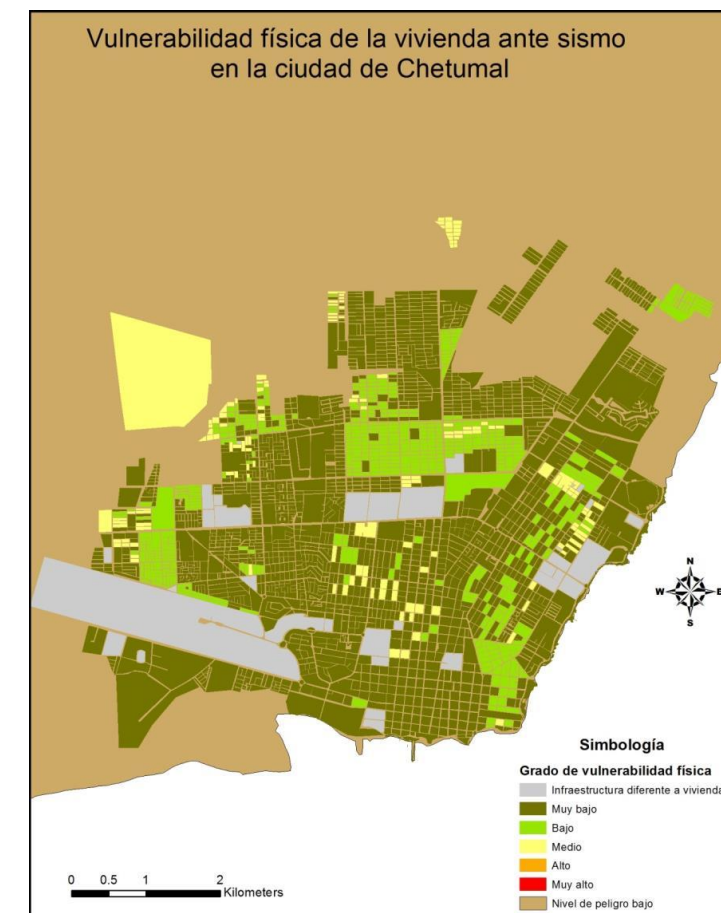


Figura 61. Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en la ciudad de Chetumal.

➔ Othón P. Blanco

➔ Solidaridad

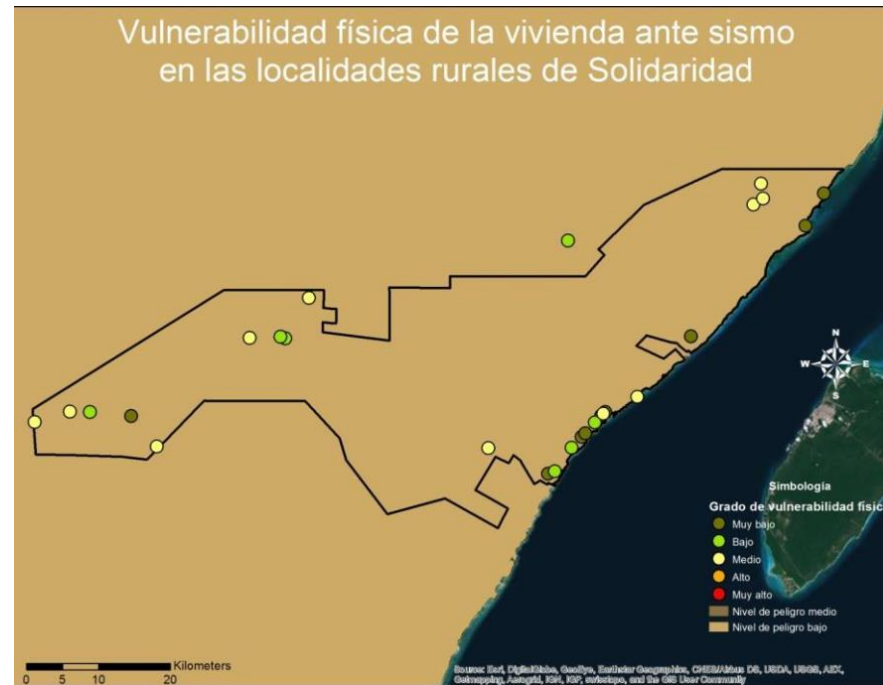


Figura 62. Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en las localidades rurales del municipio de Solidaridad.

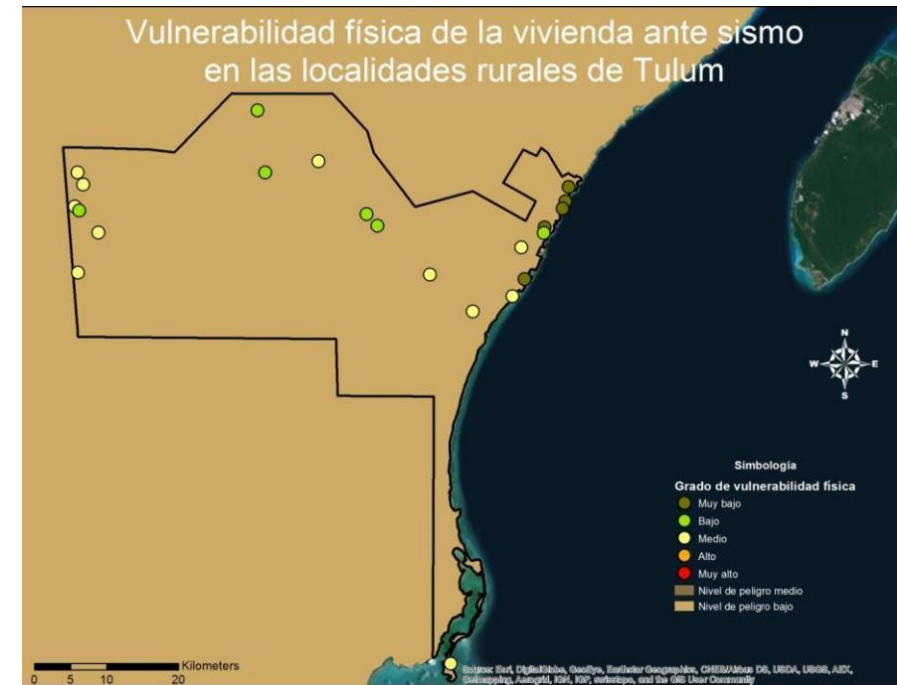


Figura 64. Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en las localidades rurales del municipio de Tulum.



Figura 63. Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en la ciudad de Playa del Carmen.
Tulum



Figura 65. Vulnerabilidad física de la vivienda ante sismo en la ciudad de Tulum.

3.2.5 Resultados

De manera práctica podemos decir que no existe una región en el mundo donde se pueda asegurar concluyentemente que nunca ha ocurrido, ni ocurrirá, un sismo de cualquier magnitud. Los sismos son producidos por eventos naturales y ningún agente antrópico puede hacer que disminuya o aumente su ocurrencia. La información disponible permite observar que en tierra firme del territorio de Quintana Roo la incidencia de sismos profundos es prácticamente nula, mientras que los sismos someros son escasos. Sin embargo, lo anterior no necesariamente implica que estos eventos sean los únicos ocurridos ya que el monitoreo de la actividad es escaso e históricamente incompleto.

El análisis determinístico realizado para el Estado nos permite definir que la magnitud de los sismos máximos calculados es menor que los registrados con instrumentos en los últimos 35 años, como puede apreciarse en la siguiente tabla:

Estructura Sismogénica	Magnitud de Sismo Máximo Instrumentado	Magnitud del Sismo Máximo Calculado (A)
Falla Ticul	4.7	4.3
Sistema Tulum-Río Hondo	4.2	4.5
Sistema Polochic-Motahua	7.3	5.5

Por esta razón se utilizaron los valores de magnitud de los terremotos máximos históricos conocidos para la Falla Ticul y para el Sistema Polochic-Motahua, y se usó el valor del sismo máximo calculado para el sistema Río Hondo. Los resultados de aceleración máxima obtenidos para cada estructura sismogénica con respecto a las principales ciudades del Estado son las siguientes

Falla Ticul			
Ciudad	Distancia al hipocentro en km	A _{max}	
		Gal	m/seg ²
Cancún	242.74	10.48	0.1048
Chetumal	51.25	50.40	0.5040
Playa del Carmen	184.97	14.10	0.1410
Cozumel	197.91	13.08	0.1308
Felipe Carrillo Puerto	46.90	53.83	0.5383
Tulum	124.45	21.56	0.2156
Sistema Tulum-Río Hondo			
Ciudad	Distancia al hipocentro en km	A _{max}	
		Gal	m/seg ²
Cancún	33.20	64.72	0.6472
Chetumal	14.46	105.20	1.0520
Playa del Carmen	14.87	103.85	1.0850
Cozumel	37.22	59.54	0.5954
Felipe Carrillo Puerto	13.47	108.60	1.0860
Tulum	5.68	144.09	1.4409
Sistema Polochic-Motahua			
Ciudad	Distancia al hipocentro en km	A _{max}	
		Gal	m/seg ²
Cancún	365.49	24.04	0.2404
Chetumal	187.96	50.84	0.5084
Playa del Carmen	321.56	27.66	0.2766

Cozumel	307.58	6.81	0.0681
Felipe Carrillo Puerto	238.75	31.95	0.3195
Tulum	259.69	35.36	0.3536

Como puede observarse en las tablas de resultados, podemos definir que el Sistema Tulum-Río Hondo representa el mayor peligro sísmico, particularmente para la ciudad de Tulum, donde la aceleración máxima del terreno sería de 1.44 m/seg² como resultado de un terremoto de magnitud 4.5 a una distancia de 5.68 km las ciudades de Carrillo Puerto, Chetumal y Playa del Carmen serían afectadas por una aceleración máxima del terreno de entre 1.05 y 1.08 m/seg² para distancias de entre 13.47 y 14.87 kilómetros con la misma intensidad del sismo. Cozumel y Cancún serían las ciudades menos afectadas por este evento asociado al Sistema Tulum-Río Hondo.

El peligro sísmico provocado por un evento de magnitud 7.3 asociado al Sistema Polochic-Motahua, produciría una aceleración máxima del terreno de 0.50 m/seg² a una distancia de casi 188 kilómetros de distancia de la ciudad de Chetumal. El peligro para la ciudad de Cozumel es una aceleración pico del terreno de 0.068 m/seg² como resultado del mismo sismo de magnitud 7.3 en el mismo sistema de fallas a una distancia de 307 kilómetros.

La falla Ticul produciría una aceleración máxima del terreno de 0.504 m/seg² producto de un sismo de magnitud 4.7 a una distancia de 51.25 kilómetros de la ciudad de Chetumal, mientras que el peligro en la ciudad de Cancún sería una aceleración pico del terreno de 0.104 m/seg² durante un terremoto de magnitud 4.7 a una distancia de aproximadamente 243 kilómetros. En general, la falla Ticul es la fuente sismogénica menos peligrosa en el Estado de Quintana Roo para las ciudades estudiadas.

Es importante hacer énfasis en el carácter subjetivo del análisis determinístico para estimar el peligro sísmico, sin embargo es útil dado que no existen datos instrumentales para realizar un análisis probabilístico. Un trabajo que comparó las diferentes propuestas de las leyes de atenuación, muestra que los resultados son muy dispares y frecuentemente son menores a los obtenidos en registros instrumentales (Sánchez-Arredondo *et al.*, 2012). Lo que reafirma la incertidumbre que implica el método determinístico.

3.2.6 Conclusiones

- El territorio de Quintana Roo se ubica en la zona de menor actividad sísmica del país.
- Existen solamente 2 sismos, de magnitud 4.2 y 4.7, registrados en territorio del estado de Quintana Roo en los últimos 35 años.
- El registro histórico de eventos sísmicos en el Estado es muy pobre, lo que impide un análisis probabilístico confiable para obtener la ocurrencia, y por lo tanto, la estimación del peligro sísmico, se realizó a partir de un análisis determinístico.
- Se identificaron 3 estructuras como posibles generadoras de sismos, la falla Ticul y el Sistema Tulum-Río Hondo dentro de la Placa de Norteamérica sobre tierra emergida en el territorio de Quintana Roo, y el sistema Polochic-Motahua que es el límite transcurrente entre la placa de Norteamérica y la placa del Caribe, donde se han registrado sismos de intensidad máxima de 7.3.
- A partir del análisis determinístico se estableció el peligro sísmico para las ciudades de Chetumal, Felipe Carrillo Puerto, Tulum, Playa del Carmen, Cozumel y Cancún.

- ➔ El sistema Tulum-Río Hondo es la fuente del mayor peligro sísmico determinístico para las ciudades de Tulum, Chetumal, Carrillo Puerto y Playa del Carmen.

3.2.7 Medidas de Prevención y mitigación

Con miras a prevenir los efectos que pudiera provocar un sismo más importante de los que hasta hoy se han registrado, se hacen las siguientes recomendaciones:

Gestionar ante el Servicio Sismológico Nacional la instalación de equipos de medición sismológica integrados a la red sismológica nacional, en el Estado de Quintana Roo y en Estados aledaños. Estos equipos podrían ser atendidos y/o parcialmente financiados por instituciones de educación superior.

De igual manera, gestionar la instalación de acelerógrafos en el territorio estatal.

Estudiar con mayor detalle la geometría y génesis de la falla Ticul para establecer evidencias geológicas que permitan medir sus desplazamientos en el tiempo.

Impulsar el estudio sobre la actividad tectónica del límite de las placas Caribe y Norteamérica en la región del Caribe mexicano.

Revisar los reglamentos de construcción de las ciudades en peligro para ajustar a los estándares estructurales para construcción de edificios, carreteras e inclusive casas habitación.

3.2.8 Referencias bibliográficas

Alfaro Soto Alejandro Altair, (2011). Peligro Sísmico en el Segmento Norte de la Región del Maule, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Geología. 1-126 pp.

Butterlin y F. Bonet, (1963). Formaciones Cenozoicas de la Parte Mexicana de la Península de Yucatán. Instituto de Geología, UNAM.

Clemente-Chávez Alejandro (2010). Ley de Atenuación de Aceleración (Pga) y Escalamiento de Forma Espectral Sísmica para Querétaro, deducidos por Análisis de Trayectorias: Aplicada a Guerrero-Querétaro. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro Facultad de Ingeniería Maestría. 1-155 pp.

http://www.ssn.unam.mx/jsp/reportesEspeciales/Sismo_QR_12ene2015.pdf

<http://es.earthquaketrack.com/mx-23-chetumal/recent>

J. García-Mayordomo y J.A. Álvarez-Gómez (2006). Estimación del terremoto máximo posible y su intervalo de recurrencia en la Falla de Carrascoy (Murcia) para su implementación en el cálculo de la peligrosidad sísmica de la región. Geogaceta, 39 (2006), 51-54 ISSN: 0213683X

Loeza García JP., Gómez Avilés A., Jiménez Hernández A. y Zárate López J. (2005). Carta Geológico-Minera Felipe Carrillo Puerto E16-1, escala 1: 250,000. Estados de Quintana Roo, Campeche y Yucatán. Informe Final. Servicio Geológico Mexicano. 1-62 pp.

Miranda Huerta, A. (2005). Carta Geológico-Minera Tizimín F16-7 escala 1:250 000, estado de Yucatán. Informe Final. Servicio Geológico Mexicano. 1-39 pp.

Sánchez Arredondo Luis Hernán, Giraldo Bolivar Orlando y Múnera Julian (2012). Análisis de Ecuaciones de Atenuación para el Proyecto Amenaza Sísmica del Departamento de Antioquia. Boletín de Ciencias de La Tierra. Número 31, Medellín, ISSN 0120 - 3630. pp 85-96.

Slemmons D,B (1977). Faults and Earthquake Magnitud. Report 6. Misc. Paper S-73-1 U.S. Army Coprs Engineeers. Waterways Experiment Station.

Slemmons, D.B. (1982). En: Proceedings of the 3rd International Earthquake Microzonation Conference, v.1, 119-130.

Zárate López j., Ávila Lugo F. y Sáenz Pita M (2004) Carta Geológico-Minera Chetumal E16-4-7, escala 1: 250,000. Estados de Quintana Roo y Campeche. Informe Final. Servicio Geológico Mexicano. 1-41 pp.

Zenón Aguilar Bardales (2002) ANALISIS DE PELIGRO SISMICO Y ESTIMADO DEL MOVIMIENTO SISMICO DE DISEÑO, Dr. Eng. Jefe del Laboratorio Geotécnico, CISMID. <http://www.bvsde.paho.org/bvsade/e/fulltext/uni/proy5.pdf>.

3.3 Tsunami

3.3.1 Introducción

La palabra tsunami es una combinación de dos *kanji* (uno de los tres sistemas de escritura japoneses): 津 *tsu*, que significa puerto o bahía, y 波 *nami*, ola, y se traduce como “ola de puerto” u “ola que arrasa con la costa”. Su sinónimo en español es maremoto.

La Real Academia de la Lengua Española²⁵ define maremoto como la “agitación violenta de aguas del mar a consecuencia de una sacudida del fondo”. Son fenómenos naturales complejos que producen secuencias de olas por efecto, predominantemente, de terremotos que ocurren cerca o en el fondo marino. Estas olas pueden alcanzar grandes alturas que provocan efectos destructivos, pérdida de vidas y daños a la infraestructura; la mayoría de estos eventos se generan en la costa del Pacífico debido a los movimientos de subducción entre las placas tectónicas²⁶.

“Un tsunami es una serie de ondas de período largo”²⁷ que se producen por una perturbación a gran escala en un tiempo muy corto, generadas en el fondo del océano. Estas series se desplazan a una velocidad de 700 km/h con longitudes de onda muy extensas, por lo tanto pueden afectar costas muy alejadas del sitio de origen. Este fenómeno tiene 3 etapas evolutivas: 1) generación, 2) propagación y 3) impacto e inundación.^{ibid}

Existen ejemplos de tsunamis originados en Chile o en Alaska que llegaron a costas del Pacífico mexicano sin consecuencias mayores. La Fosa Mesoamericana, que es la expresión de la zona de subducción entre la Placa de Norteamérica y las Placas Rivera y Cocos, se localiza muy cerca del litoral suroccidental del país y representa un riesgo por tsunami²⁸. Otra zona tectónicamente similar, es decir, con una zona de subducción, pero entre las Placas del Caribe y las Placas de Norteamérica y Sudamérica, representa un riesgo de tsunami en las costas del Caribe mexicano.

Conocer y concientizarse del riesgo por tsunami, así como sus consecuencias, es el punto de partida para generar

²⁵ real academia de la lengua española. Diccionario en línea <http://www.rae.es/>

²⁶ atlas nacional de riesgo cenapred en línea <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/index.php/riesgos-geologicos/tsunamis>

²⁷ González-González R., Ortiz Figueroa M Y Montoya Rodríguez J.M. (2012), Tsunami. Un problema matemáticamente interesante. Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones 2012 19(1): 107-119

²⁸ Atlas Nacional De Riesgo. Cenapred. Op. Cit.

comunidades resilientes ante la amenaza de este fenómeno natural (Bernard, 2001)²⁹

Los tsunamis son producidos por diferentes tipos de agentes perturbadores, entre los que destacan los procesos de remoción de masas, los sismos en zonas de subducción, las erupciones volcánicas en el fondo del mar y la caída de meteoritos en el océano.

Uno de los tsunamis más relevantes y recordados históricamente, producido por un proceso de remoción de masas, fue provocado por el colapso del volcán Krakatoa, en el suroeste de Indonesia el 26 de agosto de 1883. Este evento generó olas de hasta 40 metros de altura y provocó el deceso de más de 30,000 personas, además de la destrucción de muchas aldeas en las costas de Sumatra y Java³⁰. Este es uno de los eventos mejor documentados que permiten estudiar este tipo de tsunamis³¹.

Ward y Day³², con base en evidencias geológicas, señalan la posibilidad de un colapso lateral del flanco oeste del volcán Cumbre Vieja en la isla La Palma, perteneciente a las Islas Canarias, durante una futura erupción de dicho volcán.

La perturbación generadora de tsunamis menos frecuente es la caída de meteoritos en el océano. Para que este factor sea determinante debe ser de gran tamaño, como lo fue el meteorito que produjo el cráter Chicxulub (Pulga del Diablo), registrado en el noroeste de la Península de Yucatán.

Se calcula que el tamaño del asteroide era de 10 km de diámetro y se impactó a 25-30 km/s. Y se calcula que la colisión pudo haber liberado energía equivalente a 1014 toneladas de TNT. El cráter de 200 km de diámetro es evidente en imágenes de satélite y su caída ocurrió hace aproximadamente 65 millones de años^{33 34}.

Los efectos que se atribuyen a este evento son: elevación de la temperatura del planeta, terremotos de intensidades de 14 a 16 grados Richter, erupciones volcánicas, perturbaciones sísmicas, lluvias ácidas y tsunamis.

Se cree que la extinción masiva de dinosaurios y otras especies en el límite del Cretácico y Terciario (K/T) fue uno de los efectos más importantes del impacto de este meteorito. En el caso de los tsunamis producidos por este fenómeno, se interpreta que las olas pudieron alcanzar de 100 a 200 metros.³⁵

Las erupciones en el fondo del mar son abundantes y frecuentes, particularmente en las dorsales oceánicas. Sus efectos dependen del tamaño de la erupción y no son frecuentes generadores de tsunamis³⁶. La mayoría de los volcanes activos en el fondo oceánico se localizan en el océano Pacífico, y aunque también existen algunos en el Atlántico y en el mar

Caribe, se estima que su peligrosidad es muy relativa como para generar tsunamis.

La principal causa de tsunamis son los sismos producto de la ruptura de la corteza a lo largo de fallas geológicas que desplazan las placas tectónicas en el fondo marino, las cuales ocasionan que el agua del mar suba de 3 a 5 metros y se desborde, por lo que el océano pierde su dinámica habitual y es impulsado fuera del borde costero. Es importante señalar que no todos los sismos generan tsunamis, sino sólo aquellos que ocurren bajo el fondo marino y son capaces de deformarlo^{ibid}

En el océano Pacífico se localizan las mayores zonas de subducción, que se caracterizan por ser la región de colisión entre una placa tectónica de mayor densidad (oceánica) y una de menor densidad (continental). La placa oceánica se desplaza por debajo de la continental generando la subducción y las fosas oceánicas. El movimiento de subducción, en muchos casos, genera sismicidad de intensidad suficiente para producir maremotos. El 94% de los tsunamis ocurridos en el Océano Pacífico en el siglo XX se produjeron por esa causa³⁷.

Los tsunamis originados por sismos en el fondo marino han sido los más destructivos; los que han cobrado gran cantidad de vidas humanas y los que produjeron daños por varios millones de dólares.

Los tsunamis se clasifican³⁸ en:

- **Tsunamis locales.** El lugar de arribo a la costa está muy cercano o dentro de la zona de generación del maremoto; por tiempo de desplazamiento: a menos de una hora.
- **Tsunamis regionales.** El litoral afectado está a menos de 1,000 km, o a pocas horas de viaje de la zona de generación.
- **Tsunamis lejanos** (Remotos, transpacíficos o teletsunamis). El sitio de arribo está muy alejado, a más de 1,000 km de distancia de la zona de generación, a aproximadamente medio día o más de viaje.

La interacción de las olas de los tsunamis con la costa es muy compleja, depende de la altura de las olas en mar abierto, la batimetría, la pendiente del fondo marino, la refracción, la reflexión, la configuración del contorno de la costa y el atrapamiento de las olas en ese contorno. Todos estos factores influyen para que sea difícil hacer una evaluación del comportamiento del arribo de las olas de un tsunami, ya que esto puede variar en distancias cortas^{ibid}.

Como se mencionó en el apartado de sismicidad y derivado de las revisiones bibliográfica, es muy poco probable que se presenten eventos destructivos asociados primeramente en un evento sísmico individual o por otra parte acompañada de un Tsunami en la región geológica que comprende a la Península de Yucatán, específicamente con la costa de Q. Roo.

3.3.2 Metodologías

3.3.2.1 Antecedentes

Primeramente se examinan modelos de la recopilación bibliográfica y de investigaciones que tienen como objeto determinar si un evento catastrófico mayor a 8 grados Richter podría tener fatales consecuencias en el litoral de Q. Roo en los principales puntos de quiebre; la primera se encuentra en la plaqueta cóncava que se ubica entre la Fosa Caimán y la Falla Enriqueillo – Jardín Platano y la segunda frente a la costa de Venezuela, en el Cinturón Deformado de Sudamérica en donde las

²⁹ Lagos M. (2012), "Zonificación del riesgo de tsunami en el centro-sur de Chile", en Revista de Geografía Norte Grande, núm. 53, pp. 7-21.

³⁰ National Hurricane Center USA, Las Grandes Olas, en línea, p. 2 http://www.prh.noaa.gov/itic_pr/Las%20Grandes%20Olas/tsunami_great_waves_tc.html

³¹ Latter J. H. (1981), "Tsunami of Volcanic Origin: Summary of Causes, with Particular Reference to Krakatoa, 1883, en Bulletin of Volcanology (Impact Factor: 2.67). 44(3): p. 467-490

³² Ward S. And Day S. (2001), "Cumbre Vieja Volcano -- Potential collapse and tsunami at La Palma, Canary Islands", The American Geophysical Union, paper number 2001GL000000

³³ Cedillo-Pardo E. Y Grajales-Nishimura J. M. (1997), "Las rocas de impacto del cráter Chicxulub y el límite Cretácico-Terciario en México y áreas vecinas de América del Norte y el Caribe": in Carreño, A.L. y Montellano Ballesteros, M. Extinción masiva del límite Cretácico-Terciario; mitos y realidades.

³⁴ Grajales-Nishimura J. M., Cedillo-Pardo E., Rosales-Dominguez C., Morán-Zenteno D. J., Álvarez W., Claeys P., Ruíz-Morales J., García-Hernández J., Padilla-Ávila P. And Sánchez-Ríos A. (2000), "Chicxulub impact: The origin of reservoir and seal facies in the southeastern Mexico oil fields" en Geological Society of America, vol. 28, No. 4, pp307-310.

³⁵ Grajales-Nishimura J. M, comunicación personal

³⁶ NOAA. Las Grandes Olas, en línea, Op. Cit pag 2

http://www.prh.noaa.gov/itic_pr/Las%20Grandes%20Olas/tsunami_great_waves_4.html

³⁷ Atlas Nacional De Riesgo Cenapred op. cit página 1.

³⁸ CENAPRED. Farreras S., Dominguez R. y Gutierrez C. (2014), *Tsunamis*, Serie Fascículos. Versión electrónica.p.6 <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/6-FASCULOTSUNAMIS..PDF>

placas del Caribe y Sudamericana tienen esfuerzos, específicamente en la Falla Oca-Antón, donde el movimiento relativo de la Placa Sudamericana con respecto a la Placa del Caribe es de 14.2 mm/a en la dirección 270.48°, es decir que empuja hacia la península de Yucatán. Con ello y posteriormente recreados con el programa Community Model Interface for Tsunami (COMMIT, Interfaz para la elaboración en comunidad de modelos de tsunamis), elaborado por el Centro para la Investigación de Tsunamis de la NOAA (NCTR, por sus siglas en inglés) (<http://nctr.pmel.noaa.gov>). Se parte de información conocida y de su comportamiento, de la altura que provoca la fuerza de desplazamiento sin embargo solo se describe la acción de la altura del agua y no el efecto dinámico de la ola al llegar a la playa o impactarse sobre las estructuras. Los modelos de peligro muestran hasta donde llegaría una ola máxima de más de 30 metros de altura pero en recorrido libre y apoyado por un sismo de más de 9 grados de intensidad. No hay evidencia de que en la cuenca de Yucatán se haya presentado un Tsunami a pesar de los registros sísmicos.

Los científicos no pueden predecir cuándo ocurrirán los terremotos, ni determinar exactamente cuándo se generará un tsunami. Sin embargo, pueden establecer las áreas en las que es posible que se susciten (basados en los eventos de este tipo ocurridos en el pasado), y mediante el uso de computadoras calcular, por ejemplo, los límites de las zonas inundables en caso de la ocurrencia de un tsunami.

Existen varias propuestas metodológicas para evaluar las diferentes zonas susceptibles de inundación por tsunami que implican diversos parámetros y escenarios. A continuación, se enuncian algunas de ellas utilizadas en México y en otros países.

Martínez-Martínez y colaboradores³⁹ propusieron calcular los valores de inundación en los municipios costeros de la República Mexicana de acuerdo con la expresión $CI=MM +RU$ propuesta por (García *et al*, 2013) ^{ibid}; donde **CI** es la cota de inundación, **MM** la marea de tormenta y **RU** el ascenso máximo del oleaje (*run-up*), para el caso de ciclones tropicales y frentes fríos. Para tsunamis consideran como cota de inundación sólo el ascenso máximo del oleaje.

El **RU** (*run-up*) se obtiene con la ecuación propuesta por Stockdon *et al*. (2006) ^{ibid}, en la que se considera la altura de la ola calculada con los modelos anteriormente descritos para cada caso (ciclones tropicales, frentes fríos o tsunamis) y la pendiente de la playa, utilizando los datos de topografía y batimetría.

Para obtener los valores de cotas de inundación para distintos periodos de retorno en el caso de tsunamis, se considera, en cada punto de estudio, el epicentro que provoca la mayor altura de ola.

En cuanto al cálculo de los posibles efectos por presencia de tsunamis, se toman los epicentros propuestos por García-Martínez (2012) ^{ibid}; un total de 79 epicentros, de los cuales cinco tienen influencia en el Golfo de México, nueve en el Mar Caribe y 65 en el océano Pacífico. Para el cálculo de la altura de las olas que se pueden esperar, se utiliza el modelo paramétrico propuesto por Okal y Synolakis (2004) ^{ibid}, que contempla siete intensidades y ocho profundidades, teniendo un total de 4, 424 escenarios.

Para la elaboración de la carta de inundación por tsunamis de Ecuador⁴⁰ se utilizó un método para estimar la altura

de ola (**H**) antes de sufrir perturbaciones locales por fricción del fondo con la expresión:

$$H= 12.3 e^{-0.067D}$$

La distancia **D** entre la línea de costa y el veril de 100 metros se maneja en kilómetros.

También se determina el área de inundación considerando la altura de la ola y la pendiente del terreno, para lo cual se utiliza la ecuación siguiente:

$$R=2.83 \sqrt{\cot\theta} H^{1.25}$$

Otro parámetro considerado es el cálculo de la pendiente a partir de la relación $S= y/x$ (altura/distancia) que calcula cuánto pueden ingresar los frentes de onda producto del tsunami.

Algunos autores^{41 42} modelaron uno de los tsunamis más importantes que han azotado las costas de Chile, acontecido en 1960. Propusieron un método para zonificar el riesgo de tsunami en una localidad en el centro-sur de Chile, seleccionando un evento que podría manifestarse a corto o mediano plazo, y el peor escenario. Esos autores tomaron en cuenta la batimetría, la topografía, las cartas náuticas y los levantamientos topográficos detallados del terreno y consideraron celdas de 3'' (~90 m) así como el tiempo de simulación de cuatro horas para modelar la inundación. La zonificación del riesgo la desarrollaron en un Sistema de Información Geográfica con un método de análisis Multicriterio, considerando criterios de amenaza y vulnerabilidad. Para la modelación de tsunami estos autores utilizaron una metodología de simulación numérica basada en el modelo no-lineal TUNAMI-N2 (Goto *et al.*, 1997) ^{ibid}, ampliamente utilizado y validado con datos de recientes tsunamis^{43 44}

Un método para modelar olas de tsunami producidas por un movimiento de deslizamiento de masas por colapso lateral de islas volcánicas, fue desarrollado por Ward y Day⁴⁵. Estos autores consideraron la posibilidad de que un deslizamiento en las Islas Canarias (Volcán Cumbre Vieja) podría generar olas que se desplazarían por toda la cuenca del Atlántico y afectarían a costas de Norteamérica con olas de hasta 25 metros de altura.

La SEDATU en su manual Bases para la estandarización en la elaboración de Atlas de Riesgo y Catálogo de Datos Geográficos para representar el riesgo 2015, señala que poblaciones costeras que se encuentren en una cota por debajo de los 20 metros de altura sobre el nivel medio del mar (distancia máxima de penetración a 1 km), ya que la altura máxima histórica de olas generadas por Tsunamis es de 12 metros en México para la región del Pacífico. Sin embargo, no existen referencias para el Caribe.

La mayor parte de la actividad tectónica actual se localiza a lo largo de las zonas de subducción que rodean el océano Pacífico, lugar donde se han generado más de la mitad de los tsunamis conocidos en el mundo⁴⁶. En el último siglo, en sus

³⁹ Martínez-Martínez R. E., Mendoza-Baldwin E. G. Y Silva-Casarrín R. (2014), en línea, "Peligro de Inundación por Fenómenos Marinos Extremos en el Litoral Mexicano", XXIII Congreso Nacional de Hidráulica. p 1-7 http://amh.org.mx/documentos/congreso/Memorias%20del%20XXIII%20Congreso%20Nacional%20de%20Hidraulica/Tema%20Control%20de%20Inundaciones/t2_art_mmre1.pdf

⁴⁰ carta de inundación por tsunamis de Ecuador (2011), en línea p.3 http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PDOT/SNRG/Metodologia_TSUNAMI_GPR.pdf

⁴¹ Lagos (2012), Op. Cit. Pág. 2

⁴² Lagos M. Y Cisternas M. (2008), "El nuevo riesgo de tsunami: considerando el peor escenario", en *Scripta Nova*. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales, Universidad de Barcelona, vol. XII, núm. 270 (29).

⁴³ Dao, M. And Tkalich, P. (2007), "Tsunami propagation modeling - a sensitivity study", en *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol.7, p. 741-754.

⁴⁴ Sugawara, D. and Goto, K. (2012), "Numerical modeling of the 2011 Tohoku-oki tsunami in the offshore and onshore of Sendai Plain, Japan", en *Sedimentary Geology*. Disponible en Internet: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo>

⁴⁵ Ward And Day (2001) Op. Cit. Pág. 2

⁴⁶ bryant, E. (2001), *Tsunami, the underrated hazard*, Cambridge University Press, United Kingdom, 320 p.

márgenes continentales activos, se han registrado terremotos gigantes generadores de tsunamis destructivos. Destaca el evento más grande con registro instrumental, el terremoto de 1960 ocurrido en el centro-sur de Chile. Con una magnitud de 9.5 que ocasionó un devastador tsunami que se propagó por toda la cuenca del Pacífico⁴⁷.

En 283 años, en México se han registrado más de 60 tsunamis en la costa del océano Pacífico del país, con olas de hasta 2.5 m de altura en tsunamis lejanos, y de 5 m en promedio para los tsunamis locales, causando pérdida de vidas e infraestructura en diferentes comunidades⁴⁸

No existen registros de tsunamis muy destructivos en México, aunque en 1787 ocurrió un tsunami local devastador producido por un sismo de magnitud 8.4 en San Sixto, Oaxaca^{ibid}. En las costas del estado de Quintana Roo no hay registros de este tipo de eventos.

Para monitorear los posibles tsunamis que se generan en el Pacífico, el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), la Secretaría de Marina, la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera de los Estados Unidos (NOAA) y el Sistema de Alerta de Tsunamis del Pacífico (de la UNESCO), instalaron y mantienen 3 mareógrafos, equipados para transmisión inmediata de señales a satélite⁴⁹.

Desde 2004, el CICESE opera en Baja California, un sensor de nivel de mar de alta frecuencia, que transmite en tiempo real por Internet un dato de nivel del mar cada minuto. Existe un proyecto conjunto entre la Secretaría de Gobernación y la Secretaría de Marina, para instalar una red de sensores en otros puertos mexicanos y con esto integrar el futuro sistema de alerta temprana para tsunamis de México⁵⁰.

El territorio del estado de Quintana Roo se localiza sobre la placa tectónica de Norteamérica, cerca de su límite con la placa del Caribe (Figura 66)⁵¹. El límite norte de la Placa del Caribe está representado por una falla transformante identificada por la Fosa del Caimán; en la porción cercana al territorio mexicano, este límite lo constituye el sistema de fallas de Motagua-Polochic, que se prolonga hacia la falla de Oriente, al sur de Cuba y hasta la fosa de Puerto Rico. Este sistema está activo desde hace 9.5 Millones de años^{ibid}.

El límite oriente de la placa del Caribe es una zona de subducción entre esta Placa y las de Norteamérica y Sudamérica, aunque el límite entre estos dos últimos elementos aún se desconoce. La subducción es responsable del arco de islas de las Antillas Menores. La zona de subducción es productora de sismos de magnitud mayor a 7 en la región.

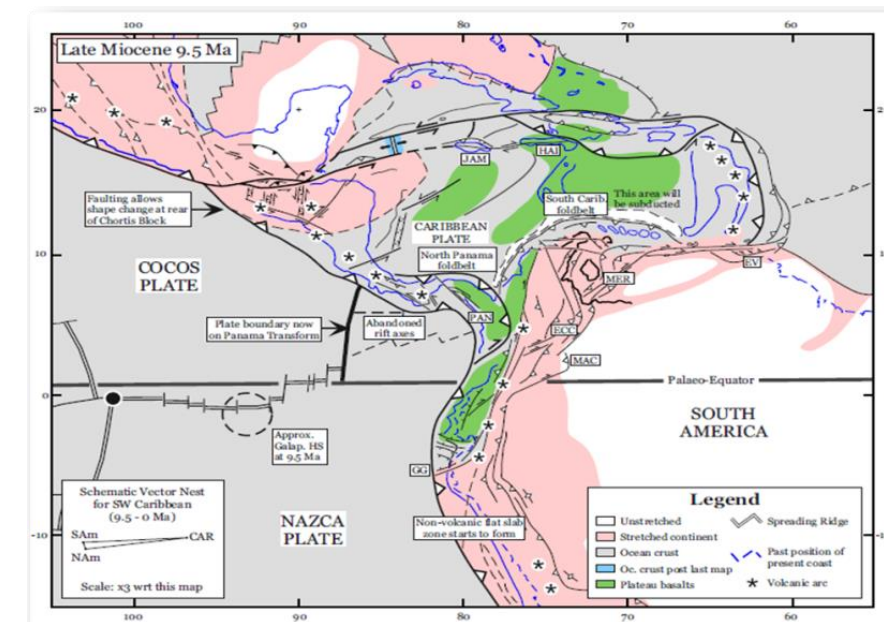


Figura 66. Estructura de las placas tectónicas en la región del Caribe desde el Mioceno tardío: JAM, Jamaica; HAI, Haití; EV, zona de cizalla transcurrente del Este de Venezuela-Trinidad; MER, Mérida Andes; ECC, Cordillera oriental de Colombia; MAC, Sierra de la Macarena; GG, Golfo de Guayaquil.

Cuando una zona de subducción tiene más de 800 kilómetros de longitud puede generar sismos de magnitudes superiores a 7⁵². Como se señaló párrafos arriba, el límite oriental de la placa Caribe es una zona de subducción y su longitud es aproximadamente 970 kilómetros, es decir, se podría esperar un sismo mayor o igual a una magnitud de 9 grados. De manera que este límite de la placa caribeña cumple con las características mínimas para generar sismos tsunamigénicos. Los tsunamis lejanos originados en las costas de España, Portugal y África⁵³ pueden llegar a tener un efecto en las costas del Estado de Quintana Roo⁵⁴. Por ejemplo, el tsunami sintético generado frente a Lisboa por un sismo de magnitud 8.9, en 1755 (Baptista *et al.*, 1998)^{ibid}, muestra que en las costas del Caribe mexicano el efecto se presentaría después de 10 horas (Figura 67)^{ibid}, y que particularmente en Quintana Roo la altura de las olas no rebasaría los 0.4 m en ningún punto de la costa del Estado (Figura 68); mientras que la altura del tsunami en las costas de La Florida, de los Estados Unidos, alcanzaría hasta 5 metros (Figura 69)^{ibid}. Por ello la afirmación de los autores que en este caso las Antillas Mayores e incluso las Menores forman una barrera que protege las costas mexicanas ante un evento de este tipo originado en la región del atlántico europeo.

En los registros históricos de tsunamis en la región del Caribe, no existen evidencias de efectos en costas mexicanas⁵⁵. De la misma manera, un tsunami originado en la Isla La Palma en el archipiélago de Las Canarias, producto de un colapso lateral del volcán Cumbre Vieja, afectaría con olas de hasta 25 metros de altura (cinco veces más que en caso del sismo de Lisboa) a las costas de La Florida, después de nueve horas⁵⁶, como se muestra en la (Figura 70)^{ibid}. En este caso las olas en la costa de Q. Roo podrían alcanzar hasta 2 m.

⁴⁷ Kanamori, H. (1977), "The Energy Release in Great Earthquakes", en *Journal of Geophysical Research*, Vol.82, N° 20, p. 2981-2987.

⁴⁸ Secretaría De Marina Armada De México. Historia de los Tsunamis Locales ocurridos en México

http://digaohm.semar.gob.mx/CAT/imagenes/CAT/Historia_tsunamis.pdf.

⁴⁹ <http://observatorio.cicese.mx>.

⁵⁰ CENAPRED, 2014 Op. Cit Pág 4

⁵¹ Pindell, J. Y Kennan L., 2010. Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update. In James, K. H., Lorente, M. A., and Pindell, J. eds., *The Origin and Evolution of the Caribbean Plate: Geological Society of London Special Publication 328*, 1-56.

⁵² Mc Caffrey R. (2007), "The next great earthquake", en *Science*, vol.315, p.1675-1676

⁵³ Ward And Day (2001), Op.Cit pag 2

⁵⁴ ORTIZ-FIGUEROA M. (2011), "Peligro por Tsunamis en México", Seminario Internacional. CICESE.

⁵⁵ Lander J., Whiteside L. And Lockridge P. (2002), "A Brief History of Tsunamis in the Caribbean Sea", en *Science of Tsunami Hazards*, Volume 20, Number 1, p. 57.

⁵⁶ Ward And Day, (2001) Op.Cit pag 2

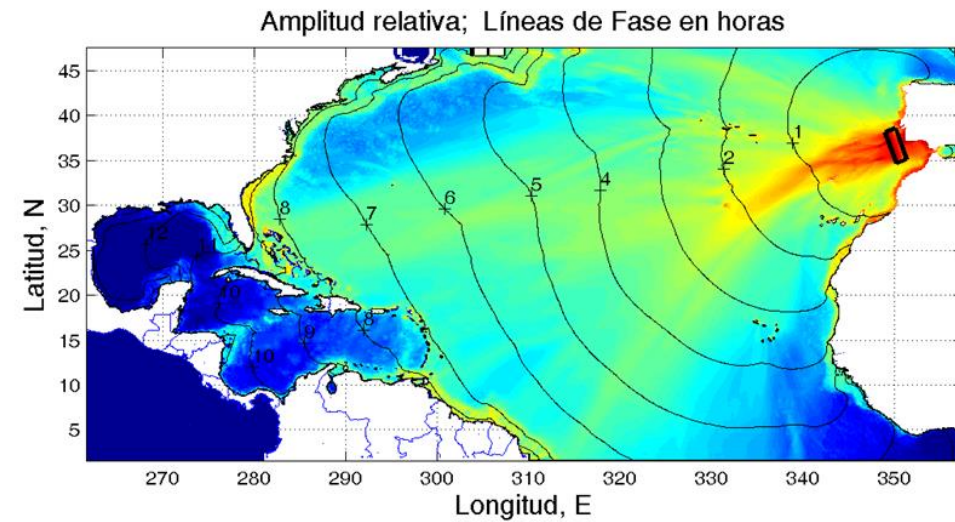


Figura 67. El tsunami sintético generado frente a Lisboa por un sismo de magnitud 8.9, en 1755 (Baptista *et al.*, 1998.)^{ibid}
Tsunami sintético originado frente a Lisboa; (Sismo M9)

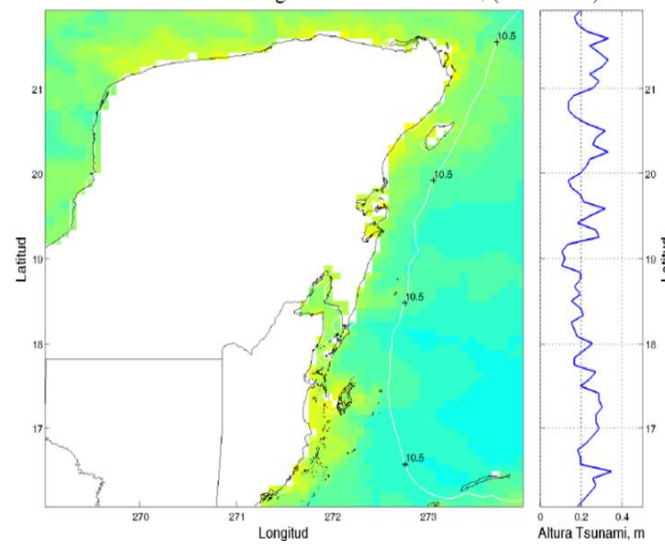


Figura 68. Tsunami sintético originado en las costas de Lisboa.
Tsunami sintético originado frente a Lisboa; (Sismo M9)

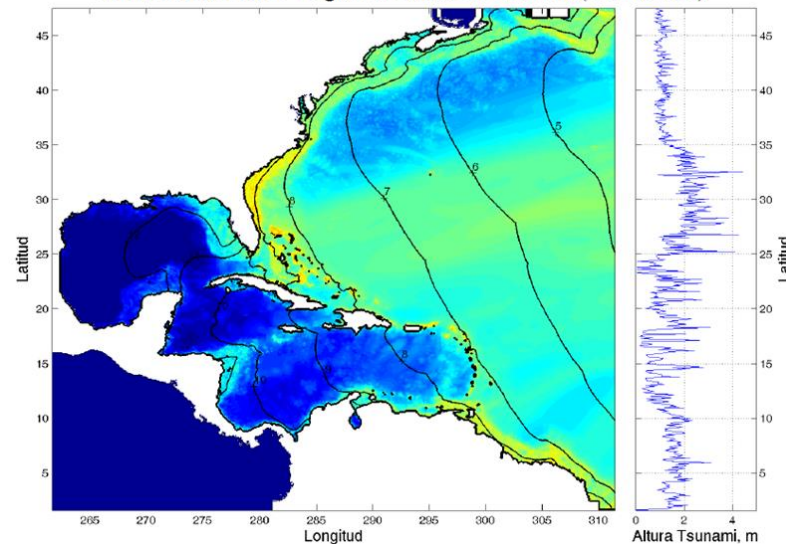


Figura 69. Altura de las olas generadas por un tsunami sintético, causado por un sismo de M9 en las costas de Lisboa.

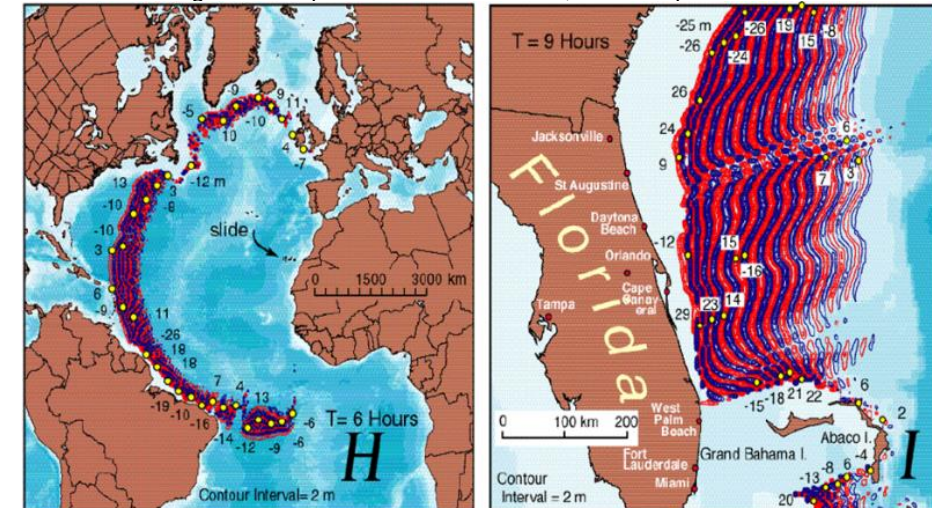


Figura 70. Distribución y altura de las olas después de 6 horas (H) y 9 horas (I) generadas por el tsunami originado por el colapso del volcán Cumbre Vieja en las Islas Canarias

Los resultados obtenidos con la metodología propuesta por Martínez-Martínez y colaboradores (Figura 71), muestran las cotas de inundación por tsunamis para sismos de 8.5 grados en la escala de Richter. Según esta metodología, para Quintana Roo son de 2.925 m, 7.485 m y 33.137 m, para magnitudes de sismos de 8, 8.5 y 9 grados Richter, respectivamente. Estos datos difieren de los señalados por Ortiz-Figueroa, explicados párrafos arriba.

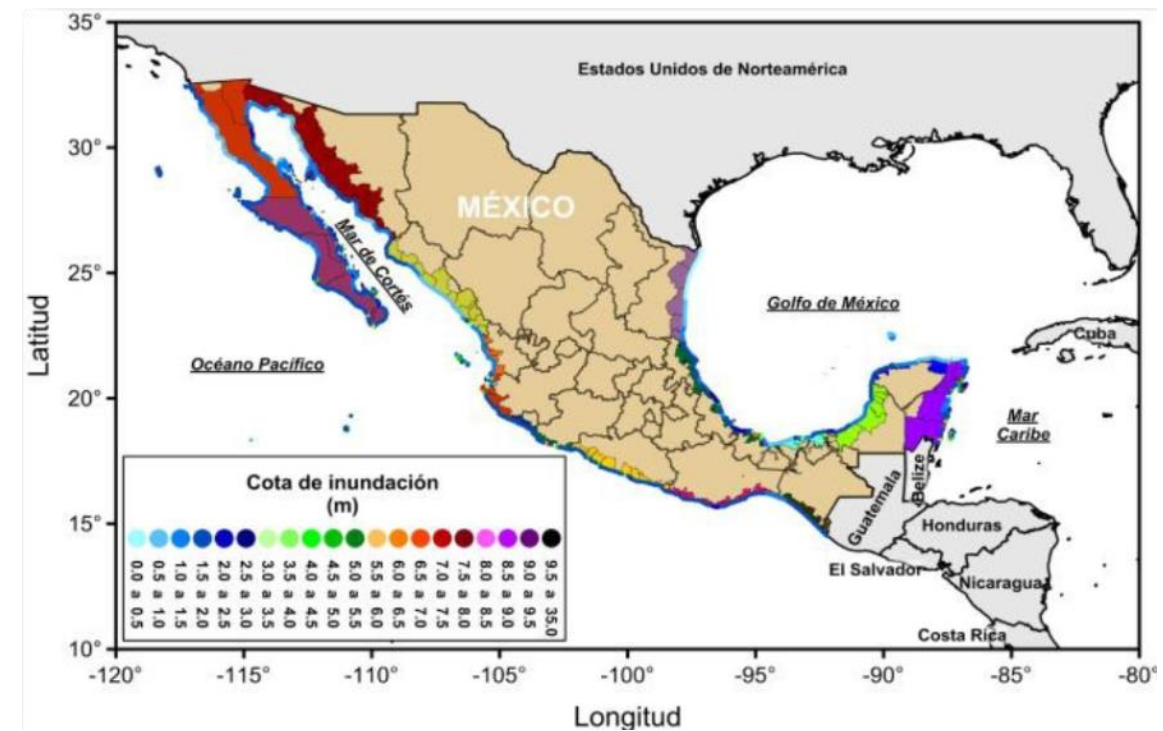


Figura 71. Mapa cotas de inundación por tsunamis para sismos de 8.5 grados en escala de Richter.

3.3.2.2 Modelos sintéticos

Para estimar la magnitud del tsunami producido por este colapso, los autores citados del párrafo anterior junto con la tesis desarrollada por Juan Espinoza (2014), Modelado numérico de Tsunami en Venezuela; y que emplearon la teoría de la

onda lineal clásica. Bajo la cual, una perturbación vertical general en el fondo (por ejemplo, el deslizamiento de tierra), estimula las olas superficiales del tsunami (componente vertical) desde el punto de observación. Las ecuaciones y las variables utilizadas para el cálculo del modelo pueden consultarse en Ward y Day⁵⁷. El modelo de un potencial tsunami generado por el colapso de Cumbre Vieja, permite considerar un peor escenario (en términos del volumen del deslizamiento) —un bloque de 500 km³, 25 km de longitud, 15 km de amplitud y 1400 m de espesor que se rompe y se derrama hacia el oeste en el océano profundo.^{ibid} Bajo esta teoría esta basado el desarrollo del modelo matemático del COMMIT y su interfaz gráfica.

Siempre de acuerdo con Ward y Day^{ibid} los resultados de este modelo en la computadora, indican que, a dos minutos de la falla inicial, un domo de agua se formaría encima del bloque deslizado de 900 m de altura. Después de cinco minutos, la velocidad de traslado de la cresta de la ola inicial superaría el frente de la avalancha. La altura que lleva la onda se reduce a 500 m después de 50 kilómetros de recorrido. Grandes olas negativas aparecerían detrás de la cresta del frente (ola líder). A los 10 minutos el derrumbe ya realizó su recorrido. El disturbio crece a 250 km de diámetro y algunas olas de cientos de metros de alto circularían por las costas de las islas más importantes del archipiélago de Las Canarias.

Los autores destacan el carácter no-direccional del patrón de olas y que la ola positiva del frente (200 m) ya no es tan larga. Después de 15 a 60 minutos las olas, de 50 a 100 m de altura, tocan el continente africano. Hacia el oeste, un gran tren de ondas dispersas de 500 kilómetros de ancho, se desarrolla a medida que el tsunami se mueve en la cuenca atlántica. Olas con crestas de 60 m de altura aparecerían en la segunda cresta. Después de tres a seis horas, el tsunami se expande a través del Atlántico conservando su amplitud en un arco de más de 180 grados. Hacia el norte, España e Inglaterra experimentarían olas de cinco a siete metros.

En la región del Caribe la actividad tectónica es importante y muy dinámica, lo cual produce la posibilidad de generar tsunamis. De acuerdo con registros históricos, evidencias geológicas y otras informaciones obtenidas para el periodo de 1492 a 2000, existen registros de 91 tsunamis, de los cuales 27 se han considerado efectivamente asociados a ese tipo de eventos, nueve de ellos son posibles y 53 muestran registros dudosos o incompletos que permiten creer que tal vez los daños pudieron ser causados por otros fenómenos, aunque no se pudo descartar la posibilidad de un tsunami⁵⁸.

En esta región se han registrado evidencias geológicas que indican la acción de tsunamis generados por diferentes causas. Por ejemplo, en Jamaica la historia muestra que la mayoría de los tsunamis se relacionan con deslizamientos de tierra; en Puerto Rico y las Islas Vírgenes la mayoría son de origen tectónico, mientras que en el Caribe oriental, un gran porcentaje de tsunamis son originados por actividad volcánica^{ibid}. Las localidades y los años en los que fueron afectadas las costas del Caribe por tsunamis, se muestran en la Figura 72.^{ibid}

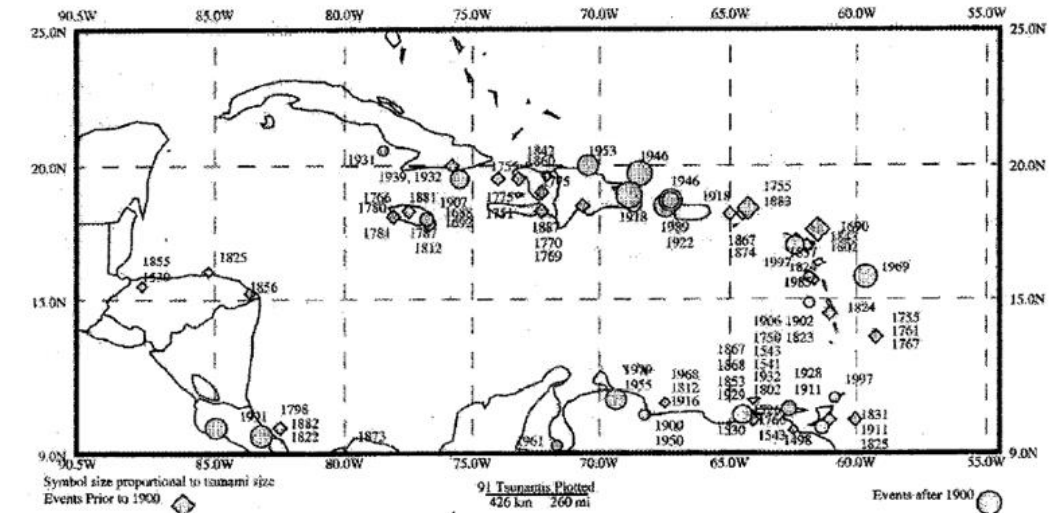


Figura 72. Localidades y años en los que los tsunamis afectaron las costas caribeñas.

A partir de datos históricos de un sismo de magnitud 8.7 originado en las costas de Venezuela, se modeló un tsunami sintético⁵⁹ que revela que las olas llegarían a costas de Quintana Roo en un lapso de aproximadamente tres horas (Figura 73)^{ibid}, con una altura cercana a 0.4 m en la costa de la ciudad Playa del Carmen. Después de aproximadamente 4.5 horas, la altura de las olas se incrementaría a más de 0.5 m en esa misma localidad, y muestran un ciclo similar cada hora hasta la décima.

En la zona de los Arrecifes de Xcalak, las olas alcanzarían una altura aproximada a 0.5 m después de la séptima hora. Otras localidades, como Cancún y Punta Allen recibirían olas de alturas inferiores a 0.3 m, mientras que en Chetumal la altura alcanza menos de 0.1 m después de 7 horas (Figura 74)^{ibid}.

⁵⁷ Ward And Day (2001) Op.Cit. pág 2

⁵⁸ Lander et al. (2002) pág 10

⁵⁹ Ortíz-Figueroa (2011) Op. Cit. Pág 10

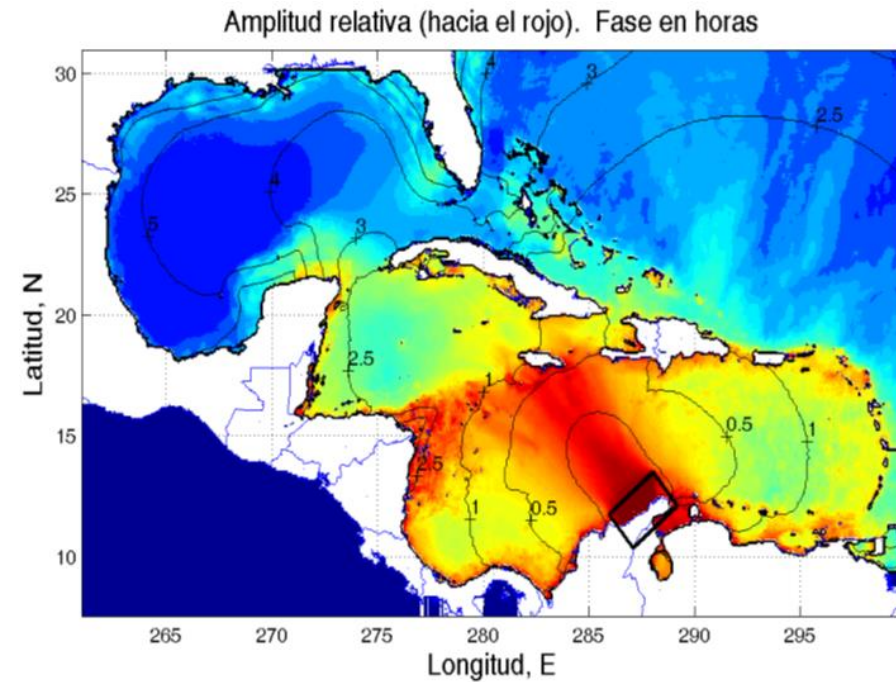


Figura 73. Modelo de un tsunami sintético originado por un sismo de magnitud 8.7 en la costa de Venezuela.

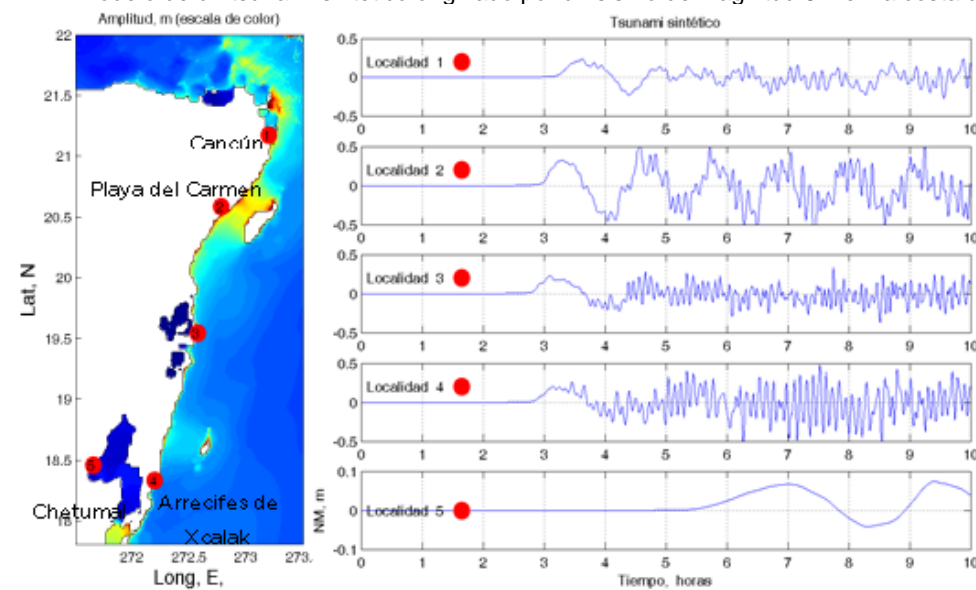


Figura 74. Modelo de un tsunami sintético originado por un sismo de magnitud 8.7 en la costa de Venezuela.

Otro tsunami que fue modelado^{ibid} se originó en Honduras en 1856 a partir de un sismo de magnitud 8. Este evento generó olas de hasta 5 m y según pobladores del lugar, el agua invadió hasta 24 km tierra adentro⁶⁰. Según el modelo, el efecto del tsunami llegaría aproximadamente en 30 minutos a costas de Quintana Roo, afectando particularmente a la zona del Banco Chinchorro y Playa del Carmen. En Banco Chinchorro, el arribo de olas sería en menos de media hora con alturas cercanas a 2 m; un poco antes de la segunda hora, la altura de las olas se estabiliza en menos de 1 metro y se mantiene en

esa condición hasta la séptima hora, cuando disminuye hasta alturas de 0.2 m. En Playa del Carmen la altura no rebasa 1 m hasta la quinta hora, cuando empieza a disminuir (Figura 76)^{ibid}. Como se señaló párrafos arriba, en los últimos 283 años las evidencias de un tsunami en costas de Quintana Roo son nulas, pero no está por demás considerar la posibilidad de que estos eventos puedan, en el futuro, afectar dichos territorios, como lo plantearon algunos autores que estudiaron diferentes escenarios en El Caribe.⁶¹

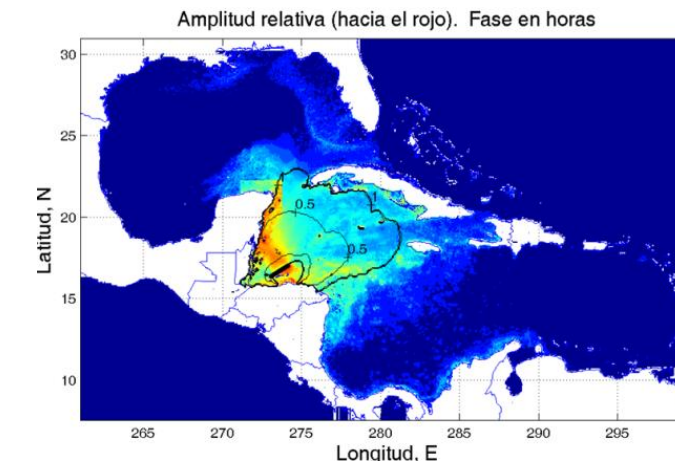


Figura 75. Modelo de un tsunami sintético originado por un sismo de magnitud 8 en la costa de Honduras.

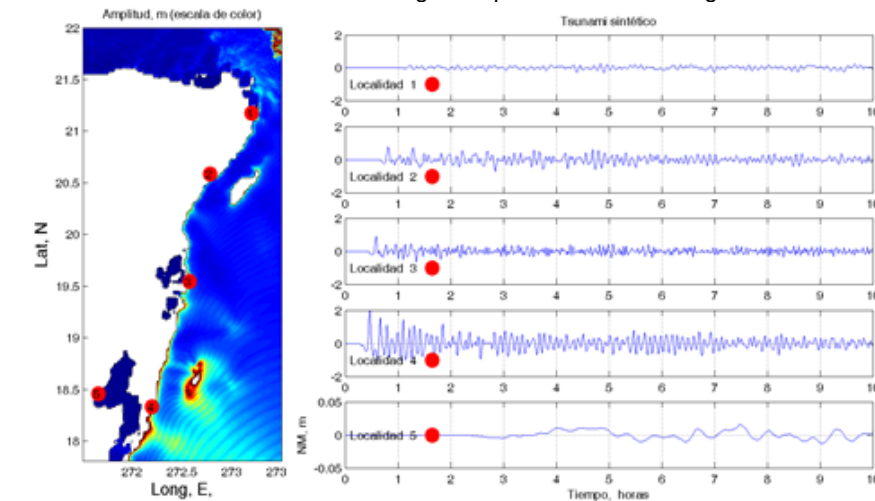


Figura 76. Modelo de un tsunami sintético originado por un sismo de magnitud 8 en la costa de Honduras.

3.3.3 Peligro

La metodología para evaluación del peligro por tsunami, se basara en los términos expuestos en la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Riesgos: Fenómenos Geológicos, en su punto 1.6.2.4, pero fue detallada por el grupo multidisciplinario, en base a su conocimiento y acervo de información pertinente, ademas de que lo investigado

⁶⁰ Lander *et al.* (2011) *Op. Cit.* pág. 10

⁶¹ Harbitz C.B, Glimsdal S., Bazin S., Zamora N., Løvholt F., Bungum H., Smebye H., Gauer P. And Kjekstad. O. (2012). "Tsunami Hazard in the Caribbean: Regional Exposure Derived from Credible Worst Case Scenarios" en *Continental Shelf Research*. Vol 38 p 1-23.

párrafos atrás sirvió para alimentar el programa COOMIT, esto se desarrolló en coordinación con los especialistas del CENAPRED en la materia.

3.3.3.1 Aplicación del COMMIT

La metodología para evaluación del peligro por tsunami, se basara en los términos expuestos en la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Riesgos: Fenómenos Geológicos, en su punto 1.6.2.4, pero fue detallada por el grupo multidisciplinario

Se trabajaron tres posibles escenarios basados en la información anteriormente descrita. Se descarto el Tsunami generado en islas Canarias por resultados con nulo impacto en la costa de Q, Roo. Los lugares fueron, la costa de Venezuela, la costa de Honduras y frente e Cuba. La recreación del Tsunami contemplo y tal como lo pide el programa primero una zona A que puede ser desde donde se origina el evento hasta donde impacta; una zona B, que es el detalle de la zona de estudio en este caso el Estado de Q.Roo y finalmente una zona C que se aprecia relieve marino por el detalle y la costa donde llega el oleaje.

Cada resultado incluye: A) Configuración del Modelo con su mapa de la unidad fuente y los parámetros del modelos; B) Condición inicial; C) Batimetría de la Malla; D) animación de resultados y E) Resultados extremos.

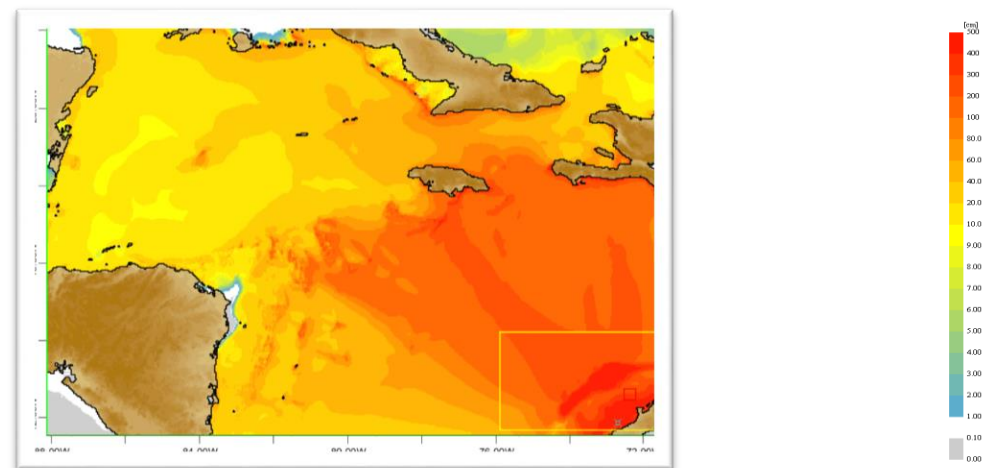


Figura 77. Modelo 1. Costa de Venezuela. Sismo de 8.6 grados de Richter.

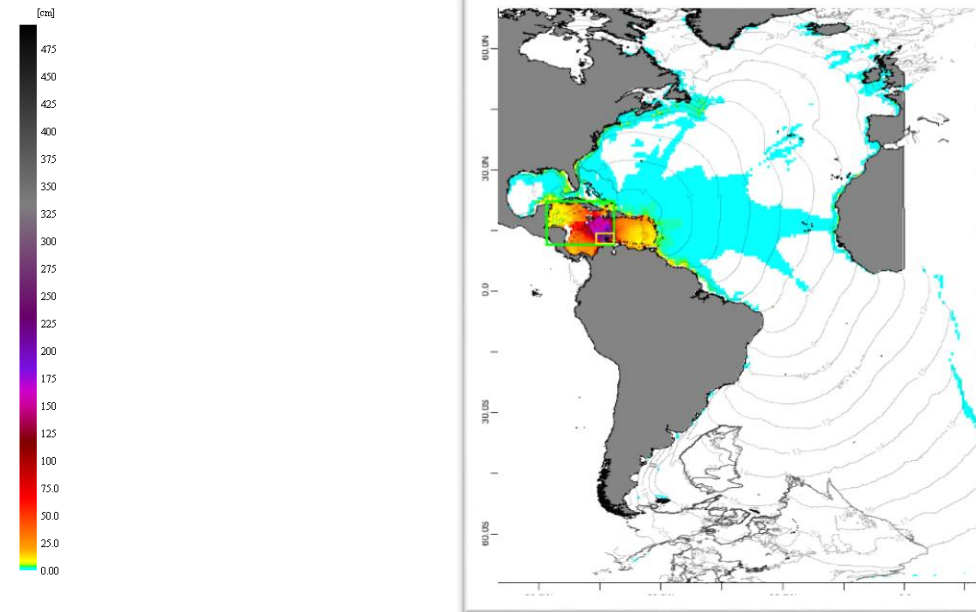


Figura 78. Condiciones iniciales del tsunami sintético para amplitud máxima (cm), izquierda y Amplitud ola máxima en corrida (cm) a la derecha.

El programa arroja una hoja de resultados con la sistesis del proceso como se ve a continuación del modelo sistetico de la costa de Venezuela

```

MOST v2.5 Rev: 3209 2016-08-29 20:37:12
Site: Mod2_venezuela
Input prefix: linCo
Read Computational parameters in run dir: ./most3_facts_nc.in
Minimum amplitude of input offshore wave (m): 5.000000000000010E-003
Input minimum depth for offshore (m): 0.10000000000000001
Input "dry land" depth for inundation (m): 0.10000000000000001
Input friction coefficient (n**2): 8.9999999999999975E-004
Input runup switch (0 - runup only in gridC, 1 - runup in all grids): 1
Max allowed eta (m): 300.00000000000000
Input time step (sec): 0.609999999999999999
Input amount of steps: 23600
Compute "A" arrays every n-th time step, n=18
Compute "B" arrays every n-th time step, n= 6
Input number of steps between snapshots (should be a multiple of A,B and C time steps) : 54
...Starting from: 0
...Saving grid every n-th node, n=1
Reading Bathymetry
1-ST LEVEL:
Bathymetry: Mod2_venezuelaGridA.most
Reading MOST formatted bathymetry file
...image-format bathy file (latitude decreasing)
Eliminating one-node islands...
Number of points affected: 361

WARNING: computational grid being adjusted!
Writing 1-node eliminated bathy file: Mod2_venezuelaGridA.most.1nod

2-ND LEVEL:
Bathymetry: Mod2_venezuelaGridB.most
Reading MOST formatted bathymetry file
...image-format bathy file (latitude decreasing)
Eliminating one-node islands...
Number of points affected: 23
    
```


WARNING: computational grid being adjusted!
Writing 1-node eliminated bathy file: Mod2_venezuelaGridB.most.1.nod

3-RD LEVEL:

Bathymetry: Mod2_venezuelaGridC.most
Reading MOST formatted bathymetry file
...image-format bathy file (latitude decreasing)
Eliminating one-node islands...
Number of points affected: 0
DODS URL: ./
output directory: ./
Produce/Suppress netCDF output for grids
A-grid B-grid C-grid Sift-file (default, 1 1 1 1)
Cannot read timeseries locations, not outputting ts
number of timeseries locations: 0
Done with input file ./most3_facts_nc.in
Input FACTS files:
zonal U: ./linCou.nc
meridial V: ./linCov.nc
amplitudes H: ./linCoh.nc
inversion found in A0 input file
No deformation in propagation file.
defmax: 0.0000000000000000
no local deformation detected

size of input array: 66 46 2161
Longitude: 271.46670000000000 to 288.80000000000001
Latitude: 11.2042000000000000 to 22.6613000000000001
Time: 0.0000000000000000 to 129600.000000000000
Number of inundated points in c-grid: 0

restart data file: ./Mod2_venezuela_restart.nc
file not found, no restart

NetCDF array size for grid C: 379 348
NetCDF array size for grid B: 523 307
NetCDF array size for grid A: 499 322
creating netCDF output file: ./Mod2_venezuela_runup_ha.nc
creating netCDF output file: ./Mod2_venezuela_runup_ua.nc
creating netCDF output file: ./Mod2_venezuela_runup_va.nc
creating netCDF output file: ./Mod2_venezuela_runupB_ha.nc
creating netCDF output file: ./Mod2_venezuela_runupB_ua.nc
creating netCDF output file: ./Mod2_venezuela_runupB_va.nc
creating netCDF output file: ./Mod2_venezuela_runupA_ha.nc
creating netCDF output file: ./Mod2_venezuela_runupA_ua.nc
creating netCDF output file: ./Mod2_venezuela_runupA_va.nc
creating netCDF output file: ./Mod2_venezuela_sift.nc

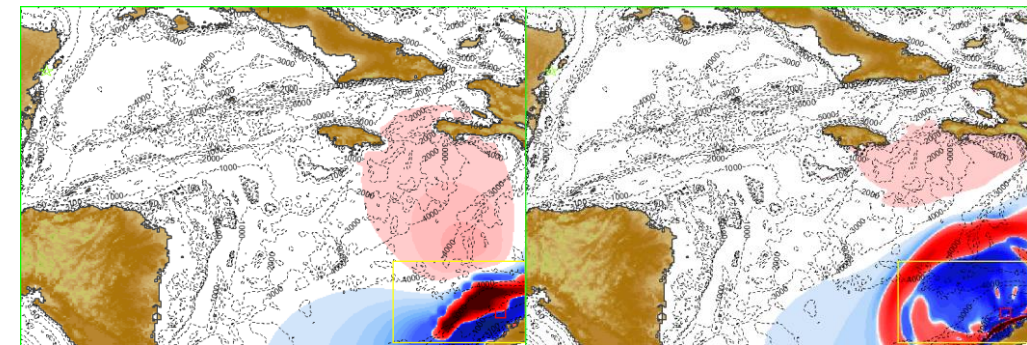
netCDF initialization complete
incoming wave max amp on A-Grid boundary: 727.85278320312500
setting threshold to 1% of max amp: 7.2785276693434753
input 1 wave detected at 0.0000000000000000
amp: -8.4460620880126953
cm at 284.53330000000000,11.7269000000000001
Initial surface is read at t= 0.0000000000000000
Output time step: 10 time: 329.4 sec, 5.5 min, 0.1 hrs, 2.3 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 2.17736094 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 3.72643159 / -3.03970167
Max/Min elevation in grid A are: 3.55244673 / -3.10696036
Output time step: 20 time: 658.8 sec, 11.0 min, 0.2 hrs, 4.6 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 4.15890729 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 5.19623436 / -2.92557585
Max/Min elevation in grid A are: 5.05665017 / -2.94449460
Output time step: 30 time: 988.2 sec, 16.5 min, 0.3 hrs, 6.9 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 9.28911892 / -3.54595462
Max/Min elevation in grid A are: 10.37536781 / -4.11213818
Output time step: 40 time: 1317.6 sec, 22.0 min, 0.4 hrs, 9.2 % comp

Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 19.13201108 / -6.98575625
Max/Min elevation in grid A are: 9.87407009 / -5.62462050
Output time step: 50 time: 1647.0 sec, 27.4 min, 0.5 hrs, 11.4 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 14.09566350 / -7.57296597
Max/Min elevation in grid A are: 10.97862497 / -7.13248769
Output time step: 60 time: 1976.4 sec, 32.9 min, 0.5 hrs, 13.7 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 16.64308362 / -8.67012248
Max/Min elevation in grid A are: 11.71408419 / -7.36205112
Output time step: 70 time: 2305.8 sec, 38.4 min, 0.6 hrs, 16.0 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 12.67500544 / -9.27018965
Max/Min elevation in grid A are: 10.86236984 / -9.18150936
Output time step: 80 time: 2635.2 sec, 43.9 min, 0.7 hrs, 18.3 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 13.64604113 / -11.26319235
Max/Min elevation in grid A are: 8.36252393 / -9.19838250
Output time step: 90 time: 2964.6 sec, 49.4 min, 0.8 hrs, 20.6 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 16.70285604 / -8.31911947
Max/Min elevation in grid A are: 10.29417426 / -8.88791705
Output time step: 100 time: 3294.0 sec, 54.9 min, 0.9 hrs, 22.9 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 9.17607760 / -5.96702666
Max/Min elevation in grid A are: 8.42796135 / -8.43791274
Output time step: 110 time: 3623.4 sec, 60.4 min, 1.0 hrs, 25.2 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 7.12406346 / -7.88635873
Max/Min elevation in grid A are: 7.41397961 / -7.08558288
Output time step: 120 time: 3952.8 sec, 65.9 min, 1.1 hrs, 27.5 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 5.81236999 / -7.06147801
Max/Min elevation in grid A are: 4.42708975 / -6.24920805
Output time step: 130 time: 4282.2 sec, 71.4 min, 1.2 hrs, 29.7 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 8.84459492 / -6.67905103
Max/Min elevation in grid A are: 6.31889357 / -7.63952376
Output time step: 140 time: 4611.6 sec, 76.9 min, 1.3 hrs, 32.0 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 6.52934725 / -4.96734470
Max/Min elevation in grid A are: 6.03144890 / -5.75205102
Output time step: 150 time: 4941.0 sec, 82.3 min, 1.4 hrs, 34.3 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 5.75521759 / -3.61595607
Max/Min elevation in grid A are: 6.43623696 / -4.71844129
Output time step: 160 time: 5270.4 sec, 87.8 min, 1.5 hrs, 36.6 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 7.31538473 / -4.77825381
Max/Min elevation in grid A are: 4.82661233 / -6.50157228
Output time step: 170 time: 5599.8 sec, 93.3 min, 1.6 hrs, 38.9 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 3.41642669 / -4.66635051
Max/Min elevation in grid A are: 4.42797729 / -6.52048020
Output time step: 180 time: 5929.2 sec, 98.8 min, 1.6 hrs, 41.2 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 3.71944234 / -5.42063046
Max/Min elevation in grid A are: 5.04367800 / -5.43390817
Output time step: 190 time: 6258.6 sec, 104.3 min, 1.7 hrs, 43.5 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 3.67870006 / -3.66452486
Max/Min elevation in grid A are: 8.20584696 / -4.50930225
Output time step: 200 time: 6588.0 sec, 109.8 min, 1.8 hrs, 45.8 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
Max/Min elevation in grid B are: 5.17227228 / -3.80751774
Max/Min elevation in grid A are: 7.98419061 / -4.75981592
Output time step: 210 time: 6917.4 sec, 115.3 min, 1.9 hrs, 48.1 % comp

Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 2.59604918 / -2.87903561
 Max/Min elevation in grid A are: 4.08576651 / -4.65485060
 Output time step: 220 time: 7246.8 sec, 120.8 min, 2.0 hrs, 50.3 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 5.46288389 / -3.89500194
 Max/Min elevation in grid A are: 3.59500793 / -4.84205869
 Output time step: 230 time: 7576.2 sec, 126.3 min, 2.1 hrs, 52.6 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 5.13041637 / -3.51070901
 Max/Min elevation in grid A are: 3.03495837 / -4.57915872
 Output time step: 240 time: 7905.6 sec, 131.8 min, 2.2 hrs, 54.9 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 2.80327226 / -3.47918187
 Max/Min elevation in grid A are: 3.48312807 / -4.10478294
 Output time step: 250 time: 8235.0 sec, 137.2 min, 2.3 hrs, 57.2 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 3.53049943 / -3.91538673
 Max/Min elevation in grid A are: 3.60520256 / -3.16894458
 Output time step: 260 time: 8564.4 sec, 142.7 min, 2.4 hrs, 59.5 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 4.61187273 / -3.85058389
 Max/Min elevation in grid A are: 4.52748044 / -3.45044818
 Output time step: 270 time: 8893.8 sec, 148.2 min, 2.5 hrs, 61.8 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 3.47013775 / -3.14580417
 Max/Min elevation in grid A are: 2.69902077 / -3.25388198
 Output time step: 280 time: 9223.2 sec, 153.7 min, 2.6 hrs, 64.1 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 4.40636871 / -3.34351678
 Max/Min elevation in grid A are: 2.86822512 / -4.35632797
 Output time step: 290 time: 9552.6 sec, 159.2 min, 2.7 hrs, 66.4 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 4.49582420 / -2.43416894
 Max/Min elevation in grid A are: 3.16985866 / -3.11718936
 Output time step: 300 time: 9882.0 sec, 164.7 min, 2.7 hrs, 68.6 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 3.98857553 / -3.03041031
 Max/Min elevation in grid A are: 4.51335246 / -2.36811406
 Output time step: 310 time: 10211.4 sec, 170.2 min, 2.8 hrs, 70.9 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 2.94562245 / -3.45478880
 Max/Min elevation in grid A are: 2.87674470 / -2.78113242
 Output time step: 320 time: 10540.8 sec, 175.7 min, 2.9 hrs, 73.2 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 3.76041070 / -5.00181335
 Max/Min elevation in grid A are: 3.60574232 / -3.76581847
 Output time step: 330 time: 10870.2 sec, 181.2 min, 3.0 hrs, 75.5 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 2.69559358 / -3.16589979
 Max/Min elevation in grid A are: 2.81532314 / -3.25164336
 Output time step: 340 time: 11199.6 sec, 186.7 min, 3.1 hrs, 77.8 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 4.84173314 / -4.04339568
 Max/Min elevation in grid A are: 2.99055915 / -2.27266836
 Output time step: 350 time: 11529.0 sec, 192.2 min, 3.2 hrs, 80.1 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 2.82269075 / -3.09117148
 Max/Min elevation in grid A are: 4.45863524 / -2.07499726
 Output time step: 360 time: 11858.4 sec, 197.6 min, 3.3 hrs, 82.4 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 2.83331394 / -2.37753030
 Max/Min elevation in grid A are: 2.97490017 / -1.94066746
 Output time step: 370 time: 12187.8 sec, 203.1 min, 3.4 hrs, 84.7 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 3.04378654 / -2.11163868
 Max/Min elevation in grid A are: 2.70928742 / -4.69031096
 Output time step: 380 time: 12517.2 sec, 208.6 min, 3.5 hrs, 86.9 % comp

Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 2.58848001 / -2.38060644
 Max/Min elevation in grid A are: 2.53060703 / -2.48470583
 Output time step: 390 time: 12846.6 sec, 214.1 min, 3.6 hrs, 89.2 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 2.30608036 / -2.98938018
 Max/Min elevation in grid A are: 4.07352434 / -2.30078921
 Output time step: 400 time: 13176.0 sec, 219.6 min, 3.7 hrs, 91.5 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 1.91867300 / -2.09849011
 Max/Min elevation in grid A are: 3.91445552 / -2.19216958
 Output time step: 410 time: 13505.4 sec, 225.1 min, 3.8 hrs, 93.8 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 1.90863749 / -2.54244095
 Max/Min elevation in grid A are: 2.28866365 / -2.08925174
 Output time step: 420 time: 13834.8 sec, 230.6 min, 3.8 hrs, 96.1 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 2.30422006 / -2.38426586
 Max/Min elevation in grid A are: 2.46577245 / -4.14325191
 Output time step: 430 time: 14164.2 sec, 236.1 min, 3.9 hrs, 98.4 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 2.02742727 / -2.77082648
 Max/Min elevation in grid B are: 2.12155108 / -2.52220710
 Max/Min elevation in grid A are: 2.17566689 / -2.31098219
 Total number of inundated points: 0
 saving restart file
 done saving restart file
 calculating maximums
 saving maximums to _sift.nc
MOST v2.5 Rev: 3209 2016-08-29 21:13:14
 elapsed secs: 2122.0625 , user: 2104.5156 , sys: 17.546875
 clock time: 2162 secs, 36.033337 minutes
 Run finished. Exiting normally.

La siguiente sucesión de imagens describen desde el tiempo 0:00 que es cuando se genera el sismo en las placas hasta las 4:00:00 horas despues del evento. El tiempo estimado para impacto en la costa de Q. Roo es de 3 horas despues. COMMIT desarrollo para esta modelación 436 imágenes distribuidas en 240 minutos. Se incluyen las mas representativas cada 20 minutos hasta sumas las 3 horas. Tiempo en que impacta a Q. Roo.



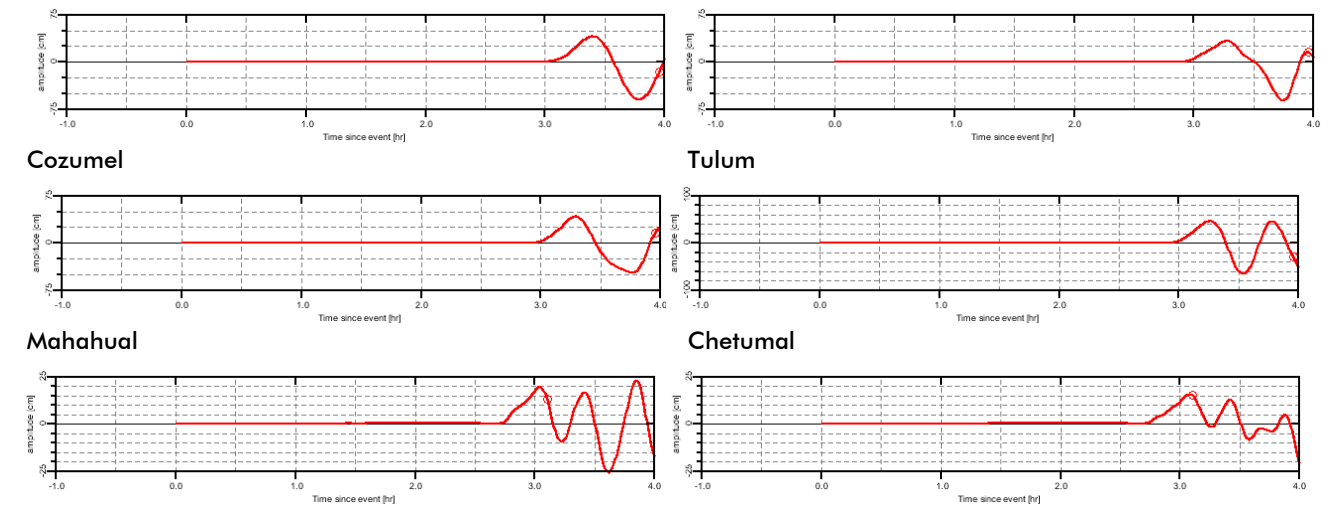
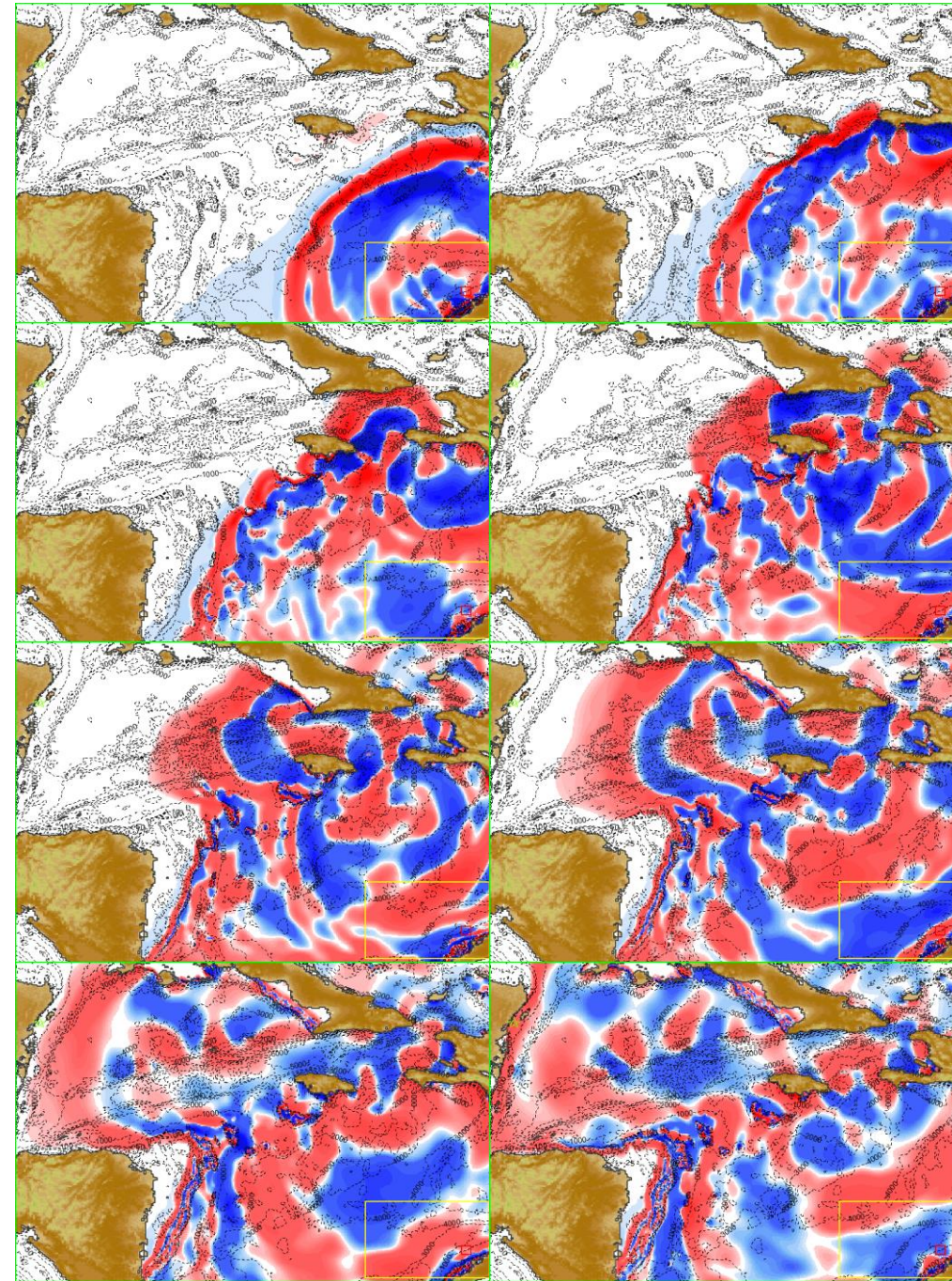
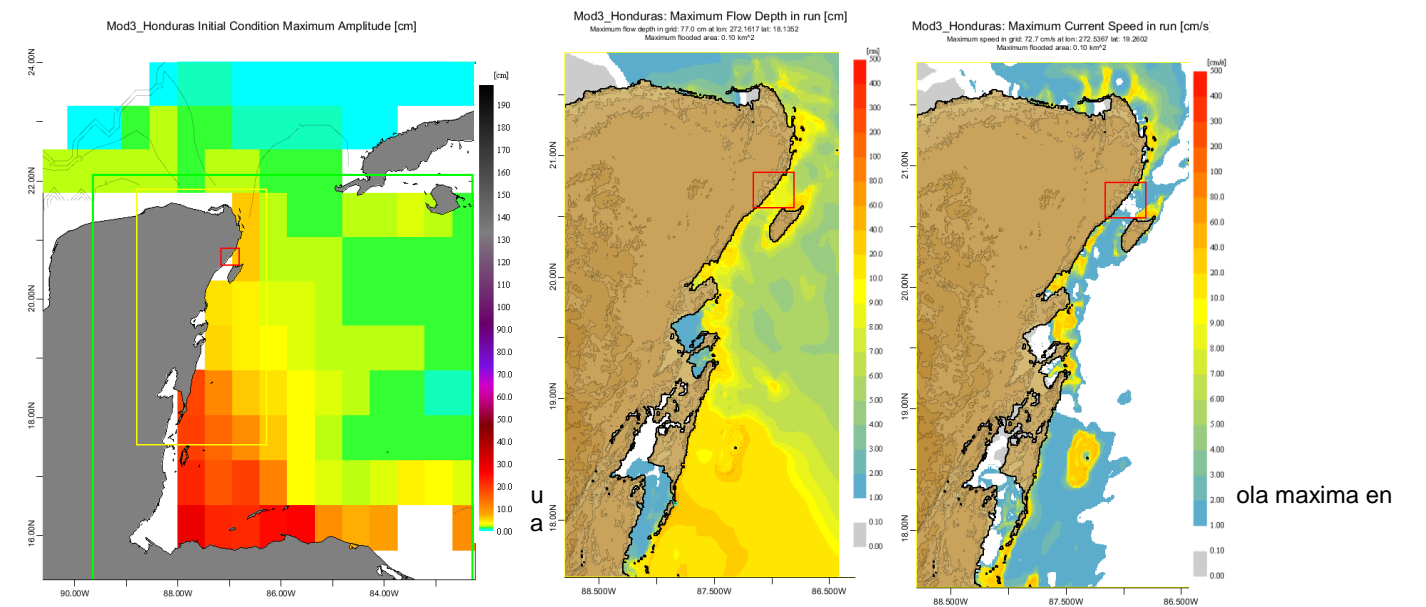


Figura 79. Mareógrafos de la línea de costa de Q. Roo para evento del tsunami sintético.

Para todas las mediciones en la costa de Q, Roo, el la altura maxima registrada no sobrepasa los 40 cm a una velocidad de no mas de 3 km/h.



El ensamble de 10 imágenes que cubren un espacio de 3 horas desde el origen del tsunami, muestran dos colores, el rojo indica una altura positiva de la columna de agua y los tonos azules indican la altura negativa de la mismo columna de agua. Para poder medir el impacto en costa, el COOMIT da una salida gráfica, mareógrafo, que se puede considerar como el factor de avance o corrida del tsunami al tocar tierra firme (run up).

Salida mareógrafo en puntos de costa en cm:

Cancun

Playa del Carmen

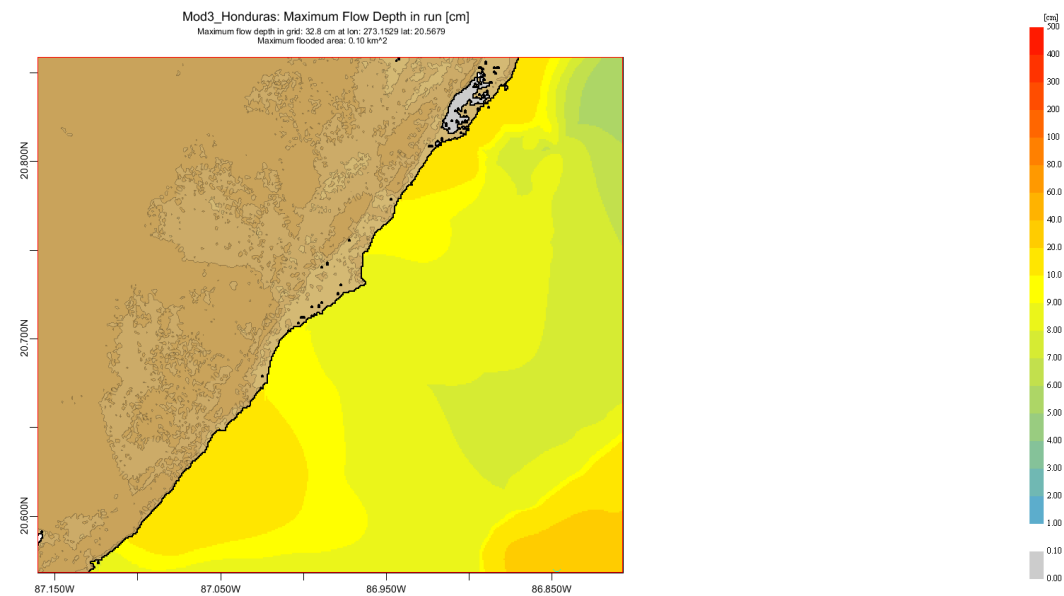


Figura 81. Detalle de la costa de Playa del Carmen para el evento de flujo profundo y donde la ola alcanza una altura de 10 cm máximos.

Modelo 2. Costa de Honduras. Sismo de 8.0 grados de Richter.

El programa arroja una hoja de resultados con la sistesis del proceso como se ve acontinuación del modelo sistetico de la costa de Venezuela

MOST v2.5 Rev: 3209 2016-08-30 19:10:11

```
Site: Mod3_Honduras
Input prefix: linCo
Input Directory: ./
Read Computational parameters in run dir: ./most3_facts_nc.in
Minimum amplitude of input offshore wave (m): 5.00000000000000010E-003
Input minimum depth for offshore (m): 0.100000000000000001
Input "dry land" depth for inundation (m): 0.100000000000000001
Input friction coefficient (n**2): 8.9999999999999975E-004
Input runup switch (0 - runup only in gridC, 1 - runup in all grids): 1
Max allowed eta (m): 300.00000000000000
Input time step (sec): 1.0700000000000001
Input amount of steps: 13500
Compute "A" arrays every n-th time step, n= 12
Compute "B" arrays every n-th time step, n= 3
Input number of steps between snapshots (should be a multiple of A,B and C time steps) : 24
...Starting from: 0
...Saving grid every n-th node, n= 1
Reading Bathymetry
1-ST LEVEL:
Bathymetry: Mod3_HondurasGridA.most
Reading MOST formatted bathymetry file
...image-format bathy file (latitude decreasing)
Eliminating one-node islands...
Number of points affected: 145
WARNING: computational grid being adjusted!
Writing 1-node eliminated bathy file: Mod3_HondurasGridA.most.1nod
2-ND LEVEL:
Bathymetry: Mod3_HondurasGridB.most
Reading MOST formatted bathymetry file
...image-format bathy file (latitude decreasing)
Eliminating one-node islands...
Number of points affected: 250
WARNING: computational grid being adjusted!
Writing 1-node eliminated bathy file: Mod3_HondurasGridB.most.1nod
3-RD LEVEL:
Bathymetry: Mod3_HondurasGridC.most
Reading MOST formatted bathymetry file
```

```
...image-format bathy file (latitude decreasing)
Eliminating one-node islands...
Number of points affected: 53
WARNING: computational grid being adjusted!
Writing 1-node eliminated bathy file: Mod3_HondurasGridC.most.1nod
DODS URL: ./
output directory: ./
Produce/Suppress netCDF output for grids
A-grid B-grid C-grid Sift-file (default, 1 1 1 0): 1 1 1 1
Cannot read timeseries locations, not outputting ts
number of timeseries locations: 0
Done with input file ./most3_facts_nc.in
Input FACTS files:
zonal U: ./linCou.nc
meridial V: ./linCov.nc
amplitudes H: ./linCoh.nc
inversion found in A0 input file
Found deformation in IC source file
defmax: 0.45262435078620911
Deformation is over threshold, deforming bathies
Writing deformed A-grid bathy file: deforma.dat
Writing deformed B-grid bathy file: deformb.dat
Writing deformed C-grid bathy file: deformc.dat
size of input array: 32 32 2161
Longitude: 269.86669999999998 to 278.133300000000002
Latitude: 14.583000000000000 to 22.414999999999999
Time: 0.0000000000000000 to 129600.000000000000
Number of inundated points in c-grid: 0
restart data file: ./Mod3_Honduras_restart.nc
file not found, no restart
NetCDF array size for grid C: 425 350
NetCDF array size for grid B: 303 520
NetCDF array size for grid A: 222 213
creating netCDF output file: ./Mod3_Honduras_runup_ha.nc
creating netCDF output file: ./Mod3_Honduras_runup_ua.nc
creating netCDF output file: ./Mod3_Honduras_runup_va.nc
creating netCDF output file: ./Mod3_Honduras_runupB_ha.nc
creating netCDF output file: ./Mod3_Honduras_runupB_ua.nc
creating netCDF output file: ./Mod3_Honduras_runupB_va.nc
creating netCDF output file: ./Mod3_Honduras_runupA_ha.nc
creating netCDF output file: ./Mod3_Honduras_runupA_ua.nc
creating netCDF output file: ./Mod3_Honduras_runupA_va.nc
creating netCDF output file: ./Mod3_Honduras_sift.nc
netCDF initialization complete
incoming wave max amp on A-Grid boundary: 43.715003967285156
leaving threshold at: 0.5000000000000000 cm
input 1 wave detected at 0.0000000000000000 amp: 29.955001831054688 cm at 271.73329999999999 ,
15.8695000000000000
Initial surface is read at t= 0.0000000000000000
Output time step: 10 time: 256.8 sec, 4.3 min, 0.1 hrs, 1.8 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.00102881 / -0.00048080
Max/Min elevation in grid B are: 0.00505314 / 0.00000000
Max/Min elevation in grid A are: 0.36766888 / -0.18127331
Output time step: 20 time: 513.6 sec, 8.6 min, 0.1 hrs, 3.6 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.00104789 / -0.00000431
Max/Min elevation in grid B are: 0.12965786 / 0.00000000
Max/Min elevation in grid A are: 0.37721866 / -0.24505111
Output time step: 30 time: 770.4 sec, 12.8 min, 0.2 hrs, 5.3 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.00108309 / -0.00005378
Max/Min elevation in grid B are: 0.20637964 / -0.00036009
Max/Min elevation in grid A are: 0.41095361 / -0.22375896
Output time step: 40 time: 1027.2 sec, 17.1 min, 0.3 hrs, 7.1 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.00107552 / -0.00008472
Max/Min elevation in grid B are: 0.22951247 / -0.00541641
Max/Min elevation in grid A are: 0.42447037 / -0.27917802
Output time step: 50 time: 1284.0 sec, 21.4 min, 0.4 hrs, 8.9 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.00102989 / -0.00008524
Max/Min elevation in grid B are: 0.34968613 / -0.02223011
```

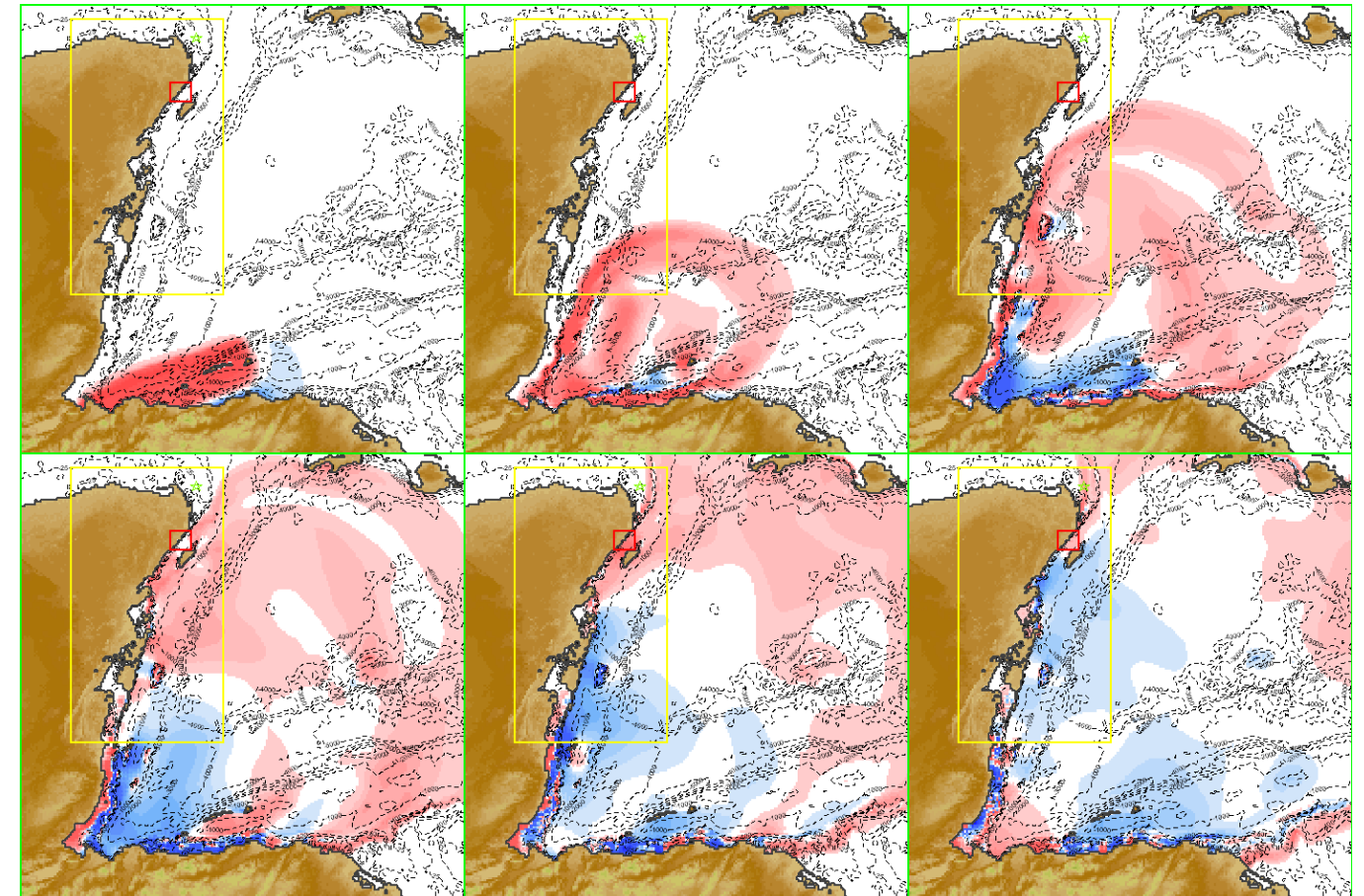
Max/Min elevation in grid A are: 0.38007172 / -0.27733171
 Output time step: 60 time: 1540.8 sec, 25.7 min, 0.4 hrs, 10.7 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.00102685 / -0.00004976
 Max/Min elevation in grid B are: 0.51334868 / -0.25493997
 Max/Min elevation in grid A are: 0.36696784 / -0.28993746
 Output time step: 70 time: 1797.6 sec, 30.0 min, 0.5 hrs, 12.4 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.00102685 / -0.00026395
 Max/Min elevation in grid B are: 0.62430609 / -0.36758268
 Max/Min elevation in grid A are: 0.36769166 / -0.29665435
 Output time step: 80 time: 2054.4 sec, 34.2 min, 0.6 hrs, 14.2 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.00102685 / -0.00064198
 Max/Min elevation in grid B are: 0.36267260 / -0.55458350
 Max/Min elevation in grid A are: 0.38188458 / -0.44976790
 Output time step: 90 time: 2311.2 sec, 38.5 min, 0.6 hrs, 16.0 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.00102685 / -0.00104237
 Max/Min elevation in grid B are: 0.48254951 / -0.41146204
 Max/Min elevation in grid A are: 0.38027831 / -0.37066104
 Output time step: 100 time: 2568.0 sec, 42.8 min, 0.7 hrs, 17.8 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.00102685 / -0.00211587
 Max/Min elevation in grid B are: 0.45872594 / -0.33650272
 Max/Min elevation in grid A are: 0.35199604 / -0.38845200
 Output time step: 110 time: 2824.8 sec, 47.1 min, 0.8 hrs, 19.6 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.00102685 / -0.00320963
 Max/Min elevation in grid B are: 0.53826808 / -0.27497093
 Max/Min elevation in grid A are: 0.36055816 / -0.42037241
 Output time step: 120 time: 3081.6 sec, 51.4 min, 0.9 hrs, 21.3 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.03650207 / -0.00397159
 Max/Min elevation in grid B are: 0.45155977 / -0.35222762
 Max/Min elevation in grid A are: 0.38995707 / -0.50016518
 Output time step: 130 time: 3338.4 sec, 55.6 min, 0.9 hrs, 23.1 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.06851756 / -0.00492968
 Max/Min elevation in grid B are: 0.28086447 / -0.53235738
 Max/Min elevation in grid A are: 0.40123149 / -0.53270484
 Output time step: 140 time: 3595.2 sec, 59.9 min, 1.0 hrs, 24.9 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.10890191 / -0.00508143
 Max/Min elevation in grid B are: 0.39444327 / -0.28793868
 Max/Min elevation in grid A are: 0.37240875 / -0.59748415
 Output time step: 150 time: 3852.0 sec, 64.2 min, 1.1 hrs, 26.7 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.16725035 / -0.00001034
 Max/Min elevation in grid B are: 0.34475873 / -0.28229262
 Max/Min elevation in grid A are: 0.31013112 / -0.56921082
 Output time step: 160 time: 4108.8 sec, 68.5 min, 1.1 hrs, 28.4 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.11057808 / -0.02043677
 Max/Min elevation in grid B are: 0.31588280 / -0.40660539
 Max/Min elevation in grid A are: 0.27007325 / -0.50950215
 Output time step: 170 time: 4365.6 sec, 72.8 min, 1.2 hrs, 30.2 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.12713220 / -0.04877697
 Max/Min elevation in grid B are: 0.32680400 / -0.41015814
 Max/Min elevation in grid A are: 0.27899056 / -0.57521260
 WARNING: num inundated pts GT 10 at timestep 170
 Output time step: 180 time: 4622.4 sec, 77.0 min, 1.3 hrs, 32.0 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.17283167 / -0.01080250
 Max/Min elevation in grid B are: 0.34876877 / -0.40139928
 Max/Min elevation in grid A are: 0.29198583 / -0.52394185
 Output time step: 190 time: 4879.2 sec, 81.3 min, 1.4 hrs, 33.8 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.21263146 / -0.00000326
 Max/Min elevation in grid B are: 0.25674968 / -0.34157880
 Max/Min elevation in grid A are: 0.40450078 / -0.53931870
 Output time step: 200 time: 5136.0 sec, 85.6 min, 1.4 hrs, 35.6 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.18640532 / -0.03824761
 Max/Min elevation in grid B are: 0.28969815 / -0.40107139
 Max/Min elevation in grid A are: 0.43242534 / -0.53203807
 Output time step: 210 time: 5392.8 sec, 89.9 min, 1.5 hrs, 37.3 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.14914256 / -0.08015997
 Max/Min elevation in grid B are: 0.24074994 / -0.34920586
 Max/Min elevation in grid A are: 0.39948126 / -0.49029492
 Output time step: 220 time: 5649.6 sec, 94.2 min, 1.6 hrs, 39.1 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.12184254 / -0.11845552

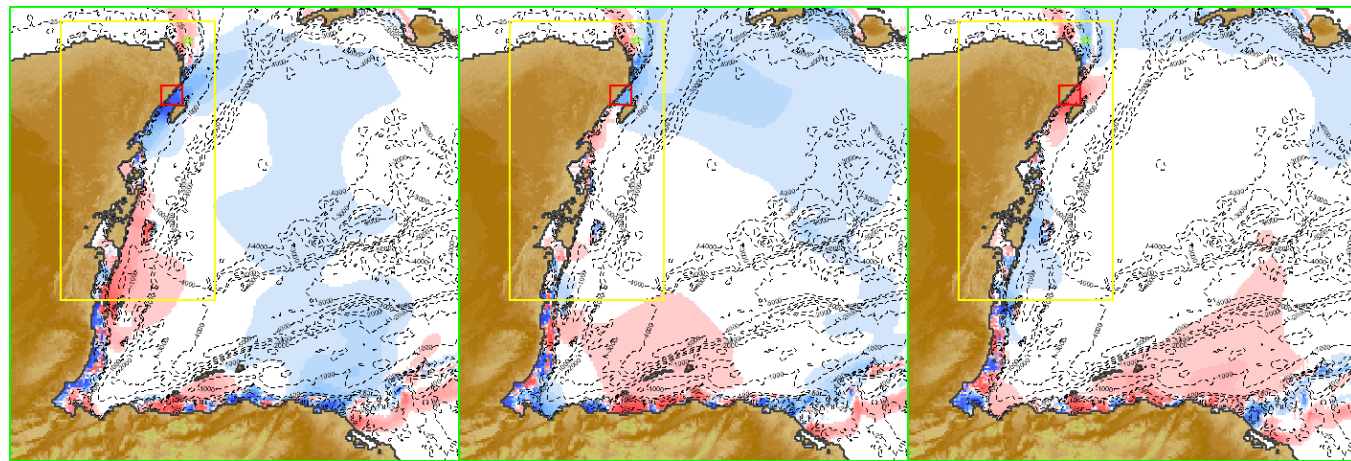
Max/Min elevation in grid B are: 0.38221090 / -0.30714088
 Max/Min elevation in grid A are: 0.43071896 / -0.46953485
 Output time step: 230 time: 5906.4 sec, 98.4 min, 1.6 hrs, 40.9 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.14843759 / -0.11923535
 Max/Min elevation in grid B are: 0.37737911 / -0.44454587
 Max/Min elevation in grid A are: 0.39801853 / -0.39792220
 Output time step: 240 time: 6163.2 sec, 102.7 min, 1.7 hrs, 42.7 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.03546010 / -0.16421528
 Max/Min elevation in grid B are: 0.29565378 / -0.37119754
 Max/Min elevation in grid A are: 0.50758795 / -0.43120634
 Output time step: 250 time: 6420.0 sec, 107.0 min, 1.8 hrs, 44.4 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.05758711 / -0.22327322
 Max/Min elevation in grid B are: 0.25095127 / -0.35285917
 Max/Min elevation in grid A are: 0.52141352 / -0.42141335
 Output time step: 260 time: 6676.8 sec, 111.3 min, 1.9 hrs, 46.2 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.00102685 / -0.29576806
 Max/Min elevation in grid B are: 0.25831575 / -0.30892023
 Max/Min elevation in grid A are: 0.45450958 / -0.41666069
 Output time step: 270 time: 6933.6 sec, 115.6 min, 1.9 hrs, 48.0 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.00102685 / -0.33184223
 Max/Min elevation in grid B are: 0.32598524 / -0.38517626
 Max/Min elevation in grid A are: 0.40329343 / -0.39013550
 Output time step: 280 time: 7190.4 sec, 119.8 min, 2.0 hrs, 49.8 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.00102685 / -0.25415312
 Max/Min elevation in grid B are: 0.39075069 / -0.29966235
 Max/Min elevation in grid A are: 0.44088480 / -0.31595999
 Output time step: 290 time: 7447.2 sec, 124.1 min, 2.1 hrs, 51.6 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.01281986 / -0.32682650
 Max/Min elevation in grid B are: 0.28676315 / -0.31691433
 Max/Min elevation in grid A are: 0.46311736 / -0.30016233
 Output time step: 300 time: 7704.0 sec, 128.4 min, 2.1 hrs, 53.3 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.07093534 / -0.19269387
 Max/Min elevation in grid B are: 0.20868508 / -0.24927299
 Max/Min elevation in grid A are: 0.39471581 / -0.40346926
 Output time step: 310 time: 7960.8 sec, 132.7 min, 2.2 hrs, 55.1 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.12245480 / -0.04246170
 Max/Min elevation in grid B are: 0.22930498 / -0.24495647
 Max/Min elevation in grid A are: 0.37198837 / -0.44878810
 Output time step: 320 time: 8217.6 sec, 137.0 min, 2.3 hrs, 56.9 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.12875720 / -0.04326881
 Max/Min elevation in grid B are: 0.25357628 / -0.24506733
 Max/Min elevation in grid A are: 0.36436004 / -0.38655467
 Output time step: 330 time: 8474.4 sec, 141.2 min, 2.4 hrs, 58.7 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.23084129 / -0.02108631
 Max/Min elevation in grid B are: 0.29514906 / -0.19370426
 Max/Min elevation in grid A are: 0.31808924 / -0.34322898
 Output time step: 340 time: 8731.2 sec, 145.5 min, 2.4 hrs, 60.4 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.24695552 / -0.01167278
 Max/Min elevation in grid B are: 0.28189769 / -0.24246397
 Max/Min elevation in grid A are: 0.26634115 / -0.27138367
 Output time step: 350 time: 8988.0 sec, 149.8 min, 2.5 hrs, 62.2 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.32399843 / -0.00401565
 Max/Min elevation in grid B are: 0.33537451 / -0.25736959
 Max/Min elevation in grid A are: 0.31523760 / -0.23610735
 Output time step: 360 time: 9244.8 sec, 154.1 min, 2.6 hrs, 64.0 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.30161937 / -0.00000010
 Max/Min elevation in grid B are: 0.30844539 / -0.26153801
 Max/Min elevation in grid A are: 0.31443405 / -0.28808217
 Output time step: 370 time: 9501.6 sec, 158.4 min, 2.6 hrs, 65.8 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.23740584 / -0.00372869
 Max/Min elevation in grid B are: 0.26158109 / -0.16106978
 Max/Min elevation in grid A are: 0.34726992 / -0.31464012
 Output time step: 380 time: 9758.4 sec, 162.6 min, 2.7 hrs, 67.6 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.14827307 / -0.03163656
 Max/Min elevation in grid B are: 0.17889047 / -0.14821409
 Max/Min elevation in grid A are: 0.31303907 / -0.34148935
 Output time step: 390 time: 10015.2 sec, 166.9 min, 2.8 hrs, 69.3 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.05411515 / -0.02183924

Max/Min elevation in grid B are: 0.24860683 / -0.17057719
 Max/Min elevation in grid A are: 0.25486227 / -0.33759384
 Output time step: 400 time: 10272.0 sec, 171.2 min, 2.9 hrs, 71.1 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.01165124 / -0.16455059
 Max/Min elevation in grid B are: 0.16271618 / -0.18319839
 Max/Min elevation in grid A are: 0.16285731 / -0.29349566
 Output time step: 410 time: 10528.8 sec, 175.5 min, 2.9 hrs, 72.9 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.00102685 / -0.26846313
 Max/Min elevation in grid B are: 0.17278892 / -0.28080076
 Max/Min elevation in grid A are: 0.20347503 / -0.32815142
 Output time step: 420 time: 10785.6 sec, 179.8 min, 3.0 hrs, 74.7 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.00102685 / -0.27696665
 Max/Min elevation in grid B are: 0.21563690 / -0.29303420
 Max/Min elevation in grid A are: 0.25135930 / -0.34217141
 Output time step: 430 time: 11042.4 sec, 184.0 min, 3.1 hrs, 76.4 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.01179085 / -0.28093030
 Max/Min elevation in grid B are: 0.25913208 / -0.28931732
 Max/Min elevation in grid A are: 0.26779342 / -0.33117292
 Output time step: 440 time: 11299.2 sec, 188.3 min, 3.1 hrs, 78.2 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.00102685 / -0.23411788
 Max/Min elevation in grid B are: 0.28937709 / -0.24533696
 Max/Min elevation in grid A are: 0.29912471 / -0.29357205
 Output time step: 450 time: 11556.0 sec, 192.6 min, 3.2 hrs, 80.0 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.01659557 / -0.13586944
 Max/Min elevation in grid B are: 0.19861154 / -0.15988948
 Max/Min elevation in grid A are: 0.31903939 / -0.27489294
 Output time step: 460 time: 11812.8 sec, 196.9 min, 3.3 hrs, 81.8 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.03230409 / -0.09158163
 Max/Min elevation in grid B are: 0.11858401 / -0.18866093
 Max/Min elevation in grid A are: 0.28703606 / -0.31733900
 Output time step: 470 time: 12069.6 sec, 201.2 min, 3.4 hrs, 83.6 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.06204999 / -0.00682030
 Max/Min elevation in grid B are: 0.13175073 / -0.12944589
 Max/Min elevation in grid A are: 0.28727204 / -0.28061486
 Output time step: 480 time: 12326.4 sec, 205.4 min, 3.4 hrs, 85.3 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.19947364 / -0.00163372
 Max/Min elevation in grid B are: 0.19747306 / -0.14068113
 Max/Min elevation in grid A are: 0.28124370 / -0.22367564
 Output time step: 490 time: 12583.2 sec, 209.7 min, 3.5 hrs, 87.1 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.25995271 / -0.00000001
 Max/Min elevation in grid B are: 0.28291087 / -0.13337226
 Max/Min elevation in grid A are: 0.28407241 / -0.17551931
 Output time step: 500 time: 12840.0 sec, 214.0 min, 3.6 hrs, 88.9 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.25698989 / -0.00000001
 Max/Min elevation in grid B are: 0.27855112 / -0.16250656
 Max/Min elevation in grid A are: 0.27105174 / -0.17574145
 Output time step: 510 time: 13096.8 sec, 218.3 min, 3.6 hrs, 90.7 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.26742316 / -0.00000001
 Max/Min elevation in grid B are: 0.28324496 / -0.16505488
 Max/Min elevation in grid A are: 0.27836074 / -0.23105965
 Output time step: 520 time: 13353.6 sec, 222.6 min, 3.7 hrs, 92.4 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.20965274 / -0.00000000
 Max/Min elevation in grid B are: 0.20903777 / -0.19405691
 Max/Min elevation in grid A are: 0.33574423 / -0.25054837
 Output time step: 530 time: 13610.4 sec, 226.8 min, 3.8 hrs, 94.2 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.11135792 / -0.01932690
 Max/Min elevation in grid B are: 0.13103161 / -0.18350387
 Max/Min elevation in grid A are: 0.36343952 / -0.26493829
 Output time step: 540 time: 13867.2 sec, 231.1 min, 3.9 hrs, 96.0 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.02898860 / -0.04695380
 Max/Min elevation in grid B are: 0.14866193 / -0.14010139
 Max/Min elevation in grid A are: 0.37605404 / -0.28408744
 Output time step: 550 time: 14124.0 sec, 235.4 min, 3.9 hrs, 97.8 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.00238094 / -0.10345744
 Max/Min elevation in grid B are: 0.12440720 / -0.16272707
 Max/Min elevation in grid A are: 0.38754301 / -0.25308858
 Output time step: 560 time: 14380.8 sec, 239.7 min, 4.0 hrs, 99.6 % comp
 Max/Min elevation in grid C are: 0.00141155 / -0.16423670

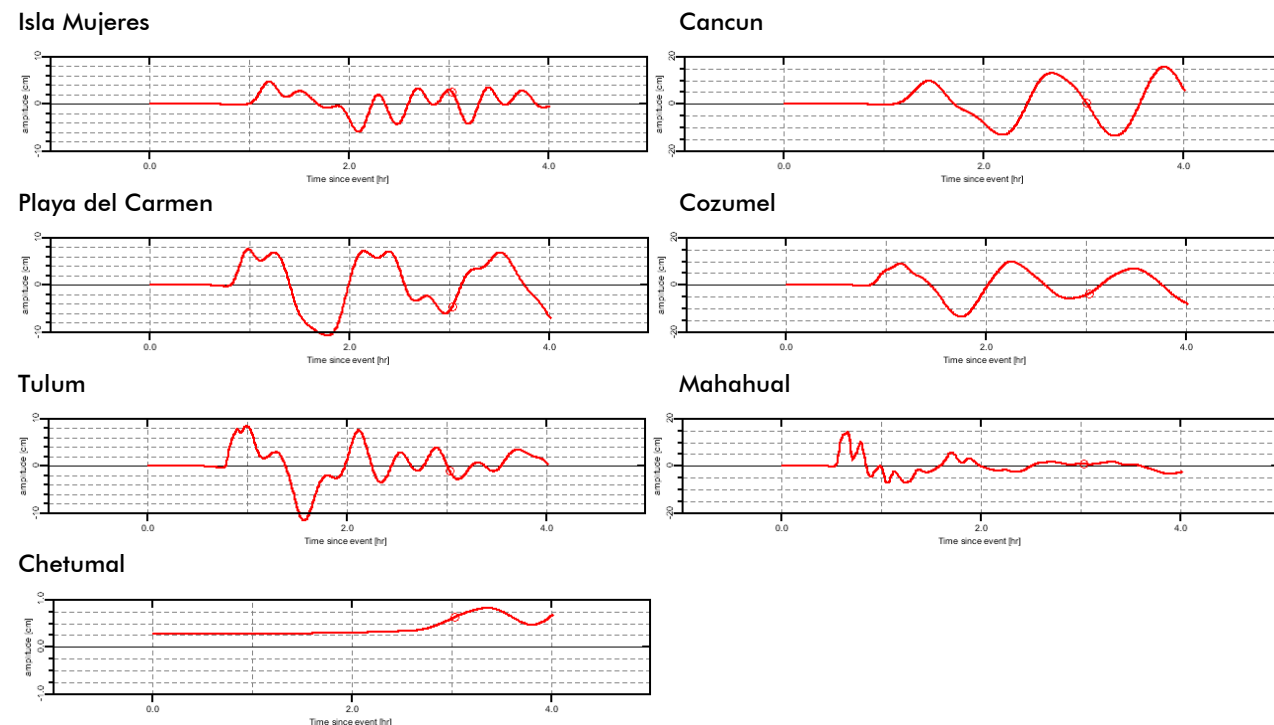
Max/Min elevation in grid B are: 0.08962736 / -0.17996475
 Max/Min elevation in grid A are: 0.32631335 / -0.21849163
 Total number of inundated points: 12
 saving restart file
 done saving restart file
 calculating maximums
 saving maximums to _sift.nc
 MOST v2.5 Rev: 3209 2016-08-30 19:26:04
 elapsed secs: 924.26563 , user: 909.93750 , sys: 14.328125
 clock time: 953 secs, 15.883334 minutos
 Run finished. Exiting normally.

La siguiente sucesión de imagens describen desde el tiempo 0:00 que es cuando se genera el sismo en las placas hasta las 4:00:00 horas despues del evento. El tiempo estimado para impacto en la costa de Q. Roo es de 30 minutos despues. COMMIT desarrollo para esta modelación 436 imágenes distribuidas en 240 minutos. Se incluyen las más representativas cada 20 minutos hasta sumas las 4 horas. Tiempo en que impacta y rebasa a Q. Roo.





El ensamble de 9 imágenes que cubre un tiempo poco mayor a tres horas desde el tiempo cero, muestra la poca agresividad de las olas o de la sucesión de olas que tienden a golpear la costa de Q. Roo, muestran dos colores, el rojo indica una altura positiva de la columna de agua y los tonos azules indican la altura negativa de la misma columna de agua. Para poder medir el impacto en costa, el COOMIT da una salida gráfica, mareógrafo, que se puede considerar como el factor de avance o corrida del tsunami al tocar tierra firme (run up), es decir la amplitud de la ola respecto a la altura promedio del mar. A continuación se presentan las graficas de los mareografos para zonas en específico.



Los mareogramas ejemplifican que el primer impacto se da a la media hora de provocarse, y casi a la hora y media en la parte norte del Estado. Las Bahías como la de Chetumal, Espíritu Santo y Ascención no son impactadas por el breve y ligero oleaje. El máximo oleaje se presenta en el norte (Cancún) con cerca de 20 cm de altura del vaiven de la ola contra los menos de 10 cm en Chetumal. Se da un fenomeno de resonancia en un lapso de cuatro horas en las que el oleaje se presenta casi en repetición como el Playa del Carmén, Cozumel y Cancún. Se da un rango de velocidades desde lo 3-5 m/s hasta los 25 m/s en Cancún y 50 m/s en Tulum que equivale a unos 180 km/h.

Es importante mencionar que la Plataforma Continental y la baja columna de agua que se da a consecuencia del arrecife sirven de escudo natural para neutralizar la fuerza del oleaje, que, aunque de baja profundidad puede llegar a pegar con mucha fuerza. Las modelaciones corridas ComMit no incluyen el relieve que se da en la Plataforma ni la acción

hidrodinámica ejercida por las corrientes en el canal de Yucatán ni Mar Caribe, sin embargo, son Línea Base para infraestructura de costa, malecones y caminos costeros.

Modelo 3. Costa de Cuba. Sismo de 9.0 grados de Richter.

MOST v2.5 Rev: 3209 2016-12-19 23:36:08

```

Site: Cuba7
Input prefix: linCo
Input Directory: ./
Read Computational parameters in run dir: ./most3_facts_nc.in
Minimum amplitude of input offshore wave (m): 5.0000000000000010E-003
Input minimum depth for offshore (m): 0.10000000000000001
Input "dry land" depth for inundation (m): 0.10000000000000001
Input friction coefficient (n**2): 8.9999999999999975E-004
Input runup switch (0 - runup only in gridC, 1 - runup in all grids): 1
Max allowed eta (m): 300.00000000000000
Input time step (sec): 3.2400000000000002
Input amount of steps: 4400
Compute "A" arrays every n-th time step, n= 1
Compute "B" arrays every n-th time step, n= 6
Input number of steps between snapshots (should be a multiple of A,B and C time steps) : 12
...Starting from: 0
...Saving grid every n-th node, n= 1
Reading Bathymetry
1-ST LEVEL:
Bathymetry: Cuba7GridA.most
Reading MOST formatted bathymetry file
...image-format bathy file (latitude decreasing)
Eliminating one-node islands...
Number of points affected: 249
WARNING: computational grid being adjusted!
Writing 1-node eliminated bathy file: Cuba7GridA.most.1nod
2-ND LEVEL:
Bathymetry: Cuba7GridB.most
Reading MOST formatted bathymetry file
...image-format bathy file (latitude decreasing)
Eliminating one-node islands...
Number of points affected: 0
3-RD LEVEL:
Bathymetry: Cuba7GridC.most
Reading MOST formatted bathymetry file
...image-format bathy file (latitude decreasing)
Eliminating one-node islands...
Number of points affected: 0
DODS URL: ./
output directory: ./
Produce/Suppress netCDF output for grids
A-grid B-grid C-grid Sift-file (default, 1 1 1 0): 1 1 1 1
Cannot read timeseries locations, not outputting ts
number of timeseries locations: 0
Done with input file ./most3_facts_nc.in
Input FACTS files:
zonal U: ./linCov.nc
meridial V: ./linCov.nc
amplitudes H: ./linCoh.nc
inversion found in A0 input file
Found deformation in IC source file
defmax: 7.9272789955139160
Deformation is over threshold, deforming bathies
Writing deformed A-grid bathy file: deforma.dat
Writing deformed B-grid bathy file: deformb.dat
Writing deformed C-grid bathy file: deformc.dat
size of input array: 43 28 2161
Longitude: 270.39999999999998 to 281.60000000000002
Latitude: 17.402400000000000 to 24.129700000000000
Time: 0.0000000000000000 to 129600.000000000000
Number of inundated points in c-grid: 0
.restart data file: ./Cuba7_restart.nc
file not found, no restart
    
```

```

NetCDF array size for grid C: 218 218
NetCDF array size for grid B: 183 168
NetCDF array size for grid A: 320 176
creating netCDF output file: ./Cuba7_runup_ha.nc
creating netCDF output file: ./Cuba7_runup_ua.nc
creating netCDF output file: ./Cuba7_runup_va.nc
creating netCDF output file: ./Cuba7_runupB_ha.nc
creating netCDF output file: ./Cuba7_runupB_ua.nc
creating netCDF output file: ./Cuba7_runupB_va.nc
creating netCDF output file: ./Cuba7_runupA_ha.nc
creating netCDF output file: ./Cuba7_runupA_ua.nc
creating netCDF output file: ./Cuba7_runupA_va.nc
creating netCDF output file: ./Cuba7_sift.nc
netCDF initialization complete
incoming wave max amp on A-Grid boundary: 785.71350097656250
setting threshold to 1% of max amp: 7.8571348341449720
input 1 wave detected at 0.0000000000000000 amp: -8.1431188583374023 cm at 275.73329999999999 ,
18.4174000000000001
Initial surface is read at t= 0.0000000000000000
Output time step: 10 time: 388.8 sec, 6.5 min, 0.1 hrs, 2.7 % comp
Max/Min elevation in grid C are: -0.00615947 / -0.00831010
Max/Min elevation in grid B are: -0.00297142 / -0.01029404
Max/Min elevation in grid A are: 4.01400341 / -4.77690266
Output time step: 20 time: 777.6 sec, 13.0 min, 0.2 hrs, 5.5 % comp
Max/Min elevation in grid C are: -0.00650063 / -0.00856954
Max/Min elevation in grid B are: -0.00301305 / -0.01002915
Max/Min elevation in grid A are: 4.71157079 / -3.57018234
Output time step: 30 time: 1166.4 sec, 19.4 min, 0.3 hrs, 8.2 % comp
Max/Min elevation in grid C are: -0.00682423 / -0.00829968
Max/Min elevation in grid B are: -0.00187910 / -0.00998432
Max/Min elevation in grid A are: 5.91949118 / -3.45331427
Output time step: 40 time: 1555.2 sec, 25.9 min, 0.4 hrs, 10.9 % comp
Max/Min elevation in grid C are: -0.00663129 / -0.00799130
Max/Min elevation in grid B are: -0.00041424 / -0.00998432
Max/Min elevation in grid A are: 7.85554258 / -4.31209612
Output time step: 50 time: 1944.0 sec, 32.4 min, 0.5 hrs, 13.6 % comp
Max/Min elevation in grid C are: -0.00663718 / -0.00790877
Max/Min elevation in grid B are: 0.00057237 / -0.00998432
Max/Min elevation in grid A are: 9.23286104 / -5.59374690
Output time step: 60 time: 2332.8 sec, 38.9 min, 0.6 hrs, 16.4 % comp
Max/Min elevation in grid C are: -0.00678936 / -0.00798007
Max/Min elevation in grid B are: 0.00306532 / -0.00998432
Max/Min elevation in grid A are: 7.70717877 / -7.48884530
Output time step: 70 time: 2721.6 sec, 45.4 min, 0.8 hrs, 19.1 % comp
Max/Min elevation in grid C are: -0.00658206 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.00576501 / -0.00998432
Max/Min elevation in grid A are: 9.25259857 / -5.74937069
Output time step: 80 time: 3110.4 sec, 51.8 min, 0.9 hrs, 21.8 % comp
Max/Min elevation in grid C are: -0.00636967 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.00723488 / -0.00998432
Max/Min elevation in grid A are: 9.23419412 / -6.42985753
Output time step: 90 time: 3499.2 sec, 58.3 min, 1.0 hrs, 24.5 % comp
Max/Min elevation in grid C are: -0.00636562 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.00799009 / -0.00998432
Max/Min elevation in grid A are: 10.72836062 / -4.00356323
Output time step: 100 time: 3888.0 sec, 64.8 min, 1.1 hrs, 27.3 % comp
Max/Min elevation in grid C are: -0.00584907 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.00889729 / -0.00998432
Max/Min elevation in grid A are: 8.96238588 / -6.50231411
Output time step: 110 time: 4276.8 sec, 71.3 min, 1.2 hrs, 30.0 % comp
Max/Min elevation in grid C are: -0.00492298 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.00936313 / -0.00998432
Max/Min elevation in grid A are: 11.28149932 / -10.02560391
Output time step: 120 time: 4665.6 sec, 77.8 min, 1.3 hrs, 32.7 % comp
Max/Min elevation in grid C are: -0.00318398 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.00972000 / -0.00998432
Max/Min elevation in grid A are: 6.41127444 / -5.73317623

```

```

Output time step: 130 time: 5054.4 sec, 84.2 min, 1.4 hrs, 35.5 % comp
Max/Min elevation in grid C are: -0.00150962 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.01052220 / -0.01697214
Max/Min elevation in grid A are: 5.78308360 / -8.15093878
Output time step: 140 time: 5443.2 sec, 90.7 min, 1.5 hrs, 38.2 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.00024764 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.01106307 / -0.04666238
Max/Min elevation in grid A are: 6.69387000 / -9.04215006
Output time step: 150 time: 5832.0 sec, 97.2 min, 1.6 hrs, 40.9 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.00213900 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.01212112 / -0.09468675
Max/Min elevation in grid A are: 6.07595817 / -9.75000860
Output time step: 160 time: 6220.8 sec, 103.7 min, 1.7 hrs, 43.6 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.00367796 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.05621245 / -0.13056090
Max/Min elevation in grid A are: 5.99428068 / -6.68365280
Output time step: 170 time: 6609.6 sec, 110.2 min, 1.8 hrs, 46.4 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.00514086 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.12794197 / -0.14615618
Max/Min elevation in grid A are: 4.72174579 / -4.55517688
Output time step: 180 time: 6998.4 sec, 116.6 min, 1.9 hrs, 49.1 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.00640629 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.30393044 / -0.14329046
Max/Min elevation in grid A are: 6.04651508 / -5.03374321
Output time step: 190 time: 7387.2 sec, 123.1 min, 2.1 hrs, 51.8 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.00802887 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.34123499 / -0.14203430
Max/Min elevation in grid A are: 5.19524769 / -3.78531809
Output time step: 200 time: 7776.0 sec, 129.6 min, 2.2 hrs, 54.5 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.00983061 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.33745057 / -0.15329004
Max/Min elevation in grid A are: 4.74554755 / -4.68788502
Output time step: 210 time: 8164.8 sec, 136.1 min, 2.3 hrs, 57.3 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.01113080 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.31923066 / -0.16401466
Max/Min elevation in grid A are: 5.32163383 / -5.14664686
Output time step: 220 time: 8553.6 sec, 142.6 min, 2.4 hrs, 60.0 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.01242053 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.34855043 / -0.14924030
Max/Min elevation in grid A are: 4.60790348 / -3.86519156
Output time step: 230 time: 8942.4 sec, 149.0 min, 2.5 hrs, 62.7 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.01365163 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.38076760 / -0.17369107
Max/Min elevation in grid A are: 5.66946864 / -4.06865693
Output time step: 240 time: 9331.2 sec, 155.5 min, 2.6 hrs, 65.5 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.01305647 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.44086412 / -0.17691887
Max/Min elevation in grid A are: 4.13343988 / -3.43699494
Output time step: 250 time: 9720.0 sec, 162.0 min, 2.7 hrs, 68.2 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.01011305 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.51449510 / -0.18258836
Max/Min elevation in grid A are: 4.16868057 / -3.07391240
Output time step: 260 time: 10108.8 sec, 168.5 min, 2.8 hrs, 70.9 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.00663114 / -0.01265099
Max/Min elevation in grid B are: 0.51104671 / -0.39768322
Max/Min elevation in grid A are: 3.87207405 / -5.17964392
Output time step: 270 time: 10497.6 sec, 175.0 min, 2.9 hrs, 73.6 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.00016566 / -0.03315241
Max/Min elevation in grid B are: 0.45377598 / -0.60060695
Max/Min elevation in grid A are: 2.69037087 / -2.84457972
Output time step: 280 time: 10886.4 sec, 181.4 min, 3.0 hrs, 76.4 % comp
Max/Min elevation in grid C are: -0.00715760 / -0.07348953
Max/Min elevation in grid B are: 0.46569859 / -0.55552613
Max/Min elevation in grid A are: 5.25599179 / -3.27186037
Output time step: 290 time: 11275.2 sec, 187.9 min, 3.1 hrs, 79.1 % comp
Max/Min elevation in grid C are: -0.00715760 / -0.12781281
Max/Min elevation in grid B are: 0.79305217 / -0.51129326
Max/Min elevation in grid A are: 2.57514746 / -2.74961424

```

```

Output time step: 300 time: 11664.0 sec, 194.4 min, 3.2 hrs, 81.8 % comp
Max/Min elevation in grid C are: -0.00715760 / -0.13623887
Max/Min elevation in grid B are: 0.52960226 / -0.67581892
Max/Min elevation in grid A are: 2.98756878 / -3.75836004
Output time step: 310 time: 12052.8 sec, 200.9 min, 3.3 hrs, 84.5 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.22694963 / -0.13448372
Max/Min elevation in grid B are: 0.43333584 / -0.84135048
Max/Min elevation in grid A are: 2.66727242 / -4.32988199
Output time step: 320 time: 12441.6 sec, 207.4 min, 3.5 hrs, 87.3 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.30383819 / -0.12893017
Max/Min elevation in grid B are: 0.72924544 / -0.71979118
Max/Min elevation in grid A are: 2.40127887 / -2.89190160
Output time step: 330 time: 12830.4 sec, 213.8 min, 3.6 hrs, 90.0 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.34677766 / -0.09360446
Max/Min elevation in grid B are: 0.67516480 / -0.53995125
Max/Min elevation in grid A are: 4.72192097 / -2.28815290
Output time step: 340 time: 13219.2 sec, 220.3 min, 3.7 hrs, 92.7 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.41531982 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.52374289 / -1.00406748
Max/Min elevation in grid A are: 2.75072619 / -2.42313388
Output time step: 350 time: 13608.0 sec, 226.8 min, 3.8 hrs, 95.5 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.41095721 / -0.00788356
Max/Min elevation in grid B are: 0.48337284 / -0.72716688
Max/Min elevation in grid A are: 2.37034582 / -3.41810511
Output time step: 360 time: 13996.8 sec, 233.3 min, 3.9 hrs, 98.2 % comp
Max/Min elevation in grid C are: 0.27007453 / -0.04764567
Max/Min elevation in grid B are: 0.94762792 / -0.61299814
Max/Min elevation in grid A are: 2.79424846 / -3.13720061
Total number of inundated points: 0
saving restart file
done saving restart file
calculating maximums
saving maximums to _sift.nc
MOST v2.5 Rev: 3209 2016-12-19 23:40:30
elapsed secs: 240.25000 , user: 235.59375 , sys: 4.6562500
clock time: 262 secs, 4.3666668 minutes
Run finished. Exiting normally.
    
```

3.3.4 Vulnerabilidad

La estimación de la vulnerabilidad física para tsunamis se basó en el ejercicio elaborado para inundaciones costeras por marea de tormenta, ya que actualmente no existe una metodología en el Cenapred que haga referencia a los riesgos por tsunami.

Así, se partió de los dos primeros escenarios descritos en los resultados (un sismo de 8 grados en escala de Richter, produciría olas de hasta 3 metros de altura en el Caribe mexicano, y el segundo a consecuencia de un sismo de 8.5 grados en la escala de Richter provocaría olas de hasta 7.5 metros).

Es preciso mencionar que la clasificación de la vivienda para estimar su vulnerabilidad se hizo con base en la tipología sugerida por el Cenapred en la Guía básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos (Fenómenos hidrometeorológicos), por lo que se establecieron cinco tipos de vivienda, dependiendo de los materiales constructivos, a los cuales se les asoció un nivel de vulnerabilidad⁶². (Tabla 48)

Tabla 48. Clasificación de viviendas y nivel de vulnerabilidad asignado

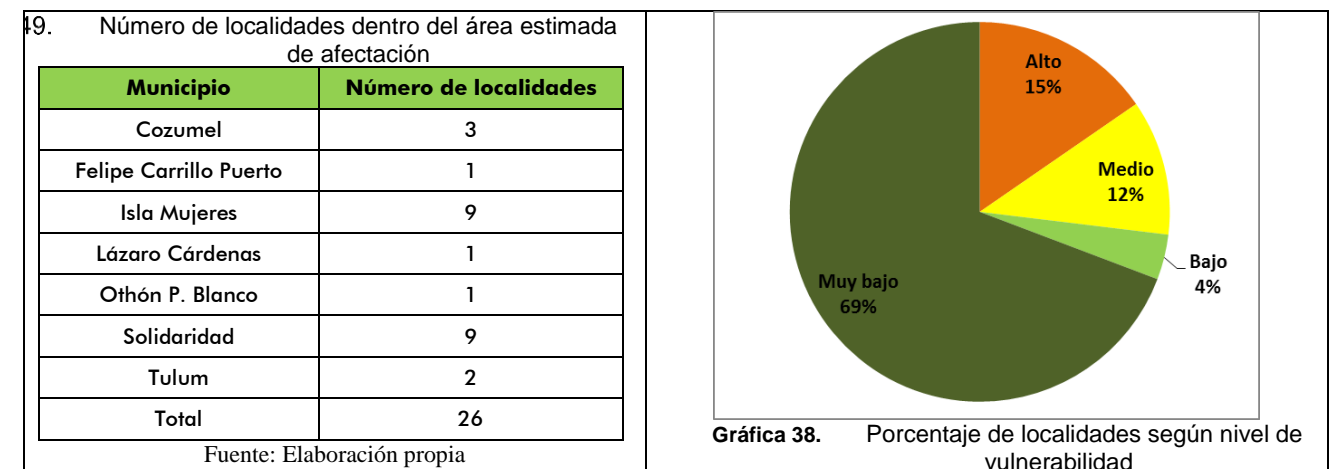
Tipo de vivienda	Nivel de vulnerabilidad	Código de colores
I	Muy alta	Rojo
II	Alta	Naranja
III	Media	Amarillo
IV	Baja	Verde claro
V	Muy baja	Verde oscuro

El análisis de vulnerabilidad en las ciudades se hizo a nivel manzana y en la zona rural a nivel localidad, es decir se asignó el color correspondiente según el tipo de vivienda predominante.

Las funciones de vulnerabilidad se elaboraron con base en el contenido promedio del menaje, puesto que únicamente se consideró el nivel que alcanzaría el agua al interior de las viviendas, no la resistencia estructural de las edificaciones, que para el caso de tsunami es de suma importancia.⁶³. En total se elaboraron para cada escenario, un mapa a nivel localidad y seis mapas a nivel manzana para las ciudades de Cancún, Cozumel, Isla Mujeres, Tulum, Chetumal y Playa del Carmen.

➤ Escenario de 3 metros

De acuerdo con el área de afectación estimada para un tsunami de 3 metros en territorio quintanarroense, se detectaron 26 localidades rurales que pudiesen ser afectadas, la mayoría ubicadas al Norte del estado y con niveles de vulnerabilidad muy bajos (Tabla 49 y Gráfica 38).



Las localidades rurales con mayores niveles de vulnerabilidad fueron Javier Rojo Gómez (Punta Allen) en Tulum, Palmar Primero en Cozumel, Punta Herrero en Felipe Carrillo Puerto, Xcalak en Othón P. Blanco y Paa Mul en Solidaridad (Figura 82). En la siguiente tabla se enlistan las localidades, el número de viviendas y habitantes, así como su nivel de vulnerabilidad.

⁶² Para mayor detalle sobre las combinaciones de materiales y la tipología de la vivienda consultar el capítulo correspondiente.

⁶³ Para consultar las funciones de vulnerabilidad consultar el capítulo de inundaciones urbanas.

Tabla 50. Nivel de vulnerabilidad de las localidades ubicadas dentro del área de afectación de un tsunami de 3 metros en el estado de Quintana Roo

Municipio	Localidades	Población total	Viviendas habitadas	Nivel de vulnerabilidad
Cozumel	Huerto Familiar	104	33	Muy baja
	Palmar Primero	13	5	Alta
	Isla de la Pasión	13	1	Baja
Felipe Carrillo Puerto	Punta Herrero	61	21	Alta
Isla Mujeres	Mira Playa	15	6	Muy baja
	Cayo Sucio	19	4	Media
	Esénica	19	5	Muy baja
	Punta Sam	81	30	Muy baja
	Jesús Alberto López Camino	11	4	Muy baja
	Playa Azul	13	5	Muy baja
	El Meco	14	5	Muy baja
	Casa Tangara	11	2	Muy baja
Residencial Arrecifes	20	5	Muy baja	
Lázaro Cárdenas	Holbox	1,486	417	Muy baja
Othón P. Blanco	Xcalak	375	107	Alta
Solidaridad	Paa Mul	29	13	Media
	Paráiso	21	5	Muy baja
	Puerto Chile	12	1	Muy baja
	Punta Maroma	58	24	Muy baja
	Santa Rosa	12	1	Muy baja
	Xpu Ha	36	12	Muy baja
	Playa del Secreto	28	11	Muy baja
	San José	62	19	Muy baja
San Mateo	20	5	Media	
Tulum	Akumal Sur	37	12	Muy baja
	Javier Rojo Gómez (Punta Allen)	469	136	Alta

Fuente: Elaboración propia



Figura 82. Vulnerabilidad física de la vivienda ante un tsunami de 3 metros en localidades rurales de Q. Roo.

A nivel ciudad, en Cancún se observó que prácticamente toda la Zona Hotelera registraría daños, así como una proporción importante de la zona urbana. Los niveles de vulnerabilidad son Muy bajos en la mayor parte de la ciudad, con excepción de una manzana al Norte de la ciudad que registró niveles Muy altos (Figura 83).



Figura 83. Vulnerabilidad física de la vivienda ante un tsunami de 3 metros en la ciudad de Cancún.

En la ciudad de Chetumal se observa una afectación de 66 manzanas, todas con niveles de vulnerabilidad Muy bajos a excepción de una, ubicada en la colonia Barrio Bravo, en la cual predominaron las viviendas con muros de madera y techos de lámina, lo que arrojó una vulnerabilidad alta (Figura 84).



Figura 84. Vulnerabilidad física de la vivienda ante un tsunami de 3 metros en la ciudad de Chetumal.

En la ciudad de Cozumel, se observan afectaciones en aproximadamente la mitad de la zona urbana, sobresale el hecho de que el aeropuerto podría registrar daños, lo que complicaría las labores de atención de la emergencia y evacuación de la población después de ocurrido el evento (Figura 85).

En cuanto a los niveles de vulnerabilidad, únicamente una manzana, en la colonia Cuzamil, registró niveles altos.

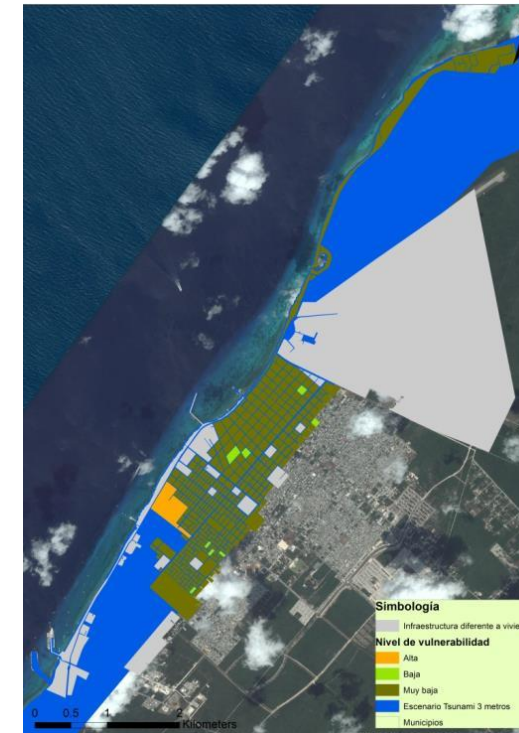


Figura 85. Vulnerabilidad física de la vivienda ante un tsunami de 3 metros en la ciudad de Cozumel.

En la cabecera municipal de Isla Mujeres prácticamente la totalidad de las manzanas resultarían afectadas por un tsunami de 3 metros. Los niveles de vulnerabilidad de la ínsula son en su mayoría Muy bajos, sin embargo existe una zona, al Oriente, en la que la mayoría de las viviendas están construidas de material endeble y por ende su vulnerabilidad es Muy alta (Figura 86).

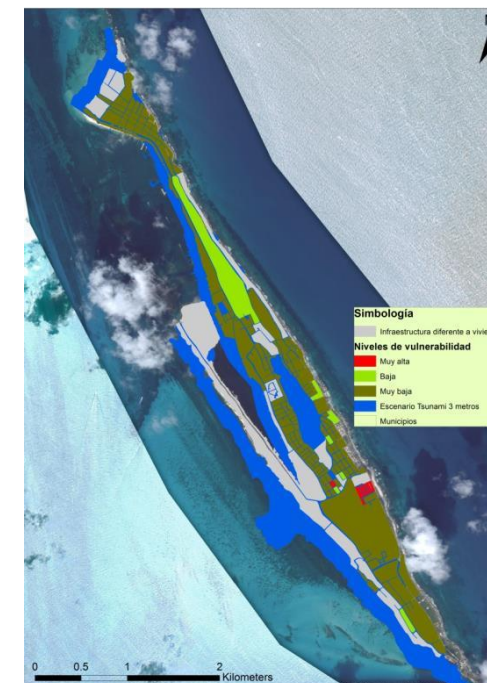


Figura 86. Vulnerabilidad física de la vivienda ante un tsunami de 3 metros en la ciudad de Isla Mujeres.

Playa del Carmen es la demarcación de las que resultarían más afectadas a consecuencia de un tsunami. Con base en los criterios empleados en el presente escenario, todas las manzanas entre la línea de costa y la carretera federal 307 sufrirían algún tipo de afectación (Figura 87). La vulnerabilidad de la mayoría de las manzanas es muy baja, ya que predominó el uso de bloque hueco de concreto en muros y losa de concreto o vigueta y bovedilla en techos.

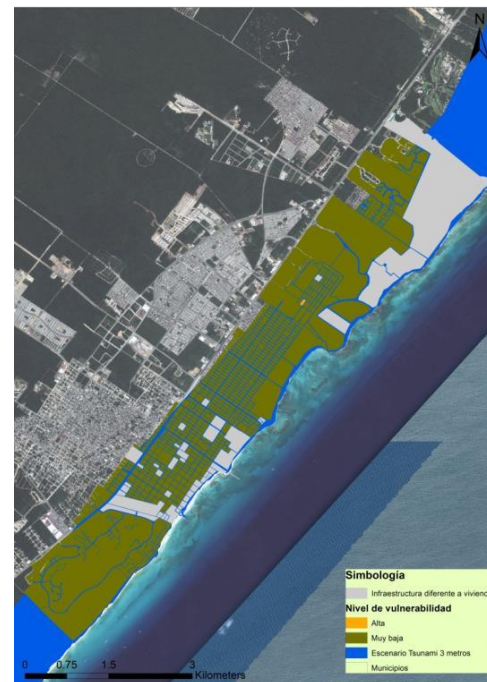


Figura 87. Vulnerabilidad física de la vivienda ante un tsunami de 3 metros en la ciudad de Isla Mujeres.

Por último, en Tulum todas las afectaciones se registrarían en las manzanas adyacentes a la línea de costa, mismas en las que se ubica la mayor proporción de la infraestructura turística de la cabecera municipal. La vulnerabilidad de las manzanas que resultarían afectadas no se calculó puesto que es infraestructura diferente a vivienda.

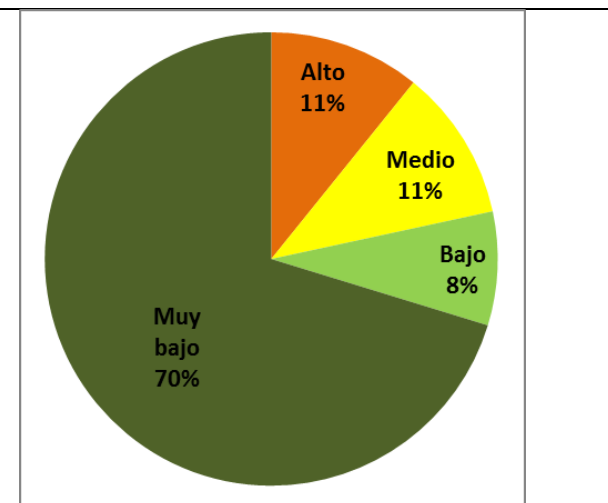
➡ Escenario 7.5 m

Para este escenario el área afectada aumenta considerablemente, el número de localidades que recibirían el impacto del fenómeno son 39. El Norte del estado es en donde se encuentra la mayor proporción, el 70% de las localidades registraron niveles de vulnerabilidad Muy Bajos, 8% Bajos, 11% Medios y 11% Altos. Solidaridad e Isla mujeres son los municipios con más localidades rurales en el área estimada de afectación (Tabla 51 y Gráfica 39).

1. Número de localidades dentro del área estimada de afectación

Municipio	Número de localidades
Benito Juárez	1
Cozumel	3
Felipe Carrillo Puerto	2
Isla Mujeres	10
Lázaro Cárdenas	1
Othón P. Blanco	6
Solidaridad	11
Tulum	5
Total	39

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 39. Porcentaje de localidades según nivel de vulnerabilidad

Las localidades con mayores niveles de vulnerabilidad ante un tsunami con olas de 7.5 metros de altura son La Divina Esperanza, Xcalak y El Makulí en Othón P. Blanco, Javier Rojo Gómez (Punta Allen) en Tulum, Palmar Primero en Cozumel y Punta Herrero en Felipe Carrillo Puerto (Tabla 52 y Figura 88).

Tabla 52. Nivel de vulnerabilidad de las localidades ubicadas dentro del área de afectación de un tsunami de 3 metros

Municipio	Localidades	Población total	Viviendas habitadas	Nivel de vulnerabilidad
Benito Juárez	Lagos del Sol	156	40	Muy baja
Cozumel	Huerto Familiar	104	33	Muy baja
	Palmar Primero	13	5	Alta
	Isla de la Pasión	13	1	Baja
Felipe Carrillo Puerto	José María Pino Suárez	45	13	Muy baja
	Punta Herrero	61	21	Alta
Isla Mujeres	Mira Playa	15	6	Muy baja
	Cayo Sucio	19	4	Media
	Esénica	19	5	Muy baja
	Punta Sam	81	30	Muy baja
	Jesús Alberto López Camino	11	4	Muy baja
	Playa Azul	13	5	Muy baja
	El Meco	14	5	Muy baja
	Casa Tangara	11	2	Muy baja
	Boca Iglesia	57	23	Media
Residencial Arrecifes	20	5	Muy baja	
Lázaro Cárdenas	Holbox	1486	417	Muy baja
Othón P. Blanco	San Carlos	13	1	Muy baja

	Subteniente López	1915	519	Muy baja
	La Divina Esperanza	16	5	Muy alta
	El Makulí	30	5	Muy alta
	Huay-Pix	1649	411	Muy baja
	Xcalak	375	107	Alta
Solidaridad	Paa Mul	29	13	Media
	Paraíso	21	5	Muy baja
	Puerto Chile	12	1	Muy baja
	Punta Maroma	58	24	Muy baja
	Santa Rosa	12	1	Muy baja
	Xpu Ha	36	12	Muy baja
	Playa del Secreto	28	11	Muy baja
	Santa Teresita	15	6	Baja
	San José	62	19	Muy baja
	San Antonio	15	4	Muy baja
Tulum	San Mateo	20	5	Media
	Akumal Sur	37	12	Muy baja
	Javier Rojo Gómez (Punta Allen)	469	136	Alta
	Akumal	1310	370	Muy baja
	Ciudad Chemuyil	1377	336	Muy baja
	Chan Chemuyil	57	23	Baja

Fuente: Elaboración propia.



Figura 89. Vulnerabilidad física de la vivienda ante un tsunami de 7.5 m en la ciudad de Cancún.



Figura 88. Vulnerabilidad física de la vivienda ante un tsunami de 3 metros en localidades rurales de Q. Roo.

En lo que se refiere a las ciudades, las áreas afectadas se ampliaron considerablemente. En Cancún, la mayoría de las manzanas registraron niveles muy bajos de vulnerabilidad, sin embargo al Norte se observan algunas zonas con vulnerabilidad Alta y Muy Alta, pertenecientes a la Colonia El Betel y la Región 237 (Figura 89).

En Chetumal también se observa un incremento importante en el área afectada, aunque únicamente dos manzanas registraron niveles de vulnerabilidad Altos. En prácticamente todas las colonias cercanas al Boulevard Bahía habría algún tipo de afectación, y a pesar de que en la mayoría de las manzanas predominó el uso de bloque hueco de concreto en muros y losa de concreto o vigueta y bovedilla en techos, en caso de un tsunami con olas de 7.5 metros, probablemente los daños estructurales en la infraestructura ubicada en la primera línea frente a la costa serían considerables (Figura 90).



Figura 90. Vulnerabilidad física de la vivienda ante un tsunami de 7.5 m en la ciudad de Chetumal.

La ciudad de Cozumel, al encontrarse ubicada en una isla, registra una exposición alta ante cualquier evento relacionado con el incremento en el nivel del mar. La vulnerabilidad de la ciudad en las manzanas que resultarían afectadas es muy baja en la mayoría (Figura 91).



Figura 91. Vulnerabilidad física de la vivienda ante un tsunami de 7.5 m en la ciudad de Cozumel.

En Isla Mujeres la situación no cambia mucho con respecto al escenario de 3 metros, sin embargo, los tirantes de agua seguramente serían más elevados y el grado de destrucción mayor, sobre todo en aquellas manzanas cuya vulnerabilidad es muy alta (Figura 92).

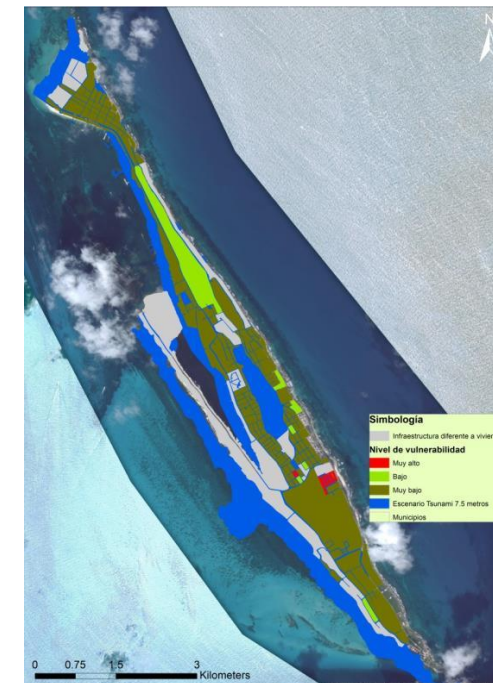


Figura 92. Vulnerabilidad física de la vivienda ante un tsunami de 7.5 m en la ciudad de Isla Mujeres.

Playa del Carmen es otra de las ciudades en donde el impacto de un tsunami con olas de 7.5 metros ocasionaría severas afectaciones. A pesar de que en la mayoría de las manzanas predominó el uso de materiales resistentes en la construcción de viviendas, la zona de afectación se extiende cerca de 3 kilómetros desde la línea de costa, lo que derivaría en daños significativos no solo en las casas de la población, sino en gran parte de la infraestructura turística y de servicios (Figura 93).

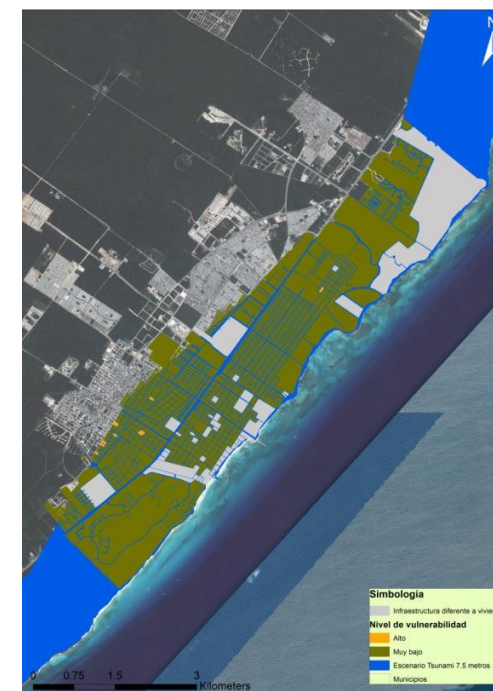


Figura 93. Vulnerabilidad física de la vivienda ante un tsunami de 7.5 m en la ciudad de Playa del Carmen.

En Tulum el impacto se registra en la zona en la que se concentra la infraestructura turística de la ciudad, lo que probablemente generaría un impacto económico importante para el municipio. A pesar de que actualmente no se observa la construcción de viviendas en la región afectada, es probable que en el futuro pueda crecer hacia esa zona (Figura 94).



Figura 94. Vulnerabilidad física de la vivienda ante un tsunami de 7.5 m en la ciudad de Tulum.

3.3.5 Resultados

3.3.6 Conclusiones

- El estado de Quintana Roo se ubica en la plataforma de Yucatán, la cual es muy estable desde el punto de vista tectónico, sin embargo, el límite entre las placas tectónicas de Norteamérica y la del Caribe está relativamente cerca. Si bien, dicho límite es de tipo transformante, es decir, que las placas se deslizan lateralmente sin saltos verticales importantes, es necesario tomar en cuenta la posibilidad de la ocurrencia de sismos generadores de tsunamis. Históricamente, estos eventos no están registrados y las evidencias geológicas son inexistentes en el límite transformante.
- El límite oriental de la placa del Caribe es una zona de subducción responsable del origen de las islas volcánicas de arco de las Antillas Menores, desde las Islas Vírgenes hasta la costa de Venezuela. En esta zona existen evidencias que indican la generación de tsunamis por deslizamiento de masas, y por actividad tectónica y volcánica. Los efectos de estos eventos se han registrado en diferentes países caribeños; en algunas ocasiones, con repercusiones casi imperceptibles para la población en Quintana Roo.
- El posible deslizamiento lateral del volcán Cumbre Vieja, en las Islas Canarias, podría producir un tsunami que llegaría a costas de Quintana Roo con olas de alturas cercanas a 2 metros, después de 10 horas de ocurrido el colapso.
- Un tsunami sintético generado frente a las costas de Lisboa, por un sismo de magnitud 8.9, tendría presencia en las costas quintanarroenses después de 10 horas, con olas de altura máxima de 0.4 m. Las Antillas forman una barrera que protege las costas mexicanas ante un evento de este tipo originado en la región del atlántico europeo. Según

otra metodología, las cotas de inundación para el Estado de Quintana Roo serían de 2.925 m, 7.485 m y 33.137 m, para magnitudes de sismos de 8, 8.5 y 9 grados Richter respectivamente.

- Para tsunamis originados en la región caribeña se han modelado diferentes sismos. Para un sismo de magnitud 8.7 en las costas de Venezuela, las olas llegarían a costas de Quintana Roo en un lapso de aproximadamente tres horas, con una altura cercana a 0.4 m en la costa de la ciudad Playa del Carmen. Después de aproximadamente 4.5 horas, la altura de las olas se incrementaría a más de 0.5 m en esa misma localidad. Otras localidades, como Cancún y Punta Allen recibirían olas de alturas inferiores a 0.3 m, mientras que en Chetumal la altura alcanzaría menos de 0.1 m después de siete horas.
- A partir de un sismo de magnitud 8, originado en las costas de Honduras, el modelo de tsunami sintético muestra que el efecto de un evento de este tipo llegaría aproximadamente en 30 minutos a costas de Quintana Roo, afectando particularmente a la zona del Banco Chinchorro y Playa del Carmen. En Banco Chinchorro el arribo de olas sería en menos de media hora con alturas máximas de 2 m. En Playa del Carmen la altura no rebasaría 1 m.
- De acuerdo con la información anteriormente descrita, se pueden presentar efectos por tsunami en varios escenarios. El primero, para un evento lejano originado por deslizamiento de una enorme masa de roca, en las islas Canarias, que invadiría las costas de Q. Roo con olas de hasta 2 m de altura máxima después de 10 horas. El segundo, para tsunamis regionales producto de sismos, originados en la zona de subducción de la placa Caribe, con una magnitud de 8.7 en Venezuela, que produciría olas de altura máxima de 0.5 m en Playa del Carmen después de 4.5 horas. El tercero, para tsunamis locales originados en la costa de Honduras por un sismo de magnitud 8, que generaría olas de altura máxima aproximada de 2 m en un tiempo menor a los 30 minutos.
- La altura máxima de las olas producidas por los tsunamis lejanos y locales es similar (2 m); sin embargo, el tiempo para reaccionar y poner a la población a salvo es muy corto, 20 minutos aproximadamente, en el caso de un tsunami local.

3.3.7 Medidas de mitigación y prevención

Las medidas de mitigación y prevención que deberán tomarse en cuenta son:

- Difundir entre la población la información pertinente y oportuna que permita conocer el riesgo y las medidas a tomar, de acuerdo a la información de CENAPRED con el apoyo de Protección Civil y a las conclusiones de este Atlas.
- Incluir contenidos curriculares sobre gestión de riesgos naturales en las escuelas de nivel básico, medio superior y superior.
- Ajustar planes urbanísticos y ordenamiento territorial considerando el riesgo.
- Construcción de barreras naturales para amortiguar el impacto del tsunami.
- Continuar, mejorar y profundizar los estudios en este tema.

3.3.8 Referencias Bibliográficas

Atlas Nacional De Riesgo Cenapred. <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/index.php/riesgos-geologicos/tsunamis>

BRYANT, E. (2001), *Tsunami, the underrated hazard*, Cambridge University Press, United Kingdom, 320 p.

Carta De Inundación Por Tsunamis De Ecuador (2011), en línea p.3 <http://app.sni.gob.ec/sni->

link/sni/PDOT/SNRG/Metodologia_TSUNAMI_GPR.pdf

Cedillo-Pardo E. Y Grajales-Nishimura J. M. (1997), "Las rocas de impacto del cráter Chicxulub y el límite Cretácico-Terciario en México y áreas vecinas de América del Norte y el Caribe": in Carreño, A.L. y Montellano Ballesteros, M. Extinción masiva del límite Cretácico-Terciario; mitos y realidades.

Cenapred. Farreras S., Dominguez R. Y Gutierrez C. (2014), *Tsunamis*, Serie Fascículos. Versión electrónica. <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/6-FASCCULOTSUNAMIS..PDF>

Dao, M. And Tkalich, P. (2007), "Tsunami propagation modeling - a sensitivity study", en *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol.7, p. 741-754.

González-González R., Ortiz Figueroa M Y Montoya Rodríguez J.M. (2012), Tsunami. Un problema matemáticamente interesante. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones* 2012 19(1): 107-119

Goto, C.; Ogawa, Y., Shuto, N. And Imamura, F. (1997), "Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-Frog Scheme", IUGG/IOC TIME Project Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Manuals and Guide, N° 35, p. 126.

Grajales-Nishimura J. M., Cedillo-Pardo E., Rosales-Dominguez C., Morán-Zenteno D. J., Álvarez W., Claeys P., Ruíz-Morales J., García-Hernández J., Padilla-Ávila P. And Sánchez-Ríos A. (2000), "Chicxulub impact: The origin of reservoir and seal facies in the southeastern Mexico oil fields" en *Geological Society of America*, vol. 28, No. 4, pp307-310.

Harbitz C.B, Glimsdal S., Bazin S., Zamora N., Løvholt F., Bungum H., Smebye H., Gauer P. And Kjekstad. O. (2012). "Tsunami Hazard in the Caribbean: Regional Exposure Derived from Credible Worst Case Scenarios" en *Continental Shelf Research*. Vol 38 p 1-23.

Kanamori, H. (1977), "The Energy Release in Great Earthquakes", en *Journal of Geophysical Research*, Vol.82, N°20, p. 2981-2987.

Kanamori, H. (2006), "Lessons from the 2004 Sumatra-Andaman earthquake", *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. 364, p.1927-1945.

Lagos M. (2012), "Zonificación del riesgo de tsunami en el centro-sur de Chile", en *Revista de Geografía Norte Grande*, núm. 53, pp. 7-21.

Lagos M. Y Cisternas M. (2008), "El nuevo riesgo de tsunami: considerando el peor escenario", en *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, Universidad de Barcelona, vol. XII, núm. 270 (29).

Lander J., Whiteside L. And Lockridge P. (2002), "A Brief History of Tsunamis in the Caribbean Sea", en *Science of Tsunami Hazards*, Volume 20, Number 1, p. 57.

Latter J. H. (1981), "Tsunami of Volcanic Origin: Summary of Causes, with Particular Reference to Krakatoa, 1883, en *Bulletin of Volcanology* (Impact Factor: 2.67). 44(3): p. 467-490.

Martínez-Martínez R. E., Mendoza-Baldwin E. G. Y Silva-Casarín R. (2014), "Peligro de Inundación por Fenómenos Marinos Extremos en el Litoral Mexicano", XXIII Congreso Nacional de Hidráulica.

Mc CAFFREY, R. (2007), "The next great earthquake", en *Science*, vol.315, p.1675-1676.

Ortiz-Figueroa M. (2011), "Peligro por Tsunamis en México", Seminario Internacional. CICESE.

Pindell, J. And Kennan, L., 2010. Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update. In James, K. H., Lorente, M. A., and Pindell, J. eds., *The Origin and Evolution of the Caribbean Plate: Geological Society of London Special Publication 328*, 1-56.

Real Academia De La Lengua Española. Diccionario en línea <http://www.rae.es/>

Secretaría De Marina Armada De México. Historia de los tsunamis locales ocurridos en México. En línea. http://digaohm.semar.gob.mx/CAT/imagenes/CAT/Historia_tsunamis.pdf.

Sugawara, D. And Goto, K. (2012), "Numerical modeling of the 2011 Tohoku-oki tsunami in the offshore and onshore of Sendai Plain, Japan", en *Sedimentary Geology*. Disponible en Internet: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo>.

Ward S. And Day S. (2001), "Cumbre Vieja Volcano -- Potential collapse and tsunami at La Palma, Canary Islands", *The American Geophysical Union*, paper number 2001GL000000. http://observatorio.cicese.mx/tsunami_Links.htm

IV. Fenómenos hidrometeorológicos

4.1 Ciclones tropicales

4.1.1 Definición

Un ciclón tropical es una masa de aire cálida y húmeda con vientos fuertes que giran en forma de espiral alrededor de una zona central. En el hemisferio norte giran en sentido contrario a las manecillas del reloj. Se forman en el mar, cuando la temperatura es superior a los 26 °C.⁶⁴

Durante su desarrollo los ciclones tropicales constan de tres etapas, la primera denominada depresión tropical con velocidad de los vientos menor a 63km/h, segunda etapa es la de tormenta tropical con velocidad de los vientos de 63 a 118 km/h y la tercera etapa la denomina ciclón tropical con velocidades mayores a 118 km/h.

Una de las diferencias principales entre los tres fenómenos tropicales es su organización. La depresión tropical agrupa nubosidad y lluvia pero las bandas espirales no están bien delimitadas. La tormenta tropical es un sistema atmosférico con una mejor estructura, con bandas en forma de espirales convergentes hacia el centro del sistema y el ciclón tropical por su parte es un sistema totalmente organizado en toda la troposfera con bandas en forma de espirales de lluvia bien delimitadas.

En la etapa de ciclón tropical es cuando se generan los efectos destructivos y más peligrosos, como son los vientos fuertes, lluvias torrenciales, inundación de la costa por efecto de la mare de tormenta, pero todo en función de la velocidad que presentes sus vientos y la presión que tenga en el centro, es por eso que en esta etapa se clasifican además en 5 categorías en la denominada escala Saffir-Simpson (Tabla 53).

Por lo anterior se dice entonces que el daño que produce un ciclón tropical se mide por el número de decesos, por la intensidad, por la presión y por las pérdidas económicas que sufre la región que es impactada.

⁶⁴ CENAPRED, Ciclones tropicales 2014.

Tabla 53. Escala Saffir-Simpson.

Escala Saffir - Simpson		
Categoría	Velocidad de los vientos (km/h)	Presión atmosférica en el centro del ciclón tropical (milibares)
Ciclón 1	19 – 153	980
Ciclón 2	154 – 177	979 -965
Ciclón 3	178 – 210	964 – 945
Ciclón 4	211 – 250	944 -920
Ciclón 5	> 251	> 920

4.1.2 Antecedentes

Debido a su ubicación geográfica, el Estado de Quintana Roo ha sufrido en diferentes ocasiones el embate de este tipo de fenómeno natural.

Uno de los ciclones más importantes que ha afectado a esta entidad fue el del 27 de septiembre de 1955, un ciclón que tuvo por nombre “Janet”, y debido a las grandes pérdidas y destrucción que ocasiono, el Estado empezó a prever, visualizar y dar seguimiento a los ciclones. El huracán llevó las aguas de la Bahía cerca de 700 m ciudad adentro con profundidades en el primer cuadro de Chetumal superiores a 1 m.

El 14 de septiembre de 1988 el ciclón “Gilberto” llegó a tocar tierra como un huracán categoría cinco, inundó la parte noreste del país y su consecuencia fueron 202 muertes.

Los ciclones “Emily” y “Wilma” del 2005, alcanzaron categorías intensas, ambas sobre Cancún. “Emily” el 19 julio de 2005; y “Wilma” en octubre que fue categoría cinco, estuvo prácticamente estacionado sobre la ciudad de Cancún lo que ocasionó grandes pérdidas a la ciudad.

Los ciclones tropicales antes mencionados son de los que más han afectado al Estado de Quintana Roo, pero existen otros ciclones que también han causado daños Histórico de ciclones que han afectado al Estado de Quintana Roo).

Tabla 54. Histórico de ciclones que han afectado al estado de Q. Roo. Fuente CONAGUA.

Nombre Ciclón Tropical	Años de Impacto	Categoría de Impacto
Allen	1980	5
Roxanne	1995	3
Dolly	1996	1
Isidoro	2002	2
Ivan	2004	5
Cindy	2005	1
Rita	2005	5
Stan	2005	1

Dean	2007	5
Dolly	2008	2
Ida	2009	2
Karl	2010	3
Paula	2010	2
Richard	2010	2

Cabe mencionar que la temporada de ciclones tropicales para el atlántico corresponde a los meses de Junio a Noviembre, y son exactamente entre esas fechas cuando Quintana Roo ha tenido los ciclones que más han afectado a la entidad, este tipo de fenómenos naturales no tiene una trayectoria fija, por lo cual pueden afectar cualquier área.

Como se ha mencionado, y debido a los antecedentes que han tenido este tipo de fenómenos naturales sobre Quintana Roo, es de gran importancia generar una herramienta que pueda ser utilizada para determinar las zonas de afectación por ciclones tropicales, a nivel estatal y municipal, pues con ella se podrán tomar decisiones que conlleven a las acciones necesarias de prevención.

4.1.3 Peligros asociados

Los principales peligros que presenta un ciclón tropical y que son los que más afecta directamente a las zonas de impacto son los vientos generados y las inundaciones provocadas por la marea de tormenta, sin embargo para poder hablar de peligro es importante conocer la magnitud del evento, y lo más importante la frecuencia y probabilidad de ocurrencia.

4.2 Viento

4.2.1 Introducción

El viento es aire en movimiento, cuando alcanza grandes velocidades puede generar empujes y succiones intensas que son capaces de dañar las estructuras; la presión con la que empuja el viento depende de la velocidad de éste. Las velocidades básicas de viento difieren según la región del país, así como de qué tan expuesta está la zona y la “rugosidad” del terreno (entre árboles, entre edificios altos, en campo libre, en la costa, etc.).

Las mayores velocidades de viento ocurren a causa de ciclones tropicales y, por tanto, las zonas costeras, en particular las que tienen una incidencia más frecuente de ciclones tropicales, son las que están expuestas a un mayor peligro por efecto del viento.

La afectación del viento está en función de la evolución de las categorías de los ciclones tropicales, estos vientos van desde 119 km/hr para ciclón categoría uno, hasta superar los 251 km/hr para ciclón categoría 5.

Otro peligro asociado a los ciclones tropicales en la inundación causada por la marea de tormenta, de la que dependen principalmente los vientos del ciclón tropical, por eso la importancia de obtener un mapa por peligro de vientos de ciclón tropical.

4.2.2 Metodología

Para obtener el mapa de peligro por vientos de ciclones tropicales, se usó el programa “busca ciclones” el cual fue proporcionado por CENAPRED, esto se usó debido a que el peligro de un ciclón tropical se asocia directamente a los vientos que genera.

De igual forma se usó el software ArcGis 10.2 para procesar la información obtenida, así como la plantilla de Excel de nombre “Calculadora para Gauss y Gumbel” con la cual se obtienen periodos de retorno.

En Q. Roo, es un estado propenso a tener problemas en cuanto a fenómenos hidrometeorológicos, de alguno de los tipos antes descritos en el apartado IV, debido a la geomorfología del terreno que en su mayoría es plano y su cercanía con la costa (Golfo de México y Mar Caribe) y recibir los efectos de fenómenos relativamente cercanos, por lo anterior es de suma importancia contar con el registro histórico con el fin de tener una prevención constante al momento en que la región se encuentre amenazada por este tipo de evento meteorológicos, los cuales detonan algún otro tipo de fenómenos ligado a estos eventos como pueden ser precipitaciones intensas, vientos intensos, mareas de tormenta, cambios de temperatura, algunos más, los cuales llegan a afectar la vida cotidiana de los habitantes de esta región. Q. Roo siempre estará sujeta al mandato del clima y la acción del mar y la combinación de estos elementos con el cambio en el paisaje y entorno natural originado por el crecimiento urbano. La acción del viento es uno factor que no ha sido tomado en cuenta dentro dentro de los reglamentos de construcción locales.

Por lo tanto, suponemos que la afectación del viento está en función de la evolución de las categorías de los ciclones tropicales, estos vientos van desde 119 km/hr para ciclón categoría uno, hasta superar los 251 km/hr para ciclón categoría 5.

Otro peligro asociado a los ciclones tropicales en la inundación causada por la marea de tormenta, de la que dependen principalmente los vientos del ciclón tropical, por eso la importancia de obtener un mapa por peligro de vientos de ciclón tropical

Para el análisis de ciclones tropicales, se toma la metodología indicada por CENAPRED que nos indica el método para obtener el mapa de peligro por vientos de ciclones tropicales, se usó el programa "busca ciclones" el cual fue proporcionado por CENAPRED, esto se usó debido a que el peligro de un ciclón tropical se asocia directamente a los vientos que genera, con ello se analizaron las trayectorias de los ciclones (en todas sus categorías) realizando un análisis estadístico simple para conocer su frecuencia y distribución por periodos

Para la depuración y procesamiento de la base de datos se utilizó el programa Excel, de igual forma se usó el software ArcGis 10.2 para procesar la información obtenida, así como la plantilla de Excel de nombre "Calculadora para Gauss y Gumbel" con la cual se obtienen periodos de retorno.

4.2.3 Desarrollo

Lo primero que se hizo fue obtener las trayectorias históricas de los ciclones tropicales para lo cual se utilizó el programa "Busca Ciclones Tropicales", la búsqueda va dirigida a las trayectorias en determinado periodo y para ciertas zonas, por lo que de ninguna manera, se puede decir que con el programa se determina el peligro de un lugar por ciclones tropicales, ya que para eso se hace el cálculo de probabilidad y tiempo de retorno.

Con el "busca ciclones" lo primero que se realizó fue definir el océano a analizar, posteriormente se filtraron los datos de nuestro interés, por periodo (mes, década, intervalo), intensidad (igual a, mayor o igual a, menor o igual a, entre) y/o por nombre, o la mezcla de filtros. Una vez seleccionados los filtros de interés, que son ciclones de categoría 1 hasta ciclones de categoría 5, se obtienen las trayectorias, mismas que tiene la intensidad del ciclón tropical y muestran su comportamiento y evolución durante su trayectoria.

La trayectorias pueden ser exportadas en formato shapefile (.shp), para su análisis en ArcGis 10.2, las trayectorias que se obtuvieron son de los ciclones tropicales históricos que han afectado al atlántico, posteriormente se procedió a obtener las trayectorias que solo han afectado a Quintana Roo, con lo cual a partir de las trayectorias históricas, se creó una interpolación de isolíneas, tomando como punto de referencia las velocidades de los vientos, obteniendo como resultado un mapa de isoyetas de ciclones tropicales.

Con la hoja de Excel "Calculadora para Gauss y Gumbel" se calculó el tiempo de retorno para obtener una afectación, que cumpla con las características de los vientos históricos de ciclones tropicales en Quintana Roo, en dicha hoja de cálculo se usó la media de los datos históricos, así como la desviación estándar.

4.2.4 Peligro

Los vientos de un ciclón tropical 119 km/hr o más, presentan un peligro debido a que sus fuertes vientos pueden destruir o afectar edificios y casas. Los escombros, los letreros, materiales de construcción, moldes y pequeños objetos dejados fuera de las casas se convierten en misiles libres durante los ciclones tropicales. Los vientos por encima de la fuerza de huracán pueden ocurrir bien tierra adentro. El peligro está asociado al periodo de retorno, para el peligro por vientos de ciclón tropical, partiendo de datos históricos, se obtuvieron las siguientes áreas de afectación en un periodo de retorno de 10 años.



Figura 95. Peligro por vientos de ciclones tropicales.

Se puede observar que los vientos más fuertes se han localizado en la parte norte del estado que comprenden los municipios de Cozumel, Benito Juárez, Isla Mujeres y Lázaro Cárdenas y también en la parte sur del Estado, que comprende los municipios de Bacalar y Othón P. Blanco, Bacalar, en donde han existido huracanes con vientos mayores a 296 km/h, mientras que en la parte centro de la entidad, en los municipios Tulum y Solidaridad, los vientos máximos van de 166 a 222 km/h.

De igual manera se puede observar que los municipios de Felipe Carrillo Puerto y José María Morelos tienen una afectación menor respecto a los vientos, esto se debe a que estos dos municipios son los más alejados de la costa.

Haciendo una comparación del mapa de vientos por ciclones tropicales con los mapas de probabilidad de ocurrencia de ciclones tropicales de CENAPRED, los cuales se encuentran en la "guía metodológica para fenómenos hidrometeorológicos", se puede observar que la mayor probabilidad de ocurrencia de ciclones categoría 5 se encuentran en la parte sur y norte del Estado, mientras que las probabilidades de ocurrencia de ciclones tropicales para categoría 4 y 3 la mayor afectación se encuentra en la parte del centro del estado, por lo que el mapa de peligros por vientos, coinciden con los mapas de probabilidad de ocurrencia de ciclones tropicales.

4.2.5 Vulnerabilidad

La alta incidencia de ciclones tropicales en Quintana Roo ha evidenciado la vulnerabilidad física de la vivienda en la entidad. De acuerdo con cifras del Cenapred, más de 43 mil viviendas han resultado afectadas por este tipo de eventos en los últimos 10 años. El monto estimado de daños y pérdidas en materia de vivienda por los ciclones tropicales Emily, Wilma y Dean sumaron 720.9 millones de pesos.⁶⁵

Uno de los principales peligros asociados a la ocurrencia de los ciclones tropicales es el viento, en este sentido, y con base en la tipología de vivienda expuesta en capítulos anteriores y las guías metodológicas del Cenapred, se calculó la vulnerabilidad de cada tipo de vivienda ante fuertes vientos.

Con base en el índice que mide la vulnerabilidad física de la vivienda (I_{vf})⁶⁶, propuesto por el Cenapred, se estimó, para cada combinación de materiales, su susceptibilidad al daño por el fenómeno en cuestión. Para calcularlo se utilizó la siguiente expresión:

$$I_{vf} = \frac{V_i P_i}{V_p P_m}$$

Dónde:

I_{vf} = Representa el índice que mide la vulnerabilidad física

V_i = Representa la calificación según el tipo de vivienda de acuerdo con la tabla**

V_p = Es la vivienda con el peor desempeño en relación a su vulnerabilidad

P_i = Es el nivel de peligro por viento en la zona de estudio⁶⁷

P_m = Es el nivel de peligro máximo por viento⁶⁸

Como se mencionó anteriormente, el uso de adobe en el estado de Q. Roo es prácticamente nulo por lo que los tipos de vivienda 7 y 8 no predominaron en ninguna localidad rural ni en ninguna manzana de las cabeceras municipales. Así, de las 17 combinaciones de materiales que se encontraron en la entidad, se conformó un total de 7 tipologías,

⁶⁵ CENAPRED. Serie "Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México" Número 7 al 13.

⁶⁶ CENAPRED. Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Evaluación de la vulnerabilidad física y social. 2006

⁶⁷ Los valores se definen más adelante

⁶⁸ Idem.

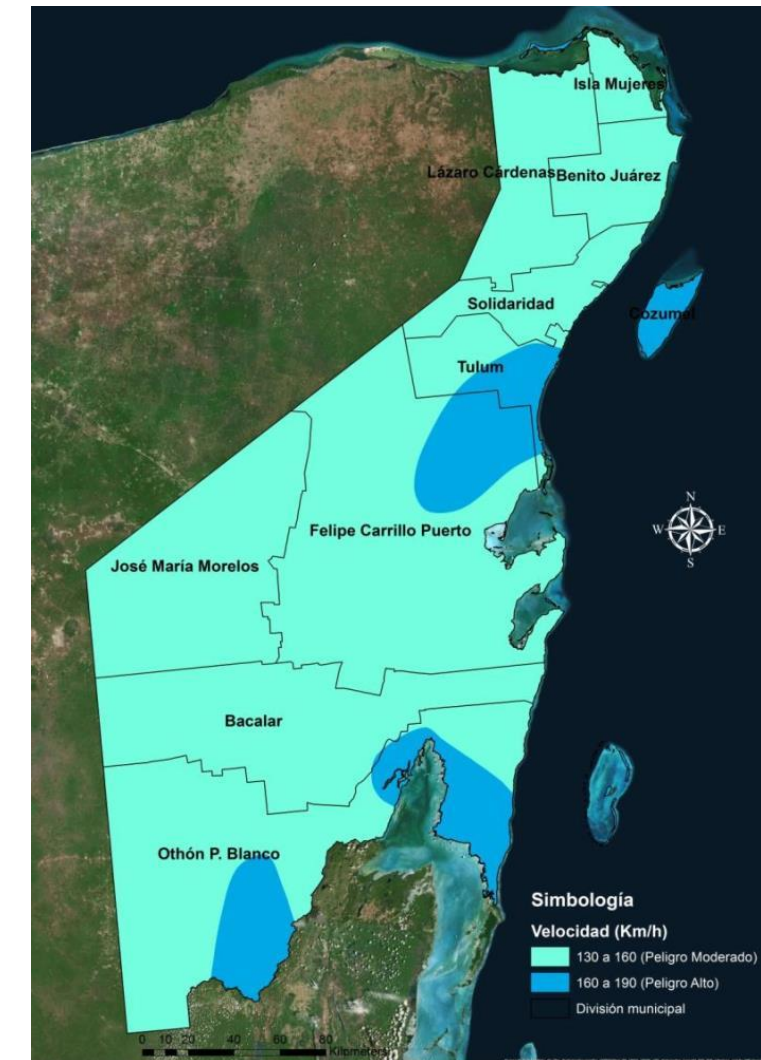
Tabla 55. Combinación de materiales encontrados en el estado de Quintana Roo y tipología asignada.

Combinación	Muros	Techos	Tipología asignada
1	Bahareque	Palma	10
2	Bahareque	Lámina	10
3	Bloque hueco de concreto	Palma	4 Y 2
4	Bloque hueco de concreto	Lámina	4 Y 2
5	Bloque hueco de concreto	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	1 Y 3
6	Concreto colado	Lámina	4
7	Concreto colado	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	3
8	Desecho	Lámina	10
9	Lámina de cartón	Lámina	10
10	Madera	Lámina	9
11	Madera	Palma	9
12	Piedra sobre piedra	Lámina	5
13	Piedra sobre piedra	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	6
14	Piedra sobre piedra	Palma	5
15	PVC relleno de concreto	Lámina	4
16	Simple Piedra sobre piedra	Palma	5
17	Simple Piedra sobre piedra	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	6

Fuente: Elaboración propia

Nota: Para las combinaciones 3, 4 y 5 la tipología asignada depende de si la mampostería está o no deficientemente reforzada.

Con base en lo anterior, a cada tipo de vivienda predominante en el estado le fue asignada una calificación obtenida de la información técnica que establece el Cenapred en su guía metodológica⁶⁹, lo que arrojó la variable V_i . En este sentido, la de peor comportamiento fue el tipo 10, a la cual se le asignó una calificación de 7.6, misma que representó el valor de la variable V_p .



Mapa 11. Zonificación de velocidades máximas de viento en Quintana Roo.

Para obtener P_i , se utilizó la clasificación de peligro por viento con base en la zonificación eólica de la CFE, recurriendo, como sugiere la guía del Cenapred, al periodo de retorno comúnmente utilizado para diseño, que es el de 50 años. Así, en el Estado de Quintana Roo, se presentan únicamente dos zonas de peligro, una de nivel moderado que abarca la mayor proporción del estado y a la cual se le asignó el valor de 145, y otra de peligro alto que incluye, además de algunas regiones continentales, las islas de la entidad cuyo valor asignado fue 175. La variable P_m corresponde al nivel máximo de peligro por viento, que se ha delimitado en 215 (Mapa 11).

Una vez obtenidas todas las variables se procedió a calcular el Índice de vulnerabilidad física para cada tipo de vivienda según la zona de peligro en la que se encontrara, lo que arrojó los resultados que se observan en la **iError! No se encuentra el origen de la referencia..**

⁶⁹ CENAPRED. Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Evaluación de la vulnerabilidad física y social. 2006. P. 317 y 318

Tabla 56. Índice de vulnerabilidad física para cada tipo de vivienda según zona de peligro.

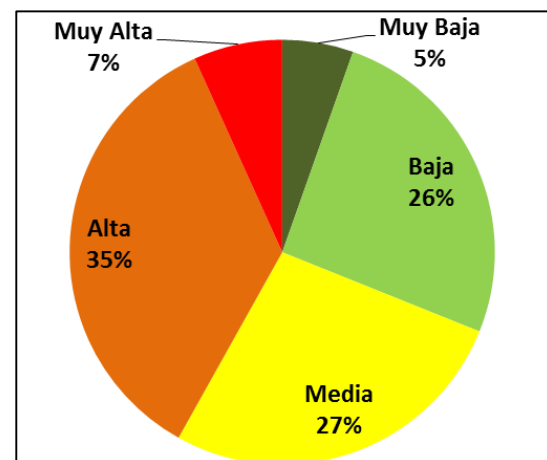
Tipo de vivienda	Calificación de la vivienda para viento (V_i)	Valor de P_i para las zonas con peligro moderado	Valor de P_i para las zonas con peligro alto	Nivel Máximo de peligro (P_m)	Vivienda con el peor desempeño en relación a su vulnerabilidad (V_B)	Índice de vulnerabilidad física para las zonas con peligro moderado (I_{vf})	Índice de vulnerabilidad física para las zonas con peligro alto (I_{vf})
1	1	145	175	215	7.6	0.089	0.107
2	4	145	175	215	7.6	0.355	0.428
3	2	145	175	215	7.6	0.177	0.214
4	4.7	145	175	215	7.6	0.417	0.503
5	6.2	145	175	215	7.6	0.550	0.664
6	2.5	145	175	215	7.6	0.222	0.268
9	5.5	145	175	215	7.6	0.488	0.589
10	7.6	145	175	215	7.6	0.674	0.814

Fuente: Elaboración propia.

Con dichos resultados se prosiguió asignando el valor obtenido a cada una de las manzanas y localidades estudiadas según el tipo de vivienda predominante y su ubicación, lo que dio como resultado los mapas de vulnerabilidad física, mismos que se analizan a continuación por municipio. Cabe señalar, que con el fin de determinar grados de vulnerabilidad física se utilizó el método de intervalos naturales mismo que se basa en la naturaleza de los datos y los agrupa atendiendo a los saltos inherentes a estos, por lo que busca los puntos donde se maximiza esa diferencia y los usa como límites de cada clase o intervalo, a continuación se analizan los municipios.

➔ **Bacalar**

De acuerdo con el análisis realizado, en Bacalar se observó una vulnerabilidad de la vivienda alta en la mayor proporción de localidades rurales (35%).



Gráfica 40. Porcentaje de localidades según niveles de vulnerabilidad física de la vivienda.

Cabe recordar que al sur del Estado, sobre todo en la zona rural, predomina el uso de techos flexibles (lámina principalmente) y de madera en muros, lo que hace más vulnerable a las estructuras ante el fenómeno en cuestión. En el centro del municipio es en donde se observa una mayor concentración de localidades con un índice de vulnerabilidad física de la vivienda alto (Gráfica 40).

Es importante mencionar que todas las localidades del municipio, así como la cabecera municipal, se encuentran en una zona de peligro moderado, lo que ayudó a que no se presentaran niveles más altos de vulnerabilidad física. Sin embargo, las localidades de Valentín Gómez Farías, Gabino Vázquez, Manuel Ávila Camacho y Blanca Flor registraron una

vulnerabilidad física muy alta, en las cuales existen un total de 377 viviendas habitadas por 1,477 personas aproximadamente (Figura 96).

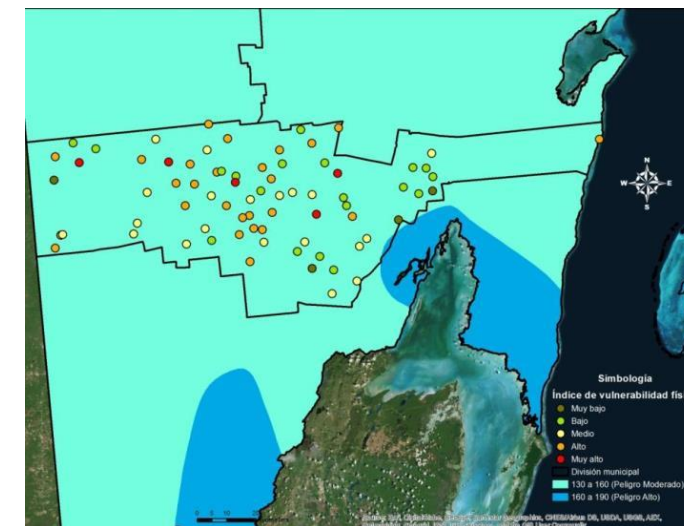


Figura 96. Vulnerabilidad física de la vivienda en las localidades rurales del municipio de Bacalar.

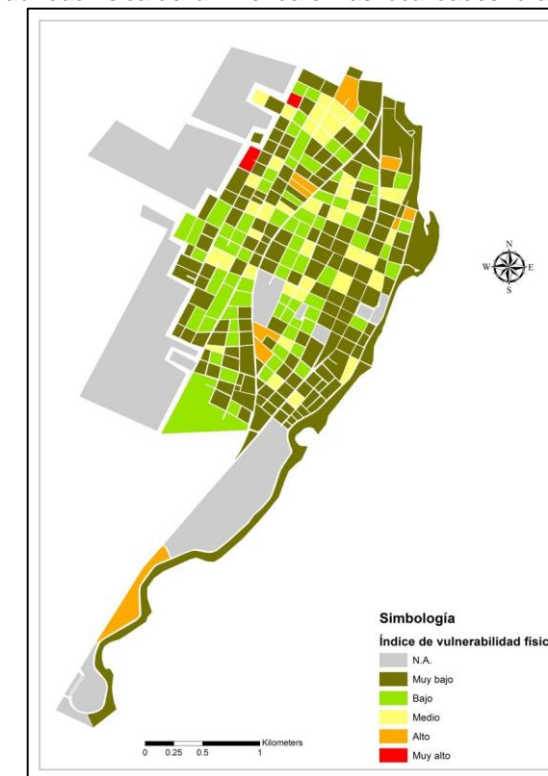
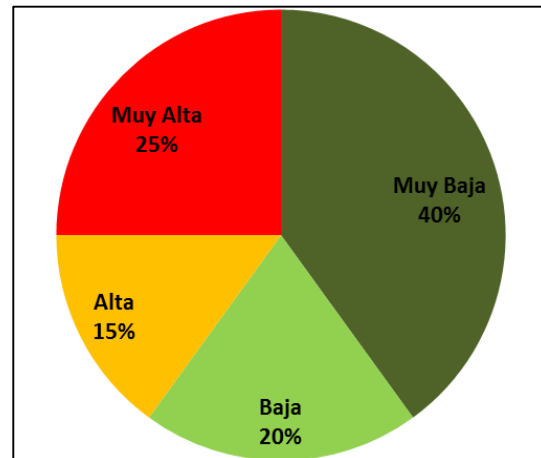


Figura 97. Vulnerabilidad física de la vivienda en la cabecera municipal de Bacalar.

En la cabecera municipal predominaron las manzanas en las cuales la vivienda registra niveles de vulnerabilidad física muy baja. Únicamente al Noroeste de la ciudad se detectaron un par de manzanas con niveles muy altos, específicamente en las colonias Benito Juárez y Luis Donaldo Colosio (Figura 97).

➔ **Benito Juárez**

El municipio de Benito Juárez es el más desarrollado y poblado del estado. La mayoría de sus habitantes se concentran en zonas urbanas, principalmente en la ciudad de Cancún. Las diferencias entre la zona urbana y la rural son muy marcadas, aunque lo anterior no se reflejó tan acentuadamente en el tema de la vivienda, ya que únicamente el 25% de las localidades estudiadas registraron grados muy altos de vulnerabilidad, éstas fueron El Jabalí, Los Coquitos, Emiliano Zapata, Colonia Chiapaneca Siglo XXI y La Primavera. En total, dichas comunidades suman únicamente 106 viviendas habitadas por 361 personas (Gráfica 41).



Gráfica 41. Porcentaje de localidades según niveles de vulnerabilidad física de la vivienda.

Al igual que en el municipio de Bacalar, en Benito Juárez todas las localidades e incluso la ciudad de Cancún se encuentran en una zona de peligro moderado, sin embargo, para estimar la vulnerabilidad únicamente se está tomando en cuenta el periodo de retorno de 50 años, que estima vientos de entre 130 y 160 kilómetros por hora.

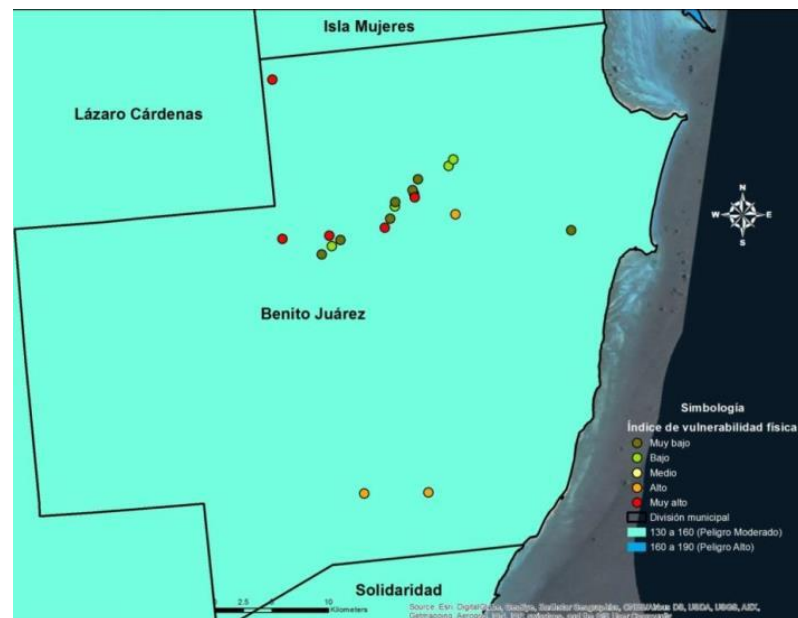


Figura 98. Vulnerabilidad física de la vivienda en las localidades rurales del municipio de Benito Juárez.

En la ciudad de Cancún, fueron pocas las manzanas que registraron una vulnerabilidad física por viento elevada, sólo se observaron algunas manzanas con niveles altos y muy altos en las regiones 235, 236 y 237 al Norte de la ciudad, en la Supermanzana 308 al Sur y en la Supermanzana 106 al Occidente.

El Occidente de la ciudad merece especial atención, pues es justamente hacia esa dirección en la que se está expandiendo la mancha urbana y en la cual se detectaron mayores niveles de vulnerabilidad física de la vivienda.

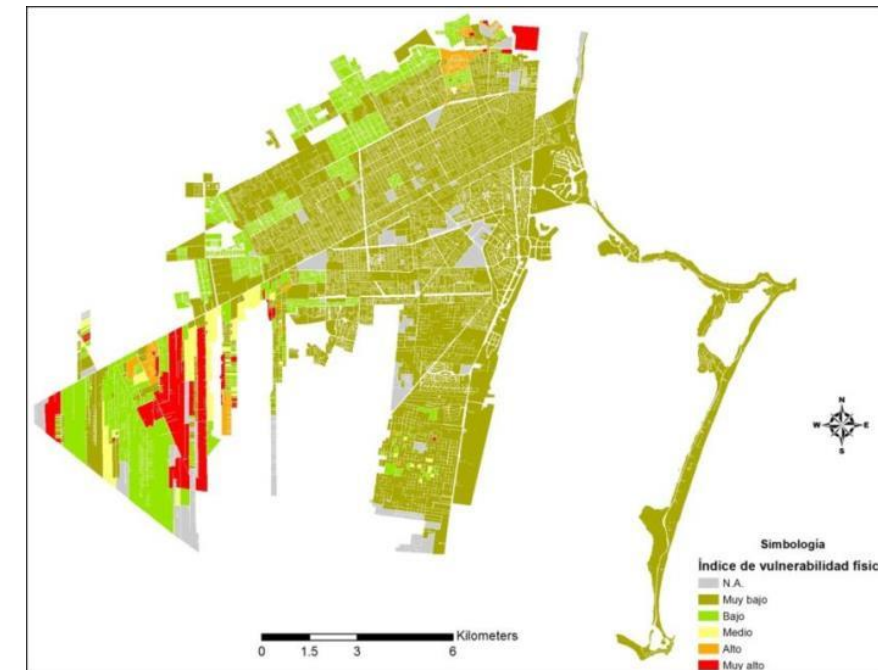
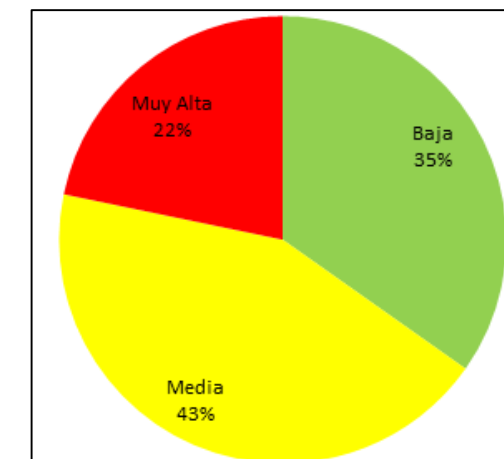


Figura 99. Vulnerabilidad física de la vivienda en la cabecera municipal de Benito Juárez (Cancún).

➡ Cozumel

En la isla de Cozumel se analizaron 23 localidades rurales, de las cuales 35% presentaron niveles de vulnerabilidad bajos, 43% medios y 22% muy alto. Las comunidades que registraron la vulnerabilidad más alta fueron Palmar Primero, La Esperanza, Lindavista, Dos Arbolitos y La Isla de la Pasión.



Gráfica 42. Porcentaje de localidades según niveles de vulnerabilidad física de la vivienda.

A diferencia de otros municipios, todo el territorio de Cozumel se encuentra en zona de peligro alto, lo que incidió claramente en los niveles de vulnerabilidad, ya que prácticamente todas las localidades en las que predominó el uso de techos flexibles aumentaron exponencialmente su vulnerabilidad..

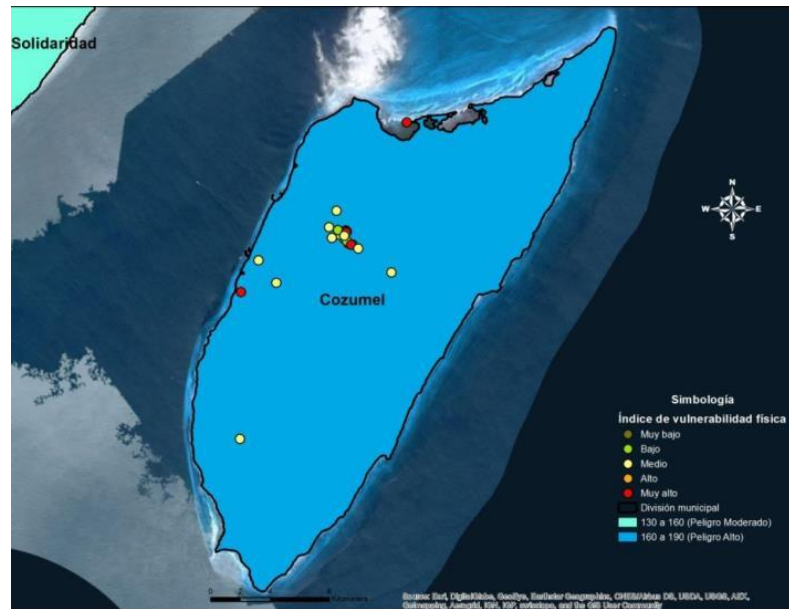


Figura 100. Vulnerabilidad física de la vivienda en las localidades rurales del municipio de Cozumel.

En el ámbito urbano se presentó la misma situación, observándose mayores niveles de vulnerabilidad física de la vivienda en el Norte de la ciudad, particularmente en las colonias 10 de Abril y Emiliano Zapata.

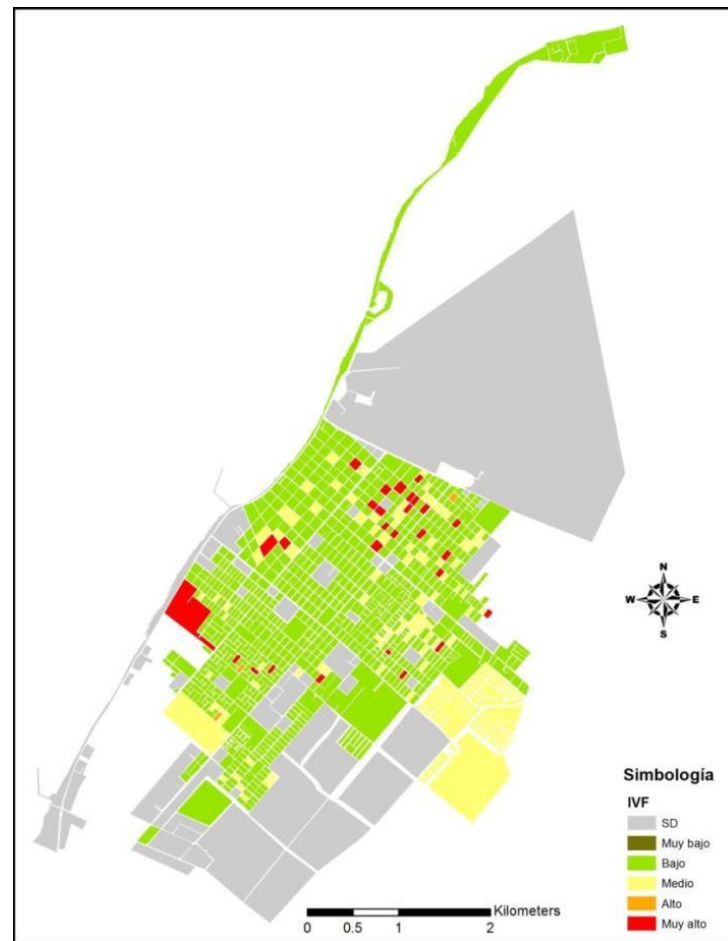
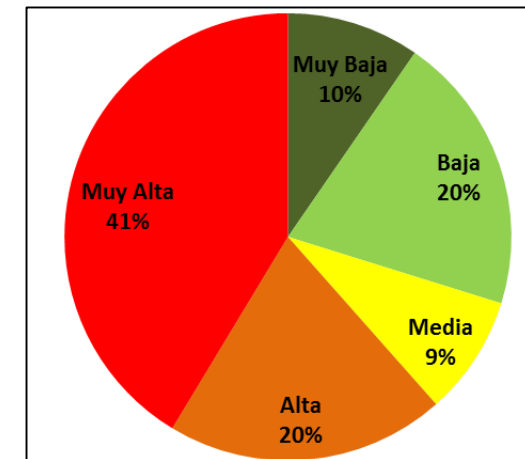


Figura 101. Vulnerabilidad física de la vivienda en la cabecera municipal de Cozumel.

➡ Felipe Carrillo Puerto

El municipio de Felipe Carrillo Puerto es de los más grandes del Estado y en el que existe mayor número de localidades rurales. En este sentido, se calculó la vulnerabilidad física de la vivienda en 104, según el tipo de materiales predominantes en cada una de ellas. Los resultados arrojaron un 41% con niveles muy altos, 20% altos, 9% medios y 30% entre bajos y muy bajos.



Gráfica 43. Porcentaje de localidades según niveles de vulnerabilidad física de la vivienda.

Tanto en el Norte como en el Sur del municipio es en donde se concentraron las localidades con los tipos de vivienda más vulnerables ante viento. Las comunidades de Cecilio Chí y San Antonio Segundo fueron las que registraron los niveles más altos, cabe destacar que estas dos localidades se encuentran justo en la zona del municipio en el que el peligro es considerado alto

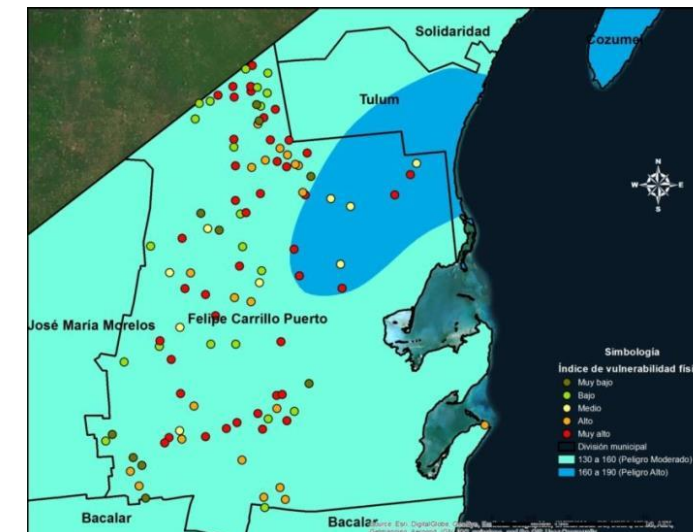


Figura 102. Vulnerabilidad física de la vivienda en las localidades rurales del municipio de Felipe Carrillo Puerto.

A nivel urbano el índice de vulnerabilidad física ante viento arrojó resultados más favorables, pues únicamente en 11 manzanas se registraron niveles muy altos, lo anterior también es resultado de que la ciudad se encuentra en una zona de peligro moderado. La colonia Francisco May es en donde se observó un mayor número de manzanas con predominancia de

viviendas vulnerables al fenómeno en cuestión.

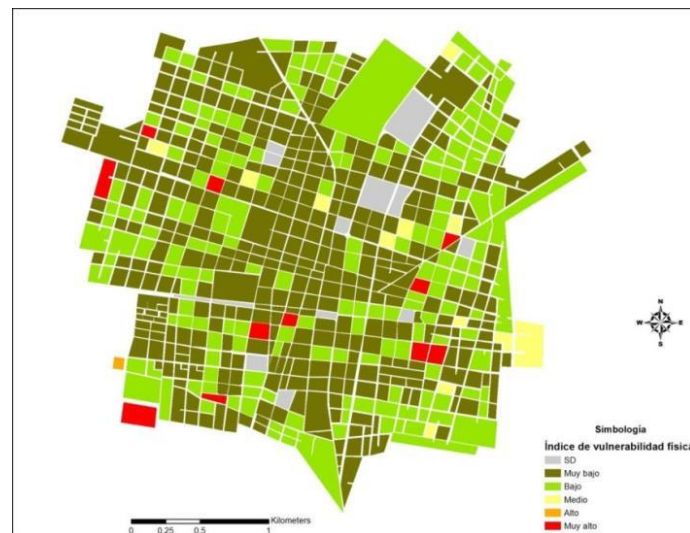
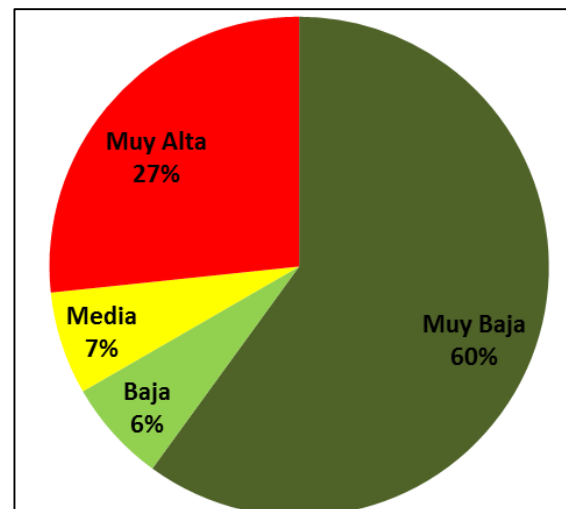


Figura 103. Vulnerabilidad física de la vivienda en la cabecera municipal de Felipe Carrillo Puerto.

➔ Isla Mujeres

El municipio de Isla Mujeres muestra una situación muy particular en torno a los niveles de vulnerabilidad ante viento. Lo anterior es producto de que la cabecera municipal se encuentra en zona insular, mientras que las localidades rurales están ubicadas en la parte continental. Lo anterior coloca a la primera en una zona de peligro por viento alto, lo que incide directamente en el índice de vulnerabilidad física.

En cuanto a las localidades rurales, la mayor proporción mostró niveles de vulnerabilidad muy bajos (60%) y únicamente cuatro (27%) muy altos. Estas fueron Cayo Sucio, Tres de Septiembre, Francisco May y Boca Iglesia.



Gráfica 44. Porcentaje de localidades según niveles de vulnerabilidad física de la vivienda.

En la **iError! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar que la mayoría de las localidades rurales de Isla Mujeres se agrupan en la zona costera que colinda con el municipio de Benito Juárez. En esa región se encuentra Puerto Juárez, que es el principal punto de partida para llegar a la isla y que prácticamente ya ha sido absorbido por la mancha urbana de Cancún, por lo que ese grupo de localidades prácticamente ya forman parte de la ciudad

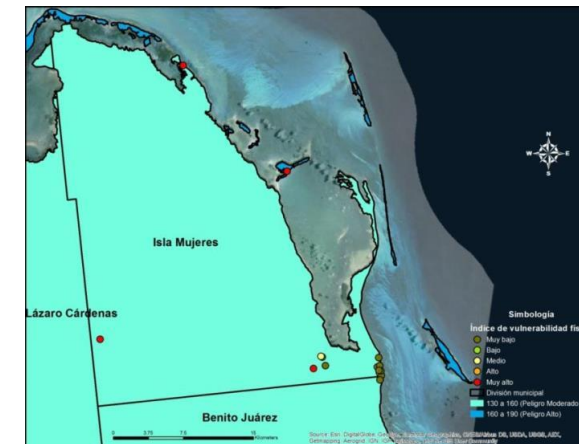


Figura 104. Vulnerabilidad física de la vivienda en las localidades rurales del municipio de Isla Mujeres.

Como ya se mencionó, la cabecera municipal se encuentra en una zona de peligro alto, lo que incidió directamente en los niveles de vulnerabilidad. Las colonias El Cañotal y Ampliación La Gloria fueron las que arrojaron niveles más altos de vulnerabilidad física por viento.

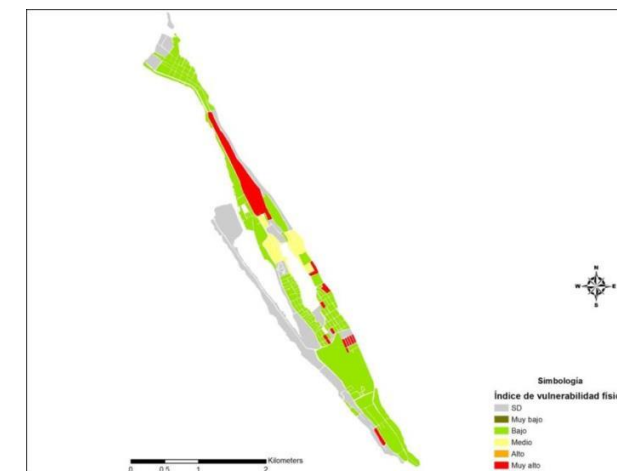
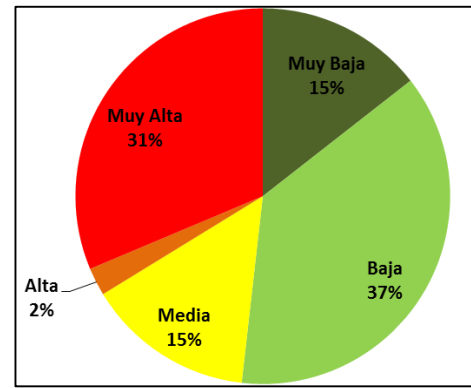


Figura 105. Vulnerabilidad física de la vivienda en la cabecera municipal de Isla Mujeres.

➔ José María Morelos

El municipio de José María Morelos se encuentra ubicado en una zona de peligro moderado, lo que favoreció la situación referente a la vulnerabilidad física de la vivienda. De las 83 localidades rurales analizadas en 15% los niveles de vulnerabilidad fueron muy bajos, en 37% bajos, en 15% medios, únicamente en 2% altos y en 31% muy altos.



Gráfica 45. Porcentaje de localidades según niveles de vulnerabilidad física de la vivienda.

La mayoría de las localidades rurales con niveles muy altos de vulnerabilidad se localizaron de centro y hacia el norte del municipio. Tobxilá, Uitziná, Ayim Dos, Sudzal Chico y Nuevo Plan de la Noria fueron las que presentaron los mayores niveles de vulnerabilidad física ante viento. En las 25 localidades que registraron niveles muy altos de vulnerabilidad existen un total de 1,404 viviendas, mismas que son habitadas por 6,258 personas aproximadamente.

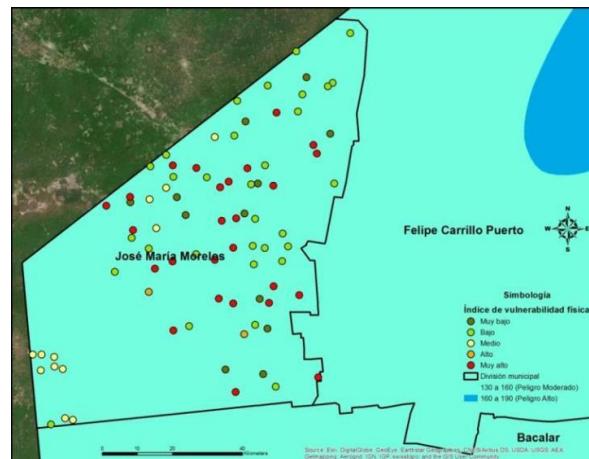


Figura 106. Vulnerabilidad física de la vivienda en las localidades rurales del municipio de José María Morelos

En la cabecera municipal se observó que en una proporción importante de las manzanas analizadas predominó el uso de materiales flexibles en techos, lo que influyó directamente en su grado de vulnerabilidad física ante viento. Las colonias Miraflores y Javier Rojo Gómez son las que presentaron mayores niveles.

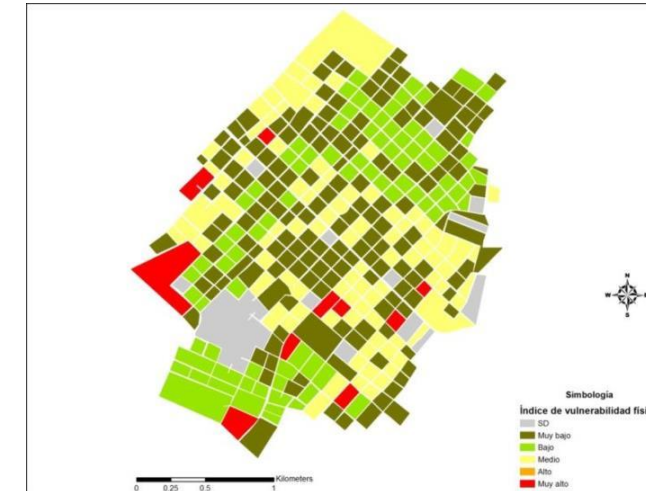
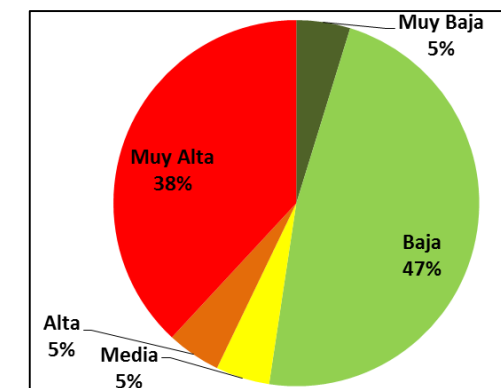


Figura 107. Vulnerabilidad física de la vivienda en la cabecera municipal de José María Morelos.

► **Lázaro Cárdenas**

El municipio de Lázaro Cárdenas también está ubicado, casi en su totalidad, en zona de peligro moderado, con excepción de la localidad de Holbox al Norte. En total se analizaron 42 localidades rurales, de las cuales el 5% presentaron niveles de vulnerabilidad física ante viento muy bajos, 47% bajos, 5% medios, 5% altos y 38% muy altos.



Gráfica 46. Porcentaje de localidades según niveles de vulnerabilidad física de la vivienda.

La mayoría de las localidades con niveles muy altos se encuentran en el Centro y Sur del municipio, siendo las más vulnerables Cedralito Segundo, Delirios, El Pocito, Esperanza y Rancho Talismán. De acuerdo con el análisis realizado, en las localidades con vulnerabilidad física ante viento muy alta existen 673 viviendas habitadas por 1,582 personas aproximadamente.

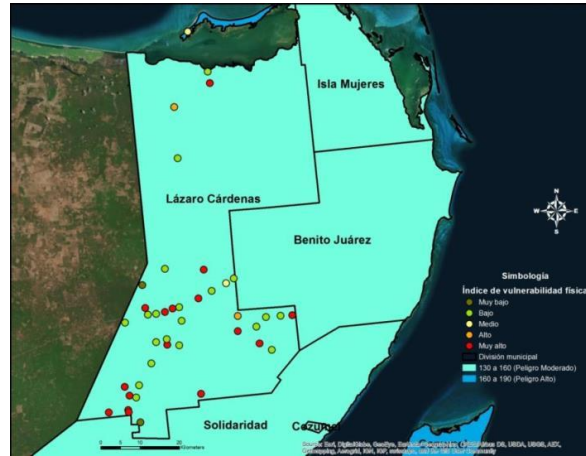


Figura 108. Vulnerabilidad física de la vivienda en las localidades rurales del municipio de Lázaro Cárdenas.

En Kantunilkin, cabecera municipal de Lázaro Cárdenas, únicamente se detectaron seis manzanas con niveles muy altos de vulnerabilidad física ante viento. La colonia Miguel Borge Marín y Xaman Kah fue en donde más presencia de viviendas vulnerables se identificó.

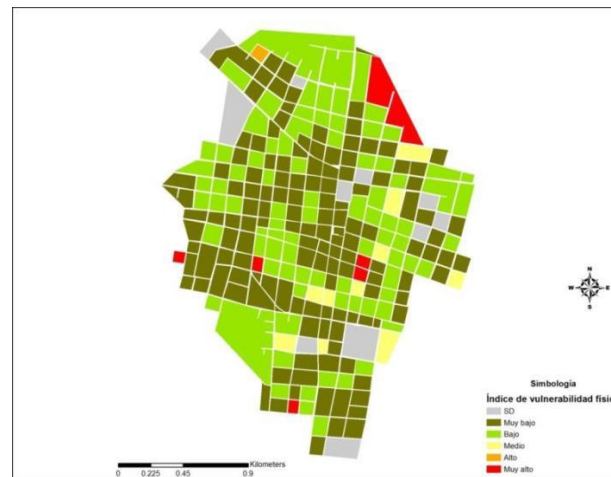
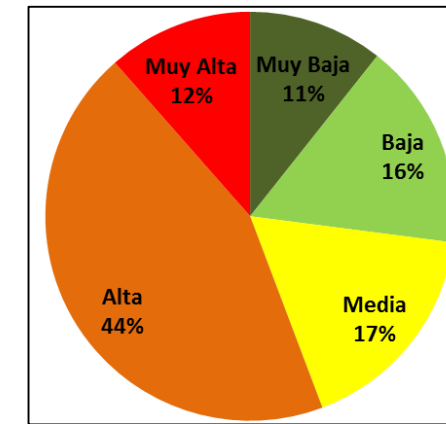


Figura 109. Vulnerabilidad física de la vivienda en la cabecera municipal de Lázaro Cárdenas (Kantunilkin).

➔ **Othón P. Blanco**

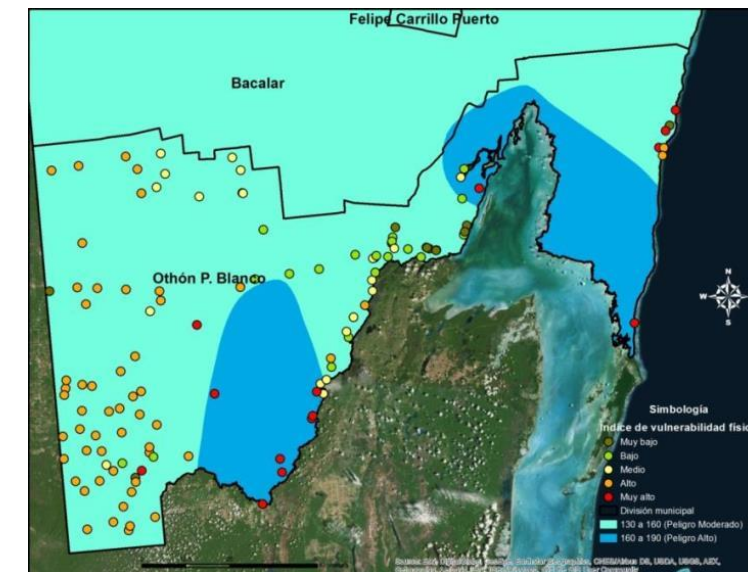
El municipio de Othón P. Blanco es el que mayor número de localidades rurales tiene en el Estado, así mismo, en su territorio se tienen ubicadas zonas de peligro moderado y alto. Lo anterior, combinado con el tipo de materiales predominantes a nivel rural, derivó en que 11% de las localidades registraran niveles muy bajos de vulnerabilidad física ante viento, 16% baja, 17% media, 44% alta y 12% muy alta.



Gráfica 47. Porcentaje de localidades según niveles de vulnerabilidad física de la vivienda.

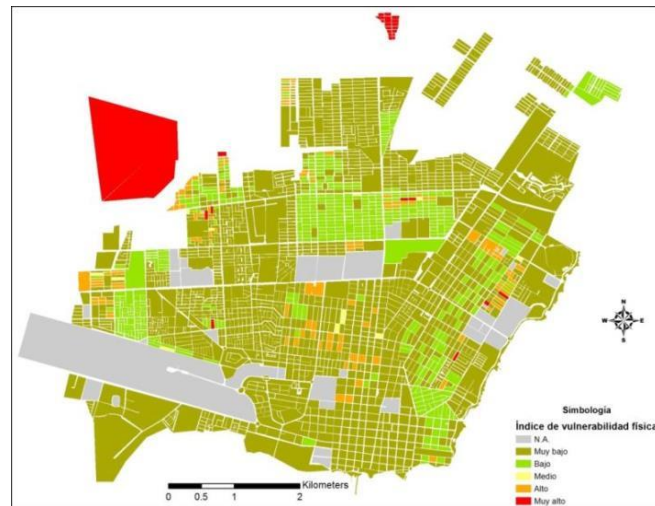
Prácticamente todas las localidades ubicadas al Occidente del municipio registran niveles de vulnerabilidad física alta. Cabe recordar que los materiales predominantes en la región son muros de madera con techos flexibles. La mayor proporción de localidades con niveles muy altos se ubican en la zona de peligro alto, así como en la franja costera al Noreste del municipio..

De las 14 localidades con vulnerabilidad física ante viento muy alta, las que presentaron los mayores niveles fueron Río indio, Santa Rosa, San José de la Montaña, La Divina Esperanza y El Makulí.



Mapa 12. Vulnerabilidad física de la vivienda en las localidades rurales del municipio de Othón P. Blanco.

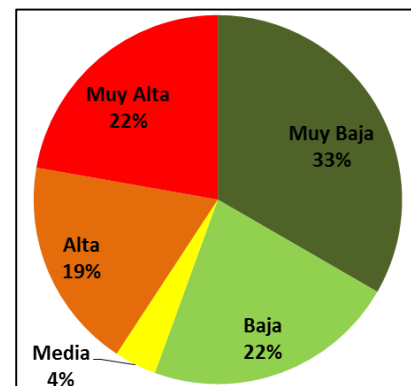
A nivel urbano, en la ciudad de Chetumal predominaron los niveles de marginación bajo y muy bajo, sin embargo, al Norte de la ciudad, particularmente en las colonias Ampliación Nuevo Progreso, Lagunas y en un asentamiento irregular en la zona conocida como La Sabana, se detectó un número importante de viviendas endeblas.



Mapa 13. Vulnerabilidad física de la vivienda en la cabecera municipal de Othón P. Blanco (Chetumal.)

➔ **Solidaridad**

En el municipio de Solidaridad se analizaron 27 localidades, de las cuales 33% registró niveles de vulnerabilidad ante viento muy bajos, 22% bajos, 4% medios, 19% altos y 22% muy altos.



Gráfica 48. Porcentaje de localidades según niveles de vulnerabilidad física de la vivienda.

Las localidades más vulnerables físicamente ante viento se ubicaron al Occidente del municipio, las que presentaron los mayores niveles fueron Santa Rosa, Timas, Punta Laguna, San Pedro, La Santísima y La Ceiba, mismas que agrupan un total de 74 viviendas habitadas por 343 personas.

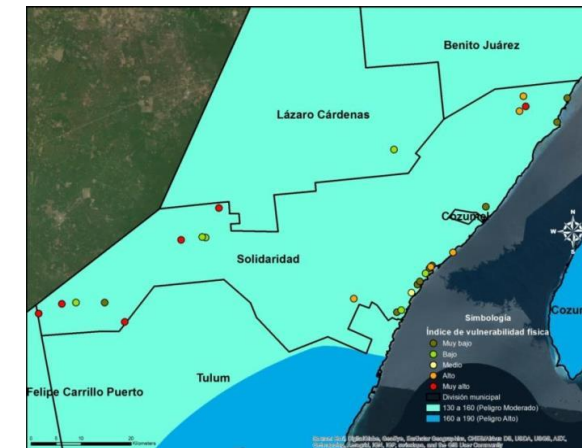


Figura 110. Vulnerabilidad física de la vivienda en las localidades rurales del municipio de Solidaridad.

A nivel urbano, la ciudad de Playa del Carmen registró casi en su totalidad niveles bajos y muy bajos de vulnerabilidad física ante viento, únicamente algunas manzanas al Norte y Occidente de la ciudad registraron una vulnerabilidad alta, particularmente en la colonia Ejidal.

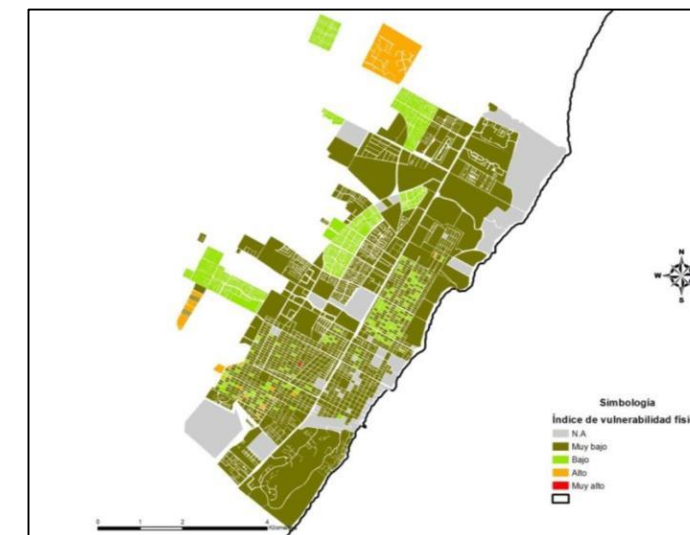
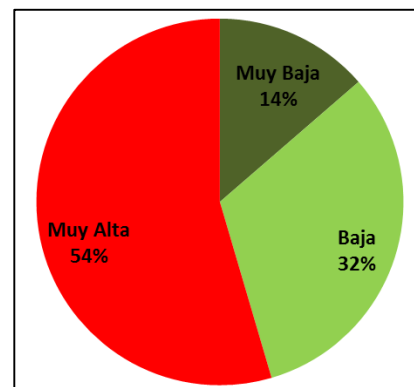


Figura 111. Vulnerabilidad física de la vivienda en la cabecera municipal de Solidaridad (Playa del Carmen).

➔ **Tulum**

Por último, en el municipio de Tulum se observó una brecha bastante amplia entre la vulnerabilidad física de las localidades rurales. O presentan niveles bajos o muy bajos, o por el contrario muestran una vulnerabilidad muy alta.



Gráfica 49. Porcentaje de localidades según niveles de vulnerabilidad física de la vivienda.

Al Occidente del municipio es en donde se ubicaron las localidades con una vulnerabilidad más alta ante viento, aunque también hay una alta presencia en el Oriente, específicamente en la zona en donde el peligro por viento es considerado alto. En las localidades con grados muy altos de vulnerabilidad existen un total de 739 viviendas, mismas que son habitadas por aproximadamente 3,232 personas.

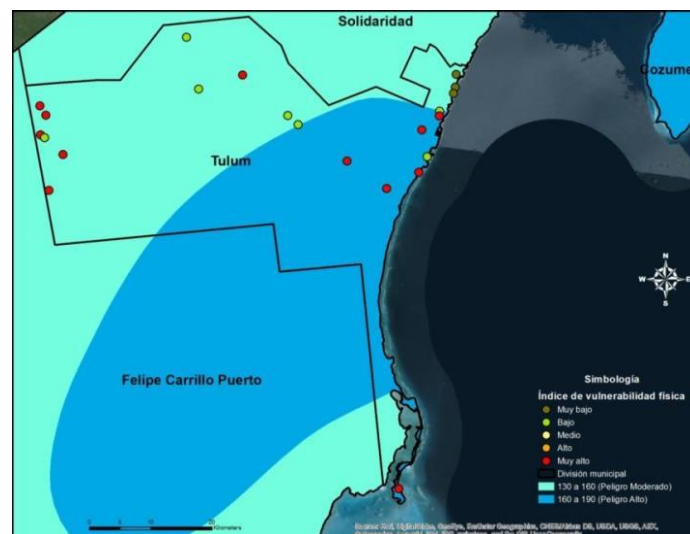


Figura 112. Vulnerabilidad física de la vivienda en las localidades rurales del municipio de Tulum.

A nivel urbano, la ciudad de Tulum es la única cabecera municipal del estado en territorio continental que se ubica en una zona de peligro alto por viento. Lo anterior incidió directamente en la vulnerabilidad física pues una proporción importante de manzanas registró niveles medios. Al Sur de la ciudad, se observa la mayor proporción de manzanas con niveles muy altos.

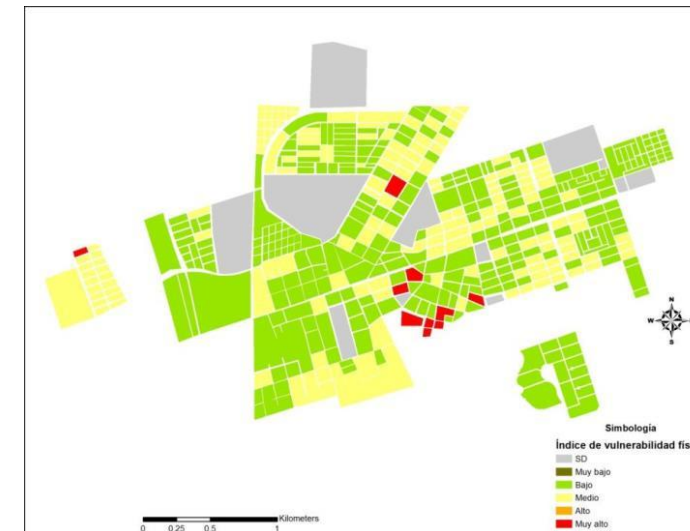


Figura 113. Vulnerabilidad física de la vivienda en la cabecera municipal de Tulum.

4.2.6 Riesgo

El cálculo de riesgo para viento se elaboró con base en el índice de riesgo para estimar la susceptibilidad al daño de la vivienda de bajo costo⁷⁰. Para calcularlo se utilizó la siguiente expresión:

$$I_{RF} = I_{VF} \left(0.8 + \frac{I_{VS}}{25} \right)$$

En donde:

I_{RF} = Índice de riesgo

I_{VF} = Índice de vulnerabilidad física

I_{VS} = Índice de vulnerabilidad social

Cada una de los tipos de vivienda encontradas en la región, en combinación con la vulnerabilidad social calculada para cada manzana, y la tipología de vivienda, permitió obtener el I_{RF} para todos los casos posibles, es decir un valor entre 0 y 1. Cabe señalar que el I_{VF} contiene asociada información sobre el nivel de peligro en el que se encuentra cada manzana o localidad estudiada. En la siguiente tabla se pueden observar los valores del I_{RF} calculados para cada tipo de vivienda según la zona de peligro en la que se ubican y su grado de vulnerabilidad social.

⁷⁰ Cenapred. Guía Básica Para La Elaboración De Atlas Estatales Y Municipales De Peligro Y Riesgo. Estimación De La Vulnerabilidad. 2006. P.P.330

Tabla 57. IRF según tipo de vivienda y zona de peligro

Tipo de vivienda	I_{RF} para peligro moderado y grado de vulnerabilidad social Muy Bajo	I_{RF} para peligro moderado y grado de vulnerabilidad social Bajo	I_{RF} para peligro moderado y grado de vulnerabilidad social Medio	I_{RF} para peligro moderado y grado de vulnerabilidad social Alto	I_{RF} para peligro moderado y grado de vulnerabilidad social Muy Alto	I_{RF} para peligro alto y grado de vulnerabilidad social Muy Bajo	I_{RF} para peligro alto y grado de vulnerabilidad social Bajo	I_{RF} para peligro alto y grado de vulnerabilidad social Medio	I_{RF} para peligro alto y grado de vulnerabilidad social Alto	I_{RF} para peligro alto y grado de vulnerabilidad social Muy Alto
1	0.075	0.078	0.082	0.085	0.089	0.090	0.094	0.099	0.103	0.107
2	0.298	0.312	0.327	0.341	0.355	0.360	0.377	0.394	0.411	0.428
3	0.149	0.156	0.163	0.170	0.177	0.180	0.188	0.197	0.206	0.214
4	0.350	0.367	0.384	0.400	0.417	0.423	0.443	0.463	0.483	0.503
5	0.462	0.484	0.506	0.528	0.550	0.558	0.584	0.611	0.637	0.664
6	0.186	0.195	0.204	0.213	0.222	0.225	0.236	0.246	0.257	0.268
9	0.410	0.429	0.449	0.469	0.488	0.495	0.518	0.542	0.565	0.589
10	0.567	0.593	0.620	0.647	0.674	0.684	0.716	0.749	0.781	0.814

Fuente: Elaboración Propia

Con el fin de que el cálculo del riesgo se ajustara a la expresión que lo define, se optó por incluir la cantidad de viviendas expuestas por cada manzana, quedando la expresión de la siguiente forma:

$$NR = I_{VF} \left(0.8 + \frac{I_{VS}}{25} \right) * TV$$

En donde:

NR= Nivel de riesgo

I_{VF} = Índice de vulnerabilidad física

I_{VS} = Índice de vulnerabilidad social

TV= Total de viviendas

Con base en lo anterior se elaboraron dos mapas para cada cabecera municipal, uno del I_{RF} y otro del nivel de riesgo.

Para su representación cartográfica se utilizaron dos escalas distintas, mismas que se muestran a continuación:

Rangos I_{RF}		Rangos nivel de riesgo	
I_{RF}	Nivel	Valor	Nivel de riesgo
0.00-0.20	Muy bajo	0.00-2.50	Muy bajo
0.20-0.40	Bajo	2.50-5.00	Bajo
0.40-0.60	Medio	5.00-7.50	Medio
0.60-0.80	Alto	10.00-12.50	Alto
0.80-1.00	Muy alto	Más de 12.50	Muy alto

Fuente: Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se realiza un análisis para cada una de las cabeceras municipales.

Bacalar

En la cabecera municipal de Bacalar el I_{RF} se mantuvo en niveles muy bajos y bajos en la mayoría de las manzanas, únicamente al Noroeste de la ciudad se observó una con niveles altos, ubicada en la colonia Luis Donaldo Colosio.



Figura 114. IRF para la ciudad de Bacalar

Al agregar la variable del sistema expuesto, es decir el número de viviendas existentes en cada una de las manzanas, se observa un aumento en los niveles de riesgo, en particular en las colonias Sor Juana Inés de la Cruz y Centro, en las cuales se registraron manzanas con niveles de riesgo muy altos.



Figura 115. Nivel de riesgo por viento para la ciudad de Bacalar

Cancún

En la ciudad de Cancún predominó el uso de materiales resistentes tanto en techos como en muros, sin embargo, en la periferia se observó una mayor presencia de materiales endebles, sobre todo el uso de lámina o guano en los techos. Derivado de lo anterior, al calcular el I_{RF} la mayoría de las manzanas registraron niveles muy bajos.

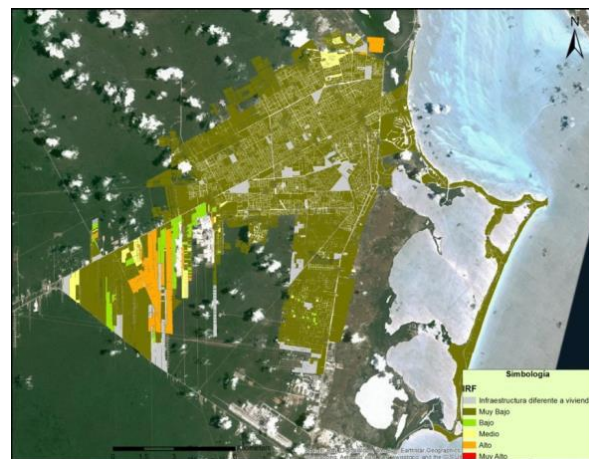


Figura 116. IRF para la ciudad de Cancún

En cuanto al nivel de riesgo, se observa un incremento significativo en comparación con el IRF, lo anterior se debe a la alta concentración de viviendas en algunas manzanas, así como a los mayores niveles de vulnerabilidad social en algunas regiones de la ciudad.

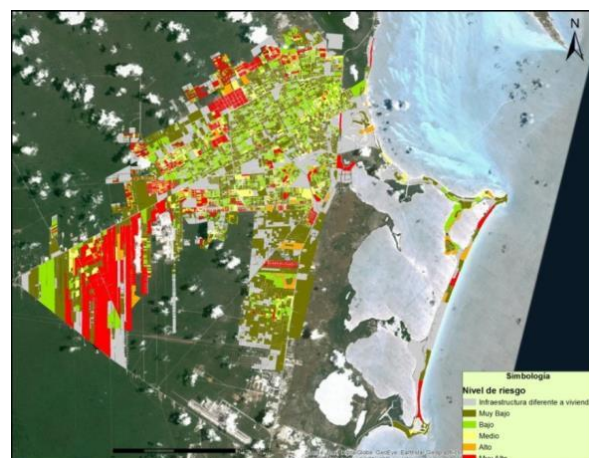


Figura 117. Nivel de riesgo por viento para la ciudad de Cancún

Las colonias con más manzanas con niveles de riesgo muy altos son la Supermanzana 224, 223, la Colonia Héroes y un área significativa de la zona Occidental de la ciudad, en donde se están estableciendo nuevos fraccionamientos que apenas comienzan el proceso de urbanización, por lo que probablemente en el futuro aumente el uso de materiales más resistentes en la construcción de viviendas, lo que se verá reflejado en una disminución en sus niveles de riesgo.

Chetumal

En la capital del estado, al igual que en la mayoría de las cabeceras municipales, predomina el uso de materiales resistentes en la construcción de viviendas, lo que las hace menor vulnerables a los efectos de los fuertes vientos, sin embargo, también hay una presencia importante, por motivos regionales, del uso de madera en muros y de lámina en techos.

Al analizar la información recopilada y elaborar los cálculos del I_{RF} , se observó que únicamente en la periferia de la ciudad, particularmente en la colonia Antorchista, ubicada al Noroeste de la ciudad, en la zona conocida como La Sabana, se registraron niveles Altos. Cabe señalar que dicho asentamiento es irregular y que la mayoría de las viviendas están construidas de materiales endeble. El resto de la ciudad mostró niveles del I_{RF} entre muy bajos y bajos.



Figura 118. IRF para la ciudad de Chetumal

En relación con los niveles de riesgo, se apreció un aumento considerable en algunas colonias, cabe señalar que para algunos de los asentamientos no se contó con la información sobre la cantidad de viviendas existentes en las manzanas, por lo que no se incluyeron en el cálculo.

Las colonias en las que se observaron manzanas con niveles de riesgo Muy altos fueron la Del Bosque, 5 de abril, Lagunas, Kilómetro 5 y Nuevo Progreso.



Figura 119. Nivel de riesgo por viento para la ciudad de Chetumal

Cozumel

La cabecera municipal de Cozumel es una de las dos ciudades que se encuentran dentro de la zona de peligro alto, sin embargo, al calcular el I_{RF} se observó la misma tendencia que en las otras ciudades, en la que predominan los niveles muy bajos y bajos, aunque también se apreció un aumento en el número de manzanas con niveles altos.

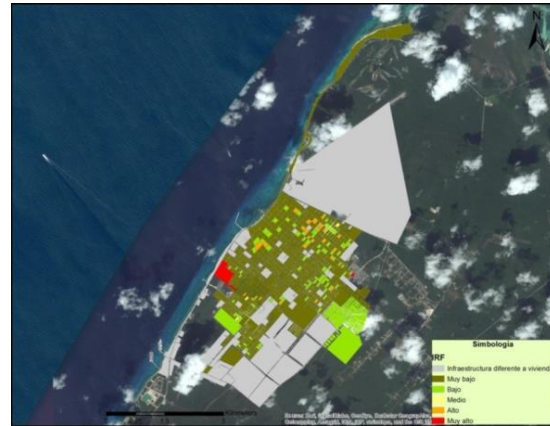


Figura 120. IRF para la ciudad de Cozumel

Para el cálculo del nivel de riesgo, las colonias Andrés Quintana Roo, 10 de abril y Emiliano Zapata fueron las que registraron el mayor número de manzanas con niveles muy altos.

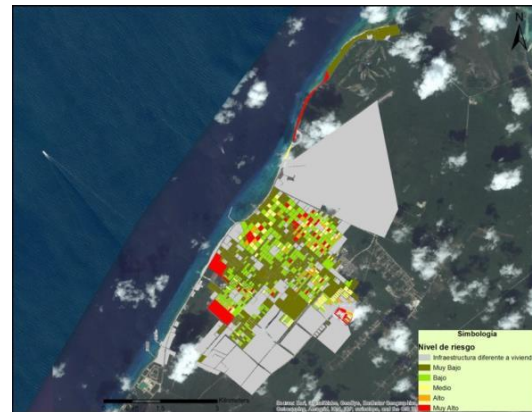


Figura 121. Nivel de riesgo por viento para la ciudad de Cozumel

Felipe Carrillo Puerto

En la cabecera municipal de Felipe Carrillo Puerto hay una mayor presencia de la denominada vivienda tipo maya. Este tipo de construcciones se caracteriza por contar con techos de guano o palma y muros de bahareque, lo que favorece su comportamiento ante fuertes vientos. El I_{RF} arrojó resultados interesantes, puesto que la mayor proporción de las manzanas que conforman la ciudad registró niveles muy bajos, a pesar de que en varias de ellas los niveles de vulnerabilidad social son altos.

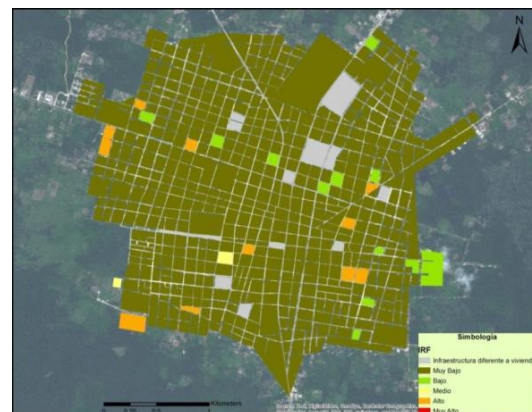


Figura 122. IRF para la ciudad de Felipe Carrillo Puerto

En relación con el nivel de riesgo, en muchas de las manzanas no se contó con información referente a la cantidad de viviendas que existe en ellas, sin embargo, en los recorridos realizados durante el levantamiento de campo, se pudo observar que la densidad de las mismas es significativamente más baja que en ciudades como Cancún, Playa del Carmen y Cozumel. Lo anterior incidió en que se registraran niveles bajos y muy bajos de riesgo en la mayoría de las manzanas, y únicamente en tres de ellas el riesgo se consideró muy alto.

Las colonias en las que se ubican estas manzanas son Francisco May, Leona Vicario y Centro.

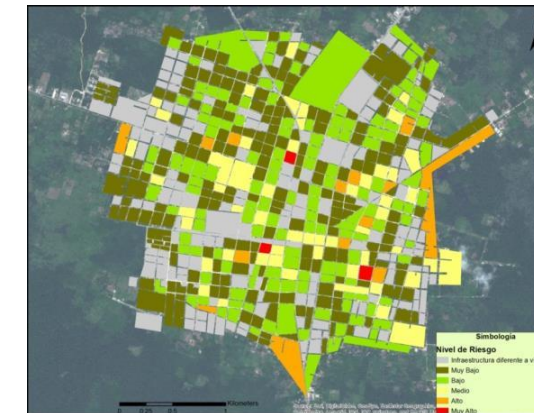


Figura 123. Nivel de riesgo por viento para la ciudad de Felipe Carrillo Puerto

Isla Mujeres

La cabecera de Isla Mujeres es la otra ciudad que se encuentra ubicada en una zona de peligro alto por viento. De acuerdo con los cálculos realizados, el I_{RF} arrojó una mayoría de manzanas con niveles muy bajos, sin embargo se observa un área, del lado Oriental de la isla, en la que se registraron niveles altos.

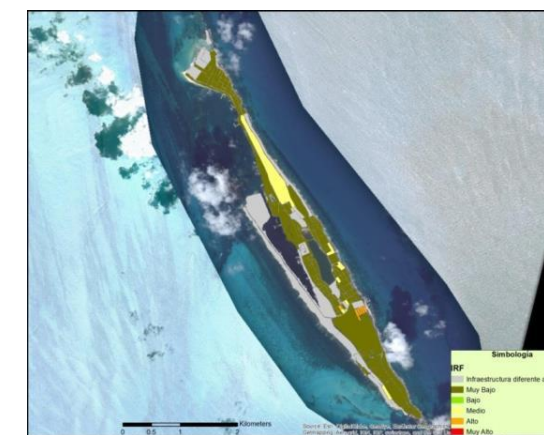


Figura 124. IRF para la ciudad de Isla Mujeres

Cuando se añade la variable del número de viviendas expuestas, se observa un incremento en el número de manzanas con niveles de riesgo muy altos. En el Oriente de la Isla se observa la mayor proporción.

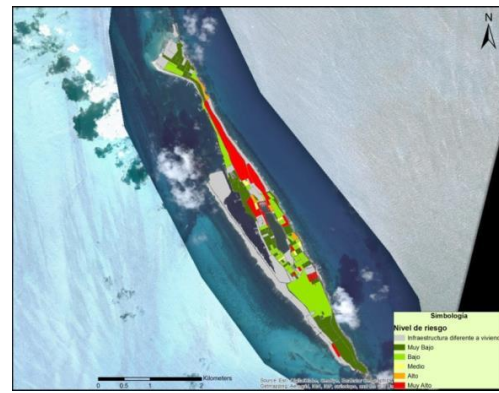


Figura 125. Nivel de riesgo por viento para la ciudad de Isla Mujeres

José María Morelos

Al igual que en Felipe Carrillo Puerto, en la cabecera municipal de José María Morelos también se observó una alta presencia de casas tipo maya. El cálculo del I_{RF} arrojó niveles muy bajos en la mayor proporción de manzanas de la ciudad, únicamente al Sur se observaron algunas manzanas con niveles altos.

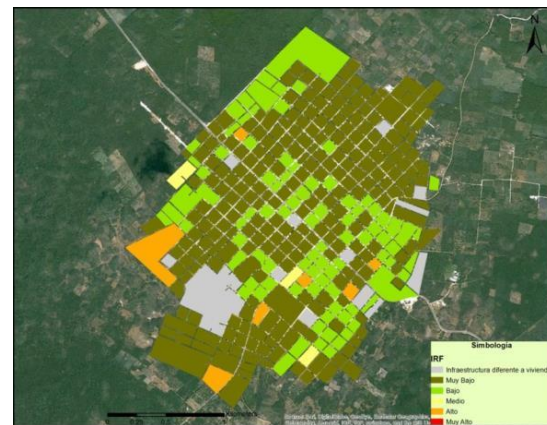


Figura 126. IRF José María Morelos

En José María Morelos también la cantidad de viviendas por manzana no es muy elevada, por lo que esto no incidió demasiado en los niveles de riesgo, puesto que únicamente 6 manzanas registraron niveles de riesgo muy altos, mismas que se ubicaron en la Colonia Madrazo, Miraflores, Centro y José María Morelos.

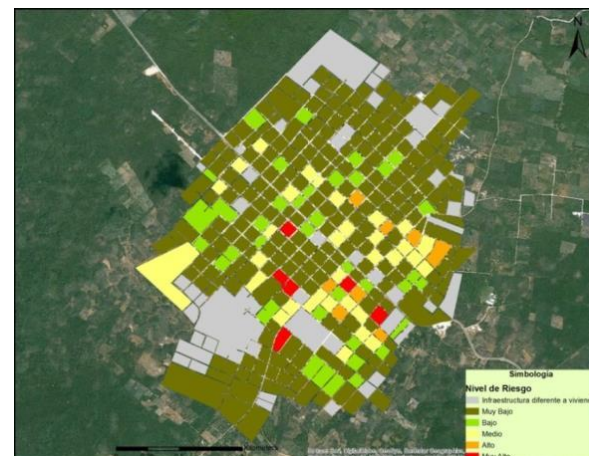


Figura 127. Nivel de riesgo por viento para la ciudad de José María Morelos

Kantunilkin

La ciudad de Kantunilkin, cabecera municipal de Lázaro Cárdenas, registró en la mayoría de las manzanas que la conforman un I_{RF} Muy bajo. Al Norte de la ciudad se observaron algunas zonas con niveles altos, pero la cantidad de viviendas en esa zona es relativamente baja.

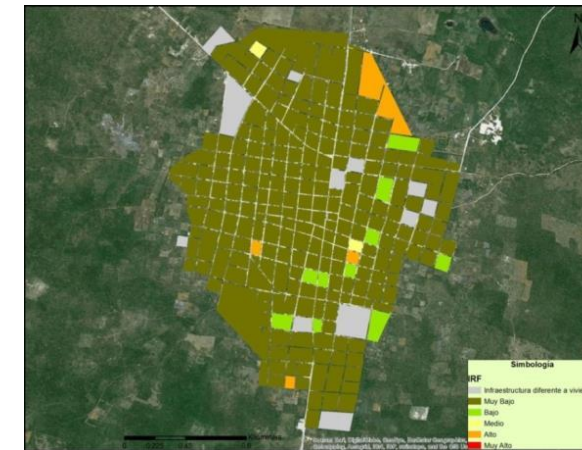


Figura 128. IRF para la ciudad de Kantunilkin

De hecho, la ciudad de Kantunilkin es la que presenta la menor cantidad de viviendas por manzana, lo que incidió positivamente en los niveles de riesgo, ya que en todas sus manzanas se observaron niveles bajos y muy bajos de riesgo.

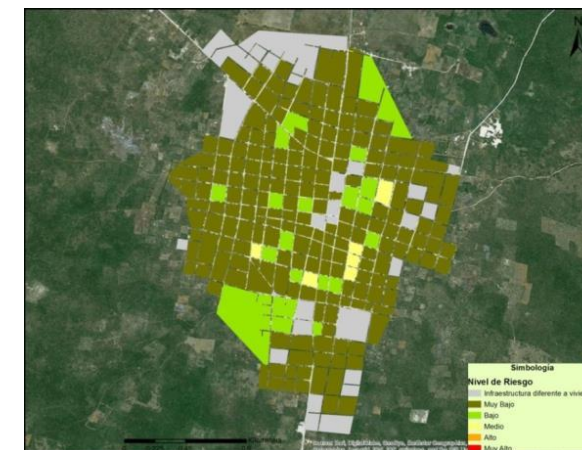


Figura 129. Nivel de riesgo ante viento para la ciudad de Kantunilkin

Playa del Carmen

Playa del Carmen es la ciudad del estado que mayor crecimiento ha registrado en los últimos años, lo que ha derivado en el uso de materiales más resistentes en la construcción de viviendas y en la aplicación de los reglamentos de construcción municipales.

Si bien la utilización de materiales de la región es común, en general se emplean con fines decorativos, sobre todo en restaurantes, hoteles y negocios dedicados a los servicios turísticos. Desafortunadamente no se realizó el análisis de este tipo

de estructuras, que en algunos casos podrían resultar afectadas por el fenómeno en cuestión.

En lo que se refiere al I_{RF} prácticamente toda la ciudad registra niveles muy bajos, aunque en la periferia se observan algunas zonas con niveles medios. En comparación con las otras cabeceras municipales, Playa del Carmen fue la que presentó los índices de riesgo más bajos.



Figura 130. IRF de la ciudad de Playa del Carmen

La situación cambia radicalmente en el mapa de niveles de riesgo. Derivado de la alta concentración de viviendas en las diferentes manzanas de la ciudad y a su vulnerabilidad social, se pueden observar diversas zonas con niveles de riesgo muy alto. Destacan las colonias Playacar, Mundo Habitat, la Ejidal y Nicté-Ha.

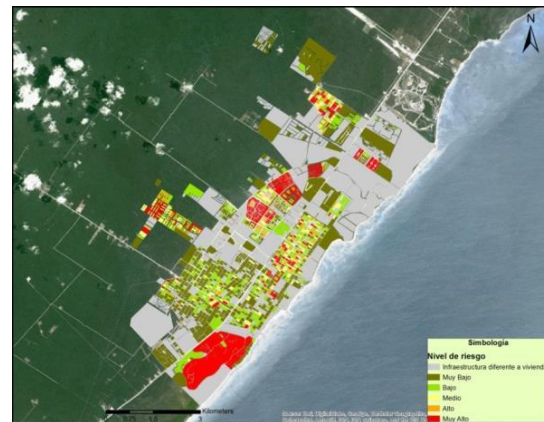


Figura 131. Nivel de riesgo ante viento para la ciudad de Playa del Carmen

Tulum

Por último, la ciudad de Tulum también registró en la mayor parte de las manzanas que la conforman un I_{RF} muy bajo, sólo en la zona Centro se observan un par de manzanas con niveles altos.



Figura 132. IRF para la ciudad de Tulum

Hay que resaltar que la ciudad de Tulum podría experimentar en los próximos años un crecimiento similar al observado en Playa del Carmen en las dos décadas pasadas, lo que podría aumentar los niveles de riesgo, no sólo para viento, sino para otros fenómenos, en caso de no planear adecuadamente el crecimiento de la ciudad. Actualmente los niveles de riesgo ante viento son en general bajos, aunque algunas manzanas en el Centro y al Sur de la ciudad registran niveles muy altos.



Figura 133. Nivel de riesgo ante viento para la ciudad de Tulum

4.2. Marea de tormenta

4.2.1. Introducción.

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 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 producen las olas.

La marea de tormenta es la principal causa de muertes ocasionadas por ciclones tropicales, por lo que su estudio y las recomendaciones que de éste se deriven servirán para mitigar el riesgo que generen estos meteoros.

Por lo anterior se menciona que el objetivo de este apartado es la obtención y determinación de la altura de marea de tormenta para las ciudades de Cancún, Chetumal, Cozumel, Playa de Carmen, Isla Mujeres y Tulum, para su determinación se tomaron en cuenta los siguientes parámetros: presión barométrica para cada categoría de los ciclones tropicales, la ubicación de las ciudades (latitud), ángulo α , que se forma entre la dirección 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.

Con los resultados alcanzados se obtuvo que la altura de la marea tormenta es de 1 m a 7.5 m, dependiendo de la categoría del ciclón tropical, lo que permitió la elaboración de mapas de peligro por inundación para las ciudades antes mencionadas, de igual forma se obtuvo el tiempo de retorno de este fenómeno hidrometeorológico para cada una de sus categorías. Estos mapas permitirán localizar los lugares de elevación topográfica contiguos al mar, que tienen mayor probabilidad de ser inundados.

4.2.2 Metodología

Se utilizó la metodología publicada por CENAPRED, la cual es "Metodología para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones costeras por marea de tormenta (método simplificado)", donde se describe el cálculo de la magnitud de los vientos de un ciclón tropical, aspectos físicos del lugar que influye en la marea de tormenta y la estimación de la altura máxima de la área de tormenta.

a) Cálculo de la magnitud de los vientos de un ciclón tropical.

La altura de la marea de tormenta depende principalmente por las velocidades del viento del ciclón tropical, por lo tanto primero se calculó la magnitud de los vientos de un ciclo tropical para cada una de sus categorías.

Para este cálculo se utilizó la fórmula

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Dónde:

V = Velocidad de los máximos vientos (km/hr).

p_0 = Presión en el centro del ciclón tropical (mb).

R = Radio de máximos vientos (km).

θ = Latitud en el centro del ciclón.

V_d = Velocidad de desplazamiento de un ciclón tropical (km/hr).

Para obtener el dato de presión en el centro del ciclón tropical (p_0), se utilizó la escala Saffir Simpson, la cual establece las presiones para cada categoría de ciclón tropical.

Escala Saffir Simpson	
Categoría	Presión en el Centro
Depresión Tropical	- - -
Tormenta Tropical	- - -
Ciclón Tropical Categoría 1	> 980
Ciclón Tropical Categoría 2	979 – 965
Ciclón Tropical Categoría 3	964 – 945
Ciclón Tropical Categoría 4	944 – 920
Ciclón Tropical Categoría 5	< 920

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente fórmula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

R = Radio de máximos vientos (km).

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p_0 = Presión en el centro del ciclón tropical (mb).

Para la obtención del dato de (θ), se ubica la latitud en el centro del ciclo tropical, el dato se expresa en grados ($^{\circ}$).

La velocidad de desplazamiento (V_d), cuando no se dispone de este dato, se puede asignar el valor de 20 km/h el cual está considerado en el sistema de alerta temprana de la secretaria de gobernación de México, o de igual forma se puede obtener de la ilustración 1 "máxima velocidad de translación de los ciclones tropicales en el atlántico" publicada por CENAPRED.

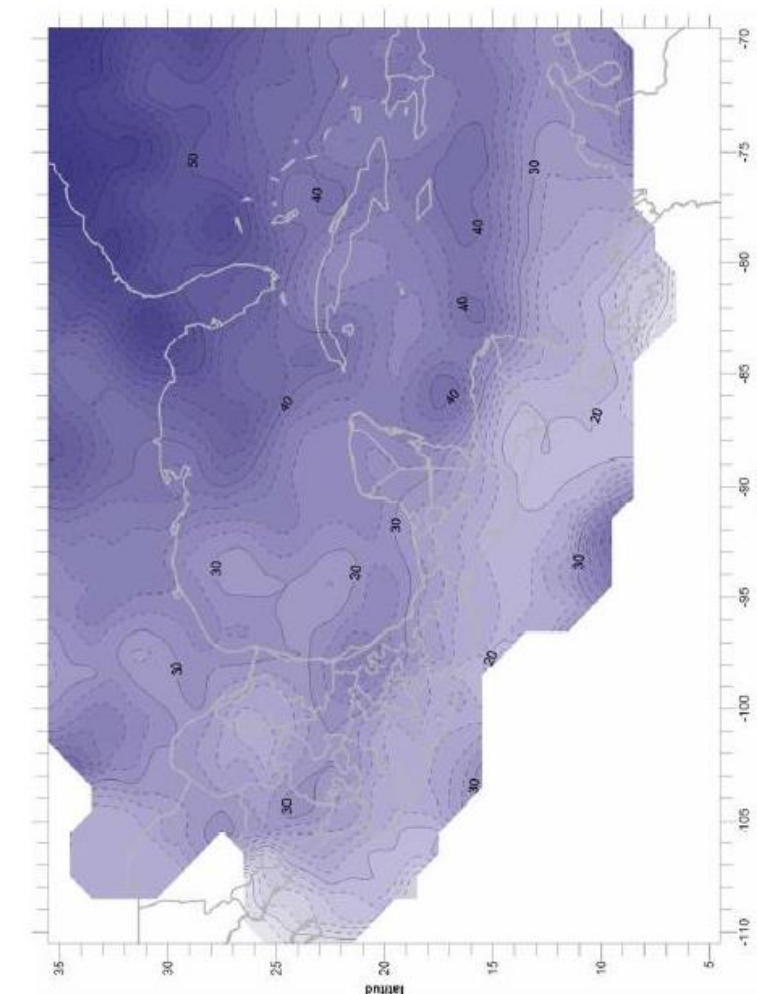


Figura 134. Máxima velocidad de translación de los ciclones tropicales en el Atlántico.

b) Aspectos físicos del lugar que influye en la marea de tormenta.

Los aspectos físicos del lugar que influye en la marea de tormenta, la amplitud de la marea de tormenta depende de varios factores, con respecto al lugar que se desea analizar, los factores más importantes son la línea de costa con respecto a la trayectoria del ciclón tropical.

La forma de la línea de costa es importante ya que de ella depende la cantidad de agua marina que puede penetrar, esto con respecto al ángulo que se forme entre la línea de costa y la trayectoria del ciclón tropical, cuando se genera un ángulo de 90° es cuando más agua se puede acumular cerca de la costa.

c) Estimación de la altura máxima de la marea de tormenta.

La elevación h (m), más grande que alcanza a ascender el nivel medio del mar por la marea de tormenta, puede ser calculada a partir de la velocidad V (km/h), que es la magnitud de los vientos de un ciclón tropical y del radio de máximo vientos R (km), los cuales se calcularon en el punto 32.1.

Sin embargo, la estimación de la altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

h= Es la elevación (m), más alta que alcanza la marea de tormenta cerca de la costa.

R= Radio máximo de vientos (km).

V= Velocidad de máximos vientos sostenidos (km/h)

F= Factor correctivo por dirección del viento.

El factor correctivo (F), se determina a partir del ángulo α , que forma la dirección de desplazamiento de ciclón tropical con respecto a la línea de costa, este factor se determina de la siguiente manera.

$$F = \begin{cases} 0.6(1 + \sin \alpha) & \text{si } 0^\circ < \alpha < 180^\circ \\ 0.6 & \text{en otros casos} \end{cases}$$

En la ilustración 2, se muestra el ángulo α , que existe en la trayectoria del ciclón tropical y la línea de costa, esto para dos casos distintos des desplazamiento.

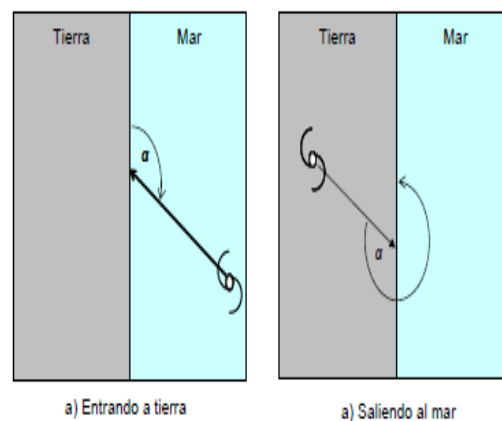


Figura 135. Trayectoria del ciclón tropical con respecto a la línea de costa.

Otra manera de obtener el factor correctivo es por medio de la ilustración 3, siempre tomando en cuenta el ángulo que se forma entre la trayectoria del ciclón y la línea de costa, cuando el ángulo este fuera del intervalo entre los 0° y 180°, el factor correctivo es igual a 0.6.

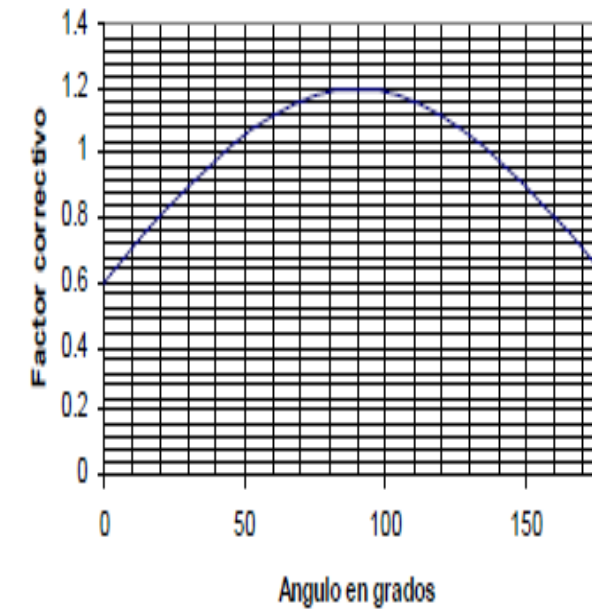


Figura 136. Grafica para estimar el factor correctivo.

Cuando no se dispone de la dirección de la trayectoria del ciclón tropical, estas se pueden obtener a partir de las trayectorias medias de traslación para ciclones tropicales en el atlántico norte (Figura 137).

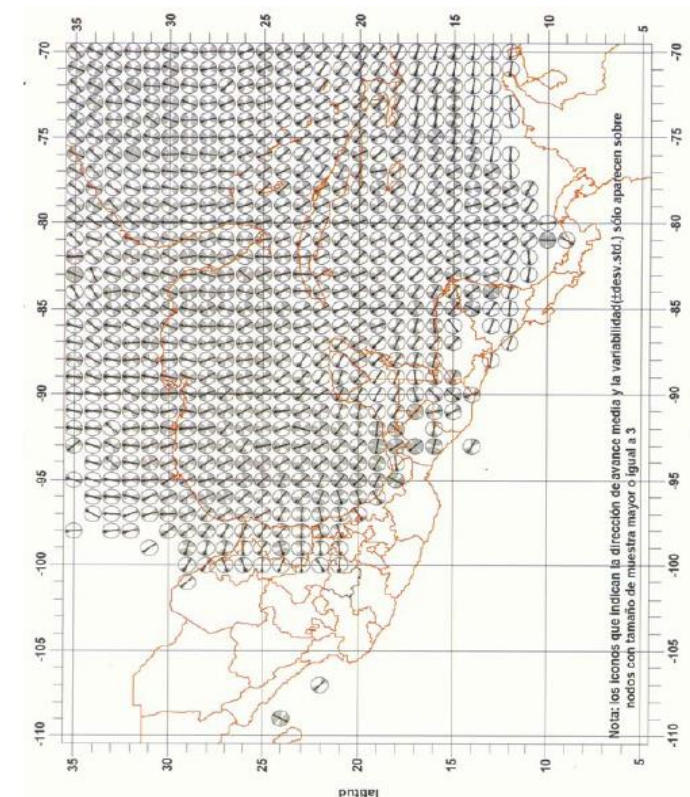


Figura 137. Dirección de la translación (media y variabilidad) para ciclones tropicales en el Atlántico norte 1851-2000.

d) Probabilidad de presentación de ciclones tropicales.

Para las funciones de peligro y los periodos de retorno, asociados a un punto de estudio en las costas de la República Mexicana, se elaboró por medio de CENAPRED, un algoritmo basado en mapas de probabilidades por la presencia de ciclones tropicales y mapas de eventos totales de estos fenómenos.

La obtención de probabilidades de un punto específico que se desea analizar es a partir de los mapas correspondientes a la categoría del ciclón tropical, mapas que se pueden consultar en la metodología de CENAPRED, fascículo "Fenómenos Hidrometeorológicos" (pag 239-246), y realizar una estimación visual de las probabilidades conforme a las isolíneas.

Con el fin de simplificar los cálculos CENAPRED elaboró un archivo de Microsoft Excel, al cual se le ingresan los datos obtenidos de los mapas de probabilidad y de los mapas de número total de ciclones tropicales en México, los datos leídos se ingresan en las celdas grises del documento, esto ajusta la probabilidad leída y nos arroja el periodo de retorno correspondiente a cada categoría de ciclón tropical (Figura 138).

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	0.339	0.3390	14.24	42.00	0.2710	3.69
TT	2	0.3	0.339	0.6780	14.24	27.76	0.1791	5.58
H1	3	0.08	0.085	0.4237	3.56	13.53	0.0873	11.46
H2	4	0.06	0.169	0.2542	7.12	9.97	0.0643	15.55
H3	5	0.01	0.034	0.2034	1.42	2.85	0.0184	54.43
H4	6	0.005	0.017	0.0508	0.71	1.42	0.0092	108.87
H5	7	0.005	0.017	0.0339	0.71	0.71	0.0046	155.00
-	8	0	0	-	0.00	0.00	-	-
Suma		0.86		-	42			

Figura 138. Libro de Excel, calculo_Tr_ciclones2005.

4.2.3 Desarrollo.

e) Preparación de los planos de trabajo.

Para elaborar los mapas de peligro por inundación por marea de tormenta para las ciudades de Cancún, Chetumal, Cozumel, Isla Mujeres, Playa del Carmen y Tulum, primero se prepararon los planos de trabajo, para lo cual se descargó de la página del INEGI las imágenes LIDAR de terreno para las ciudades de interés, con las cuales se obtuvieron las curvas de nivel.

f) Datos y caculos.

Datos.

Los datos que se utilizaron para analizar la altura de la marea de tormenta, para longitud θ , se utilizó la longitud en la que se encuentra la ciudad de interés Cancún 21°, Chetumal 18°, Cozumel 20°, Isla Mujeres 21°, Playa del Carmen 20° y Tulum 20°, se asumió que la dirección del ciclón tropical con respecto a la costa forma un ángulo α de 90°.

Cálculo de la altura de la marea de tormenta para Cancun.

El primer cálculo para obtener la altura de marea de tormenta se realizó para la ciudad de Cancún, en donde primeramente se realizó, el análisis de probabilidad de ocurrencia para las diferentes categorías de los ciclones tropicales, esto con la interpretación de los mapas de probabilidad de ocurrencia y la hoja de Excel "calculo_Tr_ciclones2005" (Figura 139).

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	0.308	0.3077	13.85	45.00	0.2903	3.44
TT	2	0.4	0.308	0.6154	13.85	31.15	0.2010	4.98
H1	3	0.1	0.077	0.3846	3.46	17.31	0.1117	8.96
H2	4	0.26	0.200	0.2769	9.00	13.85	0.0893	11.19
H3	5	0.08	0.062	0.2615	2.77	4.85	0.0313	31.98
H4	6	0.04	0.031	0.0923	1.38	2.08	0.0134	74.63
H5	7	0.02	0.015	0.0462	0.69	0.69	0.0045	155.00
-	8	0	0	-	0.00	0.00	-	-
Suma		1.3		-	45			

Figura 139. Probabilidad y tiempo de retorno, ciudad de Cancún.

Calculo para ciclón tropical categoría 1 en Cancún

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

R= **58.22 km**

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p₀= 980 mb.

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

V = **126.39 km/hr**

p₀ = 980 mb.

R = 58.22 km.

θ = 21°

V_d = 30 km/hr

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

$$h = 2.64 \text{ mts}$$

$$R = 58.22 \text{ km}$$

$$V = 126.39 \text{ km/hr}$$

$$F = 1.2$$

Calculo para ciclón tropical categoría 2 en Cancún

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

$$R = 48.95 \text{ km}$$

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

$$p_0 = 965 \text{ mb.}$$

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

$$V = 151 \text{ km/hr}$$

$$p_0 = 965 \text{ mb.}$$

$$R = 48.95 \text{ km.}$$

$$\theta = 21^\circ$$

$$V_d = 30 \text{ km/hr.}$$

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde.-

$$h = 3.28 \text{ mts}$$

$$R = 48.95 \text{ km}$$

$$V = 151 \text{ km/hr}$$

$$F = 1.2$$

Calculo para ciclón tropical categoría 3 en Cancún

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

Dónde:

$$R = 38 \text{ km}$$

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

$$p_0 = 945 \text{ mb.}$$

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

$$V = 178 \text{ km/hr}$$

$$p_0 = 945 \text{ mb.}$$

$$R = 38 \text{ km.}$$

$$\theta = 21^\circ$$

$$V_d = 30 \text{ km/hr.}$$

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

$$h = 4.2 \text{ mts}$$

$$R = 38 \text{ km}$$

$$V = 178 \text{ km/hr}$$

$$F = 1.2$$

Calculo para ciclón tropical categoría 4 en Cancún

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

$$R = 28 \text{ km}$$

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

$$p_0 = 920 \text{ mb.}$$

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

$$V = 207 \text{ km/hr}$$

$$p_0 = 920 \text{ mb.}$$

R = 28 km.

$\theta = 21^\circ$

Vd = 30 km/hr.

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

h = **5.45 mts**

R = 28 km

V = 207 km/hr

F = 1.2

Calculo para ciclón tropical categoría 5 en Cancún

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

R = **18.75 km**

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p0 = 882 mb.

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

V = **244 km/hr**

p0 = 882 mb.

R = 18.75 km.

$\theta = 21^\circ$

Vd = 30 km/hr.

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

h = **7.48 mts**

R = 18.75 km

V = 244 km/hr

F = 1.2

g) Cálculo de la altura de la marea de tormenta para Chetumal.

Costa del Golfo de México y Mar Caribe									
Cálculo del periodo de retorno									
Tipo	Intensidad	P(i) Inter.	P(i) Ajustada	P(i) Acum.	Eventos por tipo	$\mu(i)$ total	$\mu(i)$ anual	Tr(i)	
DT	1	0.3	0.359	0.3593	7.19	20.00	0.1290	7.75	
TT	2	0.3	0.359	0.7186	7.19	12.81	0.0827	12.10	
H1	3	0.08	0.096	0.4551	1.92	5.63	0.0363	27.54	
H2	4	0.1	0.120	0.2156	2.40	3.71	0.0240	41.75	
H3	5	0.04	0.048	0.1677	0.96	1.32	0.0085	117.66	
H4	6	0.01	0.012	0.0599	0.24	0.36	0.0023	155.00	
H5	7	0.005	0.006	0.0180	0.12	0.12	0.0008	155.00	
-	8	0	0		0.00	0.00	-	-	
	Suma	0.835		-	20				

Número Total de ciclones	20	Años del periodo	155
--------------------------	----	------------------	-----

Grado de confianza de la estimación de probabilidad	BUENO
---	--------------

Figura 140. Probabilidad y tiempo de retorno, ciudad de Chetumal.

Calculo para ciclón tropical categoría 1 en Chetumal.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

R = **58.22 km**

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p0 = 980 mb.

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

V = **126.60 km/hr**

p0 = 980 mb.

R = 58.22 km.

$\theta = 0.342$

Vd = 30 km/hr.

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

h= 2.65 mts

R= 58.22 km

V= 126.60 km/hr

F= 1.2

Calculo para ciclón tropical categoría 2 en Chetumal.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

R= 48.95 km

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p0= 965 mb.

$$V = 20.1834 (1013-p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

V = 151.18 km/hr

p0 = 965 mb.

R = 48.95 km.

$\theta = 0.342^\circ$

Vd = 30 km/hr.

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

h= 3.29 mts

R= 48.95 km

V= 151.18 km/hr

F= 1.2

Calculo para ciclón tropical categoría 3 en Chetumal.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

R= 38.85 km

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p0= 945 mb.

$$V = 20.1834 (1013-p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

V = 178 km/hr

p0 = 945 mb.

R = 38.85 km.

$\theta = 0.342$

Vd = 30 km/hr.

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

h= 4.22 mts

R= 38.85 km

V= 178 km/hr

F= 1.2

Calculo para ciclón tropical categoría 4 en Chetumal.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

R= 29.10 km

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p0= 920 mb.

$$V = 20.1834 (1013-p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

V = 207.47 km/hr

p0 = 920 mb.

R = 29.10 km.

$\theta = 0.342^\circ$

Vd = 30 km/hr.

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

h= **5.46 mts**

R= 29.10km

V= 207.47 km/hr

F= 1.2

Calculo para ciclón tropical categoría 5 en Chetumal.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

R= **18.75 km**

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p0= 882 mb.

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

V = **244.61 km/hr**

p0 = 882 mb.

R = 18.75 km.

θ = 90°

Vd = 30 km/hr.

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

h= **7.48 mts**

R= 18.75 km

V= 244.61 km/hr

F= 1.2

h) Cálculo de la altura de la marea de tormenta para Tulum.

Costa del Golfo de México y Mar Caribe									
Cálculo del periodo de retorno									
Tipo	Intensidad	P(i) Inter.	P(i) Ajustada	P(i) Acum.	Eventos por tipo	μ(i) total	μ(i) anual	Tr(i)	
DT	1	0.37	0.339	0.3394	10.18	30.00	0.1935	5.17	
TT	2	0.37	0.339	0.6789	10.18	19.82	0.1278	7.82	
H1	3	0.1	0.092	0.4312	2.75	9.63	0.0621	16.09	
H2	4	0.18	0.165	0.2569	4.95	6.88	0.0444	22.53	
H3	5	0.04	0.037	0.2018	1.10	1.93	0.0124	80.45	
H4	6	0.02	0.018	0.0550	0.55	0.83	0.0053	155.00	
H5	7	0.01	0.009	0.0275	0.28	0.28	0.0018	155.00	
-	8	0	0			0.00			
	Suma	1.09			30				

Número Total de ciclones	30	Años del periodo	155
--------------------------	----	------------------	-----

Grado de confianza de la estimación de probabilidad	BUENO
---	--------------

Figura 141. Probabilidad y tiempo de retorno, ciudad de Tulum.

Calculo para ciclón tropical categoría 1 en Tulum.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

R= **58.22 km**

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p0= 980 mb.

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

V = **126.60 km/hr**

p0 = 980 mb.

R = 58.22 km.

θ = 0.342

Vd = 30 km/hr.

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

h= **2.65 mts**

R= 58.22 km

V= 126.60 km/hr

F= 1.2

Calculo para ciclón tropical categoría 2 en Tulum.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

R= **48.95 km**

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p₀= 965 mb.

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

V = **151.18 km/hr**

p₀ = 965 mb.

R = 48.95 km.

θ = 0.342°

V_d = 30 km/hr.

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

h= **3.29 mts**

R= 48.95 km

V= 151.18 km/hr

F= 1.2

Calculo para ciclón tropical categoría 3 en Tulum.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

R= **38.85 km**

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p₀= 945 mb.

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

V = **178 km/hr**

p₀ = 945 mb.

R = 38.85 km.

θ = 0.342

V_d = 30 km/hr.

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

h= **4.22 mts**

R= 38.85 km

V= 178 km/hr

F= 1.2

Calculo para ciclón tropical categoría 4 en Tulum.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

R= **29.10 km**

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p₀= 920 mb.

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

V = **207.47 km/hr**

p₀ = 920 mb.

R = 29.10 km.

θ = 0.342°

V_d = 30 km/hr.

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde.-

h= **5.46 mts**

R= 29.10km

V= 207.47 km/hr

F= 1.2

Calculo para ciclón tropical categoría 5 en Tulum.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

R= **18.75 km**

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p0= 882 mb.

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

V = **244 .61 km/hr**

p0 = 882 mb.

R = 18.75 km.

θ = 90°

Vd = 30 km/hr.

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

h= **7.48 mts**

R= 18.75 km

V= 244.61 km/hr

F= 1.2

i) **Cálculo de la altura de la marea de tormenta para Playa del Carmen.**

Costa del Golfo de México y Mar Caribe									
Cálculo del periodo de retorno									
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	0.339	0.3394	10.18	30.00	0.1935	5.17	
TT	2	0.4	0.339	0.6789	10.18	19.82	0.1278	7.82	
H1	3	0.08	0.092	0.4312	2.75	9.63	0.0621	16.09	
H2	4	0.22	0.165	0.2569	4.95	6.88	0.0444	22.53	
H3	5	0.04	0.037	0.2018	1.10	1.93	0.0124	80.45	
H4	6	0.03	0.018	0.0550	0.55	0.83	0.0053	155.00	
H5	7	0.01	0.009	0.0275	0.28	0.28	0.0018	155.00	
-	8	0	0	-	0.00	0.00	-	-	
Suma		1.18		-	30				

Número Total de ciclones	35	Años del periodo	155
--------------------------	----	------------------	-----

Grado de confianza de la estimación de probabilidad	BUENO
---	--------------

Figura 142. Probabilidad y tiempo de retorno, ciudad de Playa del Carmen.

Calculo para ciclón tropical categoría 1 en Playa del Carmen.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

R= **58.22 km**

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p0= 980 mb.

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

V = **126.60 km/hr**

p0 = 980 mb.

R = 58.22 km.

θ = 0.342

Vd = 30 km/hr.

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

h= **2.65 mts**

R= 58.22 km

V= 126.60 km/hr

F= 1.2

Calculo para ciclón tropical categoría 2 en Playa del Carmen.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

$$R = 48.95 \text{ km}$$

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

$$p_0 = 965 \text{ mb.}$$

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

$$V = 151.18 \text{ km/hr}$$

$$p_0 = 965 \text{ mb.}$$

$$R = 48.95 \text{ km.}$$

$$\theta = 0.342^\circ$$

$$V_d = 30 \text{ km/hr.}$$

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

$$h = 3.29 \text{ mts}$$

$$R = 48.95 \text{ km}$$

$$V = 151.18 \text{ km/hr}$$

$$F = 1.2$$

Calculo para ciclón tropical categoría 3 en Playa del Carmen.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

$$R = 38.85 \text{ km}$$

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

$$p_0 = 945 \text{ mb.}$$

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

$$V = 178 \text{ km/hr}$$

$$p_0 = 945 \text{ mb.}$$

$$R = 38.85 \text{ km.}$$

$$\theta = 0.342$$

$$V_d = 30 \text{ km/hr.}$$

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

$$h = 4.22 \text{ mts}$$

$$R = 38.85 \text{ km}$$

$$V = 178 \text{ km/hr}$$

$$F = 1.2$$

Calculo para ciclón tropical categoría 4 en Playa del Carmen.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

$$R = 29.10 \text{ km}$$

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

$$p_0 = 920 \text{ mb.}$$

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

$$V = 207.47 \text{ km/hr}$$

$$p_0 = 920 \text{ mb.}$$

$$R = 29.10 \text{ km.}$$

$$\theta = 0.342^\circ$$

$$V_d = 30 \text{ km/hr.}$$

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

$$h = 5.46 \text{ mts}$$

$$R = 29.10 \text{ km}$$

$$V = 207.47 \text{ km/hr}$$

F= 1.2

Calculo para ciclón tropical categoría 5 en Playa del Carmen.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

R= **18.75 km**

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p0= 882 mb.

$$V = 20.1834 (1013-p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

V = **244.61 km/hr**

p0 = 882 mb.

R = 18.75 km.

θ = 90°

Vd = 30 km/hr.

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

h= **7.48 mts**

R= 18.75 km

V= 244.61 km/hr

F= 1.2

j) Cálculo de la altura de la marea de tormenta para Cozumel.

Costa del Golfo de México y Mar Caribe								
Cálculo del periodo de retorno								
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	0.339	0.3390	15.25	45.00	0.2903	3.44
TT	2	0.4	0.339	0.6780	15.25	29.75	0.1919	5.21
H1	3	0.08	0.068	0.4068	3.05	14.49	0.0935	10.70
H2	4	0.22	0.186	0.2542	8.39	11.44	0.0738	13.55
H3	5	0.04	0.034	0.2203	1.53	3.05	0.0197	50.81
H4	6	0.03	0.025	0.0593	1.14	1.53	0.0098	101.61
H5	7	0.01	0.008	0.0339	0.38	0.38	0.0025	155.00
-	8	0	0	0	0.00	0.00	-	-
Suma		1.18		-	45			

Número Total de ciclones	45	Años del periodo	155
--------------------------	----	------------------	-----

Grado de confianza de la estimación de probabilidad: **BUENO**

Figura 143. Probabilidad y tiempo de retorno, ciudad de Cozumel.

Calculo para ciclón tropical categoría 1 en Cozumel.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

R= **58.22 km**

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p0= 980 mb.

$$V = 20.1834 (1013-p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

V = **126.60 km/hr**

p0 = 980 mb.

R = 58.22 km.

θ = 0.342

Vd = 30 km/hr

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

h= **2.65 mts**

R= 58.22 km

V= 126.60 km/hr

F= 1.2

Calculo para ciclón tropical categoría 2 en Cozumel.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

R= **48.95 km**

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p0= 965 mb.

$$V = 20.1834 (1013-p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

$$V = 151.18 \text{ km/hr}$$

$$p_0 = 965 \text{ mb.}$$

$$R = 48.95 \text{ km.}$$

$$\theta = 0.342^\circ$$

$$V_d = 30 \text{ km/hr.}$$

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

$$h = 3.29 \text{ mts}$$

$$R = 48.95 \text{ km}$$

$$V = 151.18 \text{ km/hr}$$

$$F = 1.2$$

Calculo para ciclón tropical categoría 3 en Cozumel.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

$$R = 38.85 \text{ km}$$

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

$$p_0 = 945 \text{ mb.}$$

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

$$V = 178 \text{ km/hr}$$

$$p_0 = 945 \text{ mb.}$$

$$R = 38.85 \text{ km.}$$

$$\theta = 0.342$$

$$V_d = 30 \text{ km/hr.}$$

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

$$h = 4.22 \text{ mts}$$

$$R = 38.85 \text{ km}$$

$$V = 178 \text{ km/hr}$$

$$F = 1.2$$

Calculo para ciclón tropical categoría 4 en Cozumel.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

$$R = 29.10 \text{ km}$$

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

$$p_0 = 920 \text{ mb.}$$

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

$$V = 207.47 \text{ km/hr}$$

$$p_0 = 920 \text{ mb.}$$

$$R = 29.10 \text{ km.}$$

$$\theta = 0.342^\circ$$

$$V_d = 30 \text{ km/hr.}$$

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

$$h = 5.46 \text{ mts}$$

$$R = 29.10 \text{ km}$$

$$V = 207.47 \text{ km/hr}$$

$$F = 1.2$$

Calculo para ciclón tropical categoría 5 en Cozumel.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

$$R = 18.75 \text{ km}$$

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p0= 882 mb.

$$V = 20.1834 (1013-p0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 Vd$$

Donde:

V = **244.61 km/hr**

p0 = 882 mb.

R = 18.75 km.

θ = 90°

Vd = 30 km/hr.

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

h= **7.48 mts**

R= 18.75 km

V= 244.61 km/hr

F= 1.2

k) Cálculo de la altura de la marea de tormenta para Isla Mujeres.

Costa del Golfo de México y Mar Caribe									
Cálculo del periodo de retorno									
Tipo	Intensidad	P(i) Inter.	P(i) Ajustada	P(i) Acum.	Eventos por tipo	μ(i) total	μ(i) anual	Tr(i)	
DT	1	0.35	0.333	0.3333	15.00	45.00	0.2903	3.44	
TT	2	0.35	0.333	0.6667	15.00	30.00	0.1935	5.17	
H1	3	0.09	0.086	0.4190	3.86	15.00	0.0968	10.33	
H2	4	0.18	0.171	0.2571	7.71	11.14	0.0719	13.91	
H3	5	0.04	0.038	0.2095	1.71	3.43	0.0221	45.21	
H4	6	0.02	0.019	0.0571	0.86	1.71	0.0111	90.42	
H5	7	0.02	0.019	0.0381	0.86	0.86	0.0055	155.00	
-	8	0	0	-	0.00	0.00	-	-	
Suma		1.05		-	45				

Número Total de ciclones	45	Años del periodo	155
--------------------------	----	------------------	-----

Grado de confianza de la estimación de probabilidad	BUENO
---	--------------

Figura 144. Probabilidad y tiempo de retorno, ciudad de Isla Mujeres

Calculo para ciclón tropical categoría 1 en Isla Mujeres.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p0}$$

Donde:

R= **58.22 km**

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p0= 980 mb.

$$V = 20.1834 (1013-p0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 Vd$$

Donde:

V = **126.60 km/hr**

p0 = 980 mb.

R = 58.22 km.

θ = 0.342

Vd = 30 km/hr.

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

h= **2.65 mts**

R= 58.22 km

V= 126.60 km/hr

F= 1.2

Calculo para ciclón tropical categoría 2 en Isla Mujeres.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p0}$$

Donde:

R= **48.95 km**

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

p0= 965 mb.

$$V = 20.1834 (1013-p0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 Vd$$

Donde:

V = **151.18 km/hr**

p0 = 965 mb.

R = 48.95 km.

θ = 0.342°

Vd = 30 km/hr.

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

$$h = 3.29 \text{ mts}$$

$$R = 48.95 \text{ km}$$

$$V = 151.18 \text{ km/hr}$$

$$F = 1.2$$

Calculo para ciclón tropical categoría 3 en Isla Mujeres.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

$$R = 38.85 \text{ km}$$

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

$$p_0 = 945 \text{ mb.}$$

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

$$V = 178 \text{ km/hr}$$

$$p_0 = 945 \text{ mb.}$$

$$R = 38.85 \text{ km.}$$

$$\theta = 0.342$$

$$V_d = 30 \text{ km/hr}$$

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

$$h = 4.22 \text{ mts}$$

$$R = 38.85 \text{ km}$$

$$V = 178 \text{ km/hr}$$

$$F = 1.2$$

Calculo para ciclón tropical categoría 4 en Isla Mujeres.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

$$R = 29.10 \text{ km}$$

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

$$p_0 = 920 \text{ mb.}$$

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

$$V = 207.47 \text{ km/hr}$$

$$p_0 = 920 \text{ mb.}$$

$$R = 29.10 \text{ km.}$$

$$\theta = 0.342^\circ$$

$$V_d = 30 \text{ km/hr.}$$

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

$$h = 5.46 \text{ mts}$$

$$R = 29.10 \text{ km}$$

$$V = 207.47 \text{ km/hr}$$

$$F = 1.2$$

Calculo para ciclón tropical categoría 5 en Isla Mujeres.

El radio de máximos vientos (R), se obtuvo mediante la siguiente formula.

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0}$$

Dónde:

$$R = 18.75 \text{ km}$$

e = Base logarítmica natural (e = 2.71828...)

$$p_0 = 882 \text{ mb.}$$

$$V = 20.1834 (1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{ Sen}\theta + 0.50 V_d$$

Donde:

$$V = 244.61 \text{ km/hr}$$

$$p_0 = 882 \text{ mb.}$$

$$R = 18.75 \text{ km.}$$

$\theta = 90^\circ$

$V_d = 30 \text{ km/hr.}$

La altura máxima de la marea de tormenta se calcula mediante.

$$h = (0.03 R + 0.000119 V^2 - 1.4421) F$$

Donde. -

$h = 7.48 \text{ mts}$

$R = 18.75 \text{ km}$

$V = 244.61 \text{ km/hr}$

$F = 1.2$

4.2.4 Peligro

En los mapas siguientes se pueden observar las áreas de afectación de las ciudades de interés por efecto de la marea de tormenta, dicha afectación varía de acuerdo a la categoría con que impacte el ciclón tropical.

→ Ciudad Chetumal



Mapa 14. Afectación por marea de tormenta en Chetumal, ciclón tropical categoría 1.



Mapa 15. Afectación por marea de tormenta en Chetumal, ciclón tropical categoría 2.



Mapa 16. Afectación por marea de tormenta en Chetumal, ciclón tropical categoría 3.

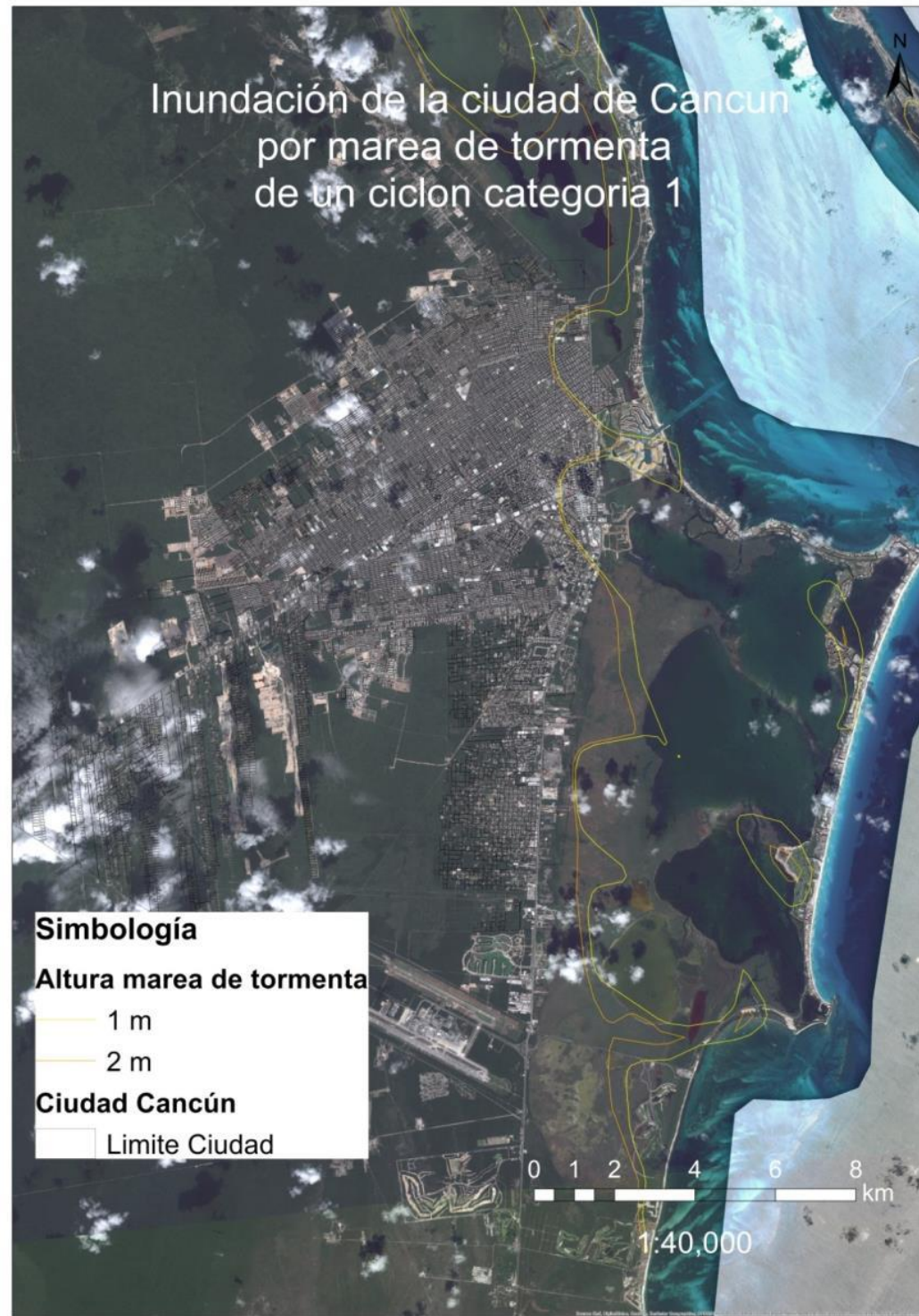


Mapa 17. Afectación por marea de tormenta en Chetumal, ciclón tropical categoría 4.

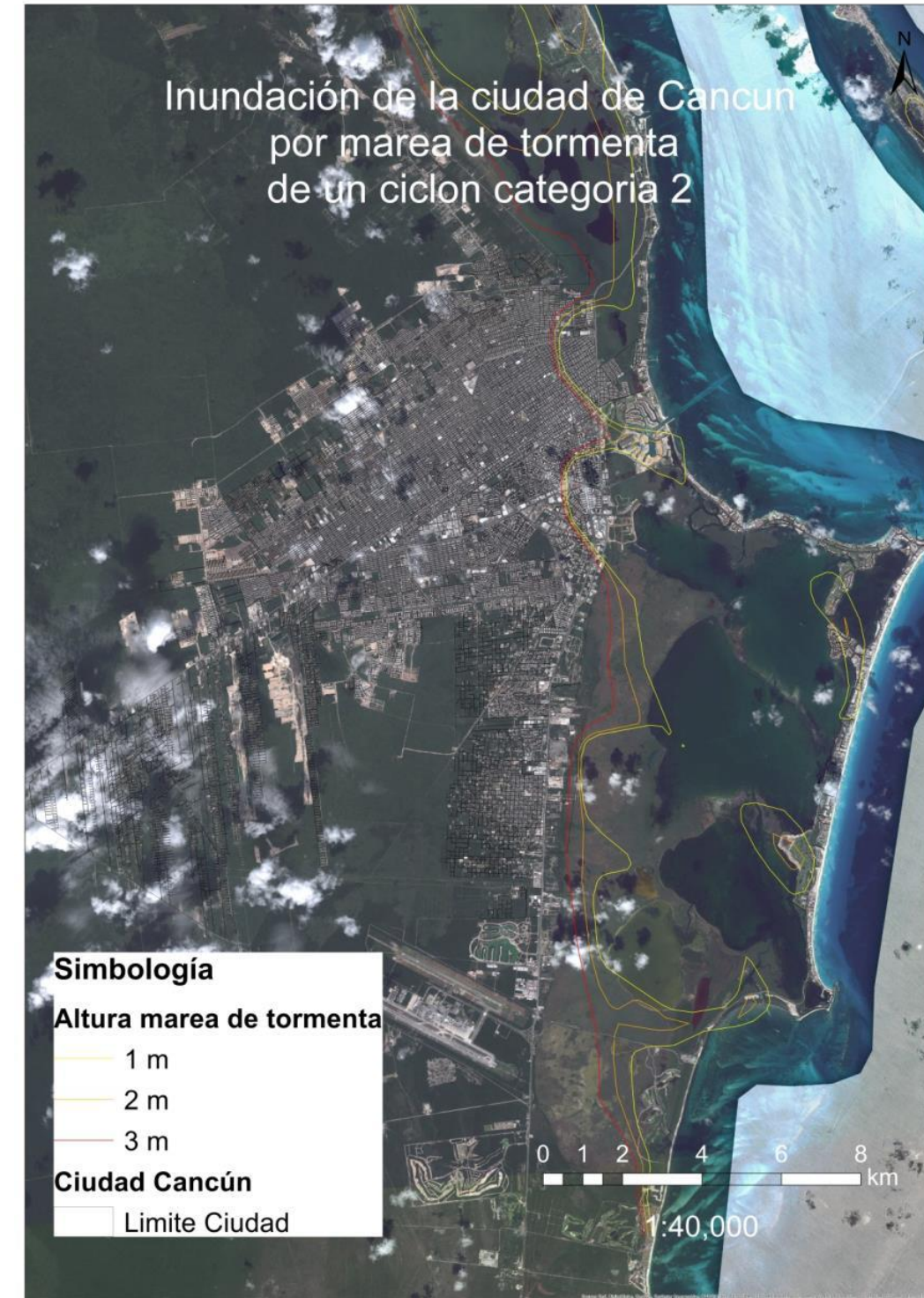


Mapa 18. Afectación por marea de tormenta en Chetumal, ciclón tropical categoría 5.

Ciudad Cancún



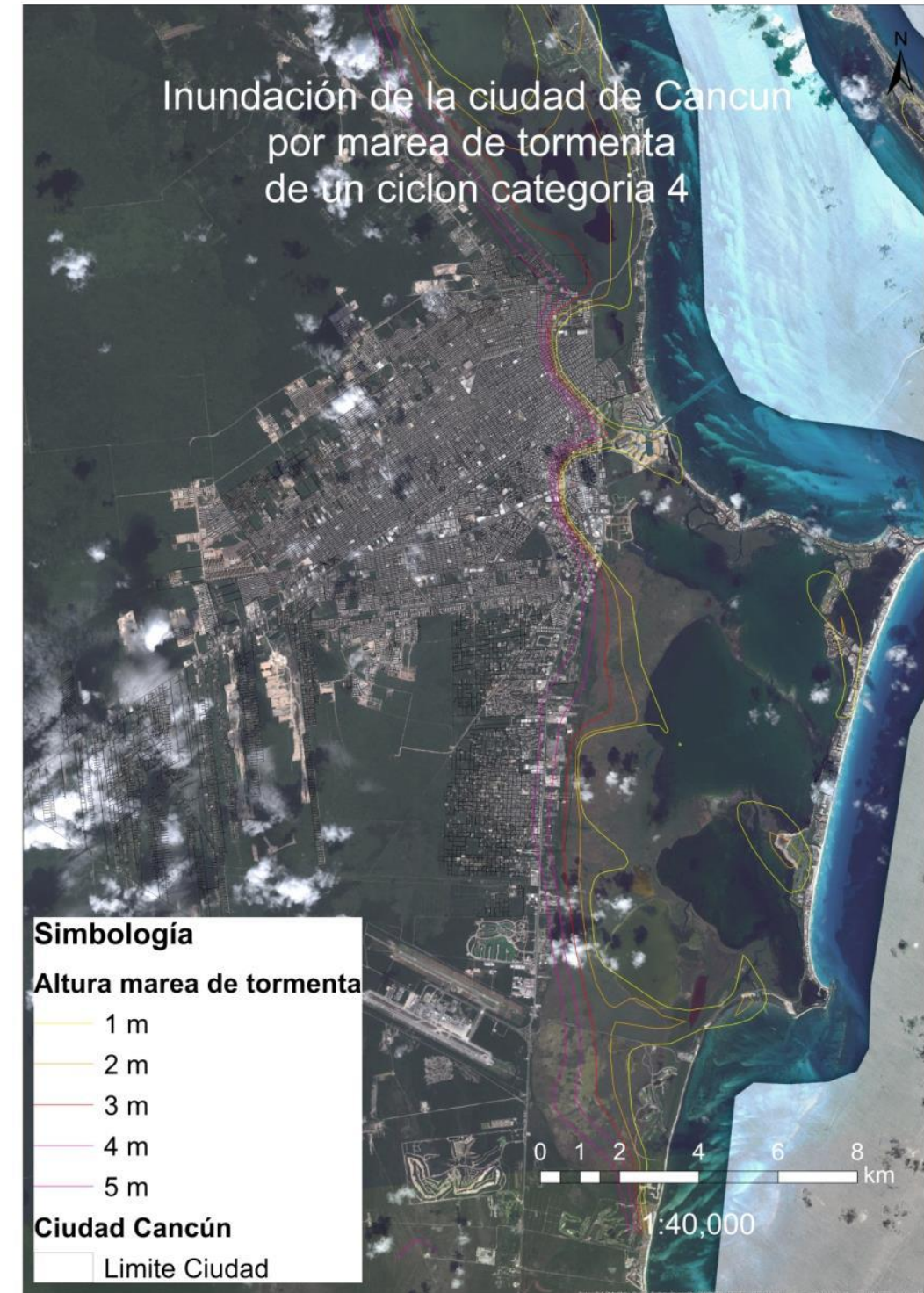
Mapa 19. Afectación por marea de tormenta en Cancún, ciclón tropical categoría 1.



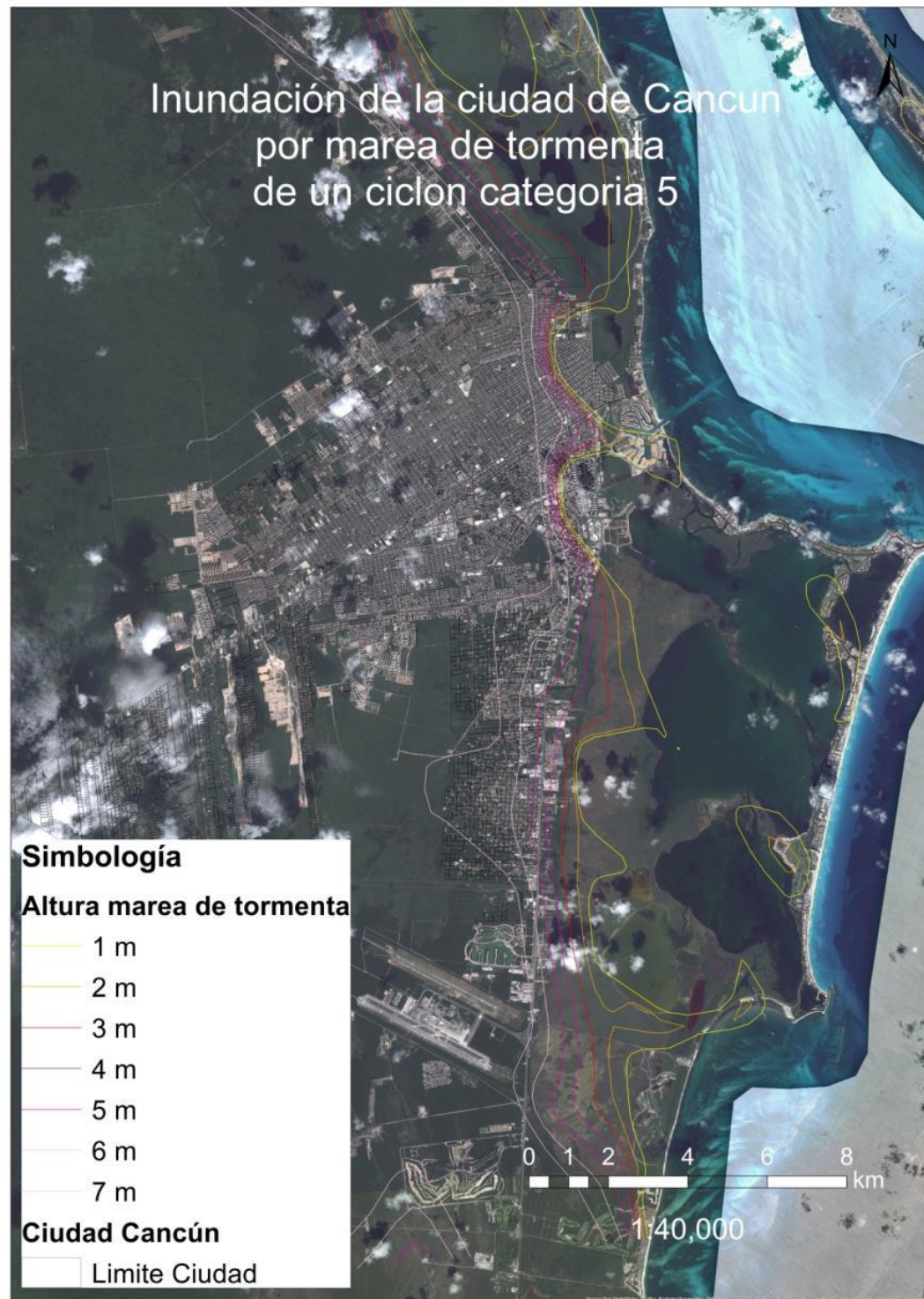
Mapa 20. Afectación por marea de tormenta en Cancún, ciclón tropical categoría 2.



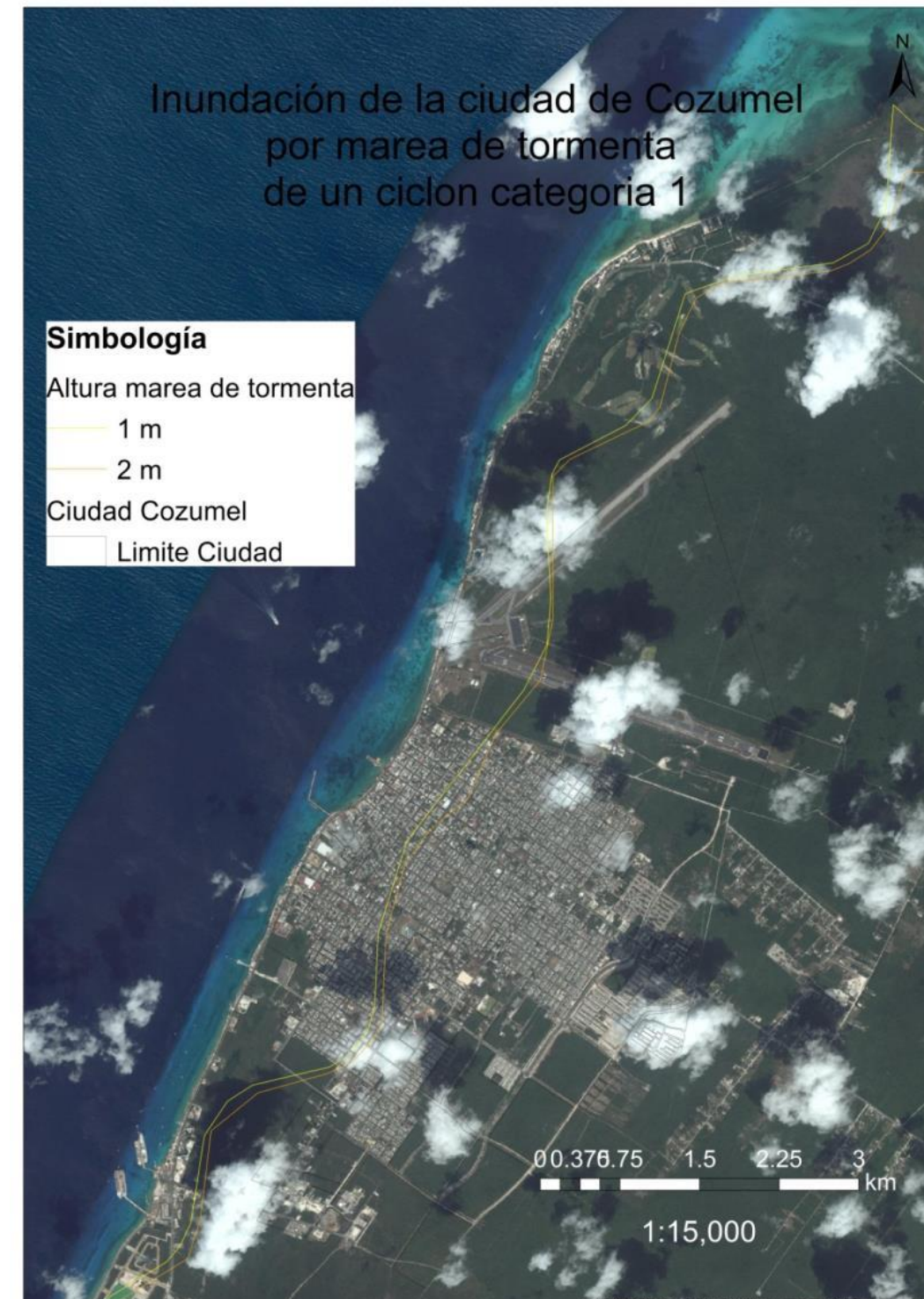
Mapa 21. Afectación por marea de tormenta en Cancún, ciclón tropical categoría 3.



Mapa 22. Afectación por marea de tormenta en Cancún, ciclón tropical categoría 4.



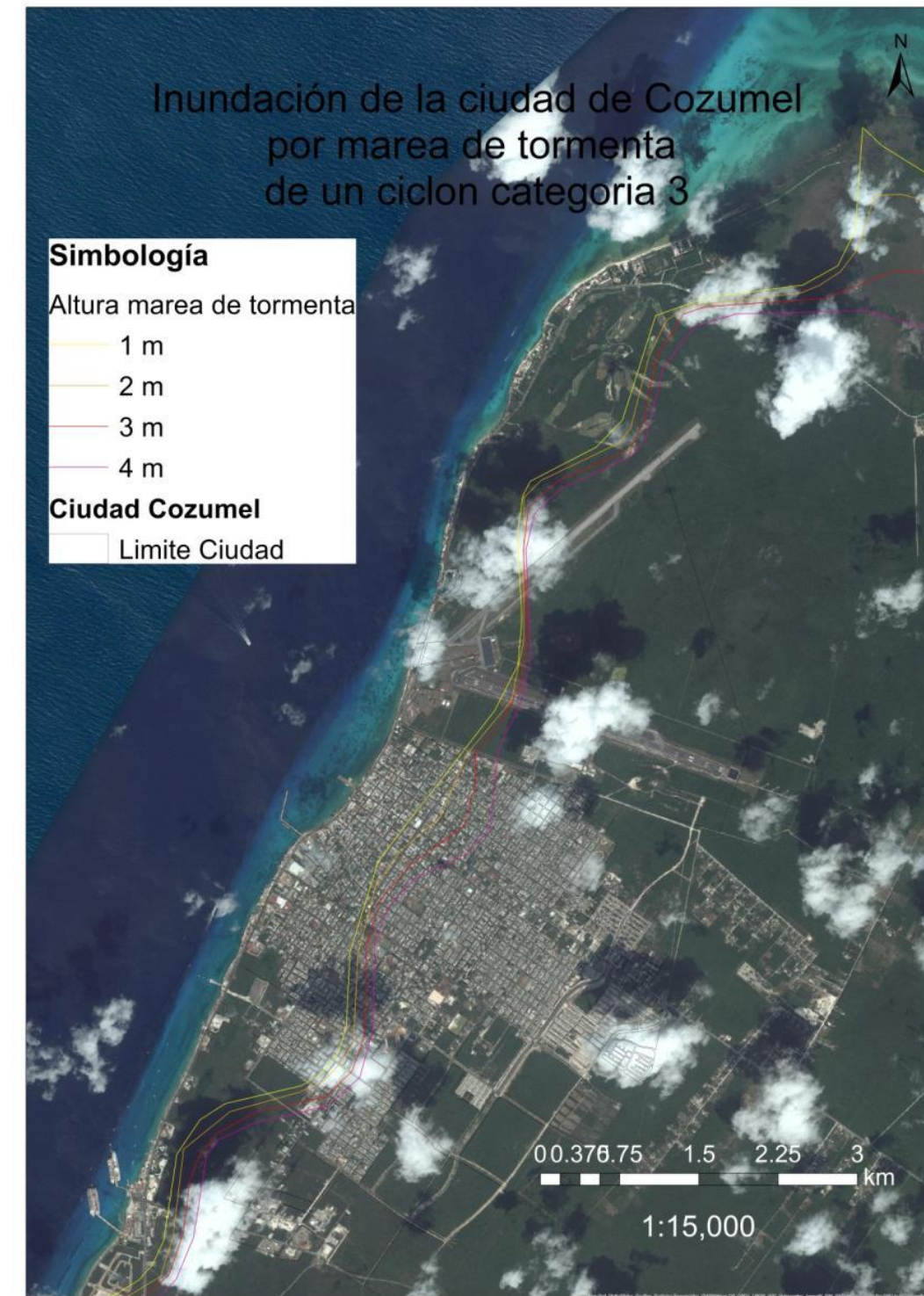
Mapa 23. Afectación por marea de tormenta en Cancún, ciclón tropical categoría 5



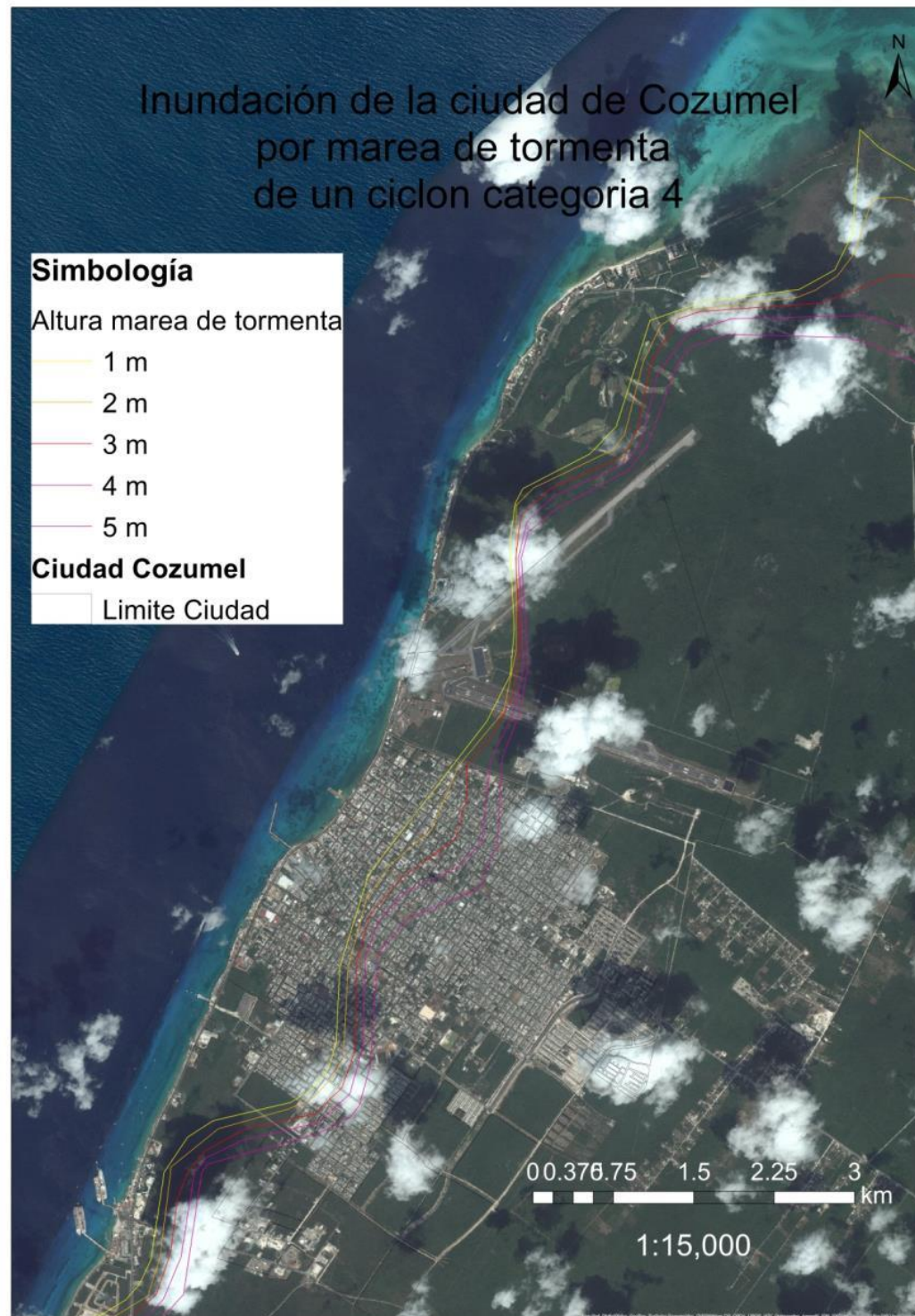
Mapa 24. Afectación por marea de tormenta en Cozumel, ciclón tropical categoría 1.



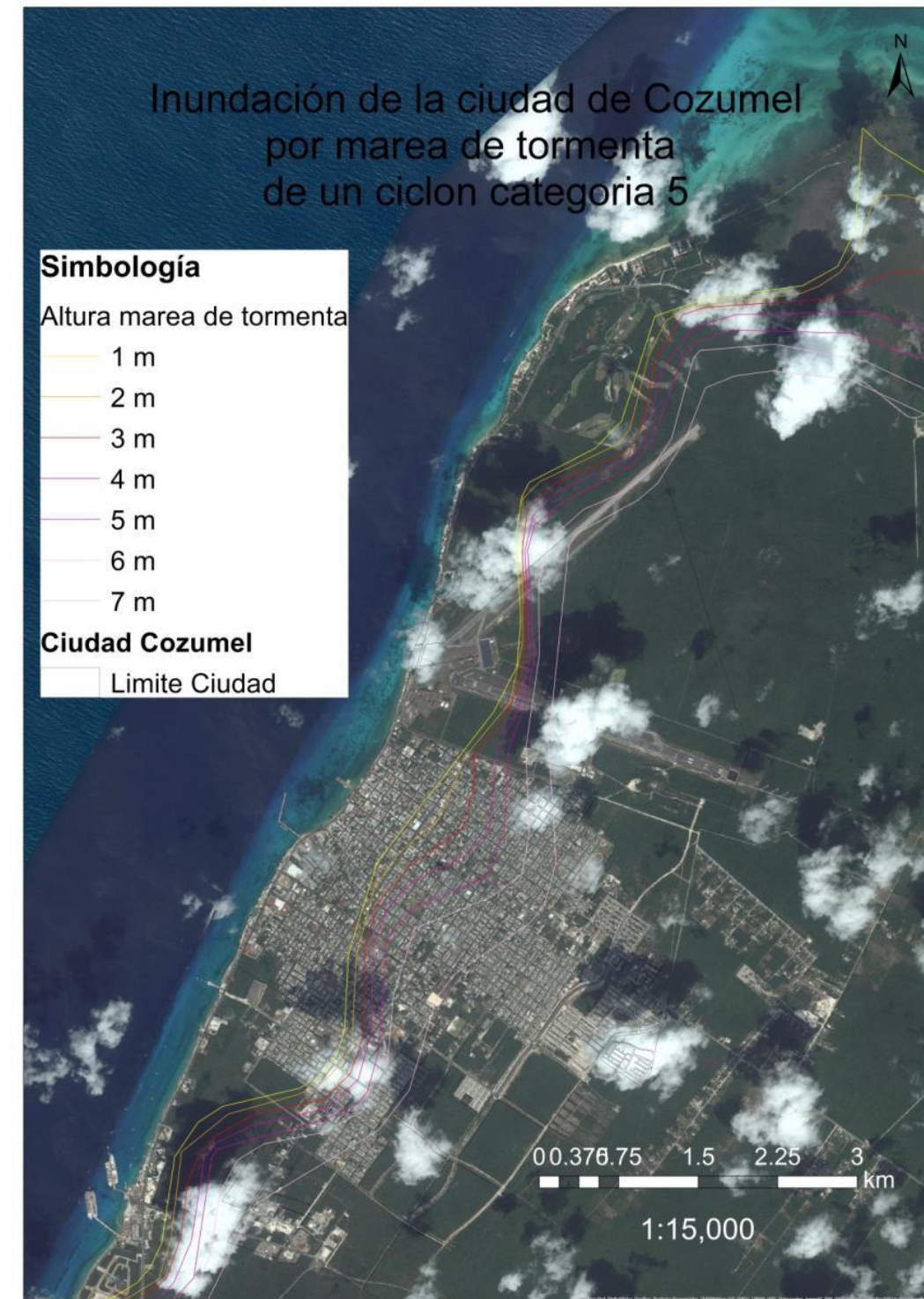
Mapa 25. Afectación por marea de tormenta en Cozumel, ciclón tropical categoría 2.



Mapa 26. Afectación por marea de tormenta en Cozumel, ciclón tropical categoría 3.

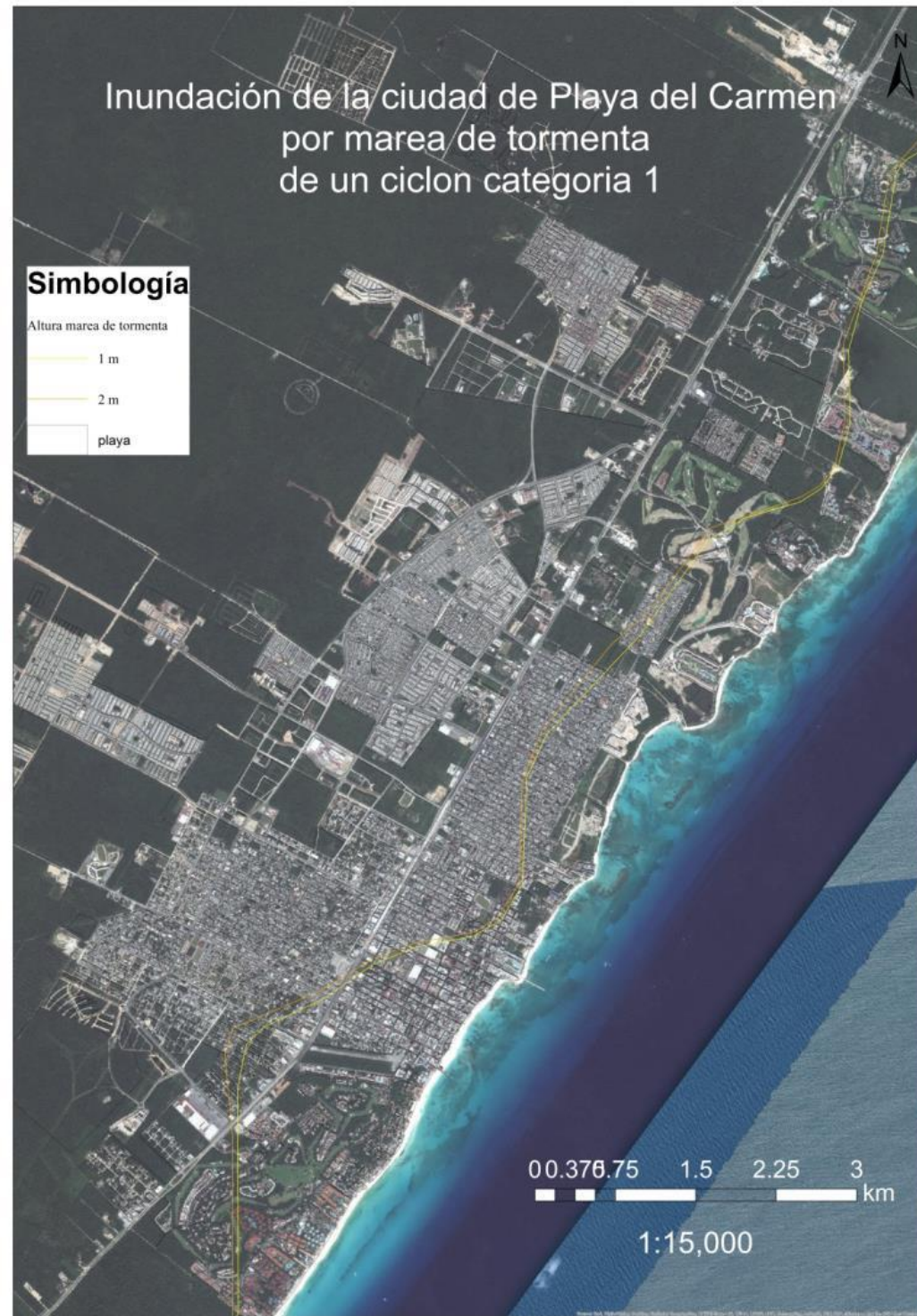


Mapa 27. Afectación por marea de tormenta en Cozumel, ciclón tropical categoría 4.



Mapa 28. Afectación por marea de tormenta en Cozumel, ciclón tropical categoría 5.

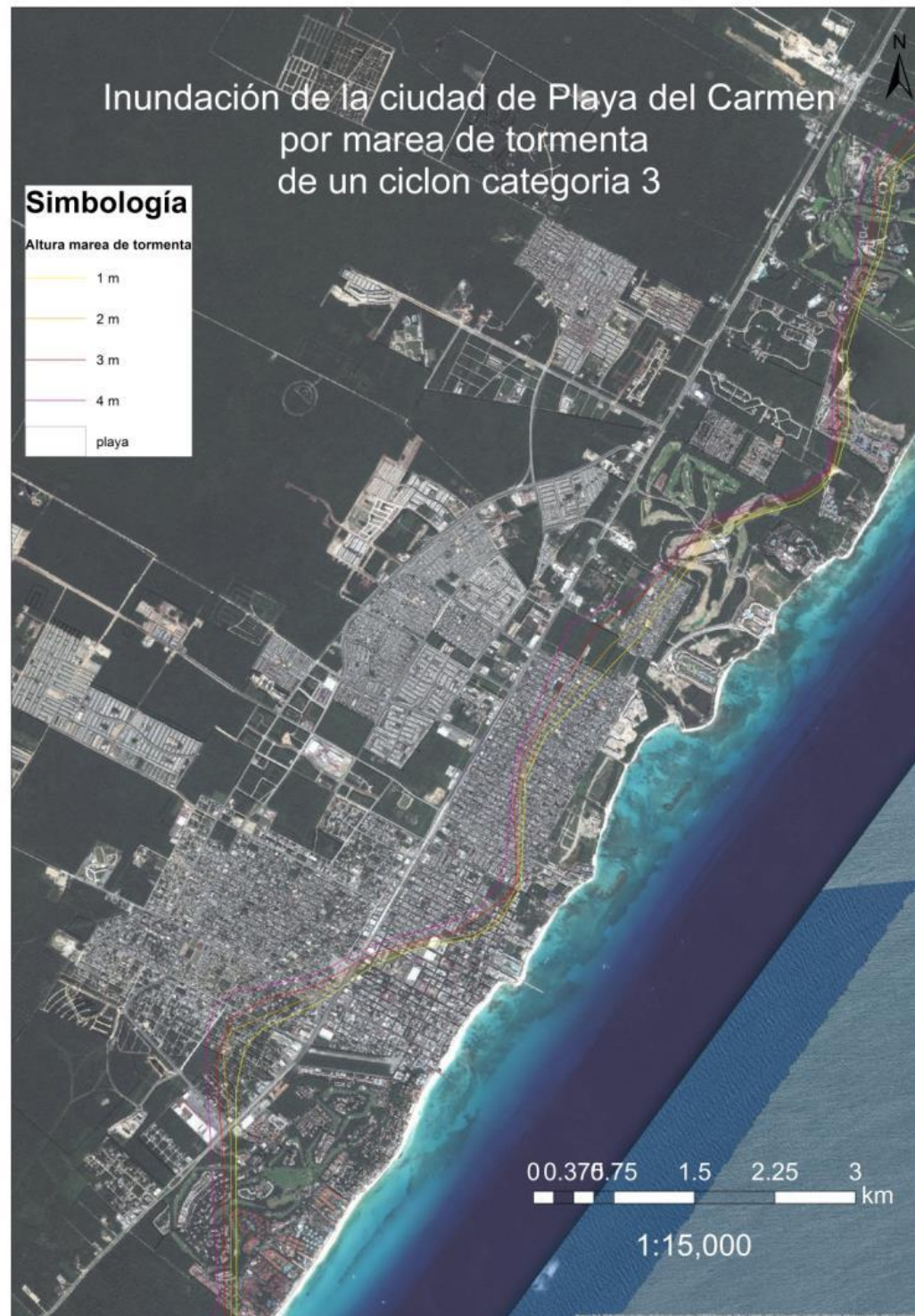
Ciudad de Playa del Carmen



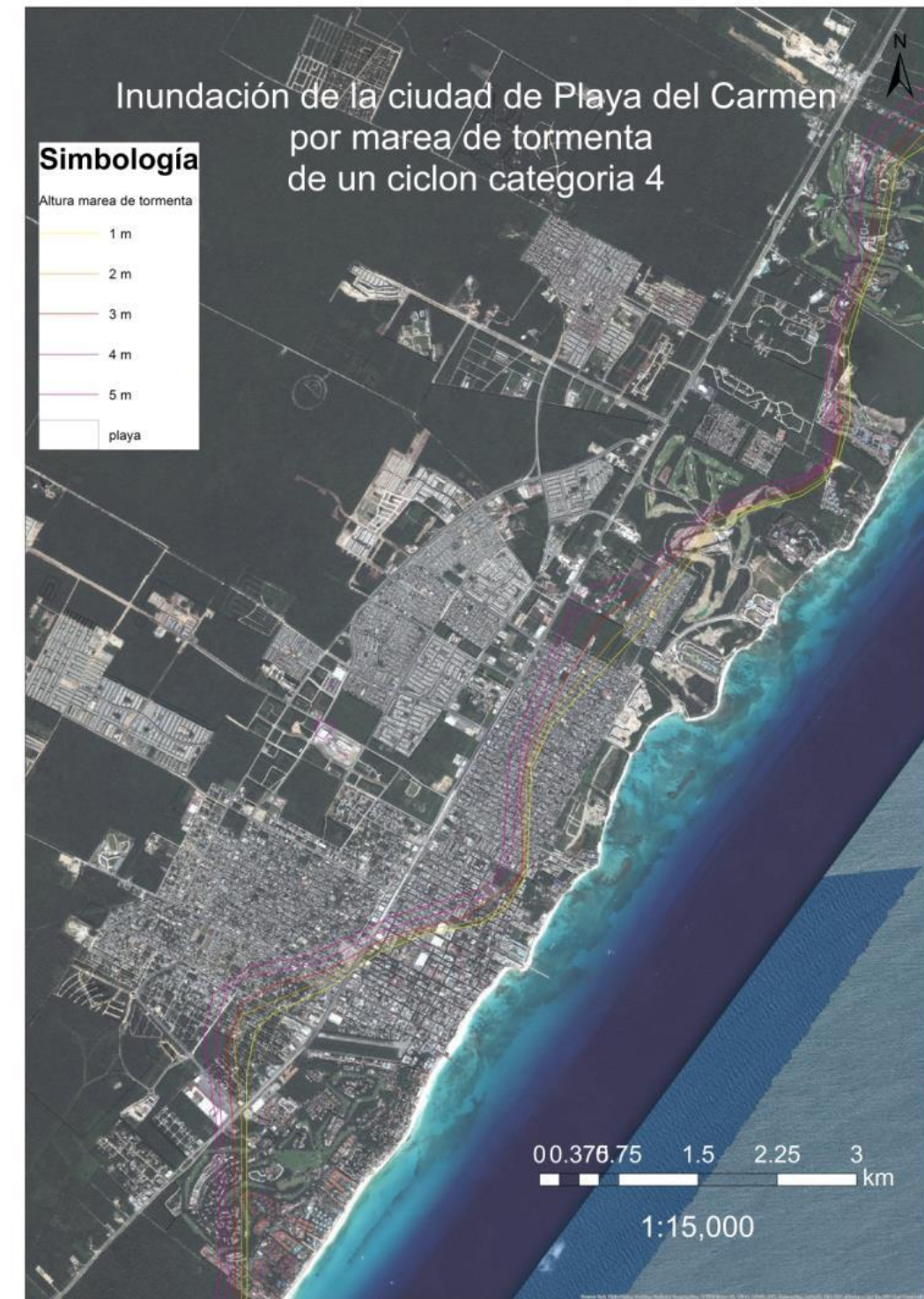
Mapa 29. Afectación por marea de tormenta en Playa del Carmen, ciclón tropical categoría 1.



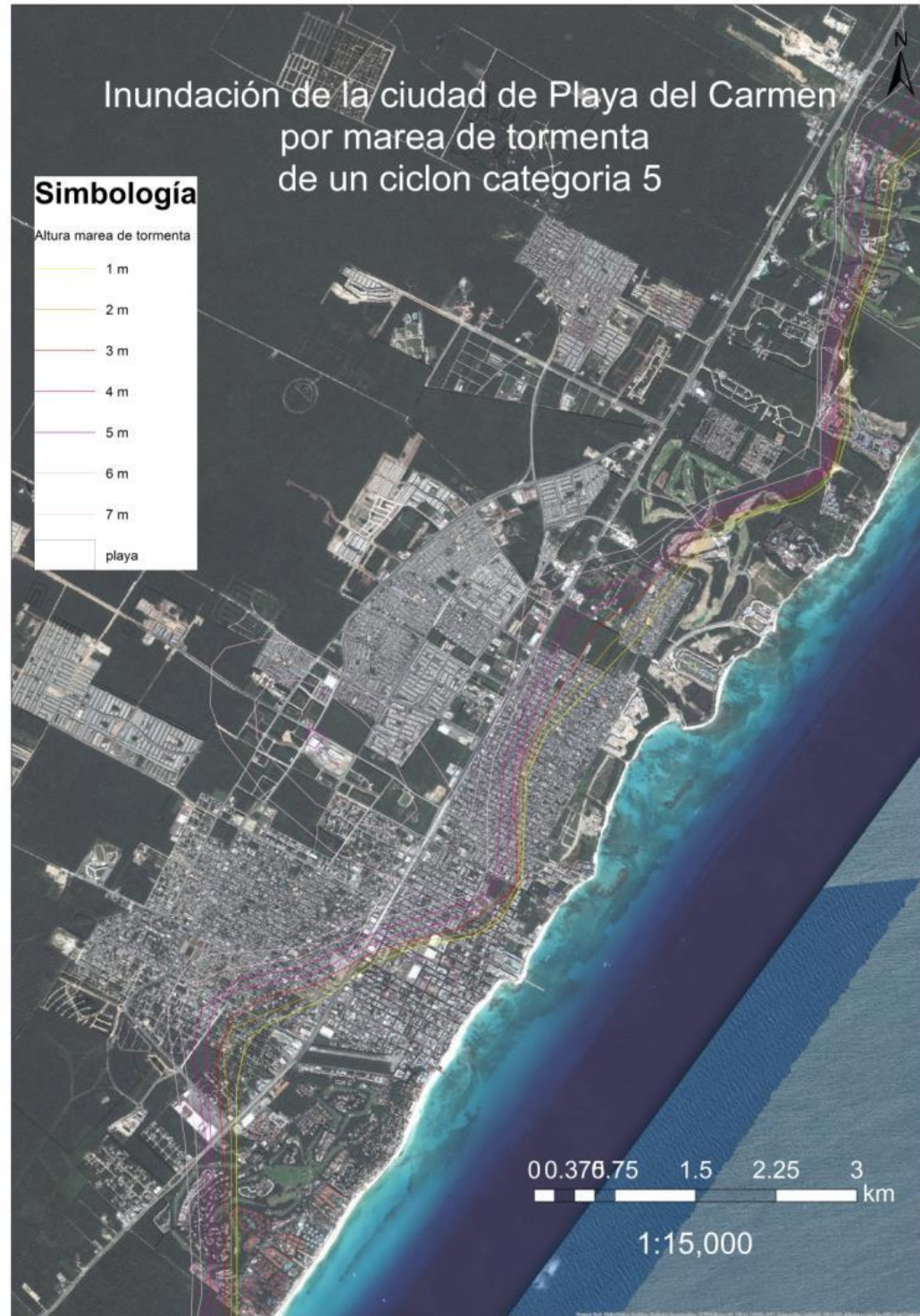
Mapa 30. Afectación por marea de tormenta en Playa del Carmen, ciclón tropical categoría 2.



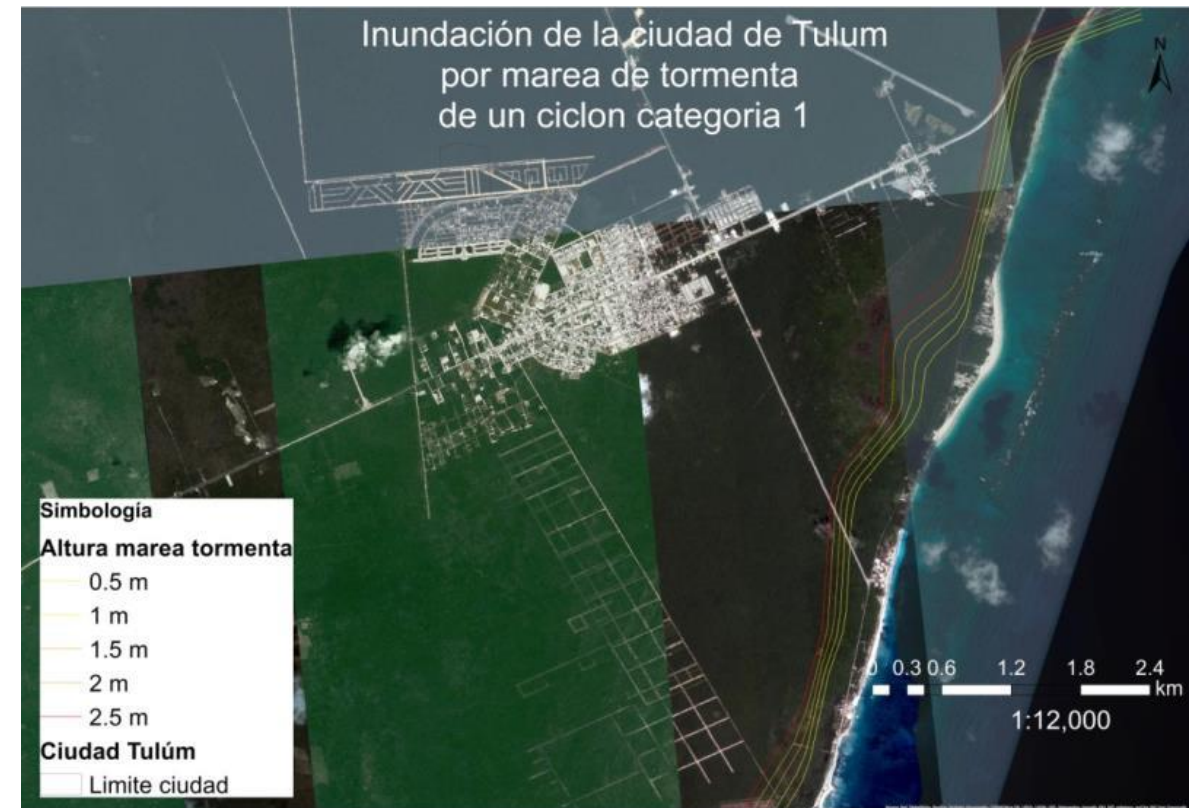
Mapa 31. Afectación por marea de tormenta en Playa del Carmen, ciclón tropical categoría 3.



Mapa 32. Afectación por marea de tormenta en Playa del Carmen, ciclón tropical categoría 4.



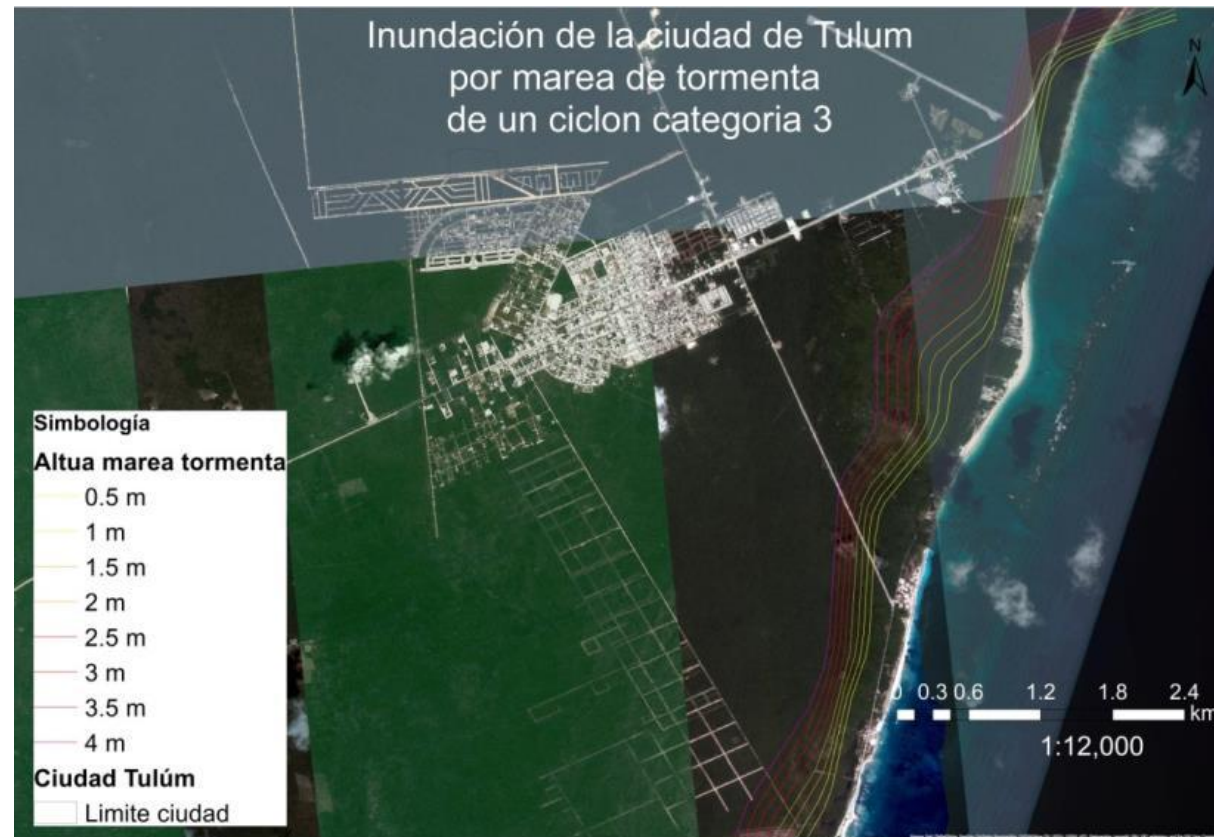
Mapa 33. Afectación por marea de tormenta en Playa del Carmen, ciclón tropical categoría 5.



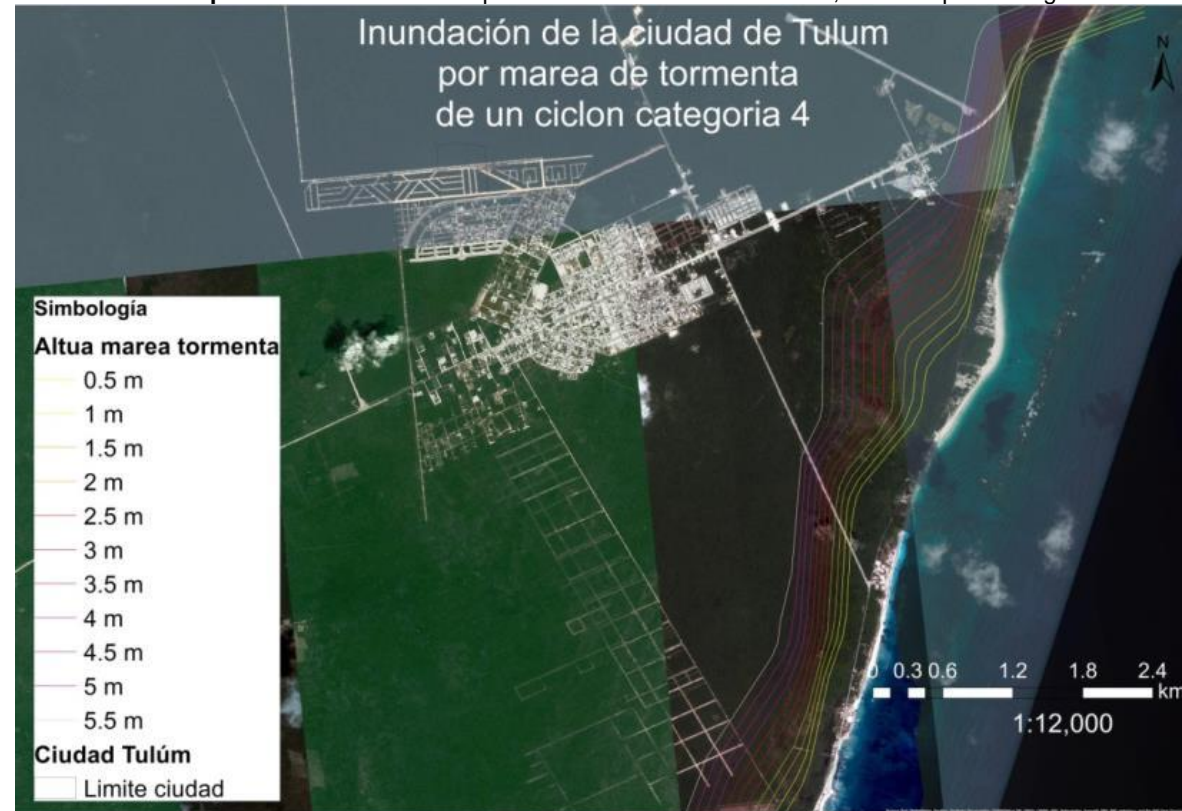
Mapa 34. Afectación por marea de tormenta en Tulum, ciclón tropical categoría 1.



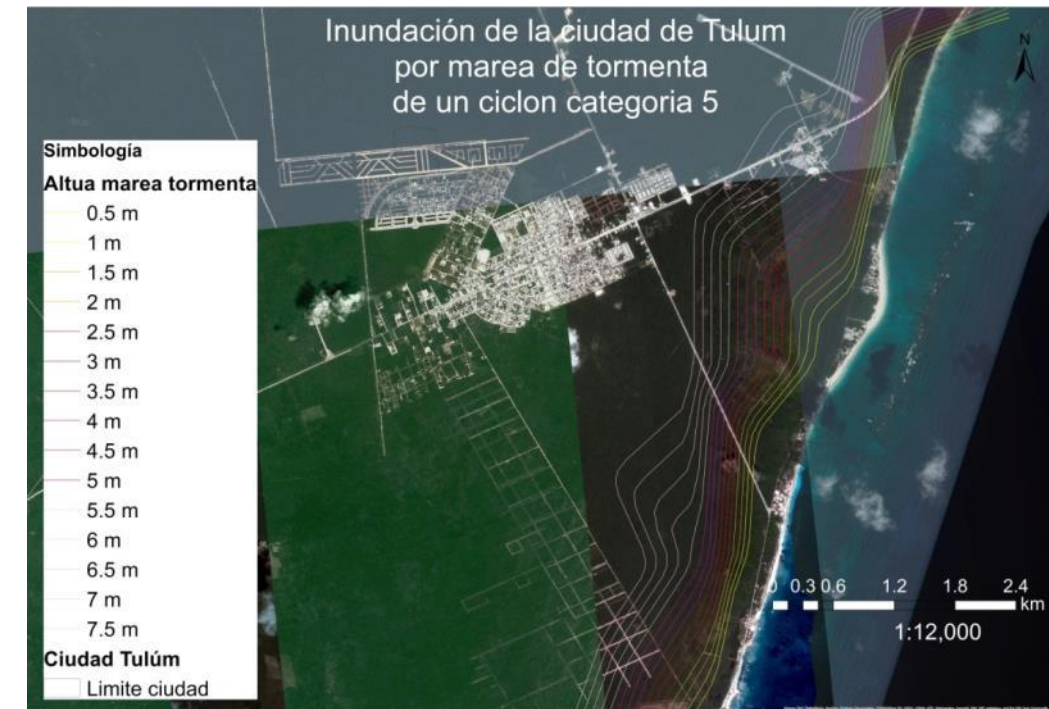
Mapa 35. Afectación por marea de tormenta en Tulum, ciclón tropical categoría 2.



Mapa 36. Afectación por marea de tormenta en Tulum, ciclón tropical categoría 3.

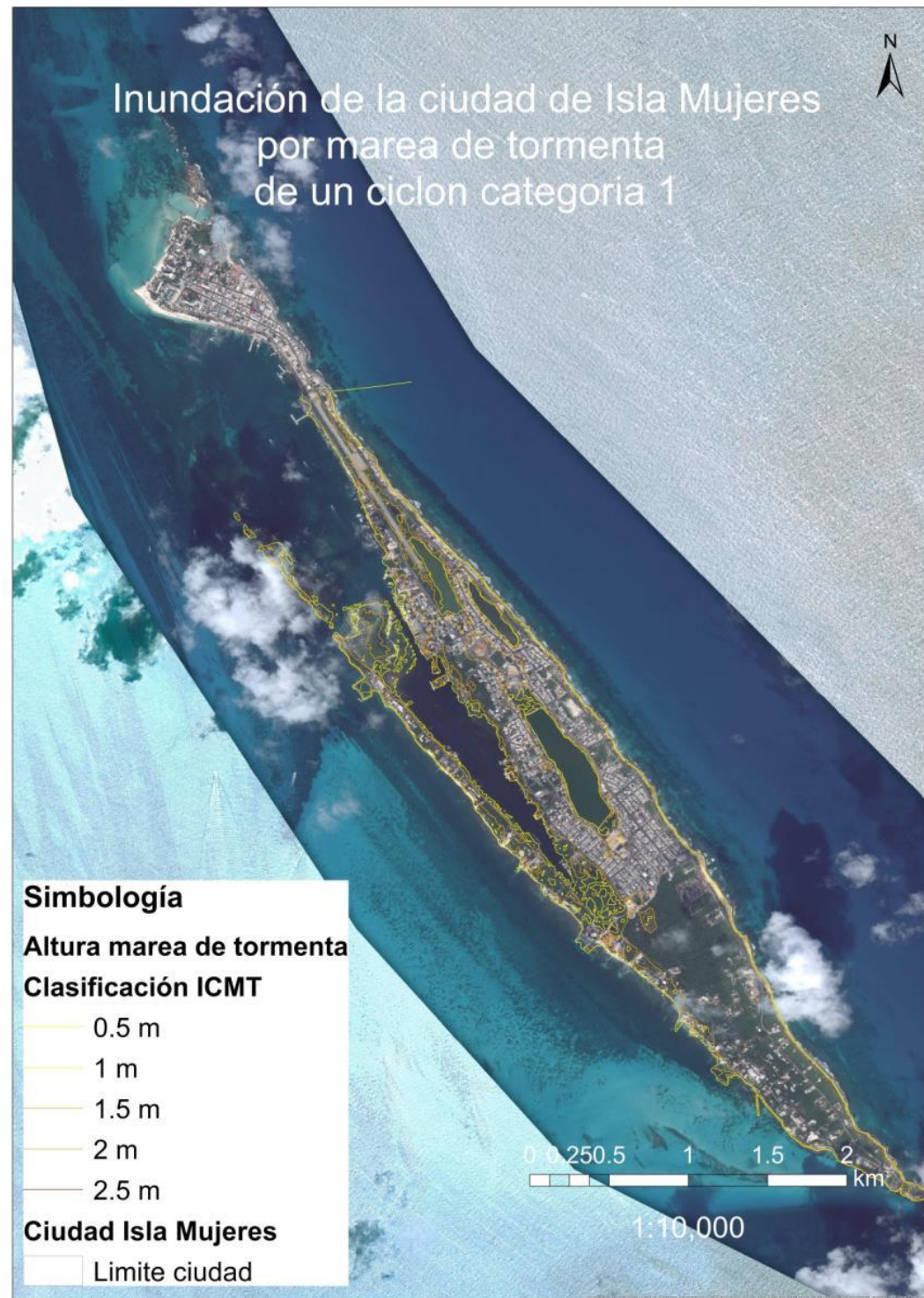


Mapa 37. Afectación por marea de tormenta en Tulum, ciclón tropical categoría 4.

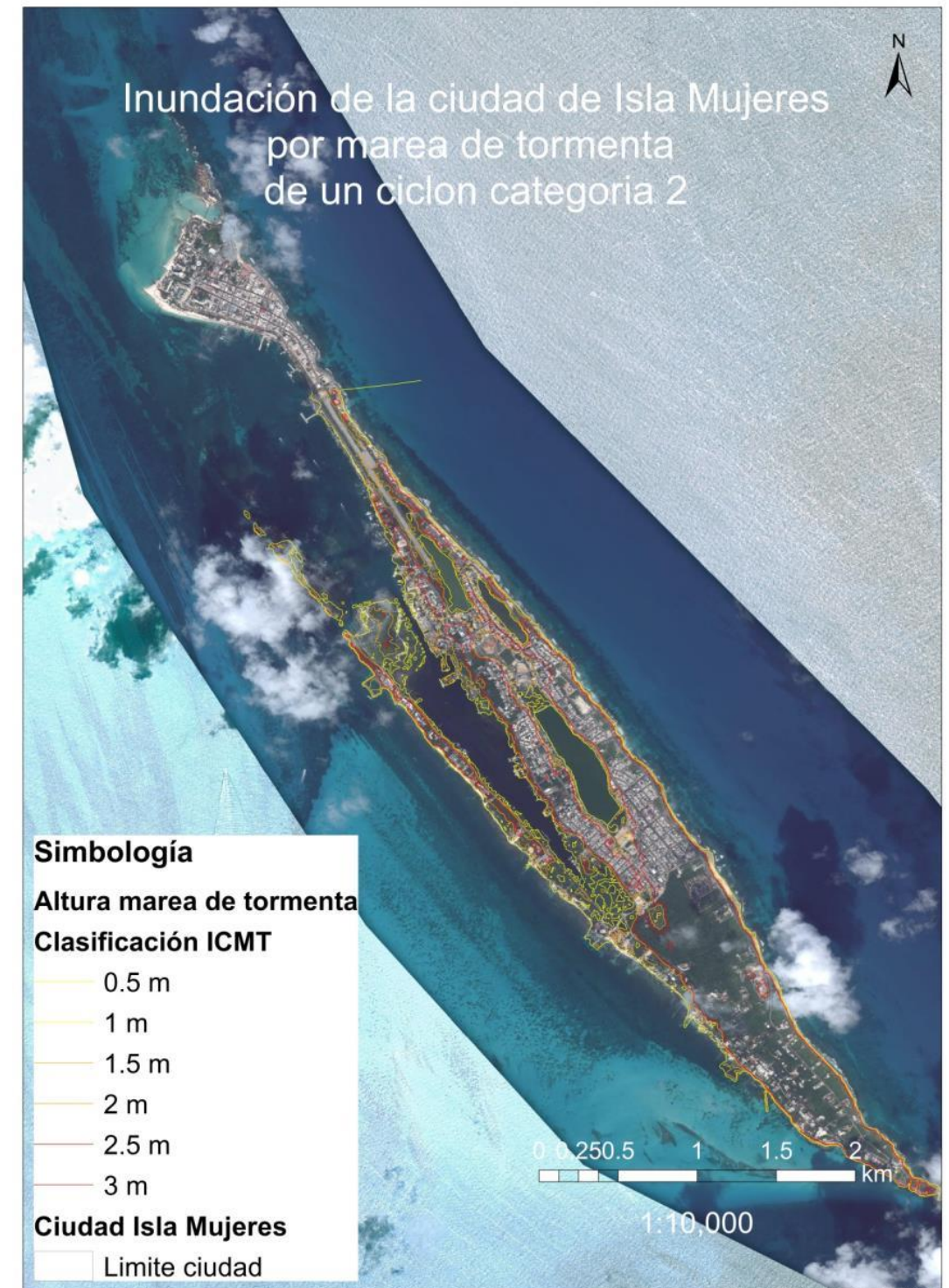


Mapa 38. Afectación por marea de tormenta en Tulum, ciclón tropical categoría 5.

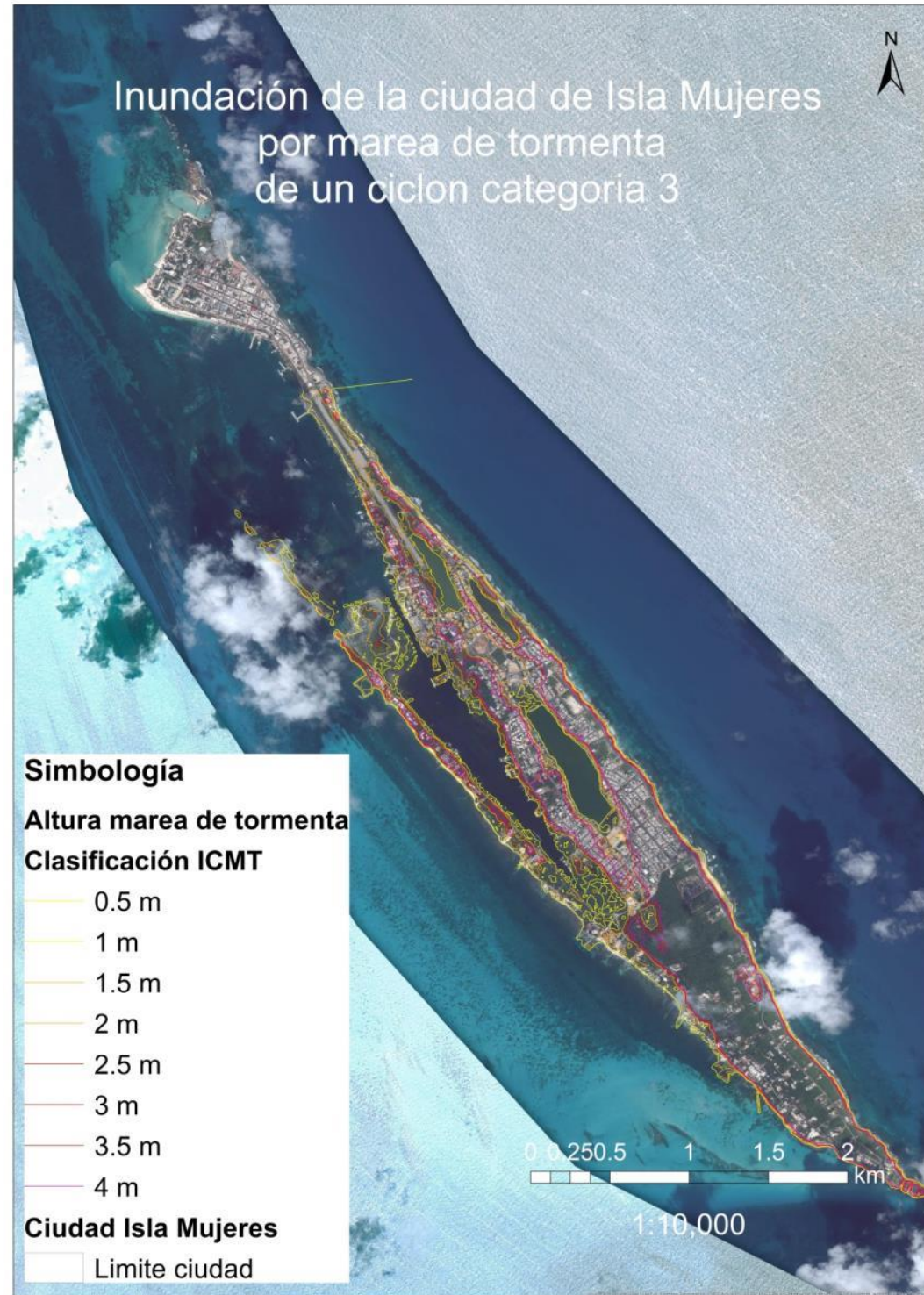
➔ Ciudad Isla Mujeres



Mapa 39. Afectación por marea de tormenta en Isla Mujeres, ciclón tropical categoría 1.



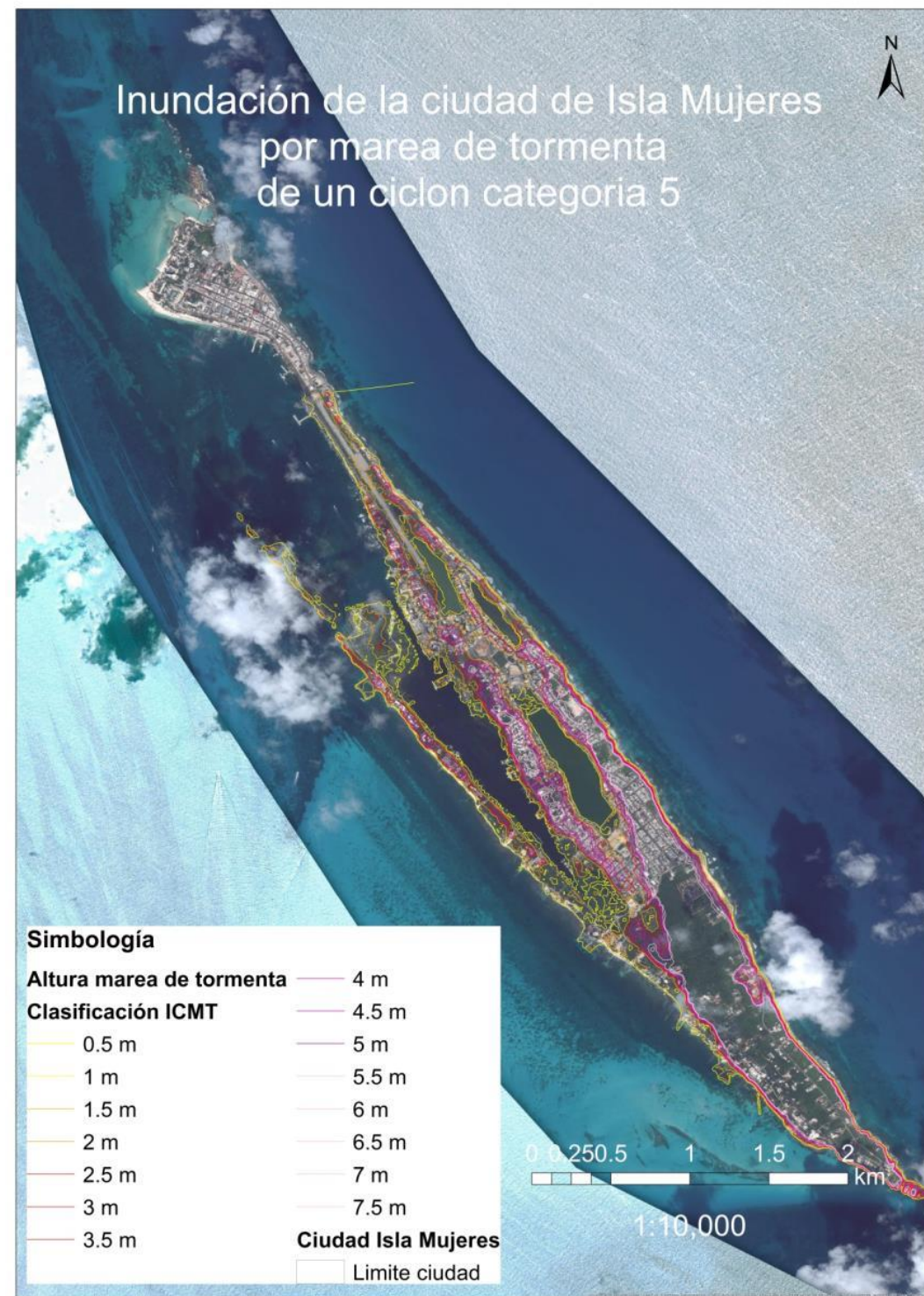
Mapa 40. Afectación por marea de tormenta en Isla Mujeres, ciclón tropical categoría 2.



Mapa 41. Afectación por marea de tormenta en Isla Mujeres, ciclón tropical categoría 3.



Mapa 42. Afectación por marea de tormenta en Isla Mujeres, ciclón tropical categoría 4.



Afectación por marea de tormenta en Isla Mujeres, ciclón tropical categoría 5.

En los mapas se observa que la altura máxima de la marea de tormenta para las ciudades de interés es de 7.5 m, de igual forma se aprecia que para los ciclones de categoría 1 a categoría 4, la marea de tormenta va subiendo de metro en metro,

pero cuando el ciclón es de categoría 5 la altura de marea de tormenta sube 2.5 m.

La afectación máxima ocurre cuando el ciclón es categoría 5, en la tabla 3 podemos ver las afectaciones máximas por ciudad.

Tabla 58. Distancias máximas de afectación por ciudad.

Ciudad de interés	Distancia máxima de afectación
Cancún	10,181 metros
Chetumal	1,540 metros
Cozumel	2,245 metros
Isla Mujeres	1,043 metros
Playa del Carmen	4,006 metros
Tulum	1,964 metros

La ciudad que más afectación presenta es la ciudad de Isla Mujeres a pesar de que la distancia de la marea de tormenta es menor a otras ciudades, pero esa afectación es completa para toda la isla, por lo que es conveniente que en caso de un ciclón categoría 5 se desaloje la isla. La ciudad de Cancún presenta una distancia de afectación muy extensa y esto se debe a que la topografía de la ciudad es relativamente plana con respecto al nivel del mar, por lo que es conveniente tener presente las zonas a desalojar en caso de ciclón tropical categoría 5. La ciudad que menos afectación tiene es Tulum, y como se observa en los mapas de peligro por marea de tormenta, la inundación no afecta a la ciudad, esto se debe al desnivel que existe entre Tulum y el mar.

Las ciudades de Chetumal, Playa del Carmen y Cozumel presentan una afectación relativamente igual con respecto al porcentaje de la ciudad afectada, la afectación en dichas ciudades ocurre solo en las zonas bajas, pero es importante tenerlos en cuenta en caso de evacuación.

4.2.5 Vulnerabilidad

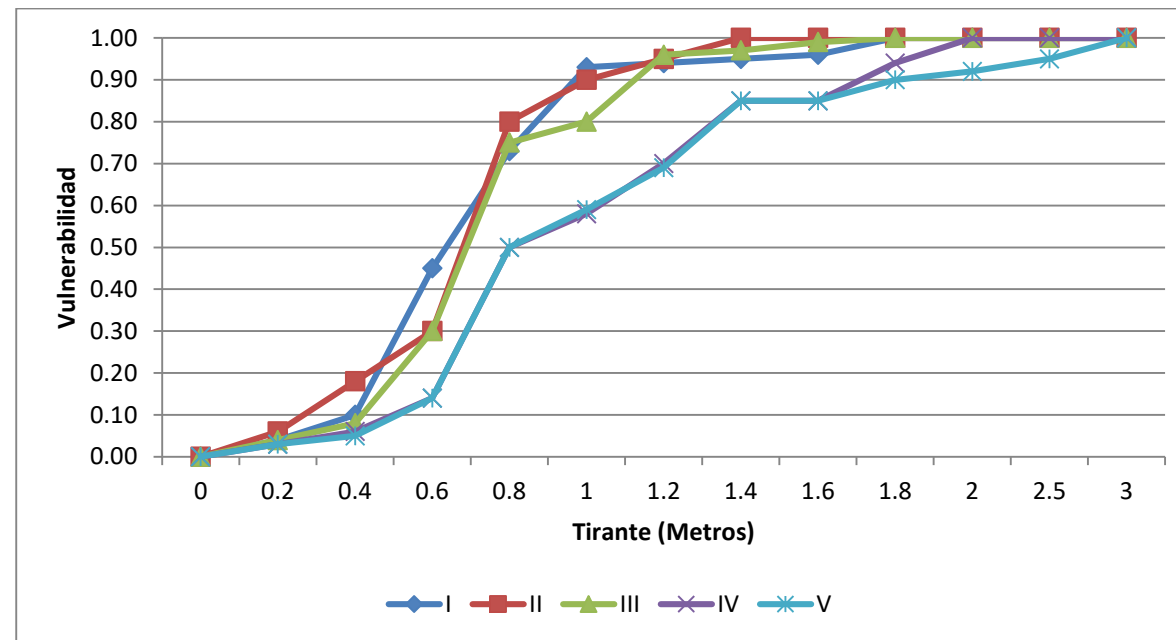
La vulnerabilidad física de la vivienda ante el fenómeno de marea de tormenta, se basó en la calculada para inundación pluvial. Si bien el efecto del aumento del nivel del mar ocasiona afectaciones distintas en la infraestructura ubicada en la primera línea de costa, debido a la fuerza con que impacta el oleaje a las estructuras, para el resto de las viviendas el mayor riesgo se asocia al aumento del nivel del agua, es decir a la altura que alcanzó la inundación costera. Derivado de lo anterior, y con base en la tipología de vivienda explicada en el apartado correspondiente a inundaciones urbanas, se elaboraron los mapas de riesgo para las seis cabeceras municipales costeras del estado (Cancún, Cozumel, Chetumal, Isla Mujeres, Playa del Carmen y Tulum). Las funciones de vulnerabilidad para los cinco diferentes tipos de vivienda fueron las mismas que se emplearon en el apartado de inundaciones y que se muestran en la siguiente tabla y gráfica⁷¹.

Tabla 59. Funciones de vulnerabilidad física de la vivienda ante marea de tormenta.

Tirante	Tipo de vivienda				
	I	II	III	IV	V
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.2	0.04	0.06	0.04	0.03	0.03
0.4	0.10	0.18	0.08	0.06	0.05
0.6	0.45	0.30	0.30	0.14	0.14

⁷¹ Para consultar los mapas y un análisis más profundo de la vulnerabilidad física se sugiere consultar el apartado 3.2.2.5, correspondiente a vulnerabilidad física ante inundaciones en ciudades.

0.8	0.73	0.80	0.75	0.50	0.50
1	0.93	0.90	0.80	0.58	0.59
1.2	0.94	0.95	0.96	0.70	0.69
1.4	0.95	1.00	0.97	0.85	0.85
1.6	0.96	1.00	0.99	0.85	0.85
1.8	1.00	1.00	1.00	0.94	0.90
2	1.00	1.00	1.00	1.00	0.92
2.5	1.00	1.00	1.00	1.00	0.95
3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00



Gráfica 50. Funciones de vulnerabilidad según cada tipo de vivienda.

4.2.6 Riesgo

El cálculo de riesgo por marea de tormenta se realizó con base en la información de peligro, de vulnerabilidad de las viviendas y del valor estimado del sistema expuesto (Menaje de casa).

Para lograrlo fue necesario calcular la elevación que alcanzaría el nivel del mar para cada categoría de ciclón tropical y para cada ciudad estudiada. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 60. Amplitud máxima de la marea de tormenta para cada categoría de ciclón tropical (Metros).

Ciudad	Categoría de ciclón tropical				
	H1	H2	H3	H4	H5
Cancún	2	3	4	5	7
Playa del Carmen	2	3	4	5	7
Cozumel	2	3	4	5	7
Tulum	2.5	3	4	5.5	7.5
Isla	2.5	3	4	5.5	7.5
Chetumal	2.5	3.5	4	5.5	7.5

Fuente: Elaboración propia con información de Cenapred.

Una vez obtenida la amplitud máxima de la marea de tormenta se identificaron las áreas de inundación y la altura

que alcanzaría la misma en cada una de las manzanas que conforman las ciudades analizadas. Posteriormente se utilizaron los mapas de vulnerabilidad y sus correspondientes funciones para estimar la proporción de daños asociados a cada tipo de vivienda según la altura de la inundación.

El siguiente paso fue calcular el valor del sistema expuesto, es decir los bienes afectables que se encuentran al interior de las viviendas (Menaje de casa), y cruzarlos con las funciones de vulnerabilidad para obtener la proporción de daños para cada categoría de ciclón tropical en las diferentes ciudades. Los valores asignados para los diferentes tipos de vivienda se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 61. Valor asignado para cada tipo de vivienda.

Tipo	Pesos
I	17,305
II	69,220
III	69,220
IV	415,320
V	622,980

Fuente: Elaboración propia con información de CENAPRED e INEGI.

La probabilidad de ocurrencia, se calculó con base en los periodos de retorno de cada categoría. Cabe señalar que mientras más amplio sea éste, la probabilidad de ocurrencia disminuye considerablemente, lo que se refleja directamente en el riesgo.

Tabla 62. Periodo de retorno

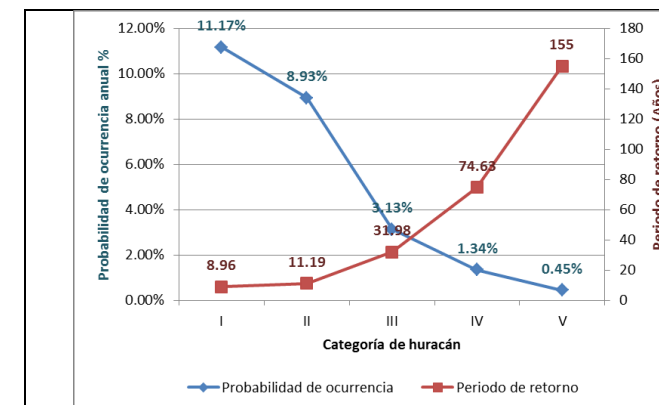
Ciudad	Periodo de retorno (Años)				
	H1	H2	H3	H4	H5
Cancún	8.96	11.19	31.98	74.63	155.00
Playa del Carmen	16.09	22.53	80.45	155.00	155.00
Cozumel	10.70	13.55	50.81	101.61	155.00
Tulum	16.09	22.53	80.45	155.00	155.00
Isla	10.33	13.91	45.21	90.42	155.00
Chetumal	27.54	41.75	117.66	155.00	155.00

Fuente: Elaboración propia

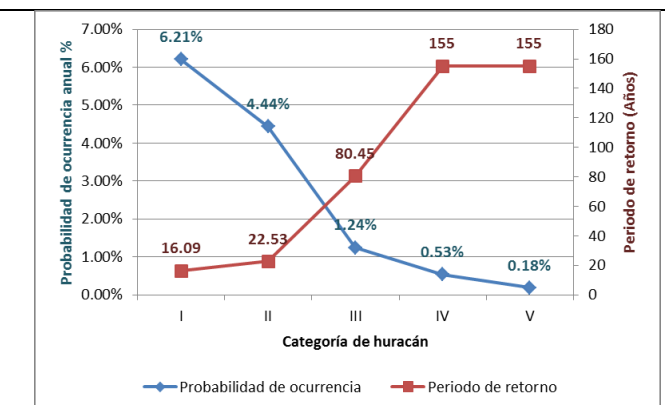
Tabla 63. Probabilidad de ocurrencia anual

Ciudad	Probabilidad de ocurrencia anual				
	H1	H2	H3	H4	H5
Cancún	0.1117	0.0893	0.0313	0.0134	0.0045
Playa del Carmen	0.0621	0.0444	0.0124	0.0053	0.0018
Cozumel	0.0935	0.0738	0.0197	0.0098	0.0025
Tulum	0.0621	0.0444	0.0124	0.0053	0.0018
Isla	0.0968	0.0719	0.0221	0.0111	0.0055
Chetumal	0.0363	0.024	0.0085	0.0023	0.0008

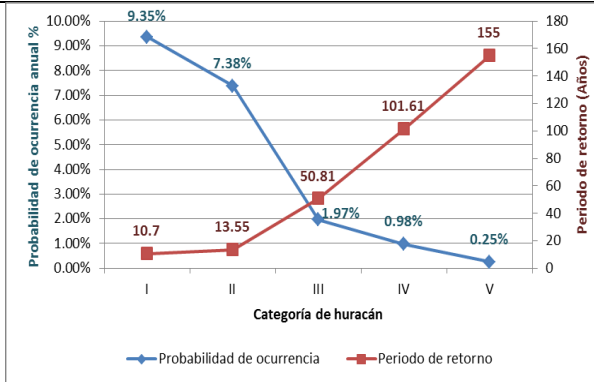
Fuente: Elaboración propia



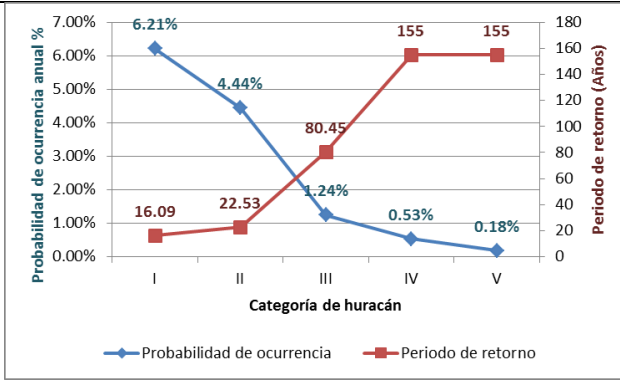
Gráfica 51. Periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia anual según categoría de huracán para la ciudad de Cancún



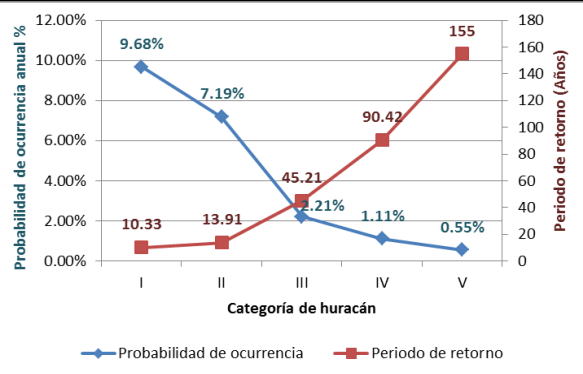
Gráfica 52. Periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia anual según categoría de huracán para la ciudad de Playa del Carmen



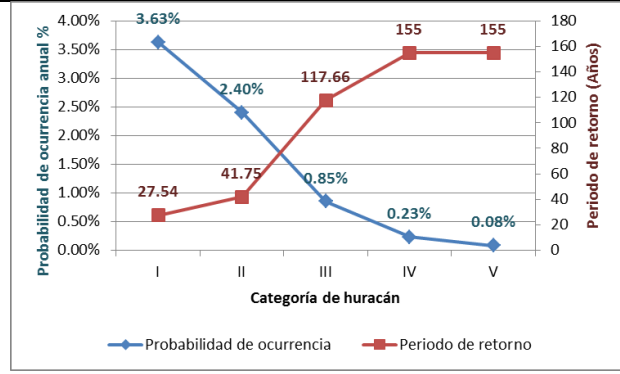
Gráfica 53. Periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia anual según categoría de huracán para la ciudad de Cozumel



Gráfica 54. Periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia anual según categoría de huracán para la ciudad de Tulum



Gráfica 55. Periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia anual según categoría de huracán para la ciudad de Isla Mujeres



Gráfica 56. Periodo de retorno y probabilidad de ocurrencia anual según categoría de huracán para la ciudad de Chetumal

Finalmente, el riesgo por marea de tormenta se calculó con base en la siguiente expresión⁷²:

$$R(i) = C P(i) V(i)$$

En donde:

R(i) es el Riesgo para el próximo evento con periodo de retorno "i" en pesos.

C es el costo de la vivienda en función de su tipología en pesos.

P(i) es la probabilidad de ocurrencia del evento con periodo de retorno (i), adimensional.

V(i) es la vulnerabilidad de cada vivienda, adimensional.

Para la representación cartográfica de la información se utilizaron dos escalas diferentes, una para los mapas de daños asociados a cada categoría de huracán, y otra para el nivel de riesgo, mismas que se describen en las siguientes tablas.

Tabla 64. Escala para representación cartográfica de mapas de daños asociados

Valor (Millones de pesos)	Nivel de daños	Color asignado
0.0	Sin daños o infraestructura diferente a vivienda	Grigio
Menos de 2	Muy alto	Oscuro
Entre 2.1 y 5	Alto	Verde
Entre 5.1 y 10	Medio	Amarillo
Entre 10.1 y 20	Bajo	Naranja
Más de 20	Muy bajo	Rojo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 65. Escala para representación de mapas de riesgo

Valor (Pesos)	Nivel de daños	Color asignado
0.0	Sin daños o infraestructura diferente a vivienda	Grigio
Menos de 100 mil	Muy alto	Oscuro
Entre 100 mil y 500 mil	Alto	Verde
Entre 501 mil y 1 millón	Medio	Amarillo
Entre 1.1 y 2 millones	Bajo	Naranja
Más de 2 millones	Muy bajo	Rojo

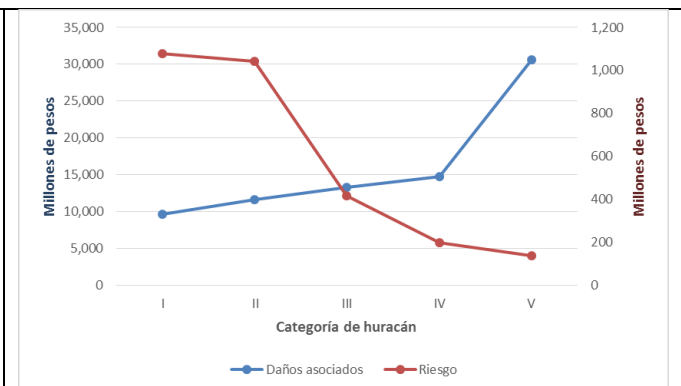
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan los resultados de las ciudades estudiadas.

Cancún

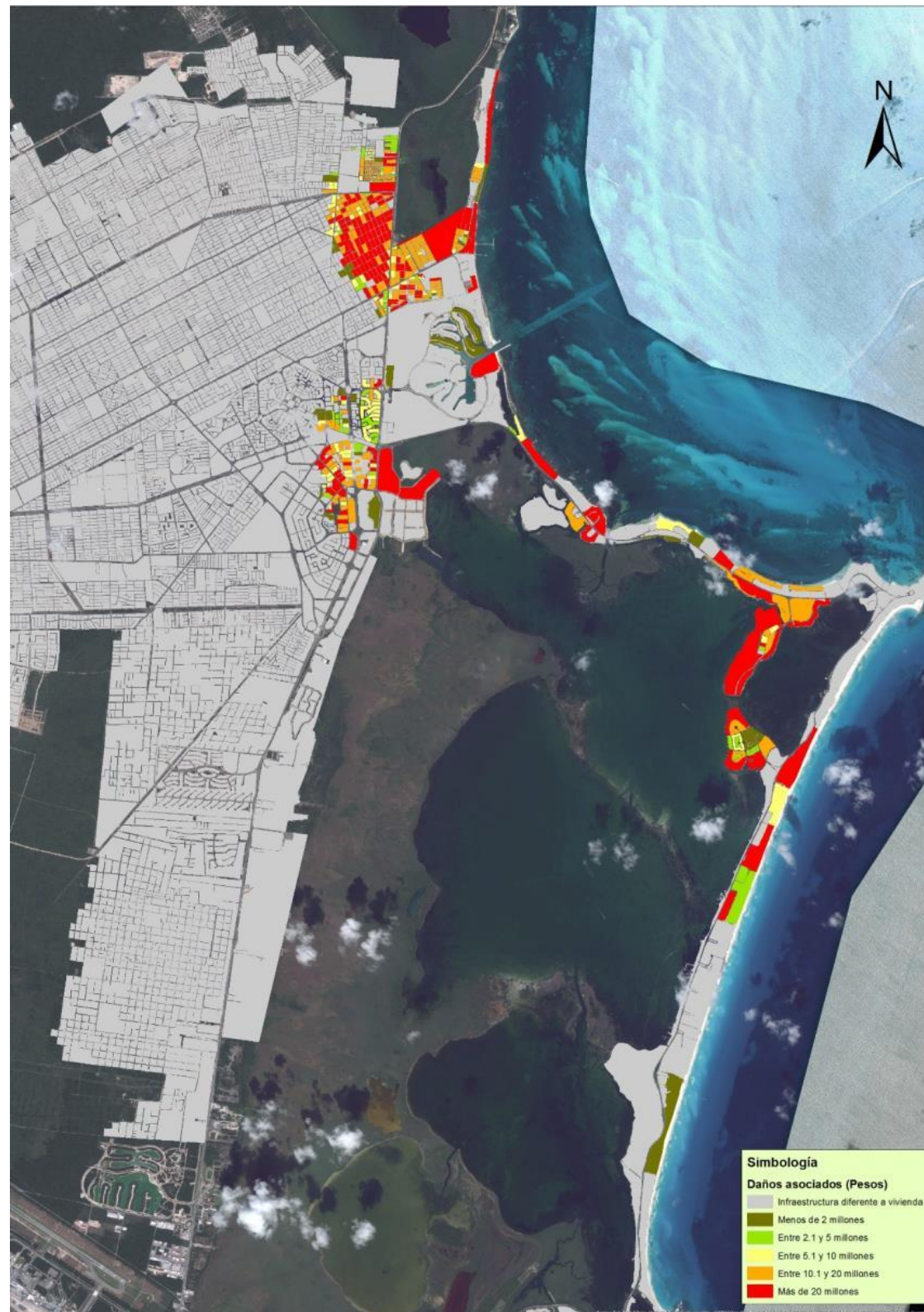
Tabla 66. Análisis de riesgo para la ciudad de Cancún

Categoría de huracán	Elevación máxima de la marea de tormenta (Metros)	Probabilidad de ocurrencia	Daños asociados (Millones de pesos)	Riesgo (Millones de pesos)
I	2	0.1117	9,656	1,079
II	3	0.0893	11,665	1,042
III	4	0.0313	13,258	415
IV	5	0.0134	14,789	198
V	7	0.0045	30,642	138

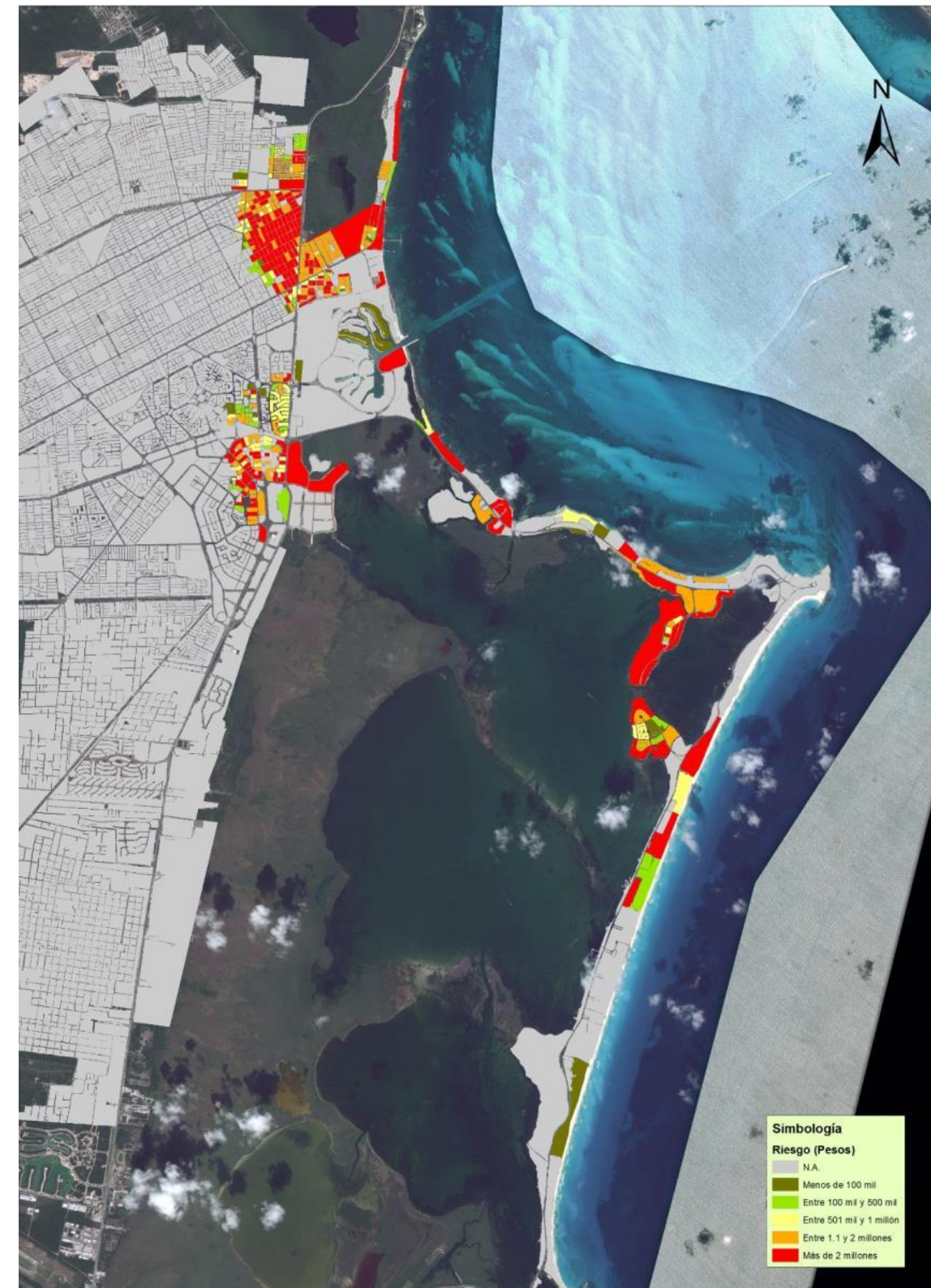


Gráfica 57. Análisis de riesgo según categoría de huracán

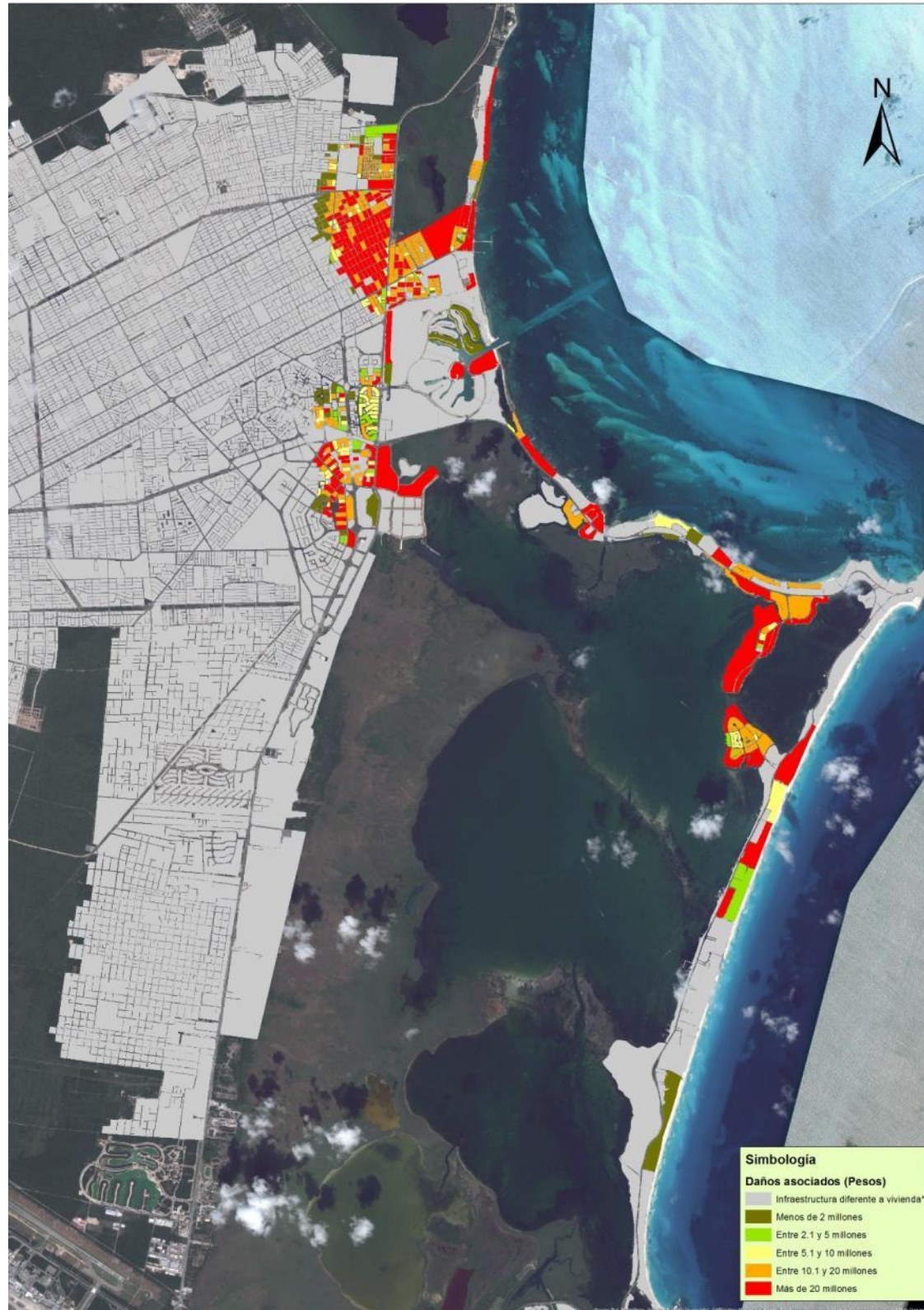
⁷² CENAPRED. Guía metodológica para la elaboración de Atlas estatales y municipales de peligro y riesgo. Fenómenos hidrometeorológicos. p.29



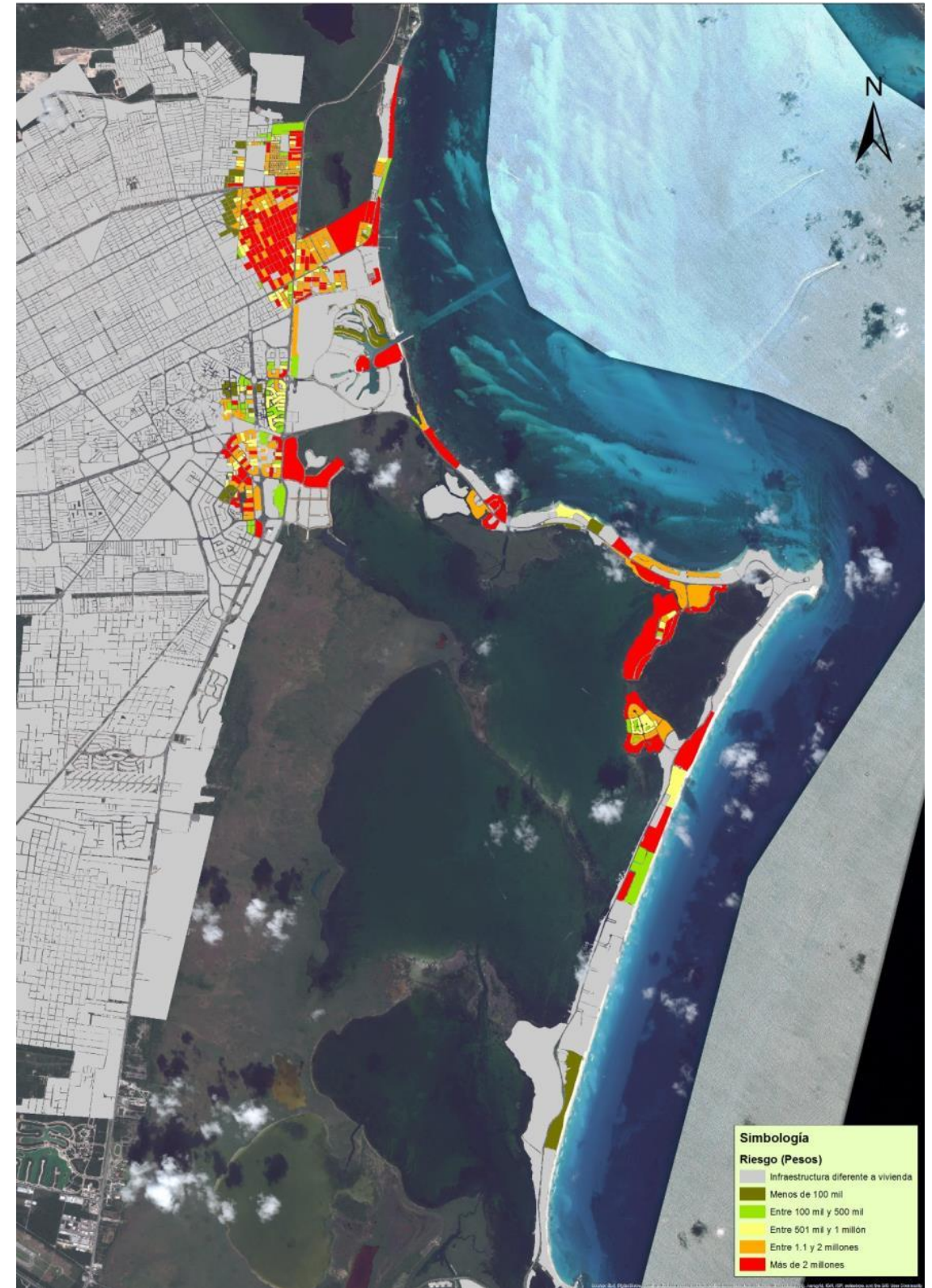
Mapa 43. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría I.



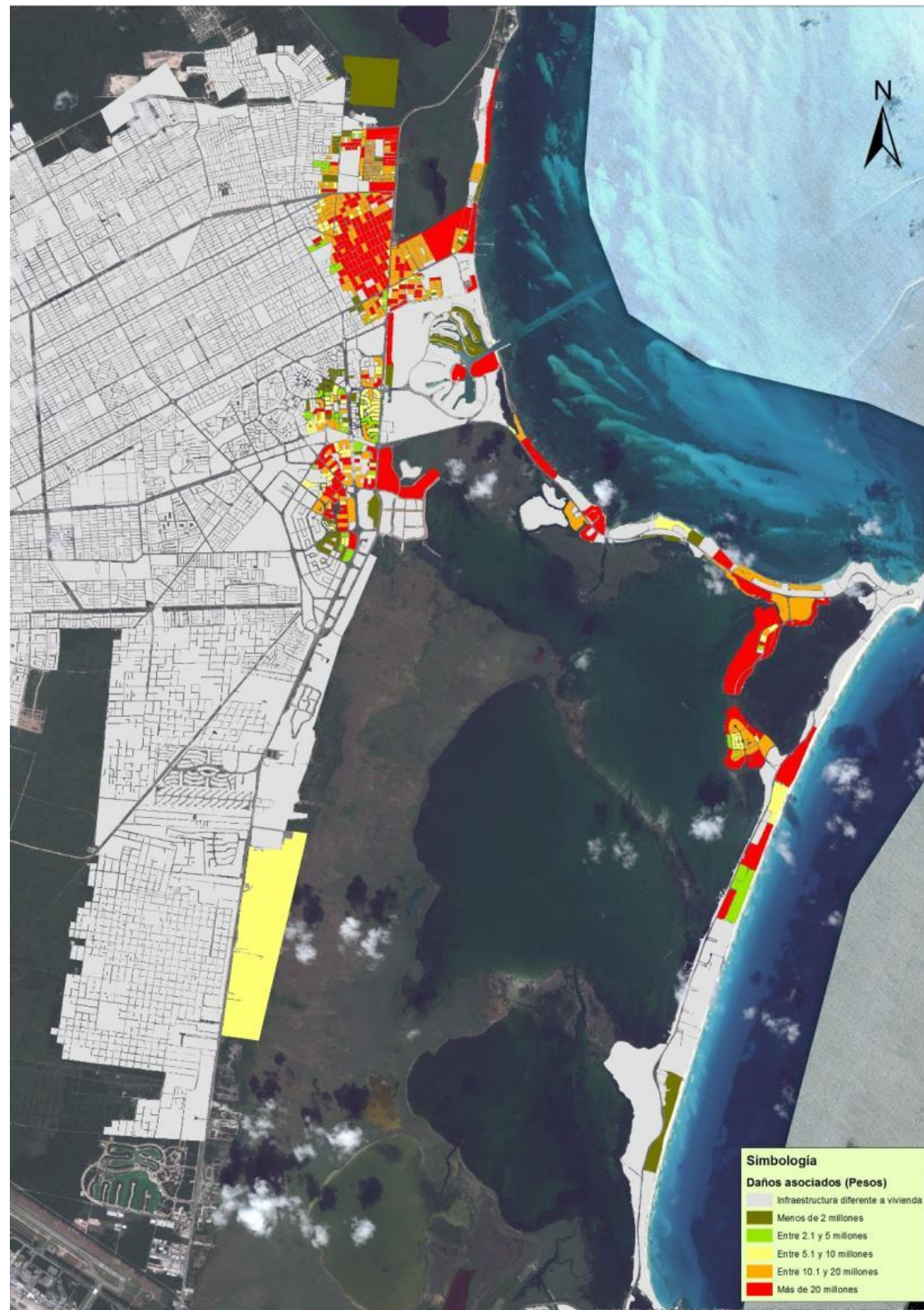
Mapa 44. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría I.



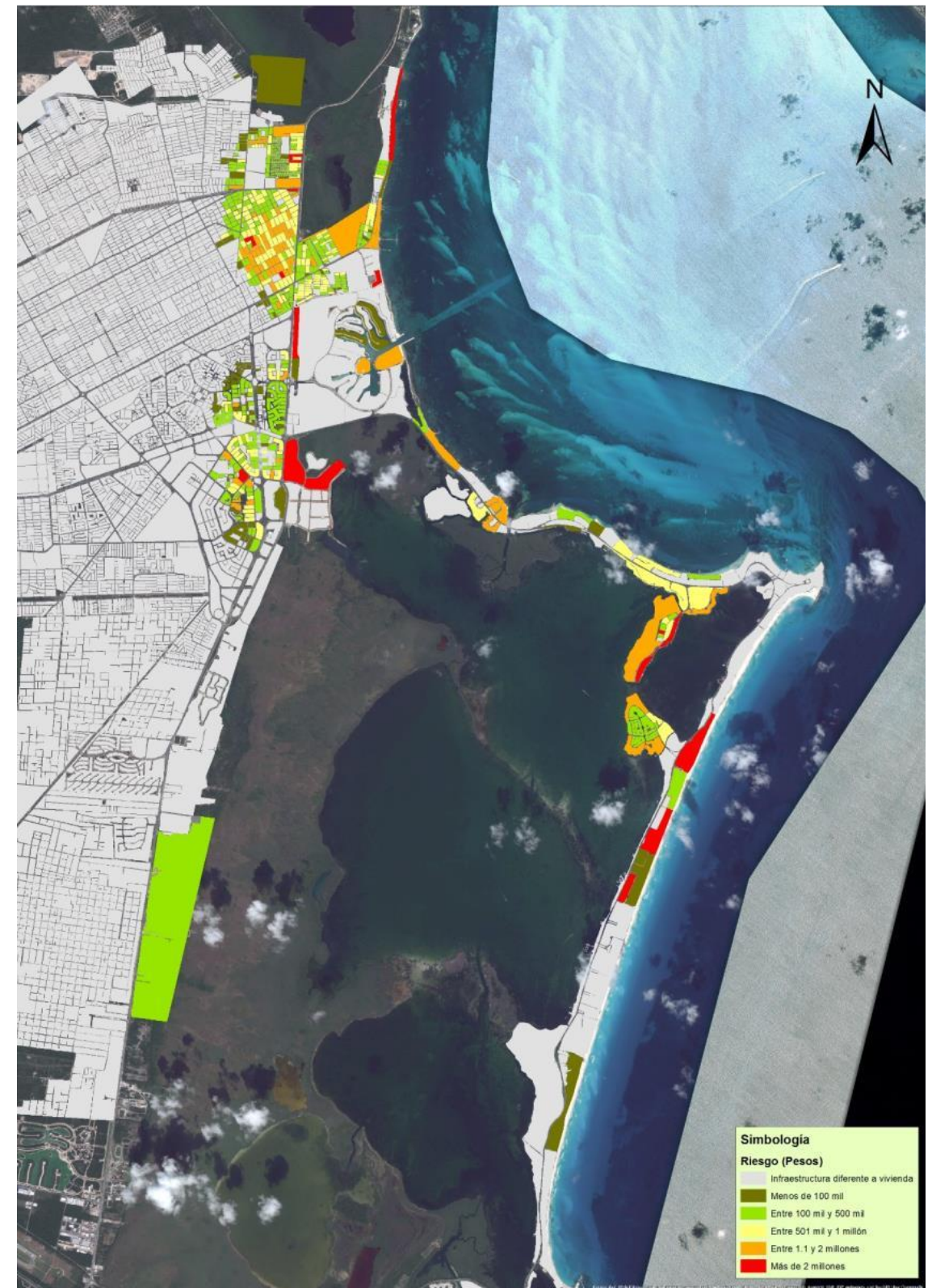
Mapa 45. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría II.



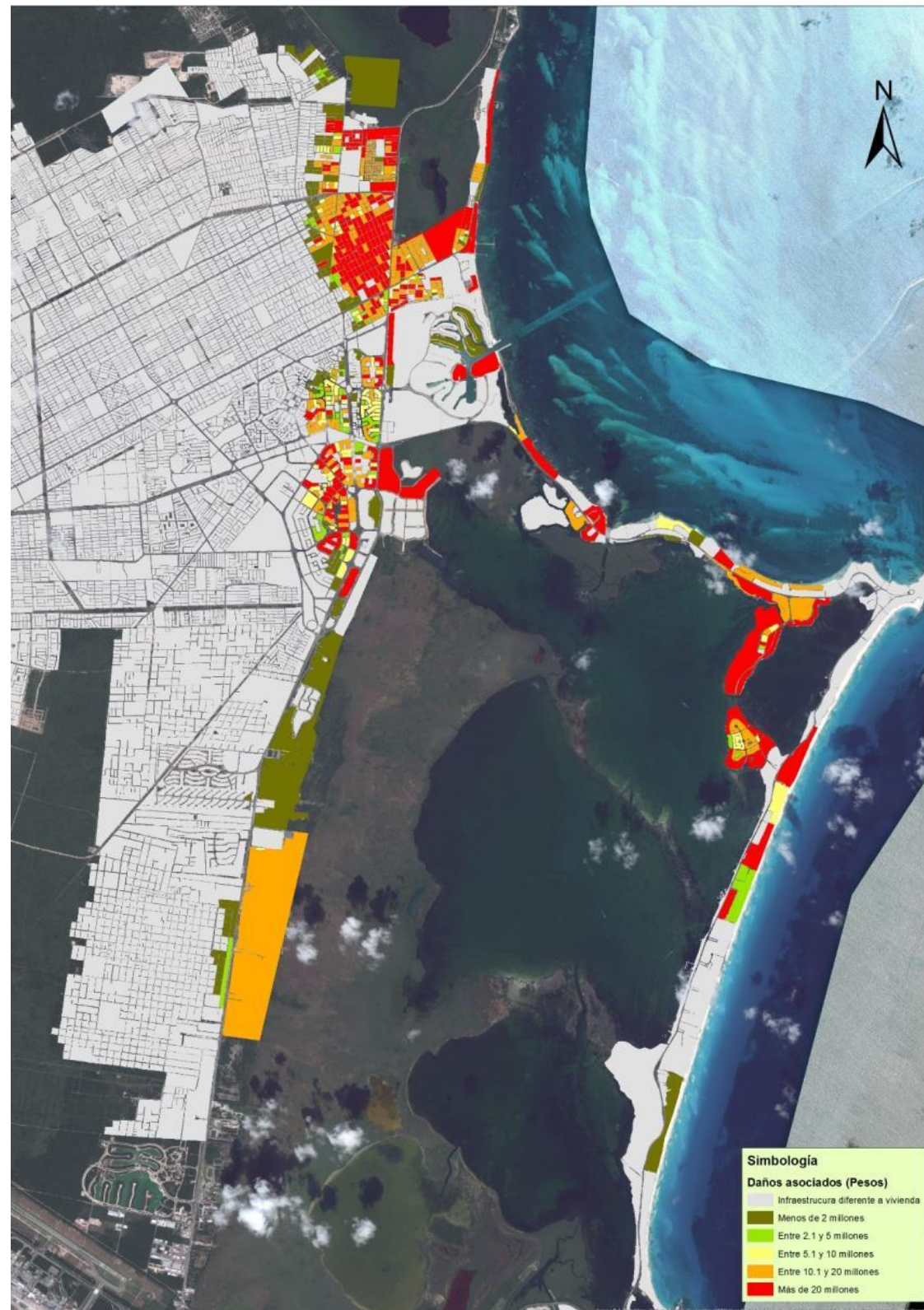
Mapa 46. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría II.



Mapa 47. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría III.



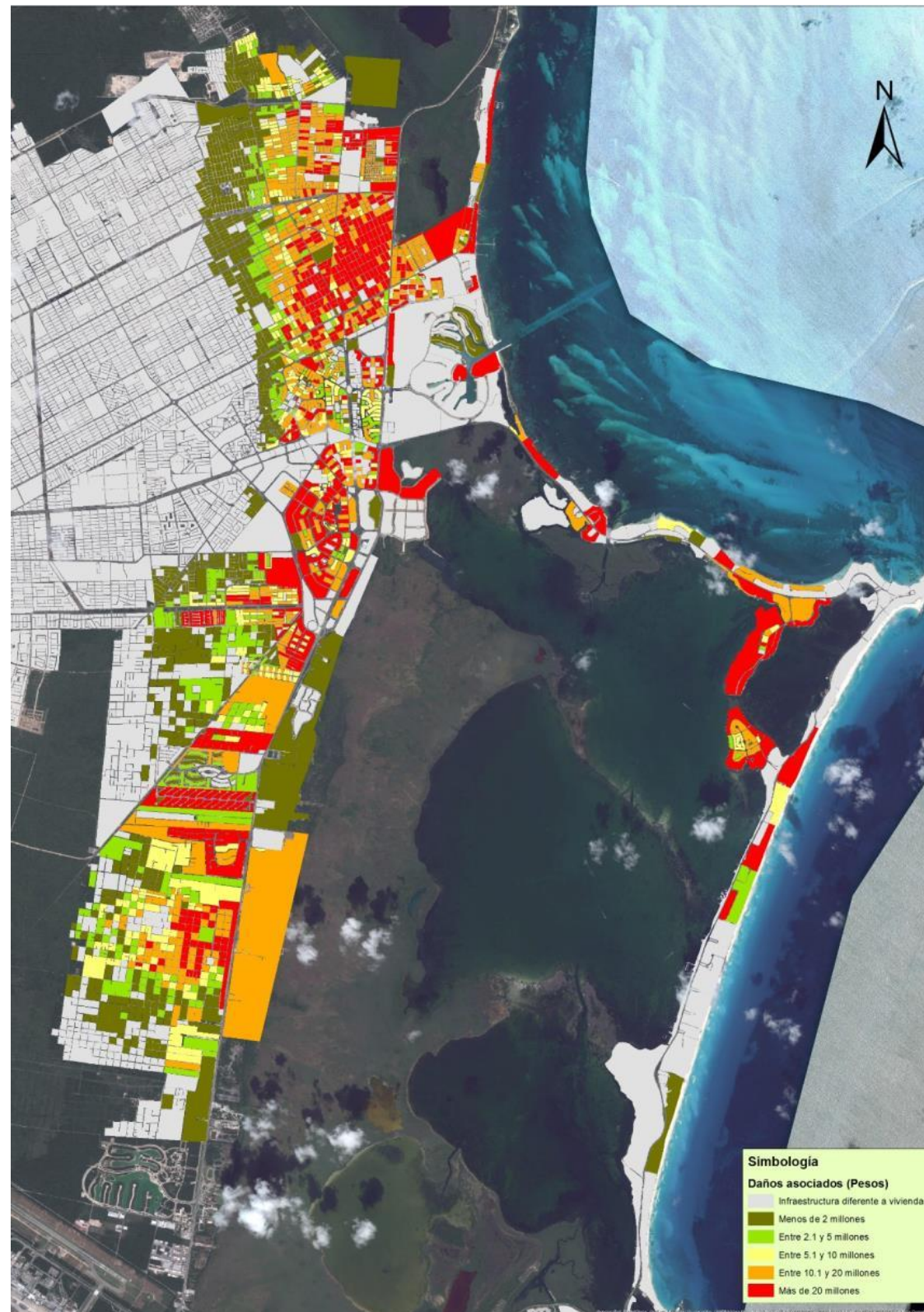
Mapa 48. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría III.



Mapa 49. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría IV.



Mapa 50. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría IV.



Mapa 51. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría V.



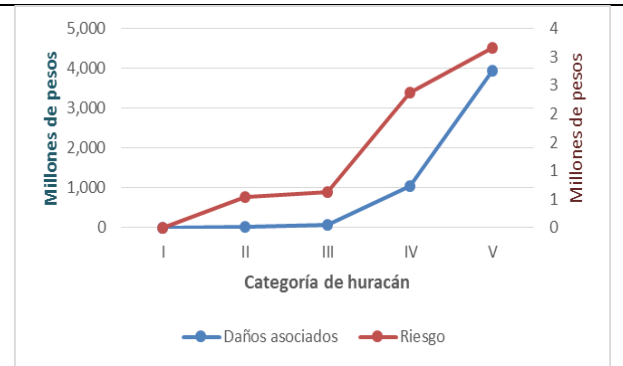
Mapa 52. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría V.

Chetumal

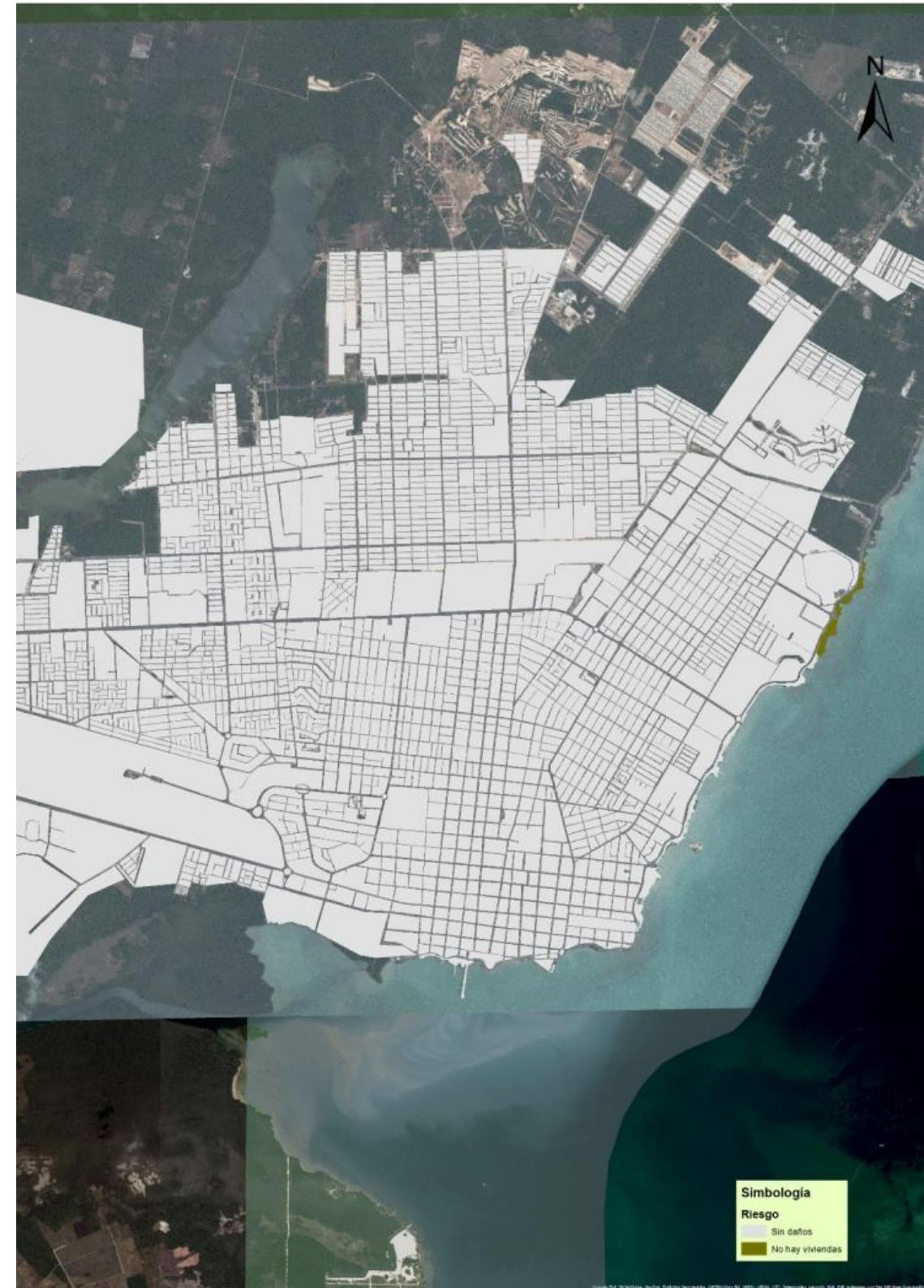
En Chetumal la marea de tormenta provocada por un huracán categoría I únicamente afecta una manzana al Oriente de la ciudad, en la cual no existe ninguna vivienda. Derivado de lo anterior, en el mapa sólo se muestra la manzana afectada en color verde.

Tabla 67. Análisis de riesgo para la ciudad de Chetumal

Categoría de huracán	Elevación máxima de la marea de tormenta (Metros)	Probabilidad de ocurrencia	Daños asociados (Millones de pesos)	Riesgo (Millones de pesos)
I	2.5	0.0363	0	0
II	3.5	0.024	23	0.5
III	4	0.0085	74	0.6
IV	5.5	0.0023	1,033	2.4
V	7.5	0.0008	3,940	3.2



Gráfica 58. Análisis de riesgo según categoría de huracán



Mapa 53. Manzana afectada por la marea de tormenta provocada por un huracán categoría I.



Mapa 54. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría II.



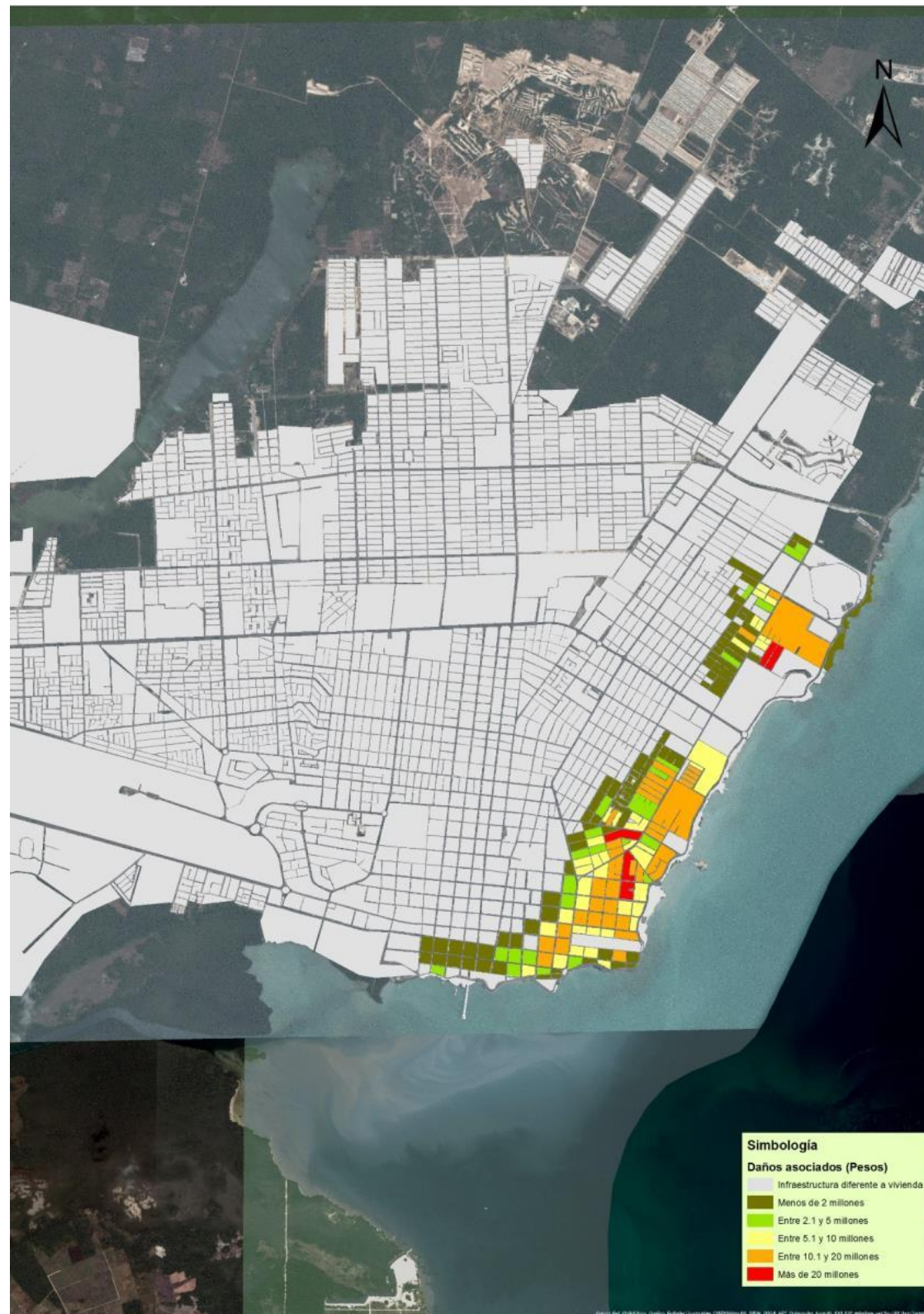
Mapa 55. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría II.



Mapa 56. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría III.



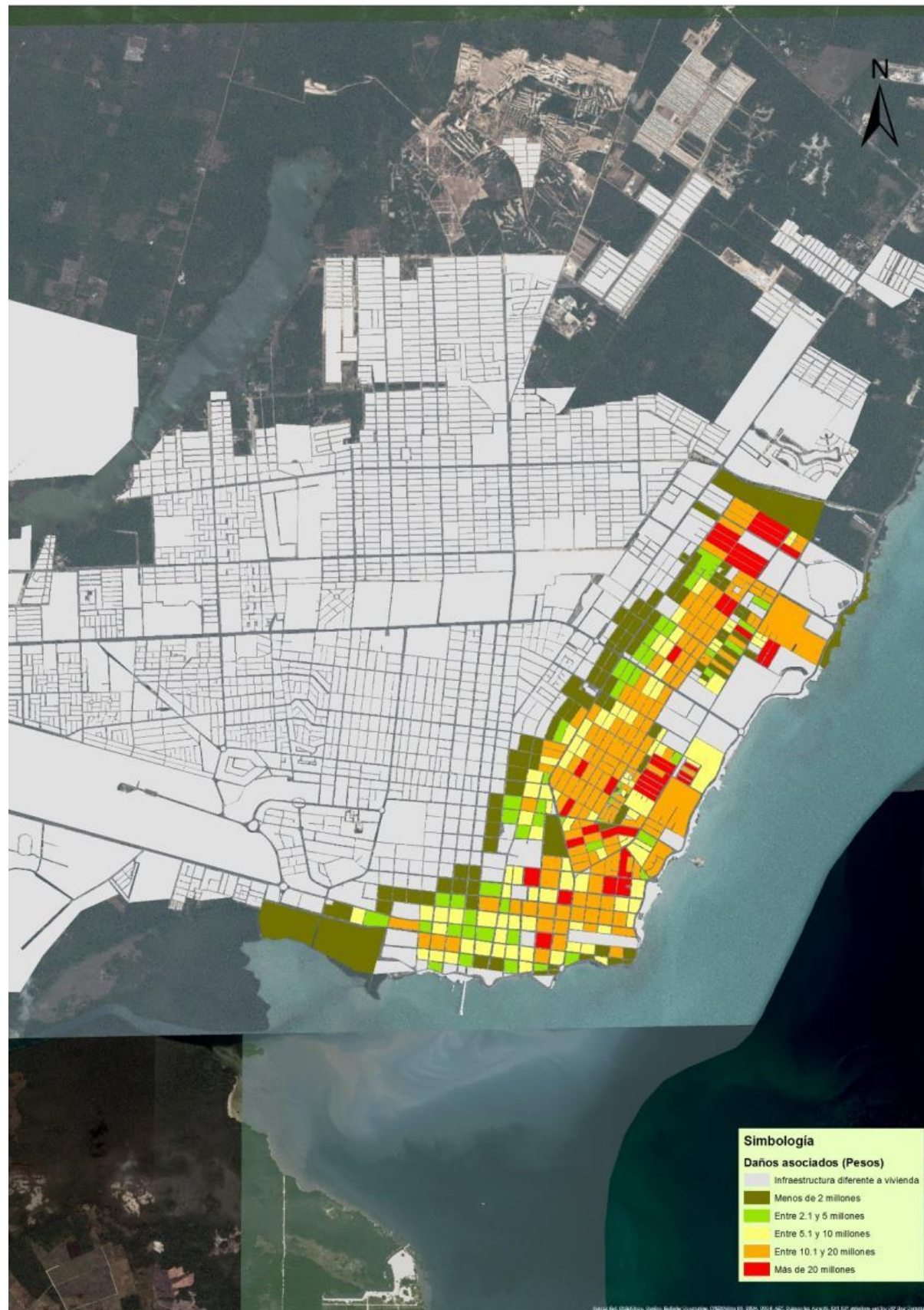
Mapa 57. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría III.



Mapa 58. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría IV.



Mapa 59. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría IV.



Mapa 60. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría V.

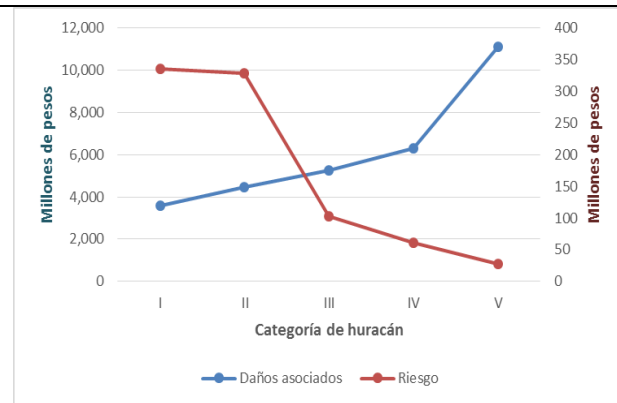


Mapa 61. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría V.

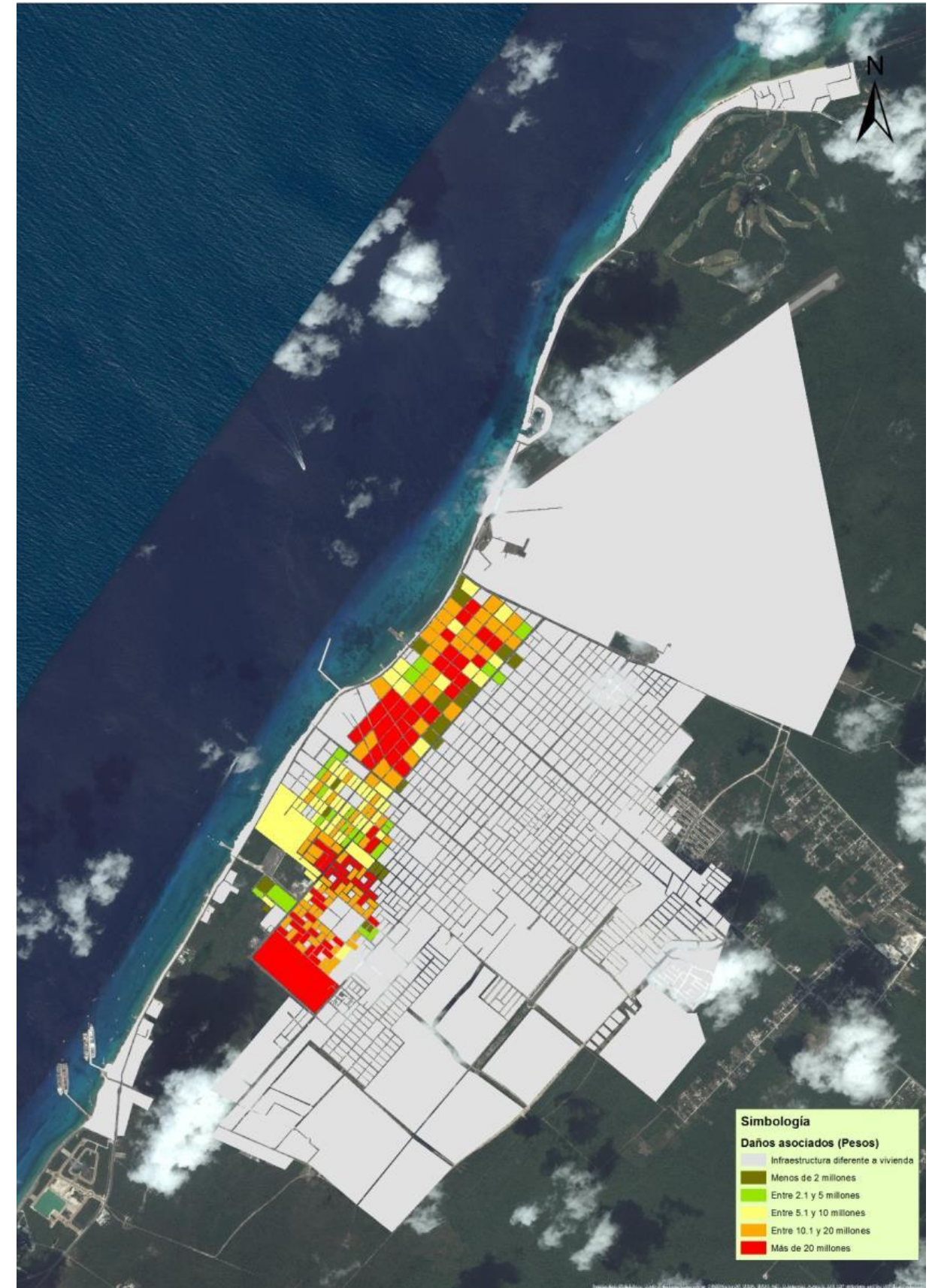
Cozumel

Tabla 68. Análisis de riesgo para la ciudad de Cozumel

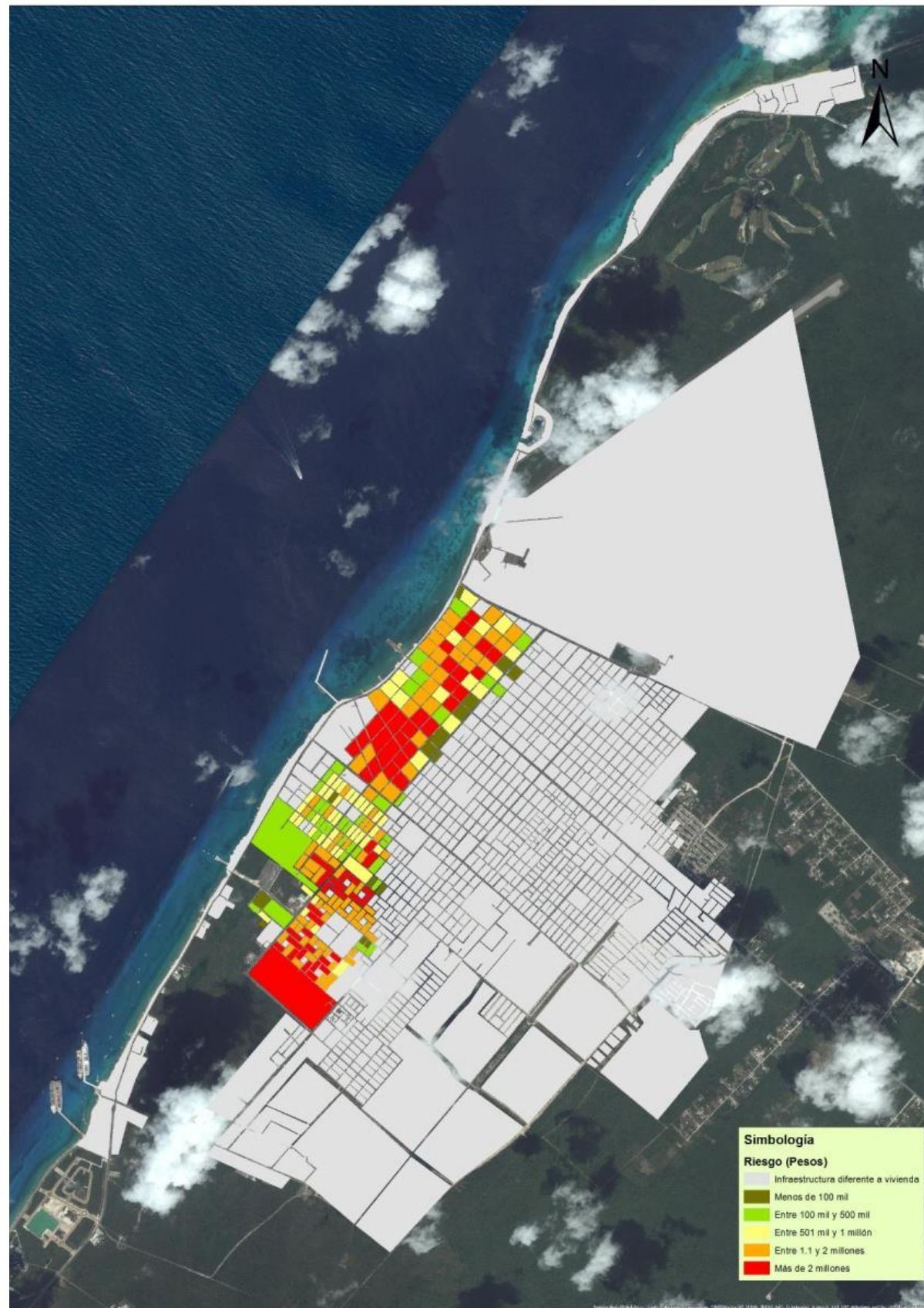
Categoría de huracán	Elevación máxima de la marea de tormenta (Metros)	Probabilidad de ocurrencia	Daños asociados (Millones de pesos)	Riesgo (Millones de pesos)
I	2	0.0935	3,596	336
II	3	0.0738	4,456	329
III	4	0.0197	5,247	103
IV	5	0.0098	6,285	62
V	7	0.0025	11,130	28



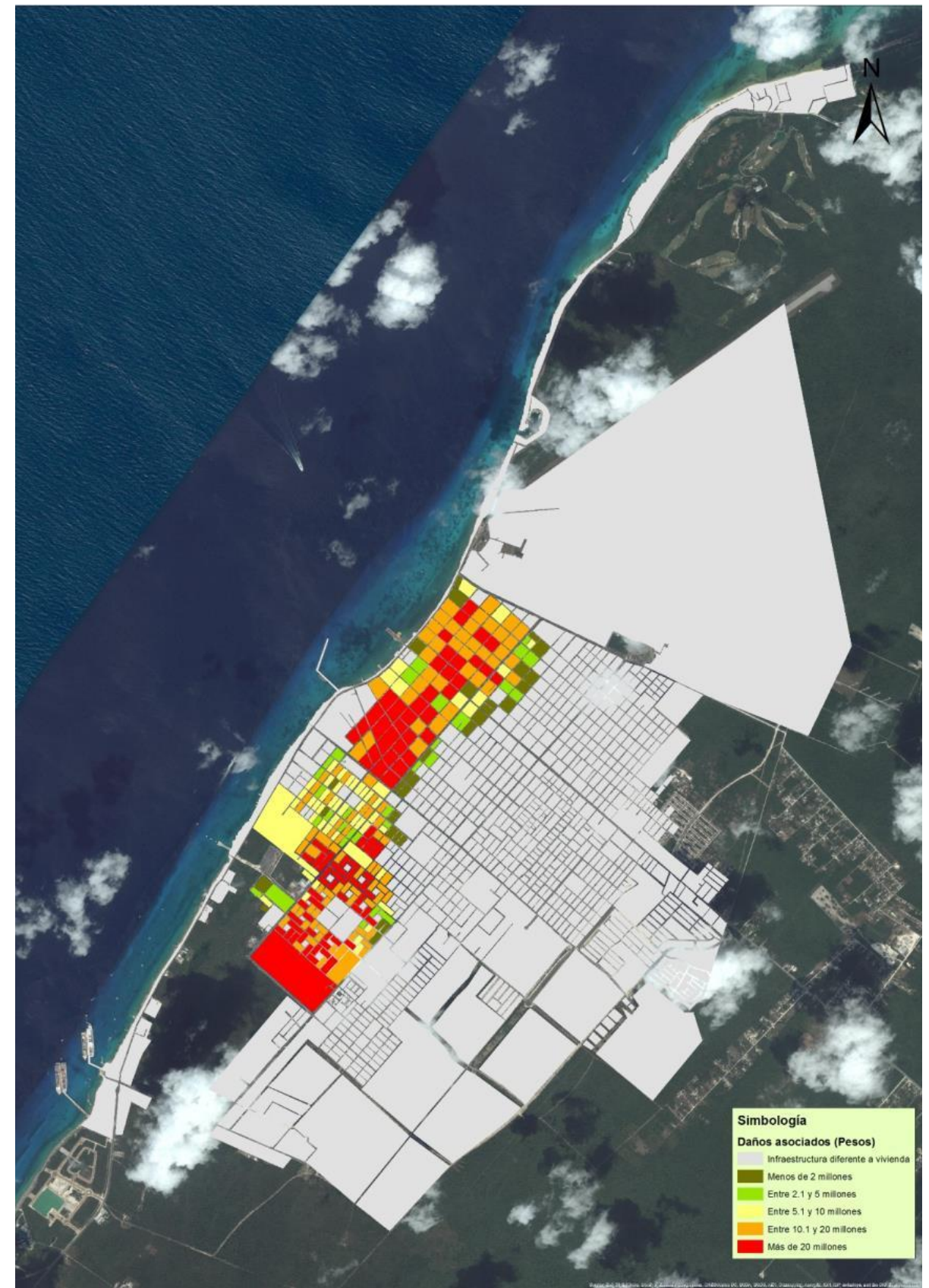
Gráfica 59. Análisis de riesgo según categoría de huracán



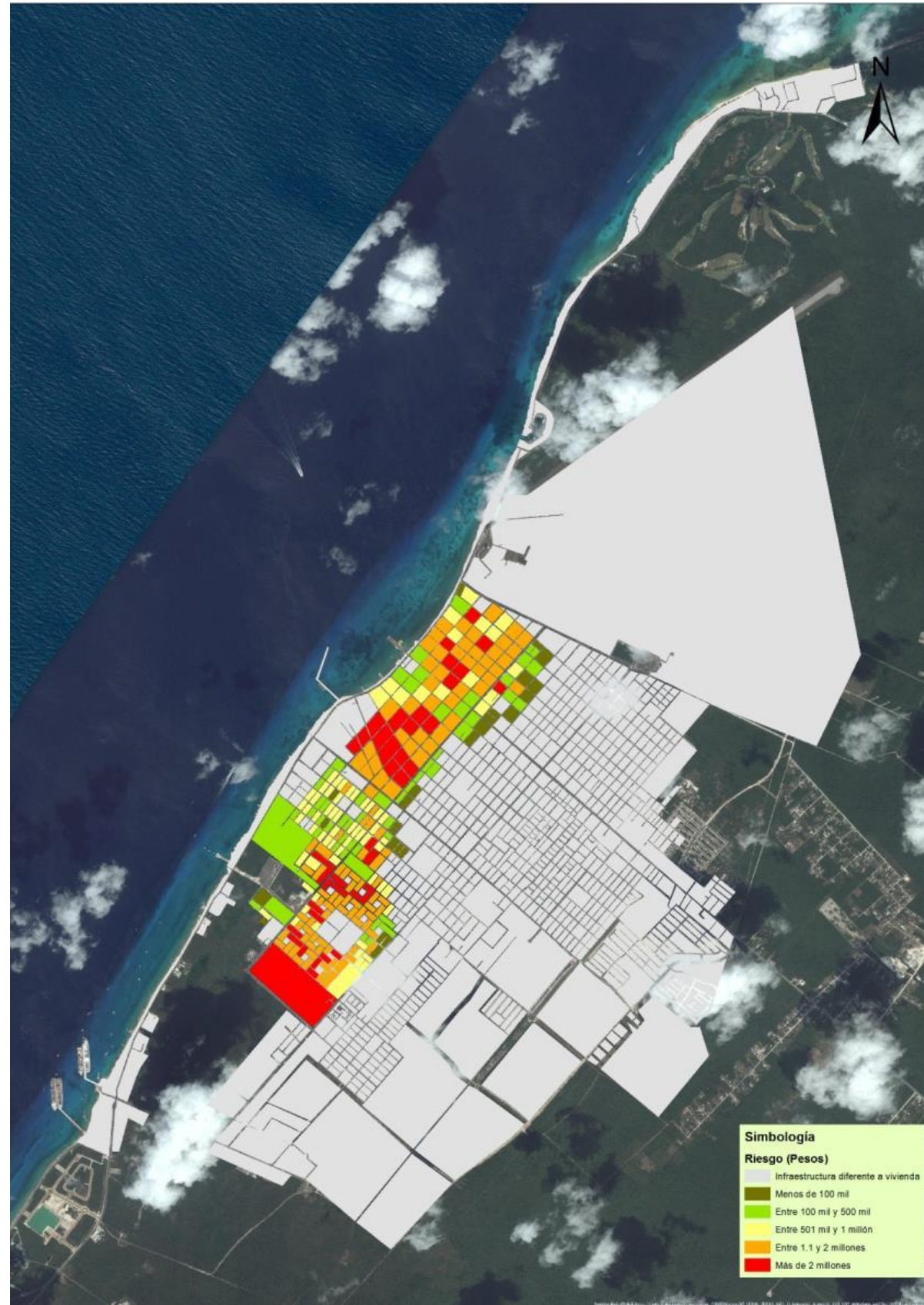
Mapa 62. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría I.



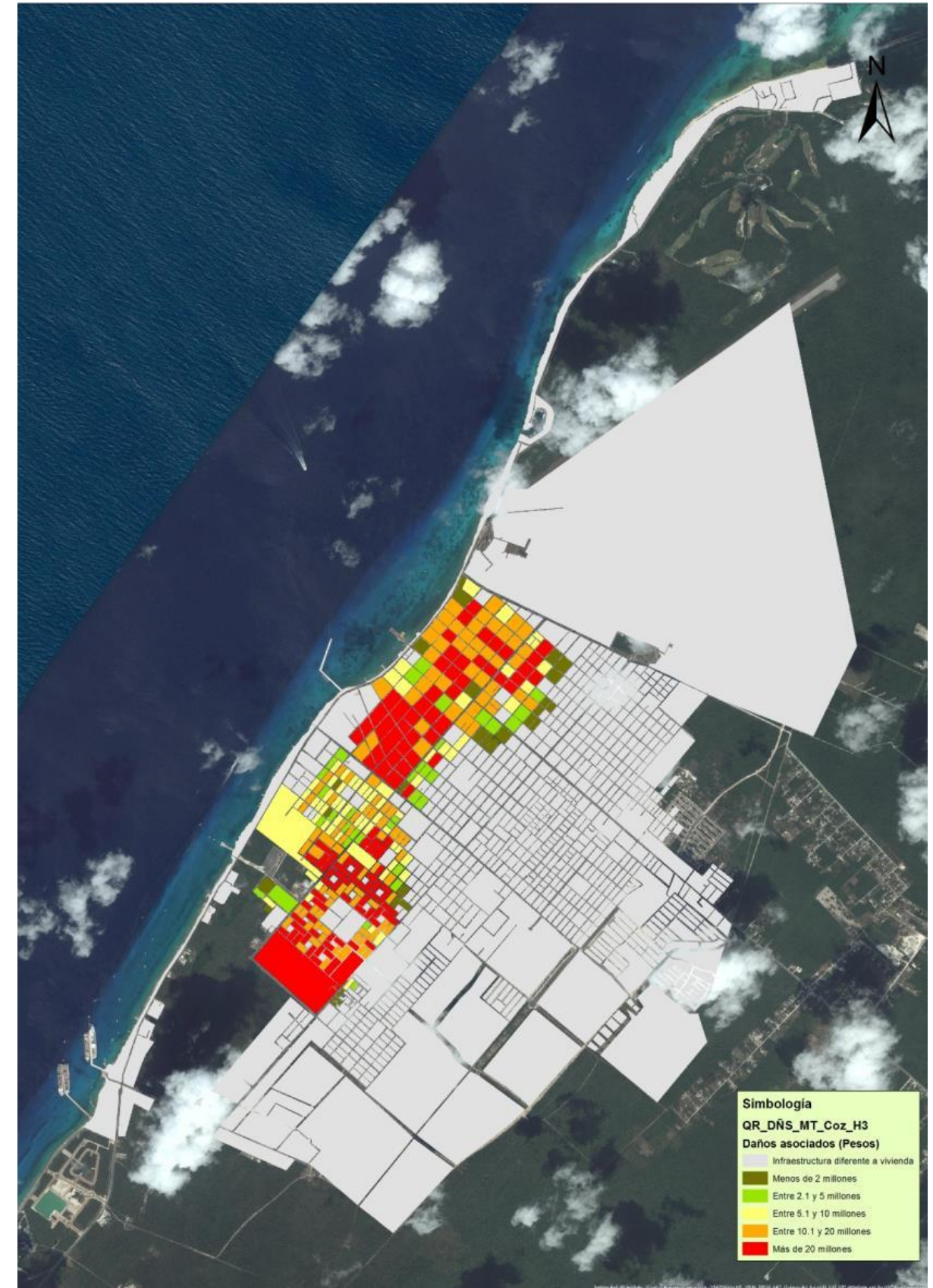
Mapa 63. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría I.



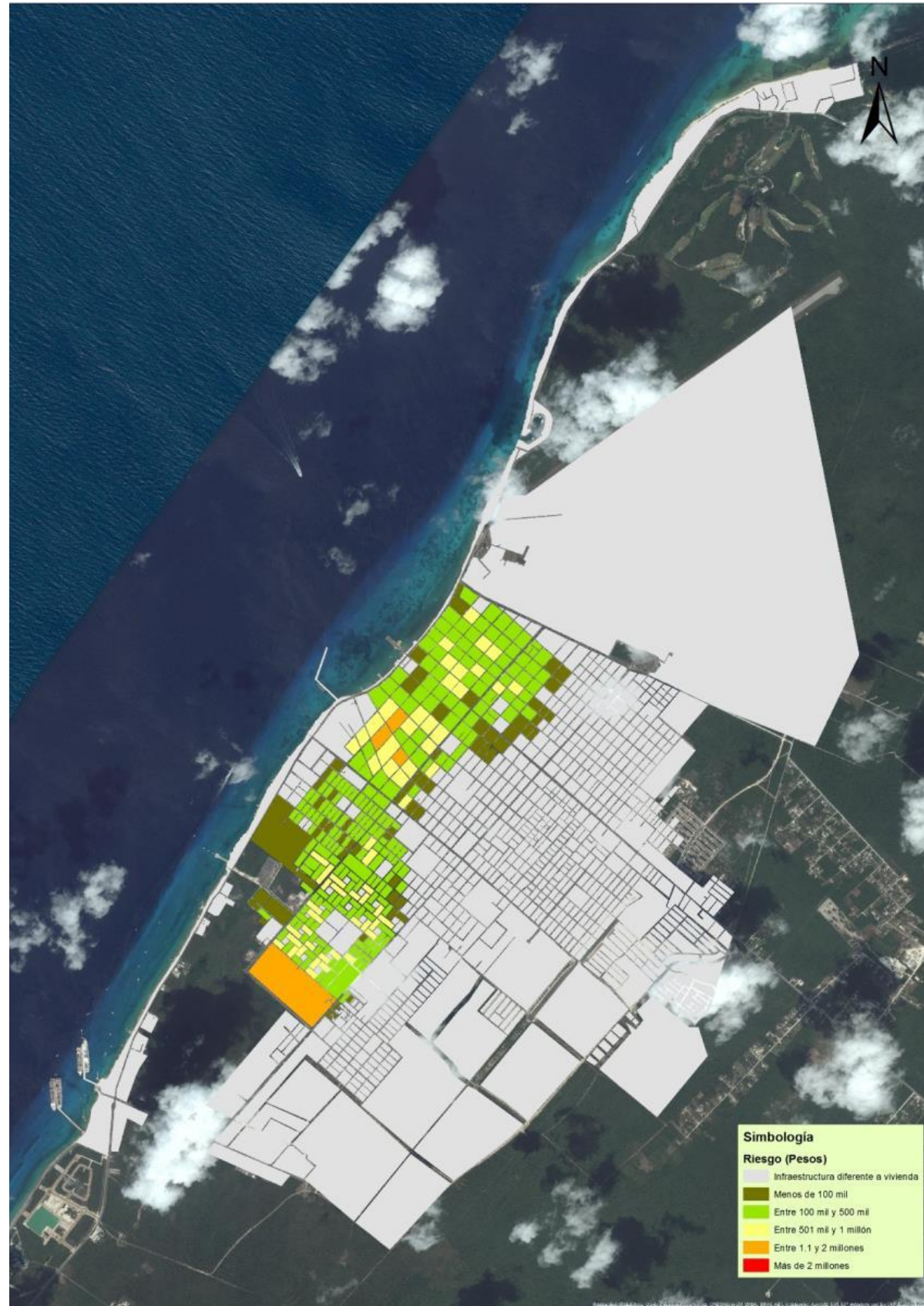
Mapa 64. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría II.



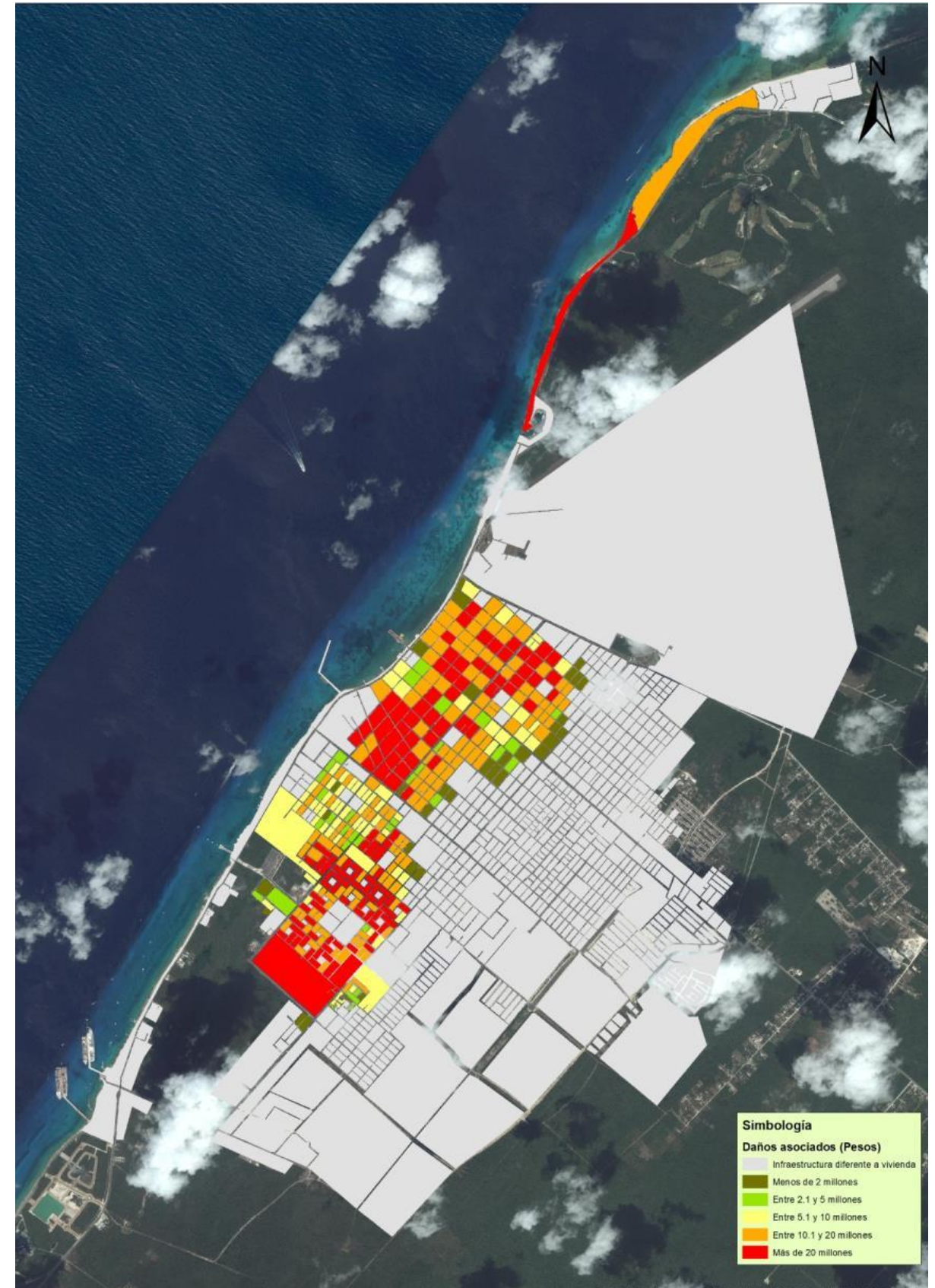
Mapa 65. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría II.



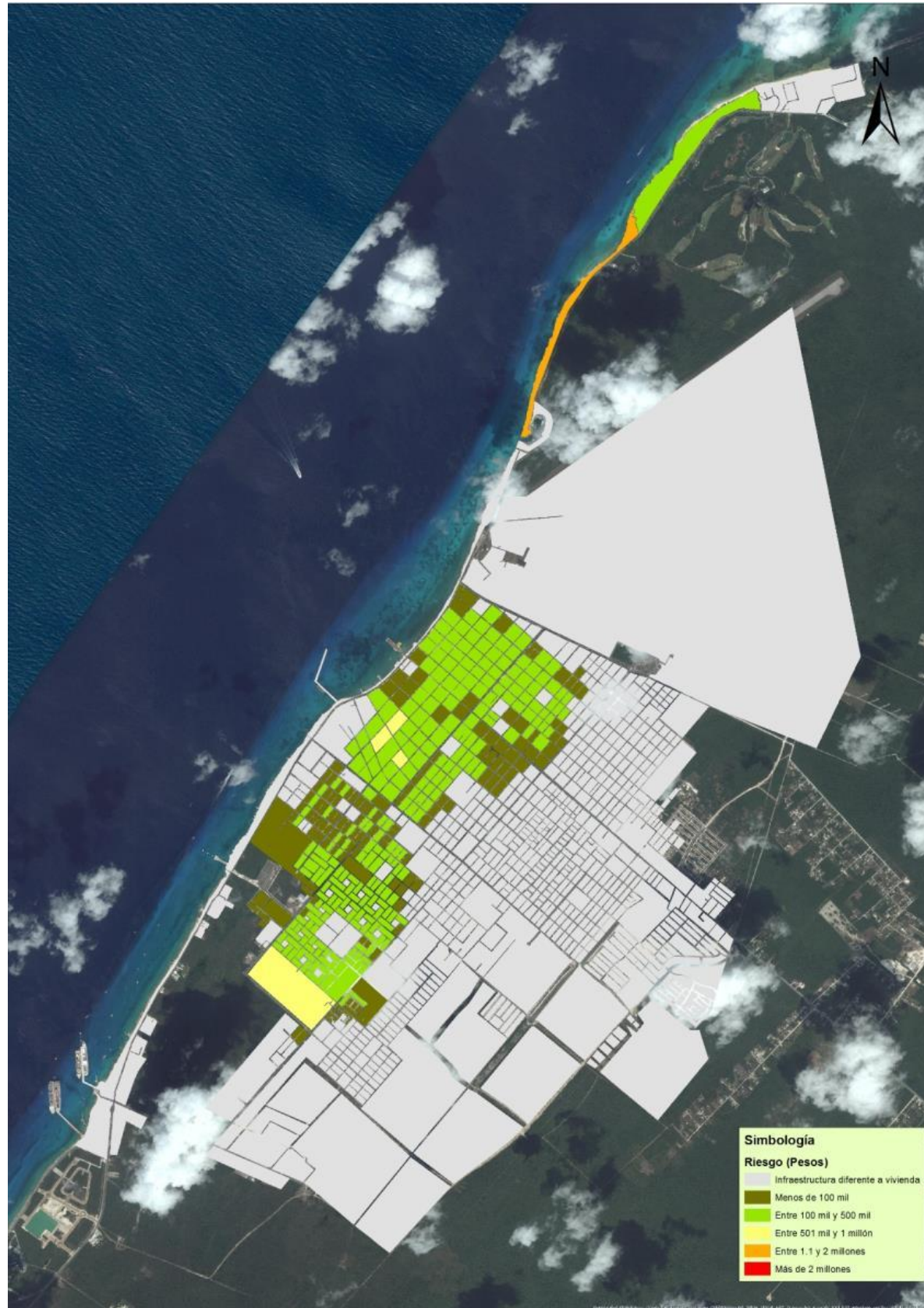
Mapa 66. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría III.



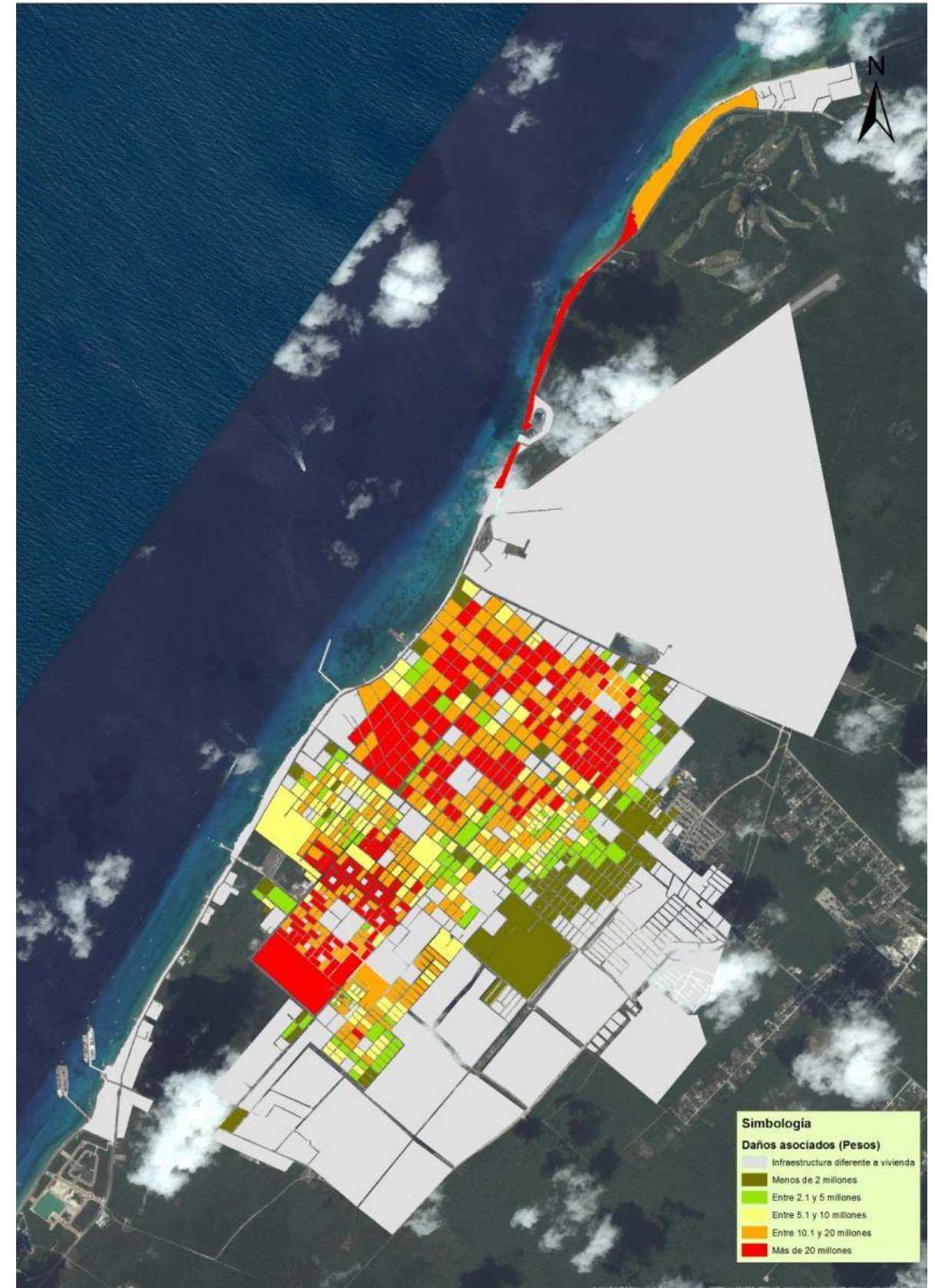
Mapa 67. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría III.



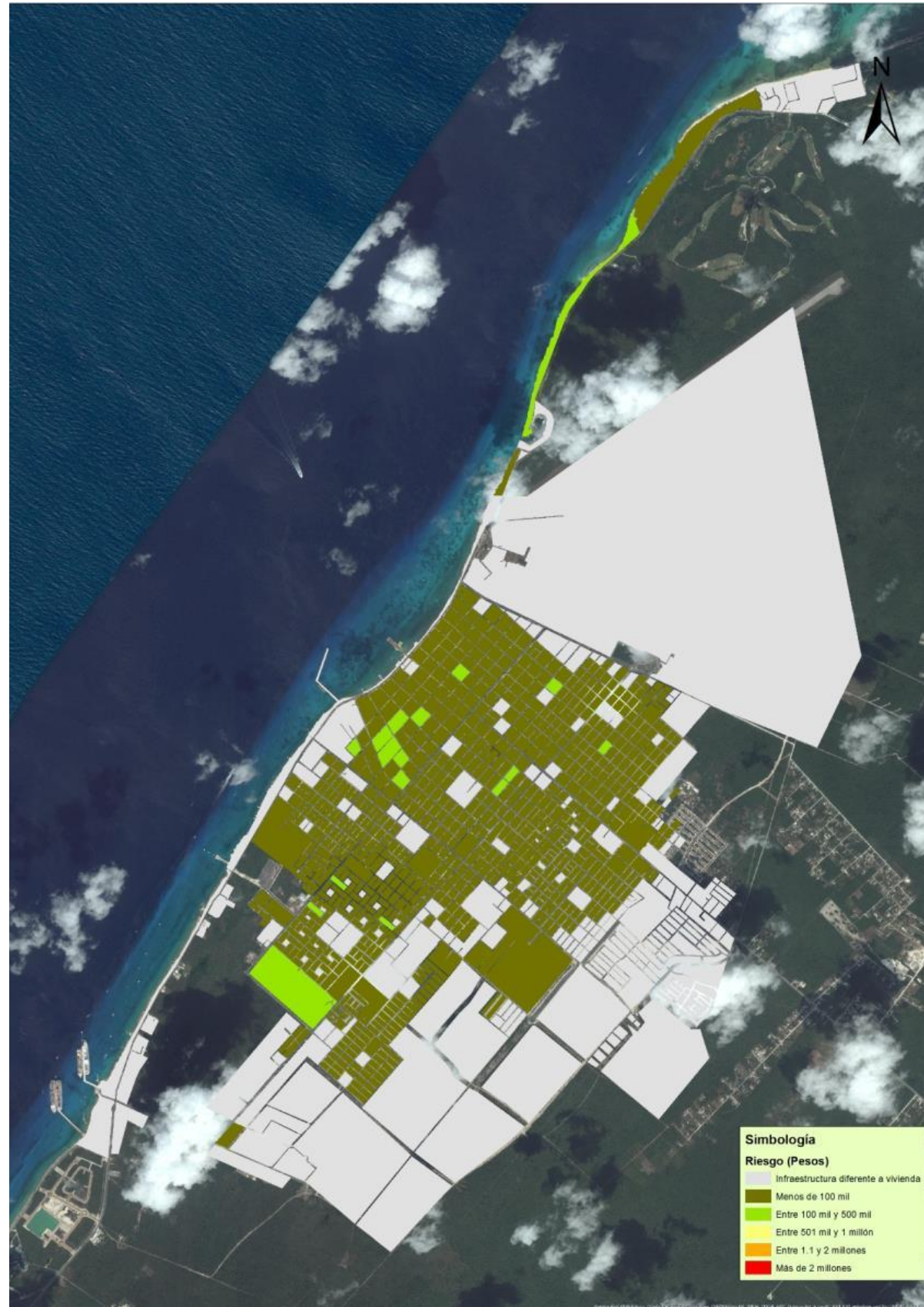
Mapa 68. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría IV.



Mapa 69. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría IV.



Mapa 70. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría V.

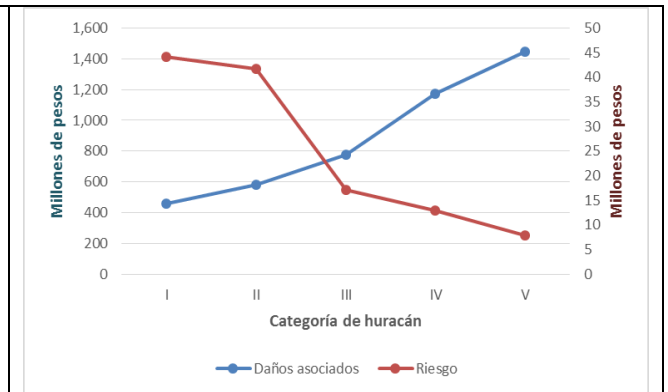


Mapa 71. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría V.

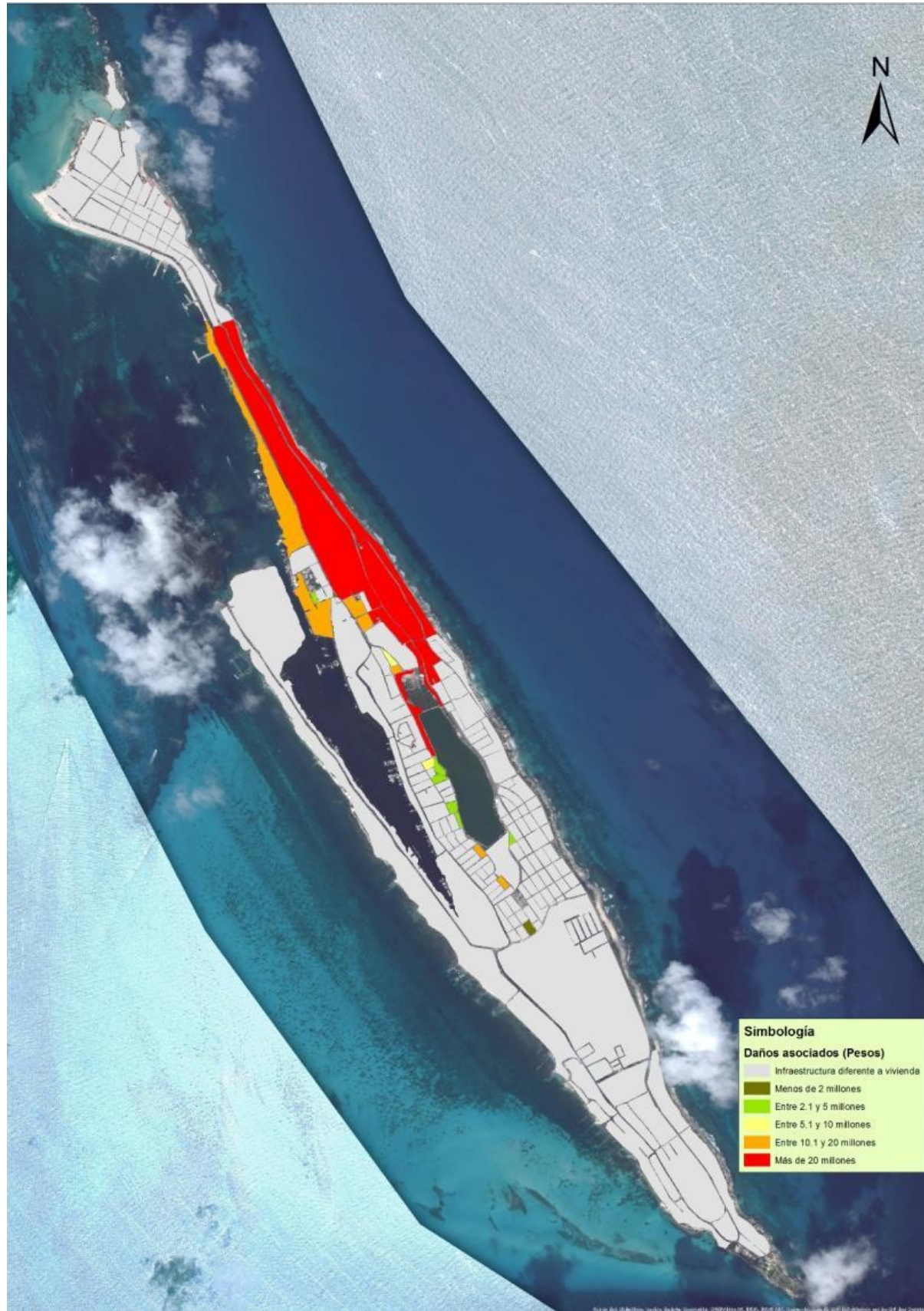
Isla Mujeres

Tabla 69. Análisis de riesgo para la ciudad de Isla Mujeres

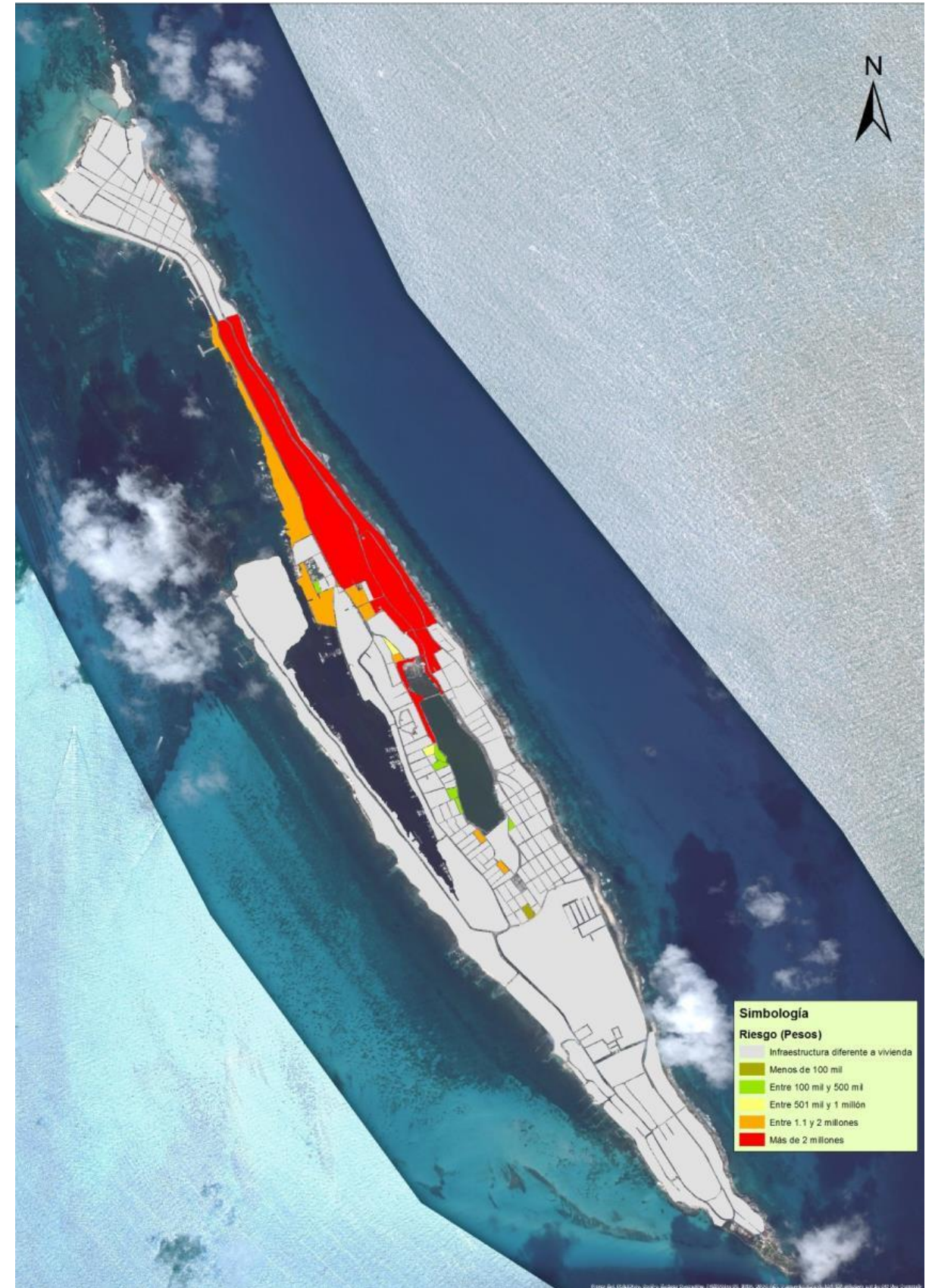
Categoría de huracán	Elevación máxima de la marea de tormenta (Metros)	Probabilidad de ocurrencia	Daños asociados (Millones de pesos)	Riesgo (Millones de pesos)
I	2.5	0.0968	457	44
II	3	0.0719	579	42
III	4	0.0221	776	17
IV	5.5	0.0111	1,172	13
V	7.5	0.0055	1,445	8



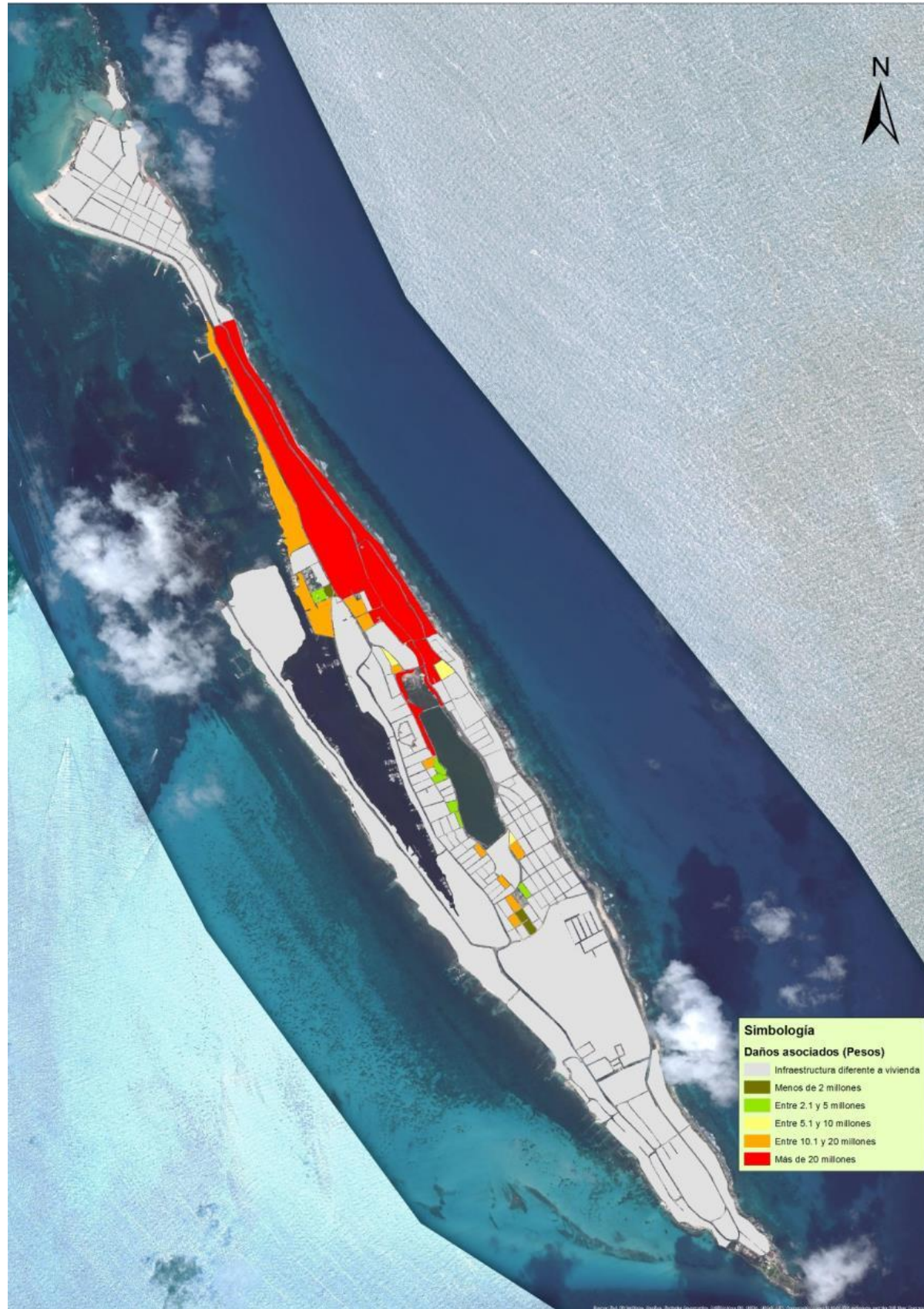
Gráfica 60. Análisis de riesgo según categoría de huracán



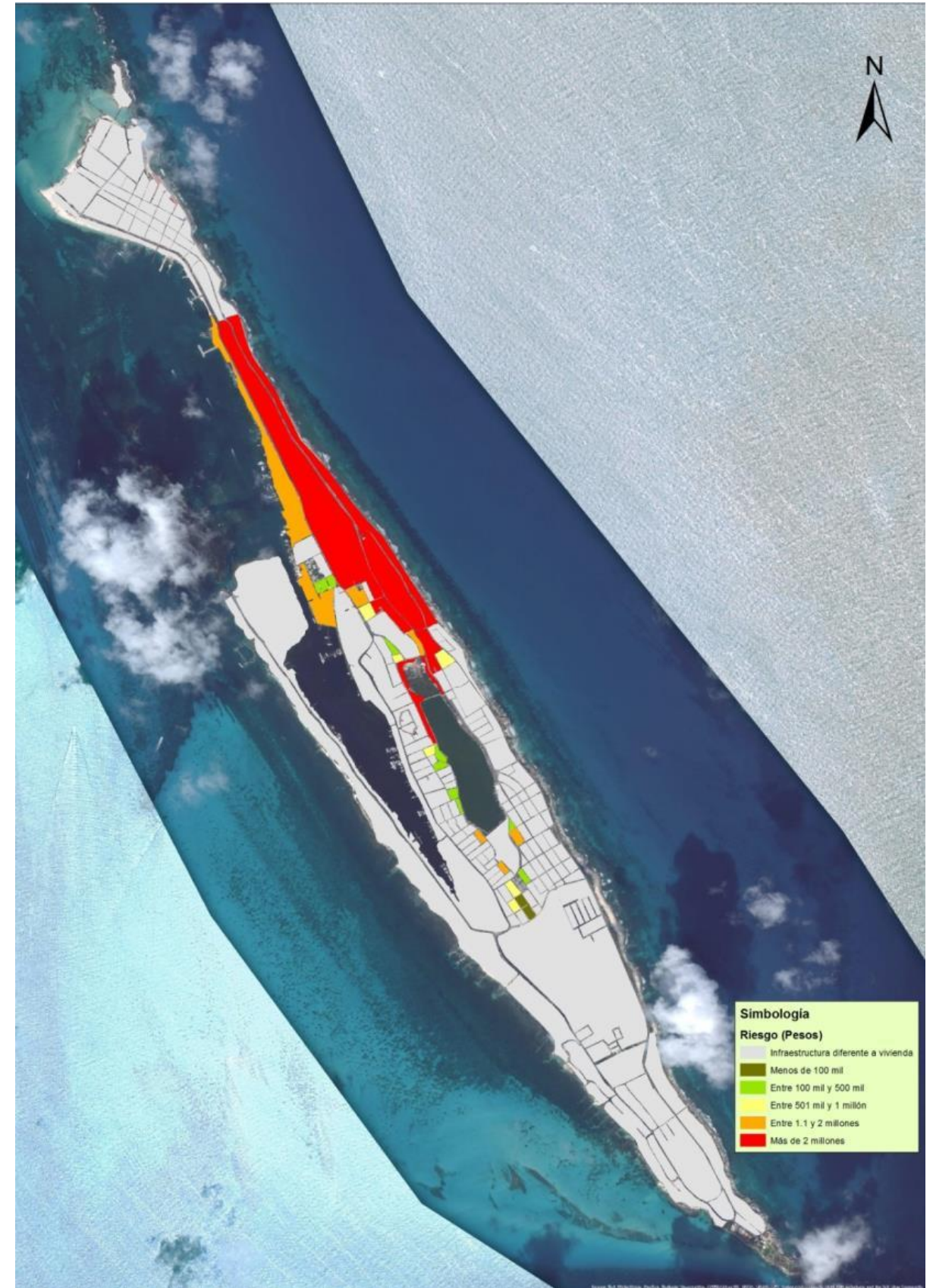
Mapa 72. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría I.



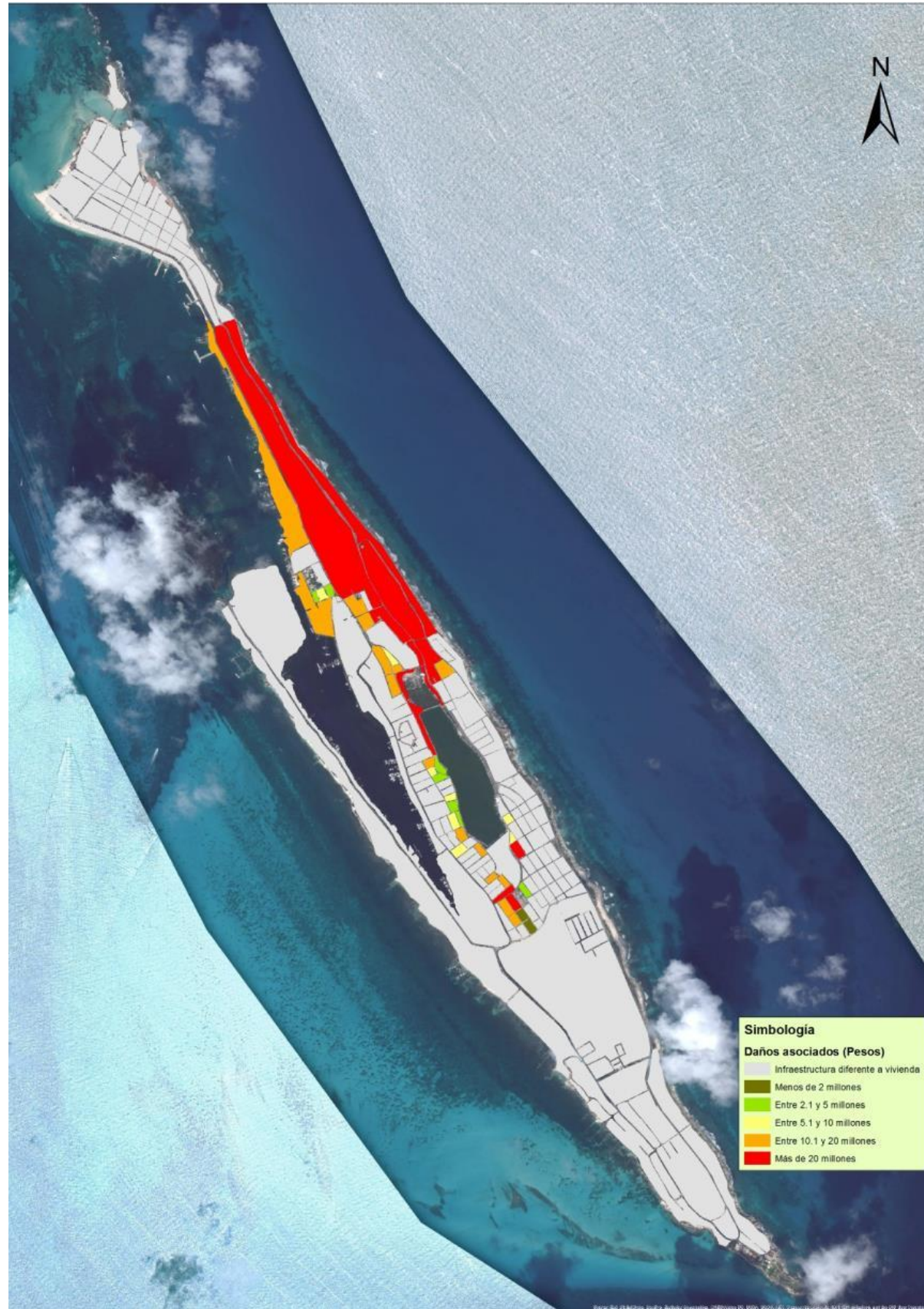
Mapa 73. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría I.



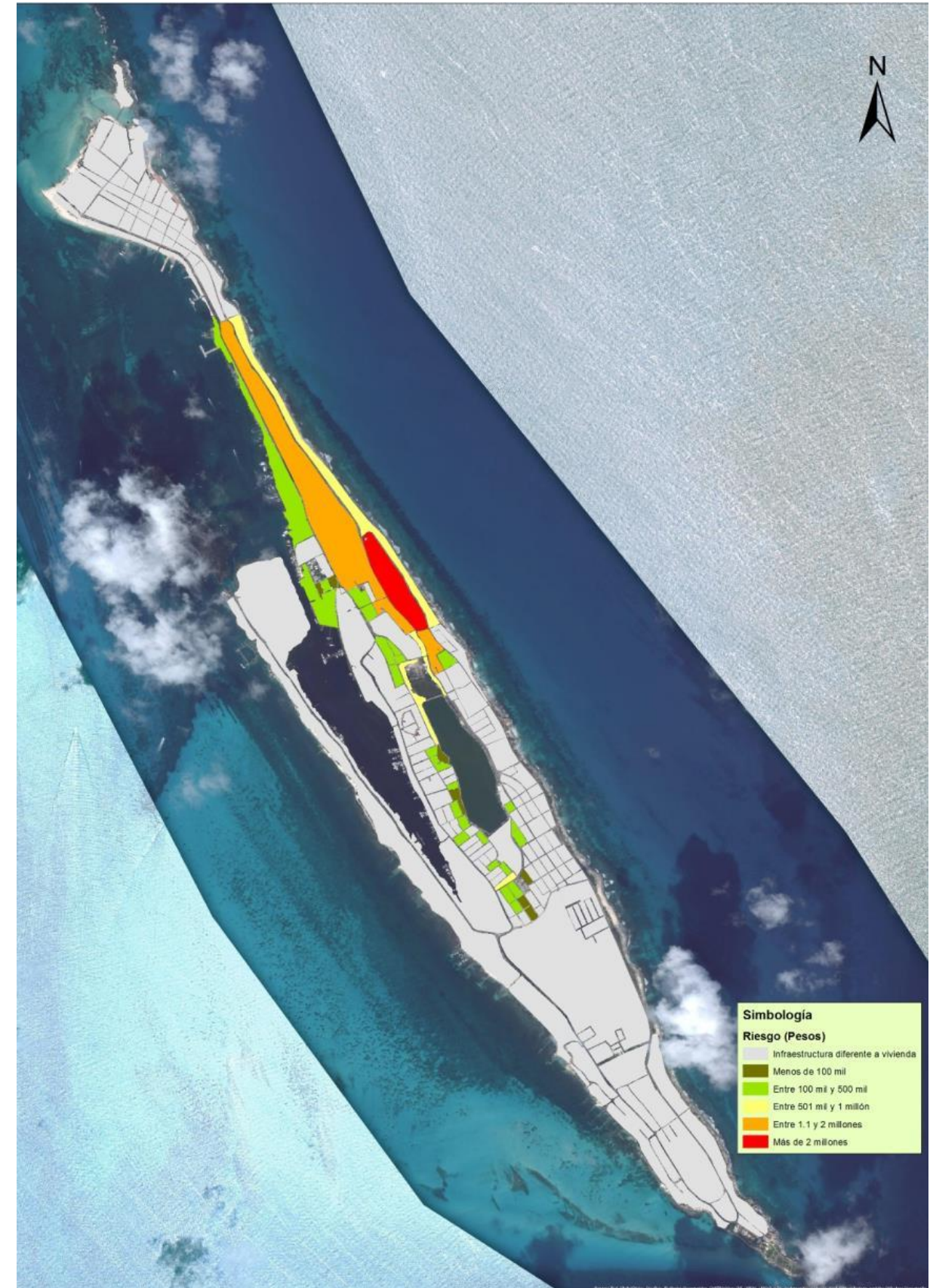
Mapa 74. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría II.



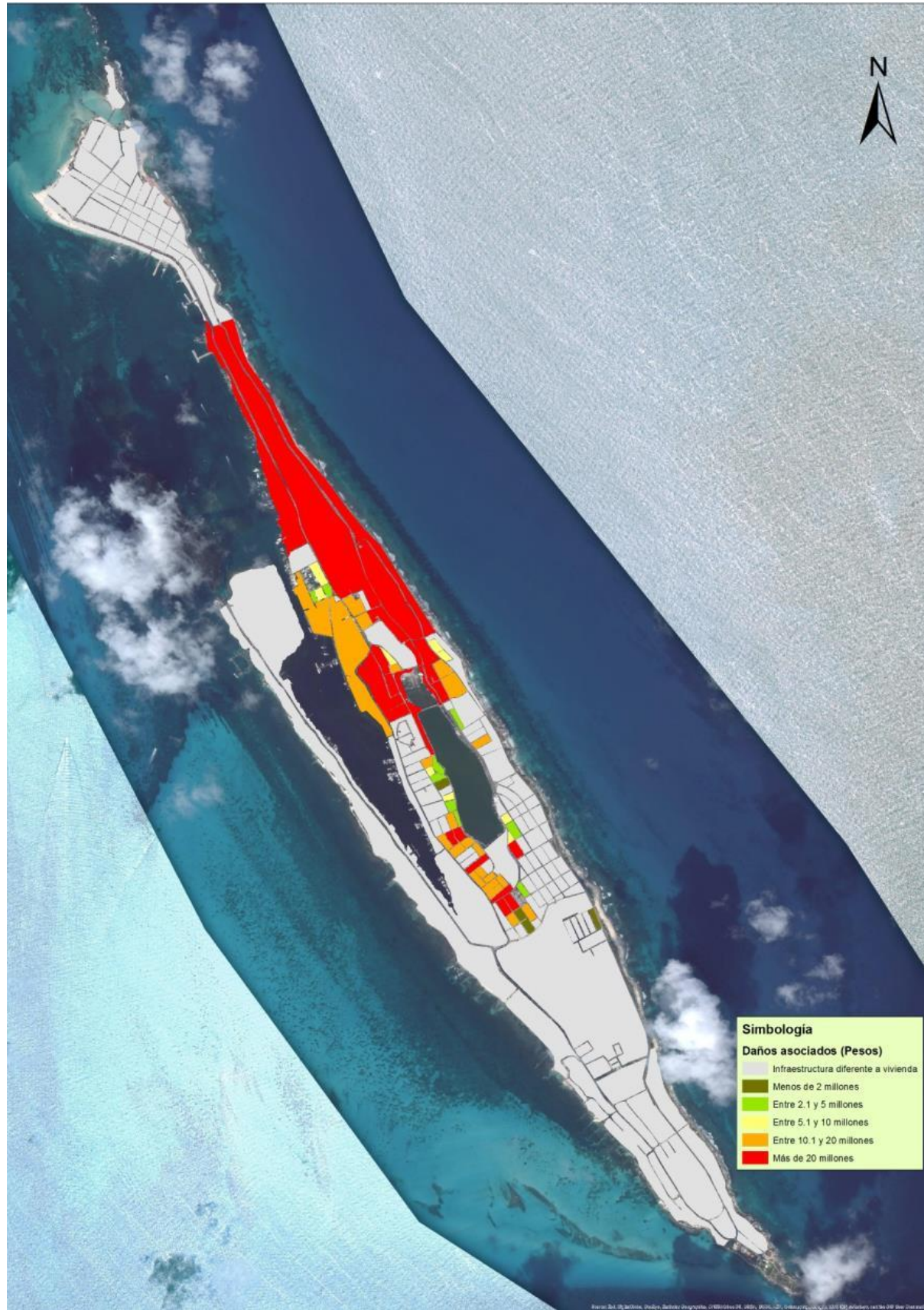
Mapa 75. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría II.



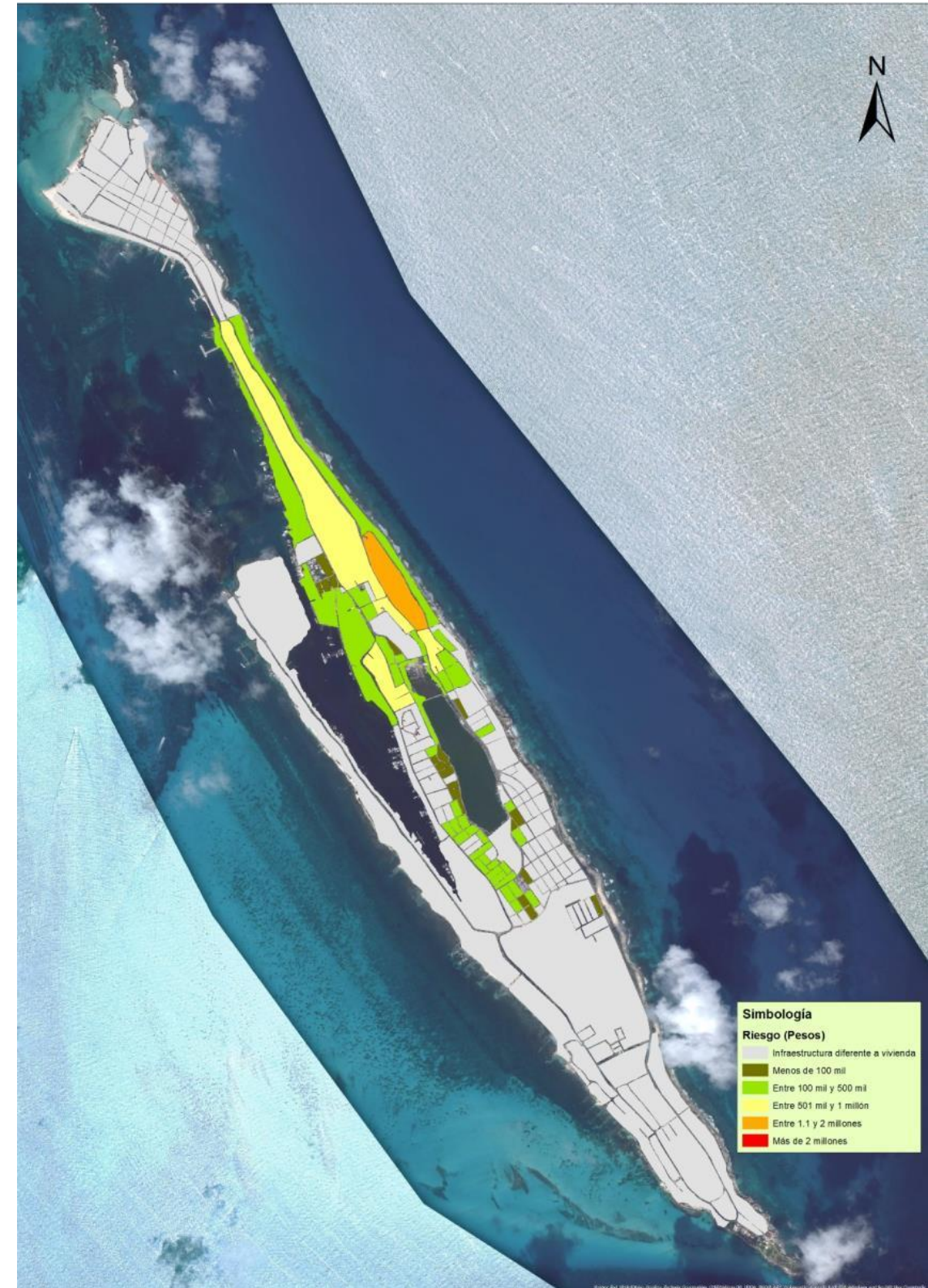
Mapa 76. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría III.



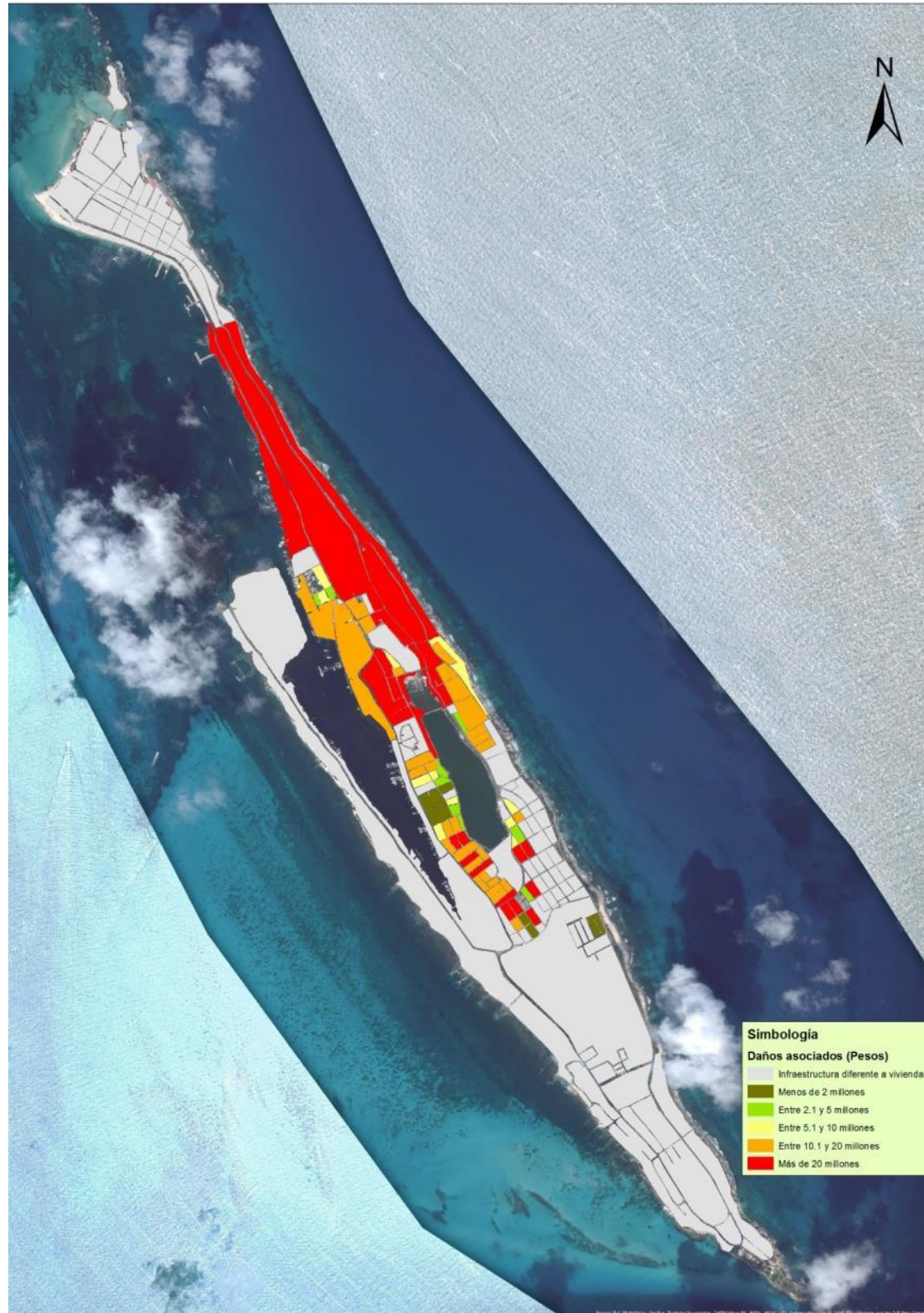
Mapa 77. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría III.



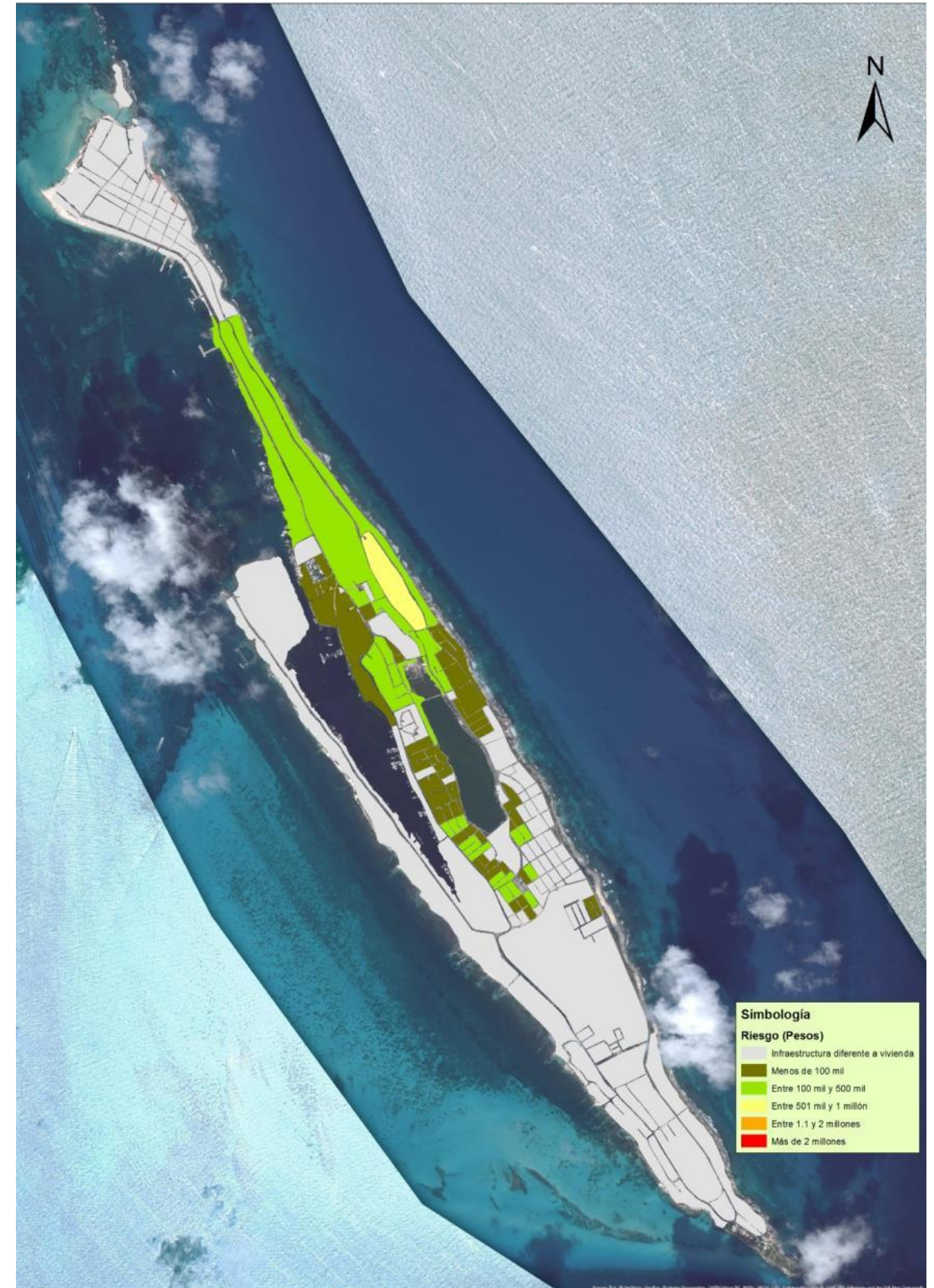
Mapa 78. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría IV.



Mapa 79. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría IV.



Mapa 80. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría V.

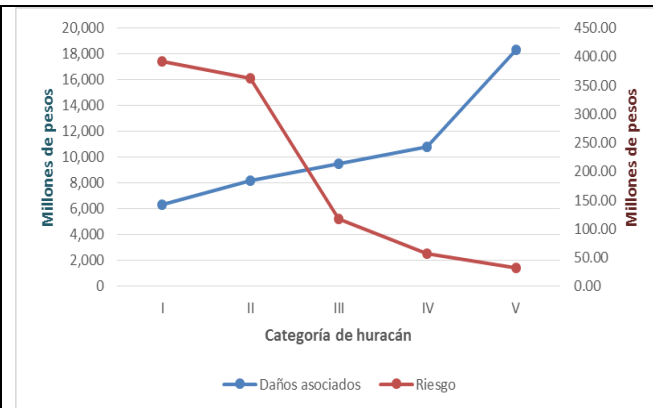


Mapa 81. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría V.

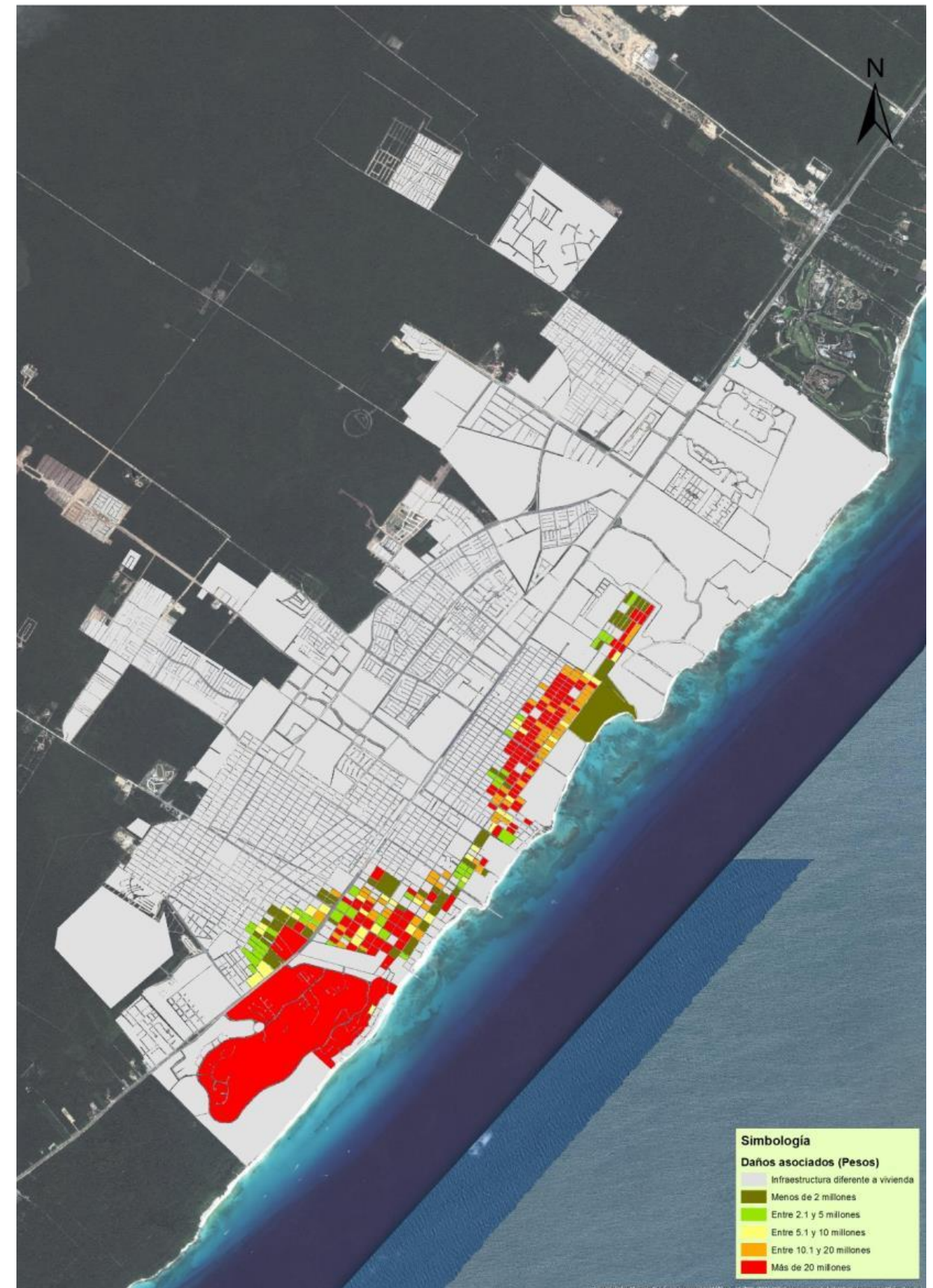
Playa del Carmen

70. Análisis de riesgo para la ciudad de Playa del Carmen

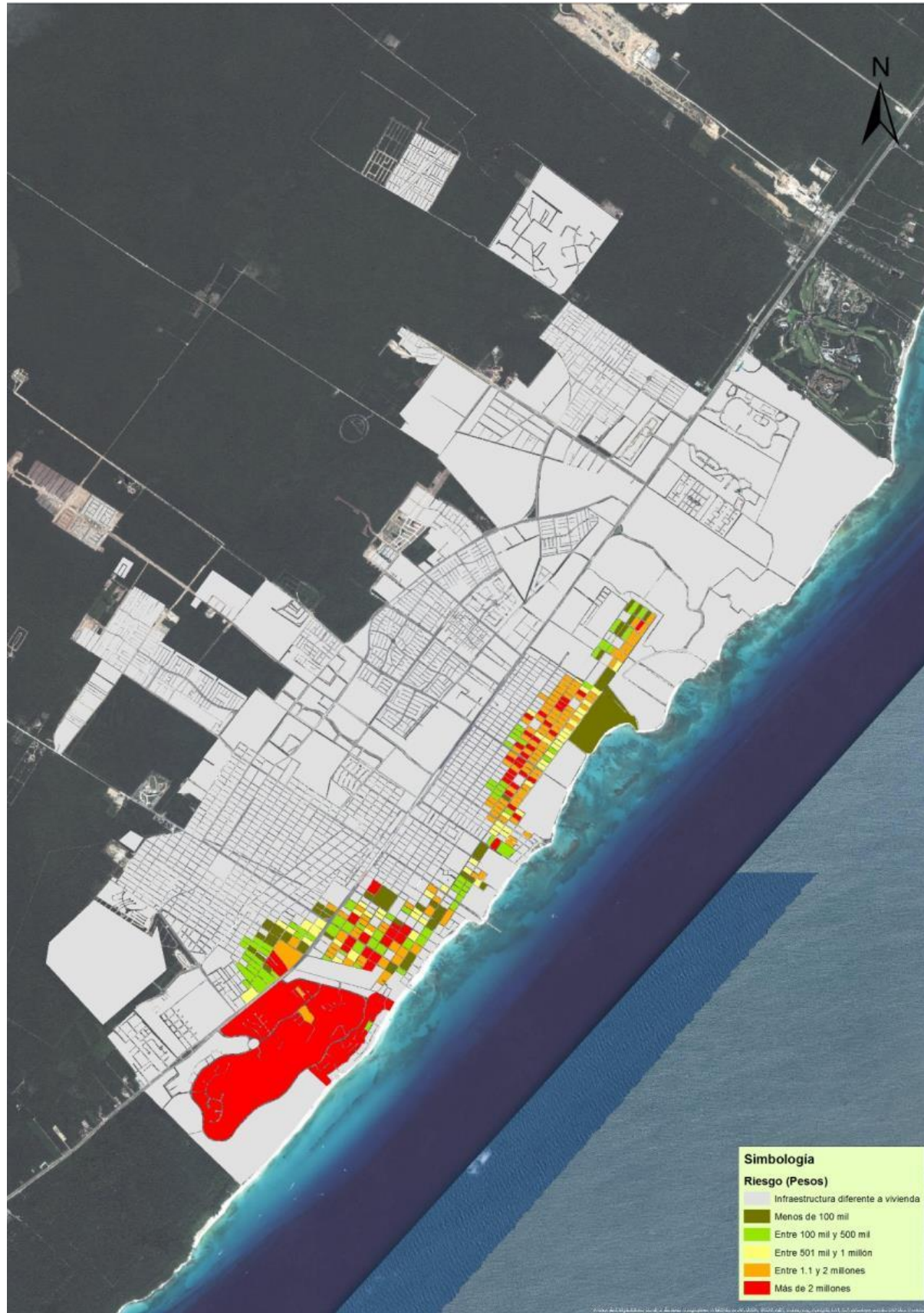
Categoría de huracán	Elevación máxima de la marea de tormenta (Metros)	Probabilidad de ocurrencia	Daños asociados	Riesgo
I	2	0.0621	6,307	391.69
II	3	0.0444	8,166	362.55
III	4	0.0124	9,489	117.66
IV	5	0.0053	10,829	57.39
V	7	0.0018	18,291	32.92



Gráfica 61. Análisis de riesgo según categoría de huracán



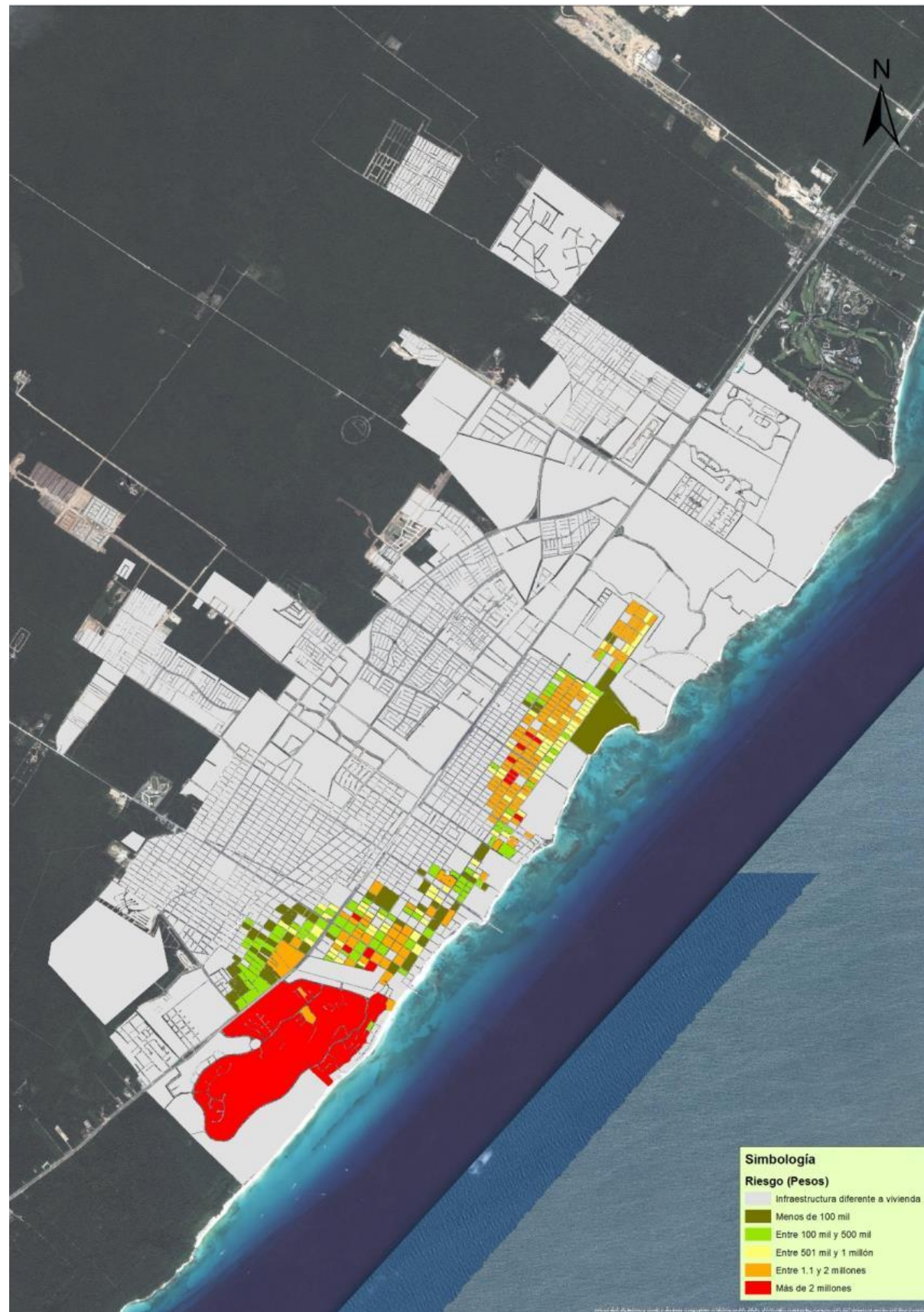
Mapa 82. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría I.



Mapa 83. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría I.



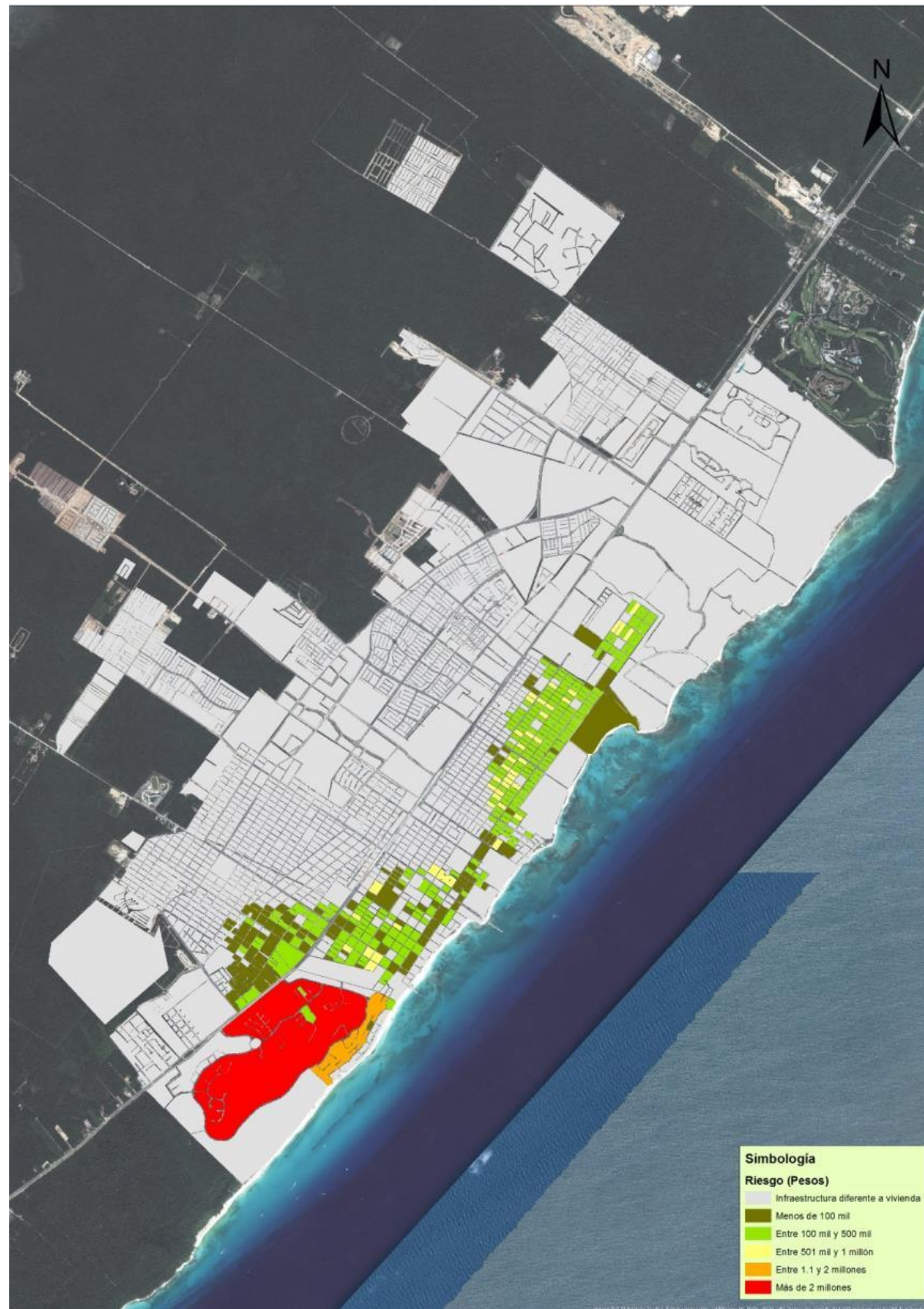
Mapa 84. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría II.



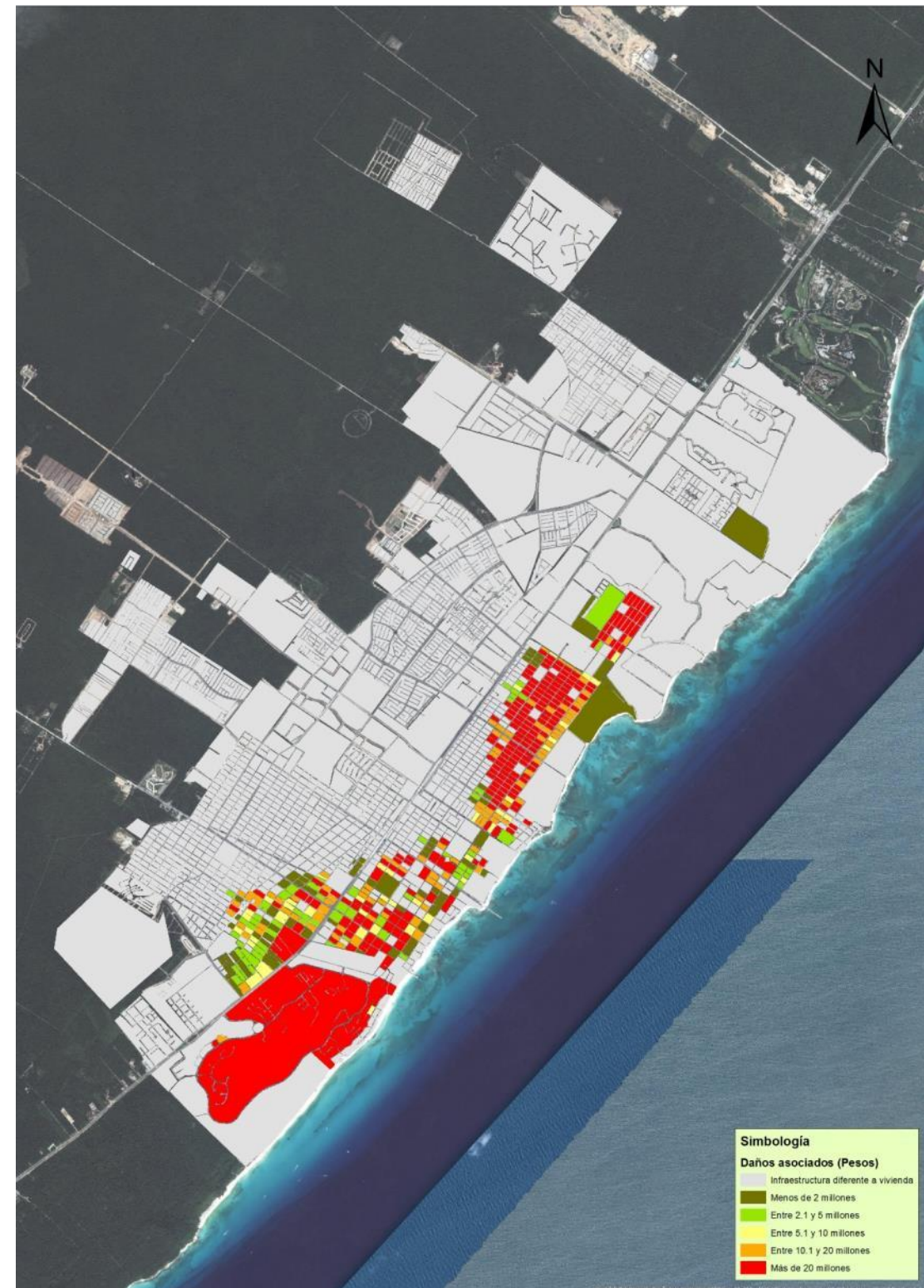
Mapa 85. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría II.



Mapa 86. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría III.



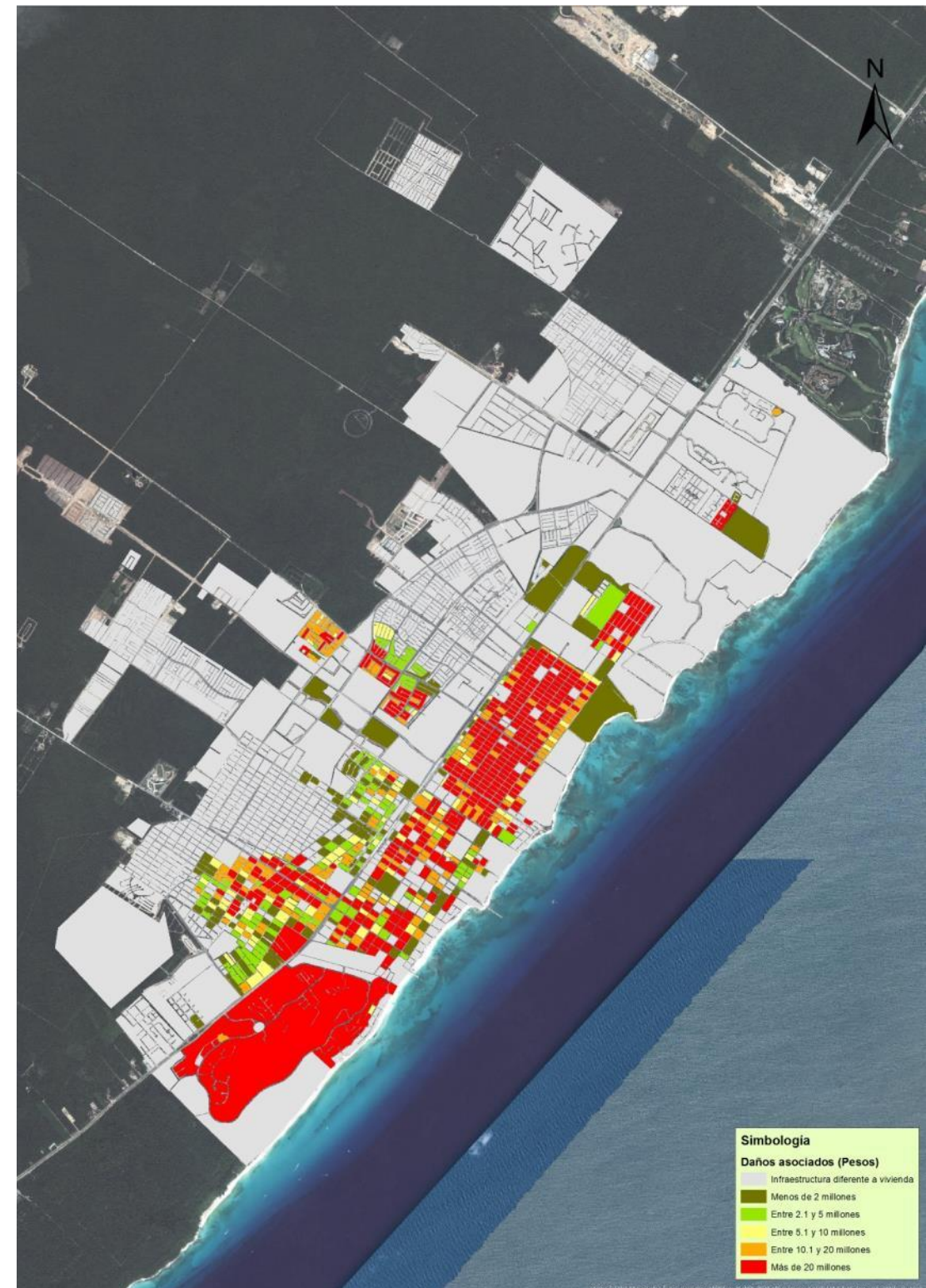
Mapa 87. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría III.



Mapa 88. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría IV.



Mapa 89. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría IV.



Mapa 90. Daños asociados por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría V.



Mapa 91. Riesgo por el efecto de marea de tormenta provocada por un huracán categoría V.

Tulum

En la ciudad de Tulum, el efecto de la marea de tormenta asociado a las diferentes categorías de huracanes, únicamente provocan afectaciones en la denominada zona hotelera de la ciudad, en la cual se encuentran ubicados, además de los hoteles, una amplia variedad de comercios relacionados con la industria turística, por lo que de presentarse un ciclón tropical con una amplitud de marea de tormenta significativa ocasionaría daños y pérdidas millonarias. (Ver Tabla 71).

Tabla 71. Análisis de riesgo por marea de tormenta para la ciudad de Cancún

Categoría de huracán	Elevación máxima de la marea de tormenta (Metros)	Probabilidad de ocurrencia	Daños asociados	Riesgo
I	2.5	0.0621	Únicamente afecta la zona hotelera, por lo que no hay daños en vivienda	
II	3	0.0444		
III	4	0.0124		
IV	5.5	0.0053		
V	7.5	0.0018		

Para poder estimarlas se requiere de la elaboración de un estudio específico para el sector turístico, mismo que se podría extender a otros destinos del Estado, como Cancún y Playa del Carmen.



Mapa 92. Peligro por marea de tormenta provocada por un huracán categoría V

4.2 Inundaciones

4.2.1 Inundación municipal

4.2.1.1 Introducción

Las inundaciones pluviales, consecuencia de la precipitación, se presentan cuando el terreno se ha saturado y el agua de lluvia excedente comienza a acumularse, pudiendo permanecer horas o días, hasta que se evapore y el terreno recupere su capacidad de infiltración.

Existen diferentes formas de clasificar las inundaciones, por ejemplo: clasificación de acuerdo con el tiempo en el que suceden:

- **Inundaciones lentas o progresivas.** Ocurren en grandes áreas de poca pendiente, por lo que suelen presentarse en

cuestión de días, dando oportunidad de evacuar.

- **Inundaciones súbitas o repentinas.** Son aquellas que suceden en cuestión de minutos como consecuencia de lluvias intensas que caen sobre una superficie pequeña con fuerte pendiente y están relacionadas con avalanchas de lodo; por ello, se consideran las más peligrosas.

Con los resultados que se obtengan del análisis hidrológico e hidráulico de las cuencas del área de estudio, se tendrá una herramienta de acción y planeación en el ámbito del desarrollo urbano y también en la prevención de desastres causados por inundaciones provocadas por lluvias atípicas y/o súbitas.

4.2.1.2 Metodología

La metodología que se aplicó para determinar el peligro por inundaciones pluviales para diferentes tiempos de retornos, se aplicó en 4 municipios del Estado (Othón P. Blanco, Babalar, José María Morelos y Felipe Carrillo Puerto) y es la misma que CENAPRED ha desarrollado: **“Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas de Julio de 2011”**.

Es muy importante mencionar que esta metodología, como su nombre lo indica fue diseñada pensando en zonas urbanas, pero se optó por la aplicación de la misma para los municipios dadas las características topográficas del área de estudio.

A pensar que, en las generalidades del presente documento, se mencionó que la escala de trabajo establecida para los estudios realizados a nivel municipal es 1: 100,000 cabe hacer mención de que en este tema en particular va más allá de esa escala regional.

Por lo anterior y para poder llegar a los mejores modelos de peligro por inundación pluvial, en el sentido práctico, se requiere de insumos, tales como:

- Insumos digitales obtenidos de fuentes oficiales, como el Modelo Digital de Elevación (MDE) continuo de elevaciones mexicano, cuya resolución es de 15 x 15 m.
- MDE de alta resolución generado con curvas de nivel separadas 1 m, para dar mayor detalle en zonas planas.
- Archivos *shape file* de los municipios de interés (Bacalar, Felipe Carrillo Puerto, José María Morelos y Othón P. Banco)
- Softwares especializados y herramientas tecnológicas tales como VELL⁷³, Hec-Ras⁷⁴ y ArcGis⁷⁵.

Ahora bien, los pasos descritos en la metodología son los siguientes:

1. Tratamiento del modelo digital

- (a) Datos de entrada (Add Data)
- (b) Unión de datos (Merge Data)

⁷³ Visualizador de escenarios de lluvia (VELL), sirve para obtener la lluvia de diseños para cada Periodo de retorno (Tr).

⁷⁴ Hec-Ras (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System), es un programa que permite modelar flujos permanentes y flujos variables de agua.

⁷⁵ ArcGis, es un software de información geográfica, que ayuda al geoprocetamiento espacial.

- (c) Identificación de depresiones (Identify Sinks)
- (d) Rellenado de depresiones (Fill Sinks)
- (e) Dirección del flujo (Flow Direction)
- (f) Acumulación del flujo (Flow Accumulation)
- (g) Red de drenaje (Stream Network)
- (h) Delimitación de cuencas (Watershed)
- (i) Identificación de la cuenca tributaria
- (j) Conversión del conjunto de celdas que delimitan la cuenca en un polígono
- (k) Delimitación de las subcuencas
- (l) Características fisiográficas de las subcuencas

2. Gastos de diseño

- (a) Tiempo de concentración
- (b) Precipitación e intensidad
- (c) Gastos o caudales
- (d) Hidrogramas para diferentes periodos de retorno

3. Generación de escenarios de peligro

- (a) Clasificación de modelos de simulación
- (b) Preparación de archivos en Arc GIS
- (c) Creación del proyecto en HecRAS (simulación del tránsito de avenidas)
- (d) Importación de datos
- (e) Completado de la información
- (f) Gastos
- (g) Condiciones de frontera
- (h) Ejecución del programa e interpretación de resultados
- (i) Verificación y exportación de resultados
- (j) Mapas de inundación
- (k) Importación del resultado de la simulación

Otro punto metodológico importante que se consideró, fue la comparación de los resultados obtenidos al final del análisis para cada periodo de retorno, contra los modelos de inundación de aquellos municipios que ya cuentan con su Atlas, y con los modelos de inundación que la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA) ha realizado con un cierto detalle interesante.

4.2.1.3 Peligro

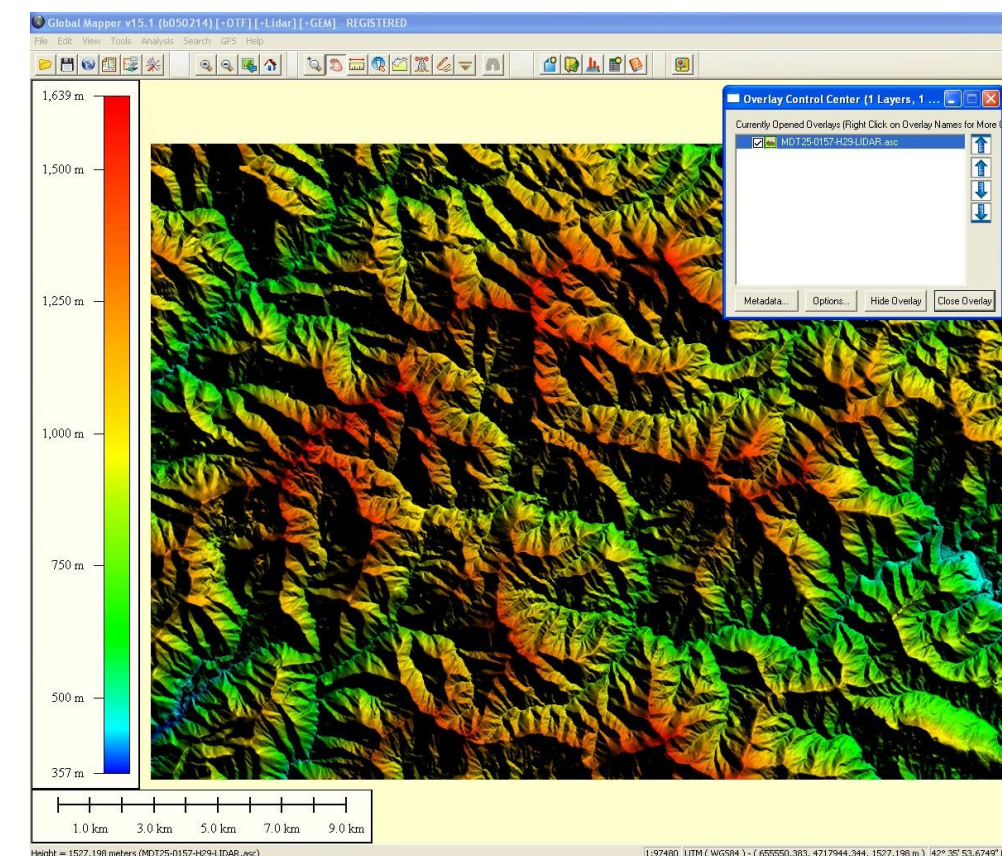
Si bien es cierto que los límites municipales no corresponden a los límites de cuencas, la opción elegida para cumplir exactamente con los requerimientos del proyecto fue hacer un análisis detallado considerando ambos límites pero en diferente orden. Es decir, primero se analizó el comportamiento de los límites de cuenca y posteriormente se realizó un corte del área de interés, utilizando los límites políticos municipales para tal efecto.

1. Tratamiento del modelo digital de elevación

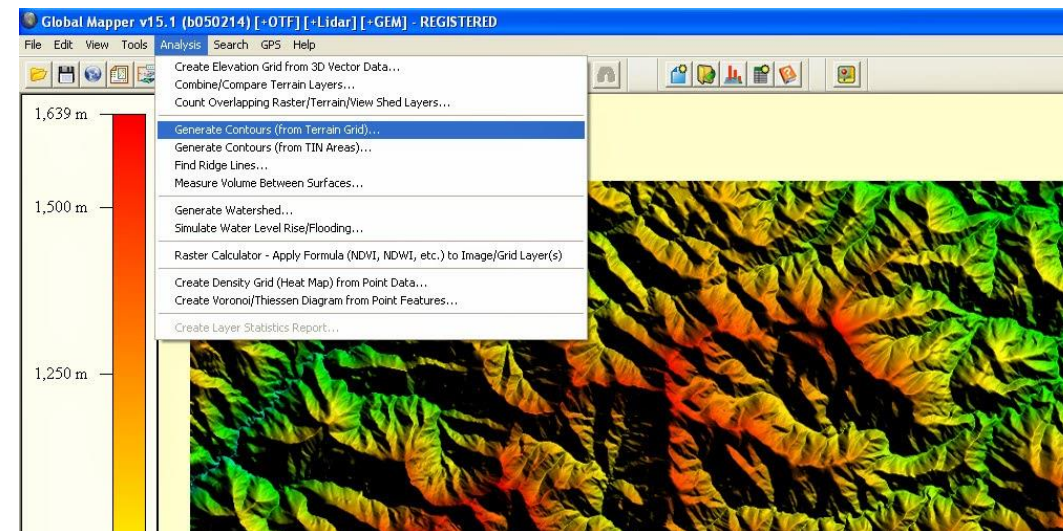
Se descargaron los archivos raster del MDE (obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 del INEGI cuya resolución es de 15 m que cubren totalente la superficie de los cuatro municipios, este fue el insumo de partida para realizar los pasos del análisis hidrológico detallado para obtener las áreas de inundación a nivel municipal.

También se generaron curvas de nivel a cada metro, con el software *Global Mapper*, con el siguiente procedimiento:

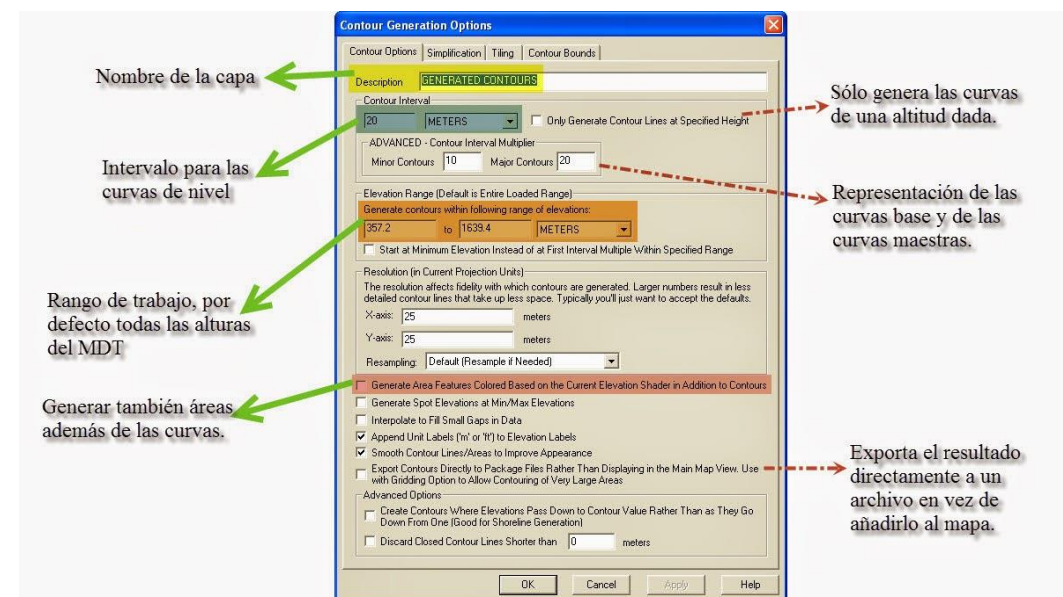
- Importar el área de interés en formato compatible, puede ser .shp, .dwg, .dxf, .kml/kmz, .gpx,
- Configurar la información geo-espacial para no tener problemas de proyección al momento de exportar
- Seleccionar el origen de las curvas de nivel.



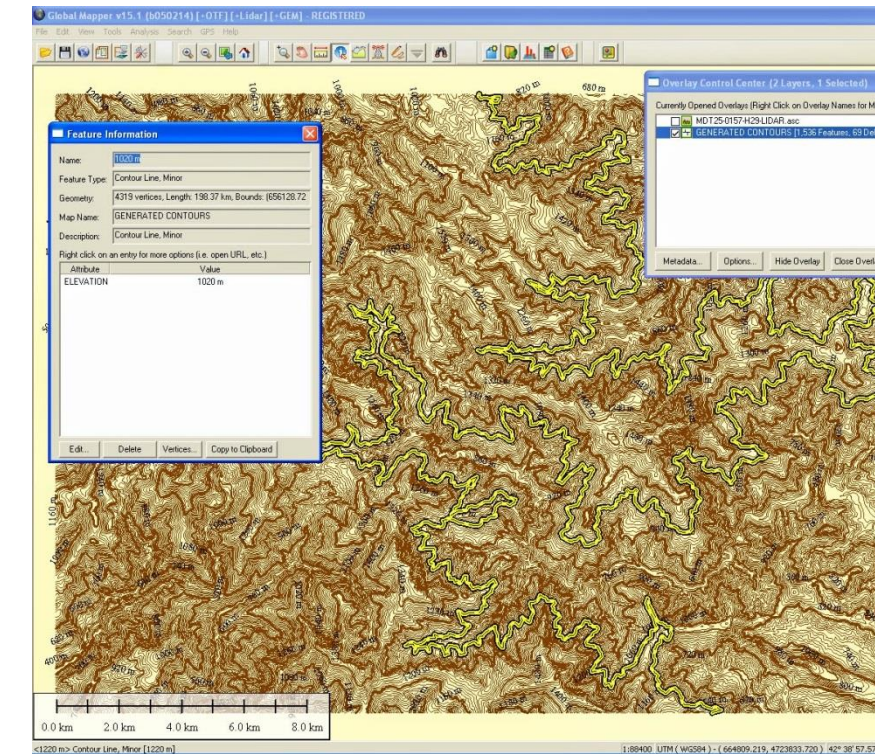
- Seleccionar en el menú *Analysis* la opción *Generate Contours (from Terrain Grid)*:



- Se despliega un cuadro de diálogo en el cual se configura los parámetros y opciones bajo las cuales se exportaran las curvas de nivel. El resto de pestañas de la ventana son para la optimización de las curvas (*Simplification*), para dividir el archivo resultante en varios (*Tiling*) o para delimitar zonas (*Contour Bounds*).



- Una vez establecidos los parámetros deseados, pulsar OK y el programa genera las curvas.



- Una vez obtenido el resultado procedemos a exportar la capa en el formato desado (.shp, .dwg, .dxf, .kml/kmz, .gpx).

De esta manera, se obtiene un insumo de gran importancia para el estudio.

Continuando con el procedimiento que indica la metodología se tiene que:

(a) Datos de entrada (Add Data)

Este paso se realizó con el programa ArcGIS 10.2 y con las herramientas del 3D Analyst y Spatial Analyst, principalmente.

(b) Unión de datos (Merge Data)

Este paso fue necesario para unir en un mosaico cada MDE descargado. Se realizó con las herramientas que se encuentran en el ArcTool Box, en Data Management Tool y luego Raster.

(c) Identificación de depresiones (Identify Sinks)

Este paso es importante realizarlo correctamente y cersiorase de que el MDE resultante sea el mejor, ya que como ya se mencionó, la topografía del Estado en general tiende a ser plana o con mínimas variaciones y la metodología dice textualmente que:

“Una depresión se define como aquella celda cuyos vecinos tienen una elevación mayor a la propia por lo tanto, las depresiones tienen vecinos que apuntan en dirección a ellas, mientras que un pico es el caso contrario, es decir, vecinos con elevaciones menores o iguales a los de ellas”.

“Uno de los principales problemas al usar un MDE es la calidad de los datos, sobre todo en zonas planas, debido a que pequeñas variaciones en la elevación pueden generar cambios significativos en el análisis hidrológico”.

“En caso de pasar por alto esta situación, es posible que la red de drenaje generada sea defectuosa, por lo que es importante que primero se corrija, usando la herramienta llenado de depresiones”.

Habiendo hecho lo anterior, se puede tener mayor confianza en que los resultados que se obtengan en los pasos posteriores serán los correctos, siempre y cuando estén en función de la utilización del MDE.

(d) Rellenado de depresiones (Fill Sinks)

Con esta herramienta se obtiene un nuevo Raster que, aunque a simple vista no se note diferencia alguna entre MDE y Raster obtenido en el proceso, las redes de drenaje obtenidas pueden variar significativamente y con mayor exactitud, ya que rellena sumideros para quitar pequeñas imperfecciones en los datos.



Figura 145. Raster resultante del tratamiento del MDE.

(e) Dirección del flujo (Flow Direction)

Existen ocho posibles direcciones relacionadas con el escurrimiento de flujo, por lo cual el flujo viaja desde cada celda hasta su vecina con la pendiente descendiente.

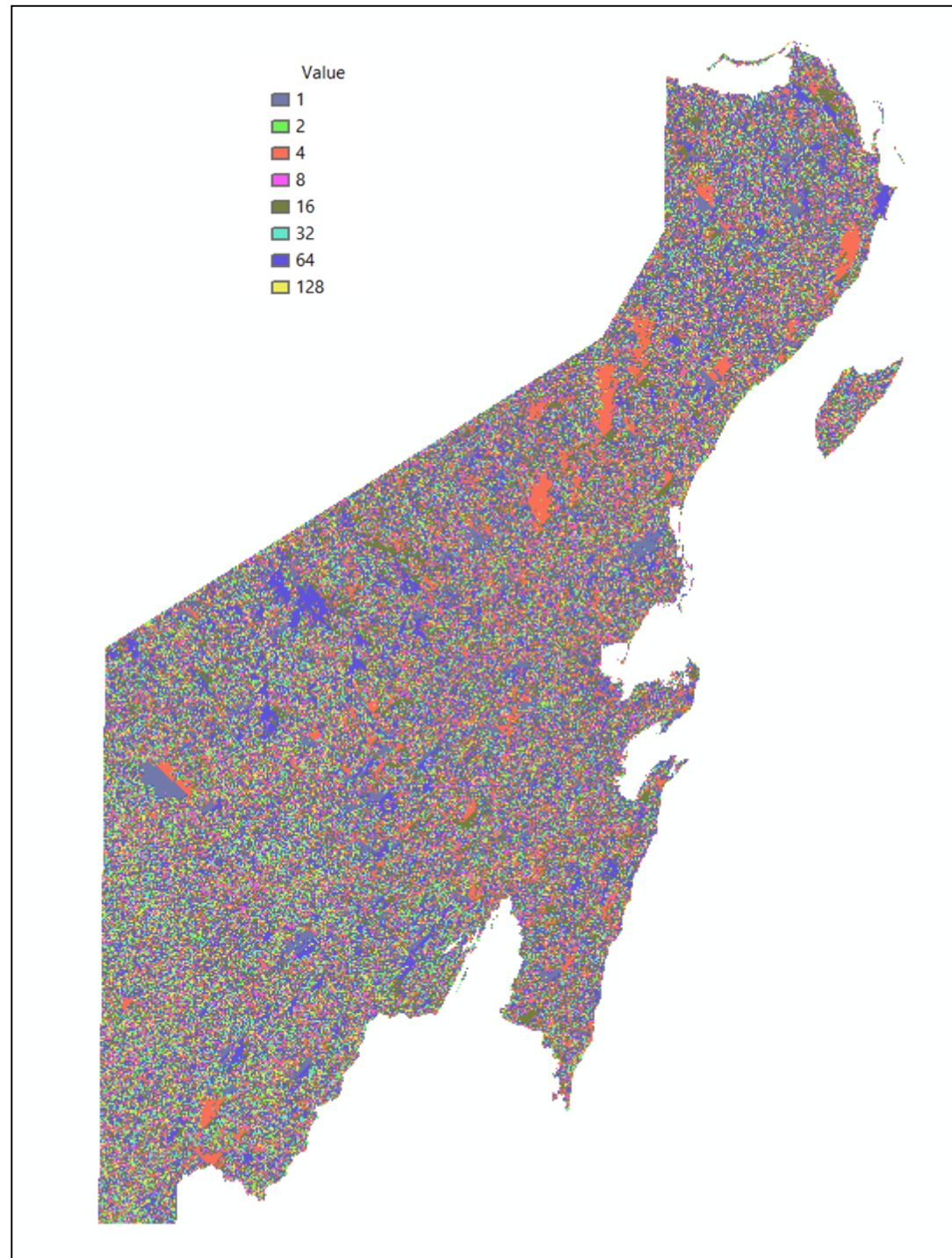


Figura 146. Raster resultante con la dirección del flujo.

Estas posibles direcciones se identifican en el mapa con los números: 1 este, 2 sureste, 4 sur, 8 suroeste, 16 oeste, 32 noroeste, 64 norte y 128 noreste.

(f) Acumulación del flujo (Flow Accumulation)

Usando el raster de dirección de flujo se procesa para obtener un tercer raster, el cual marca la acumulación de flujo. Las celdas con una acumulación de flujo alta son útiles para identificar canales de ríos, tanto principales como sus tributarios.

En la siguiente imagen no se aprecia claramente el resultado, sin embargo se deja ver que hay una delgada línea marcada en blanco que representa la principal vía de acumulación de agua en el Estado.

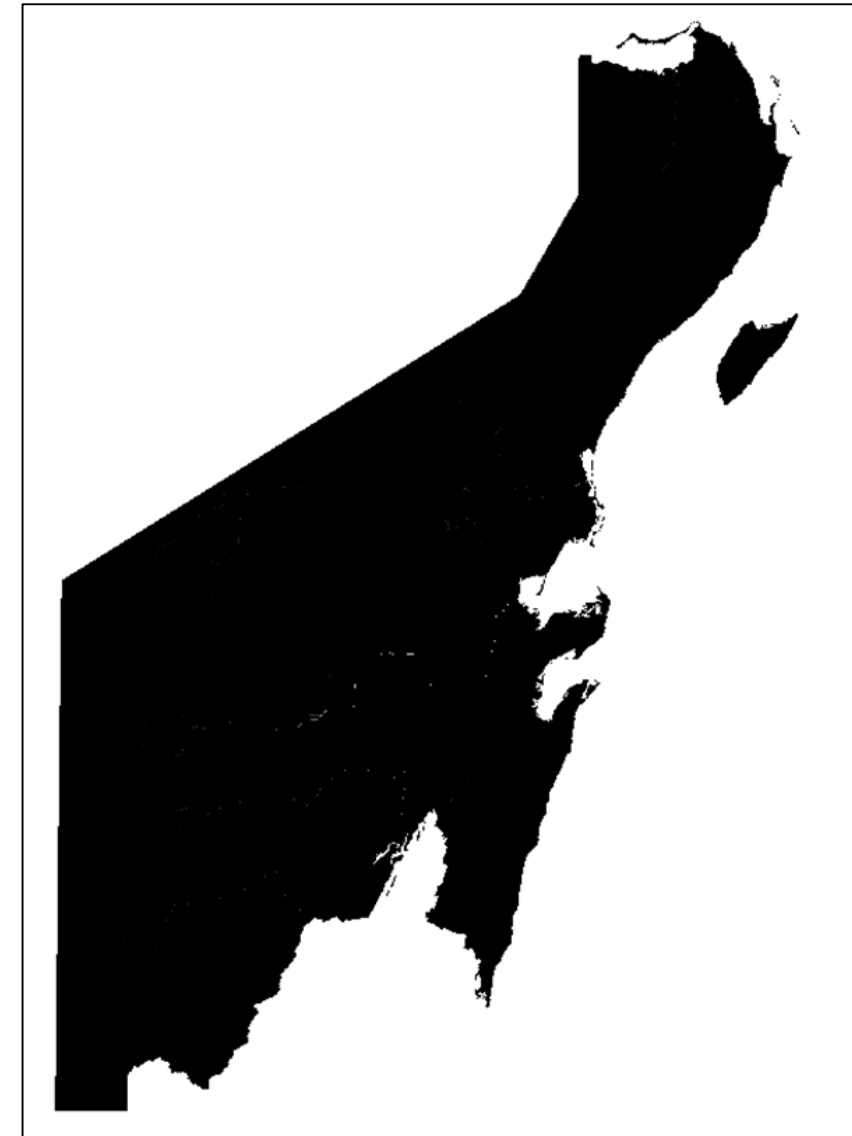


Figura 147. Raster con la acumulación de flujo.

(g) Red de drenaje (Stream Network)

Con el Raster resultante de acumulación de flujo, se procede a construir la red de drenaje con la herramienta "Con" que se encuentra en *Spatial Analyst Tools, Conditional*.

Lo que esta herramienta hace es un análisis condicionado a un umbral predefinido, que le indica al programa cuántas celdas se requiere acumular para aceptar que se forme una corriente; si ese número se iguala o rebasa, el conjunto de celdas en cuestión se toma como una corriente, en caso contrario, no existe nada y se continúa con la búsqueda.

Dado que el CEM del INEGI tiene un tamaño de celda de 15 x 15 m y tomando un umbral de 150 celdas, para definir la formación o no de una corriente, el resultado que se obtiene es: $150 \times 15 \times 15 = 33,750 \text{ m}^2 = 0.033750 \text{ km}^2$.

Esto quiere decir que todas las corrientes definidas en la última figura tienen un área de aportación al menos de 0.033750 km².



Figura 148. Resultado en la obtención de la red de drenaje.

(h) Delimitación de cuencas (Watershed)

Una vez obtenido la red de drenaje, se procede a delimitar las cuencas, para lo cual hay dos formas:

- Watershed Delineation. Delinea una subcuenca por cada uno de los segmentos de cauce definidos mediante el cual se obtiene la delimitación de las cuencas.
- Basin. Crea un archivo tipo raster que delimita las cuencas de drenaje.

Con el primero procedimiento, se obtuvieron 622 subcuencas para el área de estudio (para todo el estado resultados mas de mil).

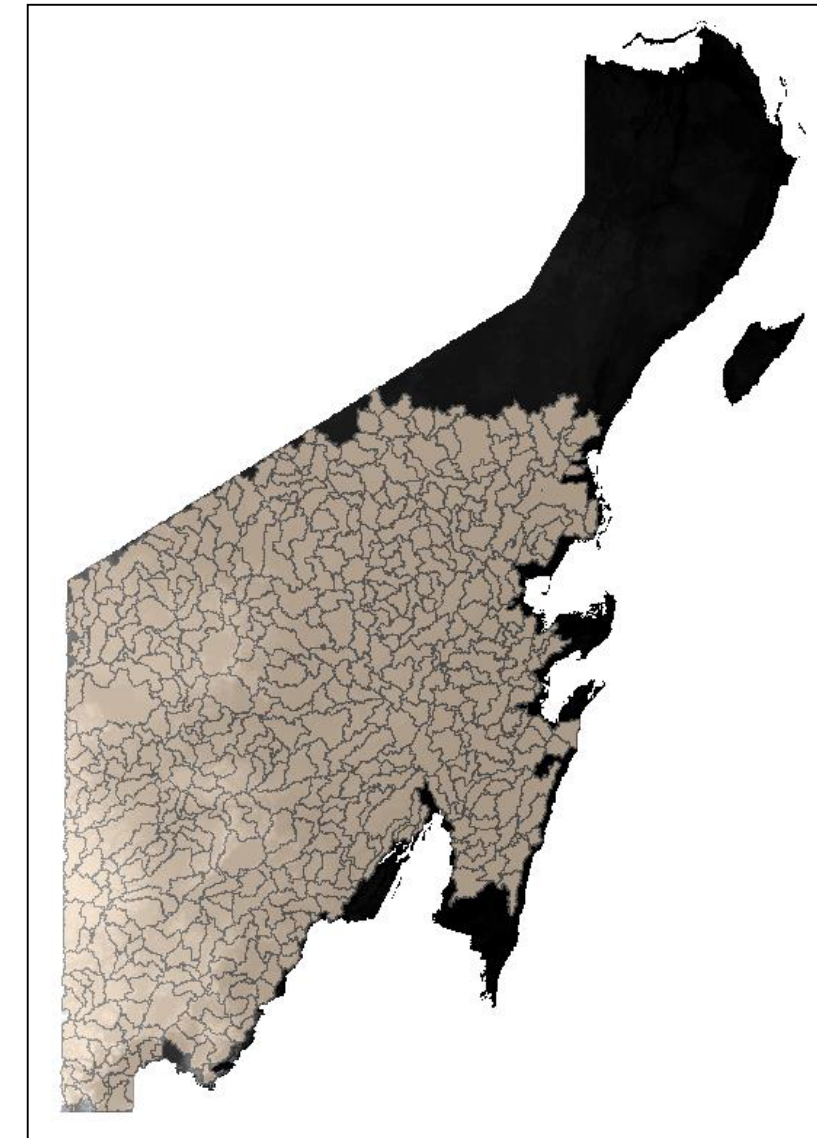


Figura 149. Delimitación de subcuencas con el método se Watershed.

Con este resultado se vió el inconveniente de realizar 622 análisis hidrológicos (uno por subcuenca), principalmente por que el objetivo y el alcance del estudio no persigue detallar a tal nivel de análisis hidrológico. Por lo tanto, se realizó la delimitación de las cuencas con el segundo método, "Basin".

Esta herramienta se localiza en Hydrology en Spatial Analyst Tools, y el raster de dirección de flujo como insumo.

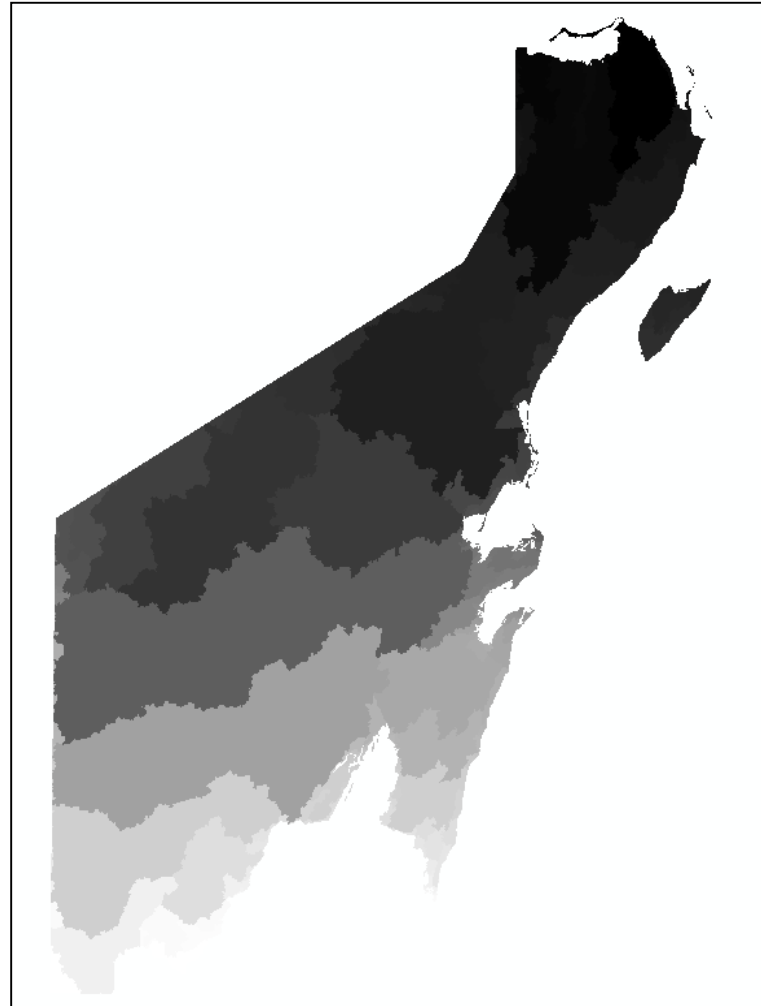


Figura 150. Raster que indica y delimita las cuencas existentes.

El resultado fue de 12 cuencas delimitadas en formato shape de las cuales se obtiene directamente su superficie y perímetro.

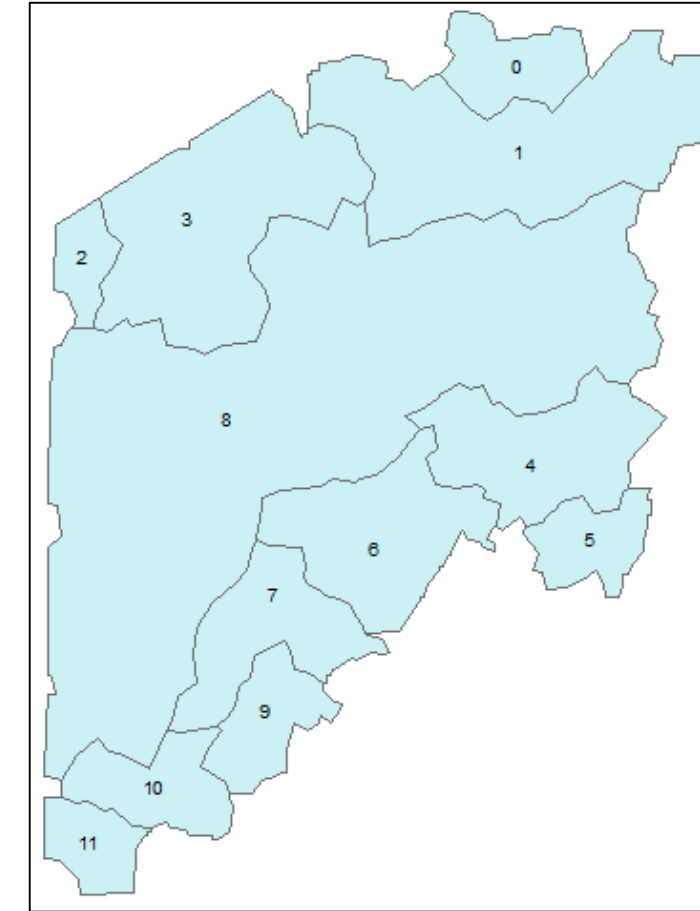


Figura 151. Límite de cuencas en formato shape.

ID_cuenca	Área (km2)	Perímetro (Km)
0	952	141
1	4476	392
2	510	102
3	3710	308
4	2159	245
5	803	141
6	2282	246
7	1658	226
8	14610	757
9	968	148
10	1094	168
11	657	110

Debido a que la metodología está preparada para versiones anteriores de ArcGIS, actualmente, con la versión 10.2 de ArcGIS en un sólo paso se obtienen los resultados de los incisos (i) Identificación de la cuenca tributaria, (ii) Conversión del conjunto de celdas que delimitan la cuenca en un polígono, (k) Delimitación de las subcuencas y (l) Características fisiográficas de las subcuencas.

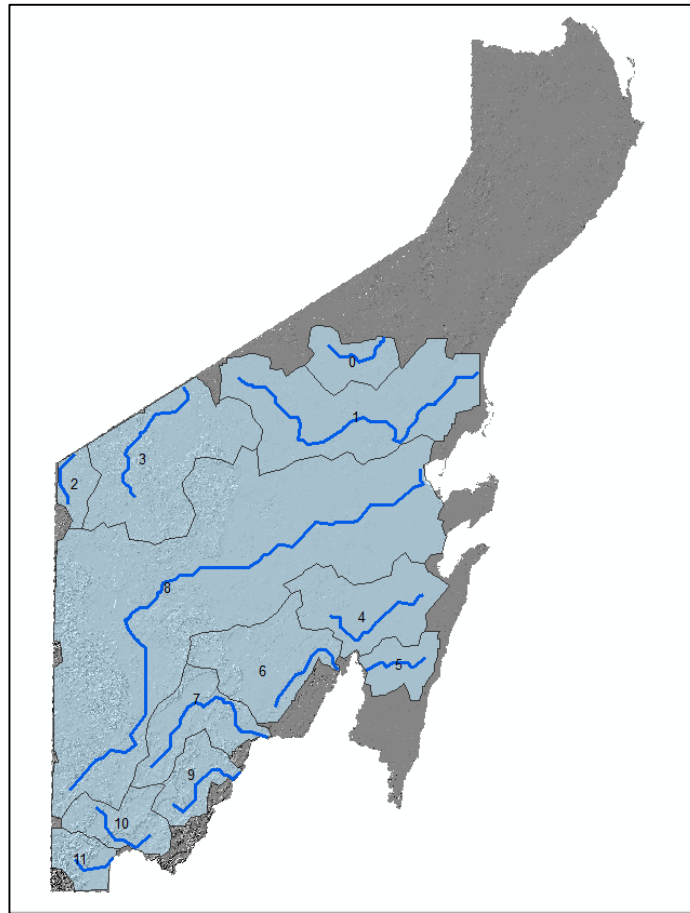


Figura 152. Cuencas y cauces principales sobre el DEM

El cálculo de la pendiente y longitud media del cauce se calculó con la herramienta Add Surface Information que está en Functional Surface dentro de 3D Analyst. Con esta útil herramienta se genera una tabla con los campos de Longitud del cauce, Z mínima, Z máxima, Z promedio, Longitud considerando la tercera dimensión (SLength), la Pendiente Minina, la pendiente máxima y la pendiente promedio.

Se conoce que el software utiliza la fórmula de Taylor-Schwartz:

$$S_{media} = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2 =$$

Donde S es la pendiente media del cauce principal; L es la longitud total del cauce principal; S1, S2,.....,Sm son las pendientes de cada tramo; y L1, L2,.....,Lm son las longitudes de cada tramo.

En la siguiente tabla se observan los datos de longitud y pendiente de los cauces principales por cada cuenca:

Id_cuenca	Longitud	Z_Min	Z_Max	Z_Mean	SLength	Min_Slope	Max_Slope	Avg_Slope
0	38862.4	174.0	186.0	179.9	38911.2	0.0	28.3	1.9

1	167206.1	166.9	186.3	180.0	167352.6	0.0	31.5	1.4
2	27760.2	163.4	212.8	180.3	27836.5	0.0	64.5	5.2
3	74511.3	144.0	209.7	180.1	74505.6	0.0	102.1	6.0
4	61687.4	173.1	186.0	179.9	61743.2	0.0	26.0	1.4
5	34752.3	150.3	211.8	180.0	34839.0	0.0	168.5	1.3
6	50583.8	89.7	235.7	177.3	52917.2	0.0	368.3	18.3
7	90843.8	134.7	225.1	180.0	89135.6	0.0	155.3	4.6
8	288219.8	111.7	235.7	179.8	288874.6	0.0	118.0	2.9
9	49526.1	135.3	212.8	178.9	50150.1	0.0	120.2	9.0
10	39342.4	98.1	210.2	179.2	39532.3	0.0	181.9	5.9
11	22695.4	135.8	210.3	179.6	22749.9	0.0	102.9	4.6

• Gastos de diseño

Aunque la metodología nos indica que para estimar los caudales de diseño en cuencas, se requiere cualquiera de las siguientes: Mapas de isoyetas, elaborados por el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. y el CENAPRED, o bien, • Curvas hp - d - Tr, o • Curvas i - d - Tr, o incluso • Estudio hidrológico de la zona, también es posible calcular estos Gastos con la siguiente información:

- Área de la cuenca
- Cálculo de la pendiente media del cauce
- Cálculo de la lluvia de diseño
- Cálculo del número de escurrimiento

Estos datos se ingresan a una hoja de cálculo de Excel, que fue proporcionado por CENAPRED, (Racional. xls)

(a) Tiempo de concentración

El tiempo de concentración de una cuenca se obtiene con la fórmula de Kirpich (Aparicio, 2001):

$$T_c = 0.000325 (L^{0.77}/S^{0.385})$$

donde: L longitud del cauce principal, (m)

S pendiente del cauce principal, (adim)

L0.77	S 0.385	Constante	Tc
3422.61175	1.29045715	0.000325	0.861980
10524.3938	1.14094933	0.000325	2.997879
2644.56108	1.89068941	0.000325	0.454587
5643.9824	1.99128913	0.000325	0.921159
4883.7525	1.12525791	0.000325	1.410538
3143.3369	1.11605316	0.000325	0.915355
4336.79912	3.05998229	0.000325	0.460610

6479.46776	1.7922123	0.000325	1.174987
16023.0865	1.49988603	0.000325	3.471933
4161.11237	2.33432217	0.000325	0.579338
3464.59691	1.97665128	0.000325	0.569647
2263.98465	1.79555441	0.000325	0.409787

(b) Precipitación e intensidad

Cálculo de la lluvia de diseño.

Para la lluvia de diseño se usó el software visualizador de escenarios de lluvia (VELL), el cual utiliza las isoyetas y ajustes de probabilidad el cual fue revisado y aprobado por el CENAPRED.

Al abrir el VELL, podemos buscar la lluvia de diseño para cada regio hidrográfica, así como por coordenadas. La lluvia de diseño que nos proporciona el programa es de suma importancia en el momento de hacer el cálculo de los gastos, dicha lluvia de diseño se presenta en una tabla especificando sus tiempos de retornos.

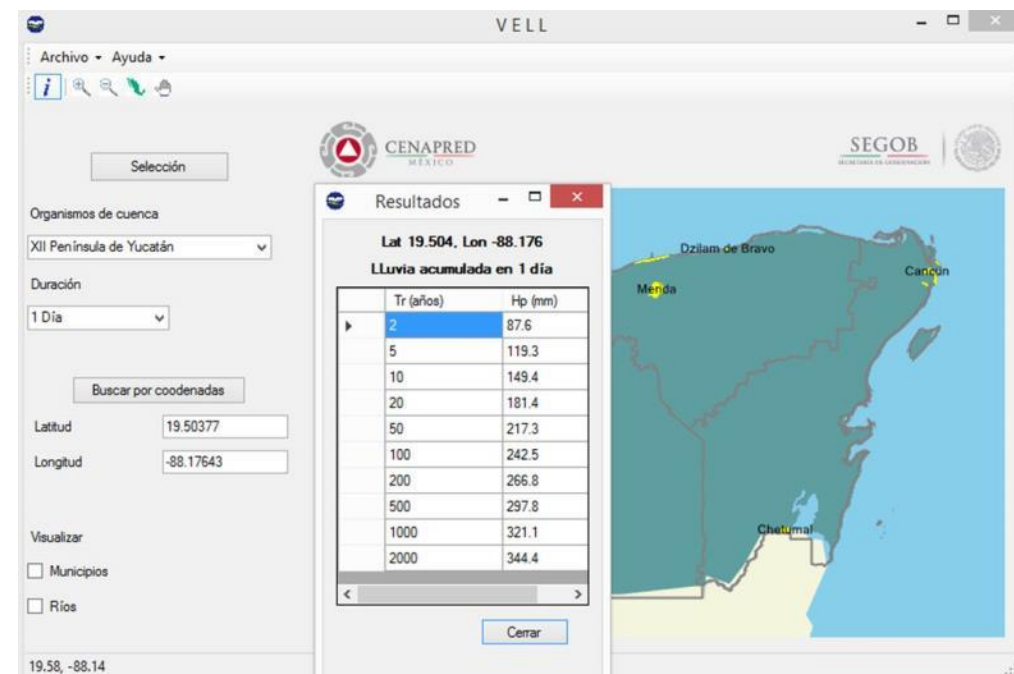


Figura 153. Visualizador de escenarios de lluvia.

(c) Gastos o caudales

Cálculo del número de escurrimiento.

Existen diversos problemas al determinar el número de escurrimiento, sin embargo, estos datos son necesarios para el cálculo caudal. Los parámetros que son recurrentes en el proceso de calcular el número de escurrimiento son: las características generales (forma, pendiente, vegetación, tipo y uso de suelo).

Para el presente trabajo se usó la hoja de Excel proporcionada por CENAPRED, con el nombre de Racional, como dato importante el número de escurrimiento no puede ser menor a 55 ni mayor a 90.

Calculo del caudal, para cada tiempo de retorno.

El caudal es la cantidad de agua que pasa por un canal en determinado tiempo. Para determinar este gasto, se usó la hoja de Excel, por lo que es importante tener a mano los datos obtenidos anteriormente:

- Área de la Cuenca.
- Pendiente media y longitud de la cuenca.
- Calculo de la lluvia de diseño.
- Calculo de número de escurrimiento.

El método por el cual se calculó el gasto máximo es "método racional", que implica la formula.

$$Qd = 0.278 C I A$$

Dónde:

Qd= Gasto calculado.

C= Numero de escurrimiento.

I= Intensidad de la lluvia.

A= Área de la cuenca.

El tiempo de retorno del gasto obtenido está en función de tiempo de retorno de la intensidad de la lluvia.

De esta manera los parámetros calculados para cada una de las cuencas, es el siguiente:

Cuenca 0

Área Cuenca (Km2)	952.2
Longitud Principal (m)	38862.37
Pendiente Media (%)	1.94
Coficiente Escurrimiento	0.75

Lluvia de diseño 24 horas			
Tr (años)	Precipitación diaria (mm)	Precipitación por hora (mm)	Q (mm*Km2)/hr
2	87	3.625	742.983806
5	118.8	4.95	1014.5572
10	148.7	6.19583333	1269.90451
20	180.6	7.525	1542.3319
50	216.3	9.0125	1847.21146
100	241.4	10.0583333	2061.56656
200	265.6	11.0666667	2268.23562
500	296.5	12.3541667	2532.12297
1000	319.7	13.3208333	2730.25199
10000	384.2	16.0083333	3281.08481

Cuenca 1

Área Cuenca (Km2)	4476.16
Longitud Principal (m)	167206.07

Pendiente Media (%)	1.4084
Coeficiente Escurrimiento	0.75

Lluvia de diseño 24 horas			
Tr (años)	Precipitación diaria (mm)	Precipitación por hora (mm)	Q (mm*Km2)/hr
2	85.4	3.558333333	3428.430824
5	116.5	4.854166667	4676.95774
10	145.8	6.075	5853.222648
20	177.1	7.379166667	7109.778676
50	212.1	8.8375	8514.873276
100	236.7	9.8625	9502.454052
200	260.4	10.85	10453.90382
500	290.7	12.1125	11670.31429
1000	313.4	13.05833333	12581.6185
10000	381.2	15.88333333	15303.48747

Cuenca 2	
Área Cuenca (Km2)	509.83
Longitud Principal (m)	27760.18
Pendiente Media (%)	5.22
Coeficiente Escurrimiento	0.75

Lluvia de diseño 24 horas			
Tr (años)	Precipitación diaria (mm)	Precipitación por hora (mm)	Q (mm*Km2)/hr
2	79.5	3.3125	363.5167561
5	108.4	4.516666667	495.6630989
10	135.8	5.658333333	620.9506349
20	164.9	6.870833333	754.0114853
50	197.5	8.229166667	903.076218
100	220.4	9.183333333	1007.787334
200	242.5	10.10416667	1108.84042
500	270.7	11.27916667	1237.785986
1000	291.8	12.15833333	1334.266534
10000	385.6	16.06666667	1763.170581

Cuenca 3	
Área Cuenca (Km2)	3710
Longitud Principal (m)	74511
Pendiente Media (%)	5.983
Coeficiente Escurrimiento	0.75

Lluvia de diseño 24 horas			
----------------------------------	--	--	--

Tr (años)	Precipitación diaria (mm)	Precipitación por hora (mm)	Q (mm*Km2)/hr
2	91.7	3.820833333	3051.231531
5	125.5	5.229166667	4175.894844
10	157.3	6.554166667	5234.010031
20	191.7	7.9875	6378.637781
50	229.9	9.579166667	7649.706969
100	256.7	10.69583333	8541.451844
200	282.5	11.77083333	9399.922656
500	315.4	13.14166667	10494.63931
1000	340.2	14.175	11319.83606
10000	372.1	15.50416667	12381.27866

Cuenca 4	
Área Cuenca (Km2)	2158.65
Longitud Principal (m)	61687.38
Pendiente Media (%)	1.35
Coeficiente Escurrimiento	0.75

Lluvia de diseño 24 horas			
Tr (años)	Precipitación diaria (mm)	Precipitación por hora (mm)	Q (mm*Km2)/hr
2	92	3.833333333	1781.156081
5	125.8	5.241666667	2435.537337
10	157.5	6.5625	3049.26177
20	191.2	7.966666667	3701.706986
50	229.1	9.545833333	4435.46585
100	255.7	10.65416667	4950.452282
200	281.2	11.71666667	5444.142283
500	314	13.08333333	6079.163147
1000	338.5	14.10416667	6553.492755
10000	374.2	15.59166667	7244.658757

Cuenca 5	
Área Cuenca (Km2)	803.02
Longitud Principal (m)	34752.28
Pendiente Media (%)	1.33
Coeficiente Escurrimiento	0.75

Lluvia de diseño 24 horas			
Tr (años)	Precipitación diaria (mm)	Precipitación por hora (mm)	Q (mm*Km2)/hr

2	93.4	3.891666667	672.6747974
5	127.7	5.320833333	919.7063343
10	159.9	6.6625	1151.613491
20	194.1	8.0875	1397.92482
50	232.5	9.6875	1674.484908
100	259.5	10.8125	1868.94122
200	285.5	11.89583333	2056.195446
500	318.7	13.27916667	2295.304689
1000	343.6	14.31666667	2474.636621
10000	381.3	15.8875	2746.155249

Cuenca 6

Área Cuenca (Km2)	2282.22
Longitud Principal (m)	50583.81
Pendiente Media (%)	1.826
Coefficiente Escurrimiento	0.75

Lluvia de diseño 24 horas			
Tr (años)	Precipitación diaria (mm)	Precipitación por hora (mm)	Q (mm*Km2)/hr
2	95.7	3.9875	1958.850822
5	130.8	5.45	2677.30081
10	163.7	6.820833333	3350.719744
20	198.8	8.283333333	4069.169732
50	238.1	9.920833333	4873.588095
100	265.8	11.075	5440.569994
200	292.4	12.18333333	5985.036367
500	326.4	13.6	6680.970828
1000	351.9	14.6625	7202.921674
10000	393.5	16.39583333	8054.417956

Cuenca 7

Área Cuenca (Km2)	1657.68
Longitud Principal (m)	90843.8
Pendiente Media (%)	4.551
Coefficiente Escurrimiento	0.75

Lluvia de diseño 24 horas			
Tr (años)	Precipitación diaria (mm)	Precipitación por hora (mm)	Q (mm*Km2)/hr
2	95.5	3.979166667	1419.828821
5	130.5	5.4375	1940.184934
10	163.4	6.808333333	2429.31968

20	198.4	8.266666667	2949.675792
50	237.7	9.904166667	3533.96137
100	265.3	11.05416667	3944.299333
200	291.8	12.15833333	4338.283247
500	325.8	13.575	4843.772042
1000	351.2	14.63333333	5221.401906
10000	394.1	16.42083333	5859.209827

Cuenca 8

Área Cuenca (Km2)	14610
Longitud Principal (m)	288219.8
Pendiente Media (%)	2.866
Coefficiente Escurrimiento	0.75

Lluvia de diseño 24 horas			
Tr (años)	Precipitación diaria (mm)	Precipitación por hora (mm)	Q (mm*Km2)/hr
2	87.4	3.641666667	11452.32244
5	119.4	4.975	15645.39244
10	149.5	6.229166667	19589.49891
20	181.5	7.5625	23782.56891
50	217.4	9.058333333	28486.66931
100	242.7	10.1125	31801.81528
200	267	11.125	34985.92781
500	298	12.41666667	39047.96438
1000	321.3	13.3875	42101.04347
10000	352.2	14.675	46149.97669

Cuenca 9

Área Cuenca (Km2)	967.56
Longitud Principal (m)	49526.05
Pendiente Media (%)	9.04
Coefficiente Escurrimiento	0.75

Lluvia de diseño 24 horas			
Tr (años)	Precipitación diaria (mm)	Precipitación por hora (mm)	Q (mm*Km2)/hr
2	102.7	4.279166667	891.2104451
5	139.5	5.8125	1210.553623
10	174.7	7.279166667	1516.012315
20	212.1	8.8375	1840.562175
50	254.1	10.5875	2205.029933
100	283.6	11.81666667	2461.025144

200	311.9	12.99583333	2706.60699
500	348.2	14.50833333	3021.611266
1000	375.5	15.64583333	3258.515308
10000	450.2	18.75833333	3906.747248

10000	402.3	16.7625	2370.359772
-------	-------	---------	-------------

Cuenca 10

Área Cuenca (Km2)	1094
Longitud Principal (m)	39342.39
Pendiente Media (%)	5.87
Coefficiente Escurrimiento	0.75

Lluvia de diseño 24 horas

Tr (años)	Precipitación diaria (mm)	Precipitación por hora (mm)	Q (mm*Km2)/hr
2	88.8	3.7	871.28895
5	121.6	5.066666667	1193.1164
10	152.6	6.358333333	1497.282588
20	186.1	7.754166667	1825.978306
50	223.4	9.308333333	2191.958913
100	249.6	10.4	2449.0284
200	274.7	11.44583333	2695.304894
500	306.9	12.7875	3011.245256
1000	331	13.79166667	3247.709938
10000	391.4	16.30833333	3840.343413

Cuenca 11

Área Cuenca (Km2)	656.95
Longitud Principal (m)	22695.42
Pendiente Media (%)	4.57
Coefficiente Escurrimiento	0.75

Lluvia de diseño 24 horas

Tr (años)	Precipitación diaria (mm)	Precipitación por hora (mm)	Q (mm*Km2)/hr
2	89.4	3.725	526.7466159
5	122.7	5.1125	722.9508923
10	154.4	6.433333333	909.7279363
20	189	7.875	1113.591839
50	227.8	9.491666667	1342.202227
100	255	10.625	1502.46518
200	281	11.70833333	1655.657708
500	314.4	13.1	1852.451186
1000	339.3	14.1375	1999.162492

3. Generación de escenarios de peligro

(a) Clasificación de modelos de simulación

Para simular una inundación existen diferentes modelos que son producto de las hipótesis simplificadoras aceptadas para resolver las ecuaciones que definen el comportamiento del fenómeno. De acuerdo con lo anterior, se cuenta con modelos hidráulicos y modelos hidrológicos, siendo los primeros los que mejores resultados obtienen. Más aún, dentro de los hidráulicos se tienen modelos que analizan el comportamiento del flujo en una, dos y tres dimensiones; obviamente su precisión mejora en función de las dimensiones usadas para su análisis; sin embargo, también los requerimientos de información son mayores.

Los programas empleados en esta parte de la metodología han sido seleccionados debido a su facilidad de uso y, aunque es software libre, cuentan con un buen soporte técnico. El modelo hidráulico propuesto para ser usado es HecRAS, propuesto por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE, 2002) debido a que:

1) Es un modelo ampliamente reconocido y por ende está validado,

2) Es público, lo que significa que no tiene ningún costo y

3) Pese a que es un modelo unidimensional, en la mayoría de los casos esta hipótesis no tiene mayores repercusiones; sin embargo, habrá algunos casos en los que sea necesario emplear algún modelo bidimensional. En este sentido, actualmente se está revisando el programa de cómputo Mike Flood y, aunque no es el único en su tipo, es una opción para el modelado de flujo bidimensional.

(b) Preparación de archivos en Arc GIS

Creación de la estructura de la dirección del flujo.

Usando la red de drenaje generada, y con ayuda de la extensión Hec-GeoRas⁷⁶, se procede a digitalizar el cauce de interés, la digitalización se realizó de aguas arriba a aguas abajo.

La información mínima que se digitalizó para usar en Hec-Ras, es la siguiente:

- Stream Centerline, que es el cauce del río.
- Flow Path Certerlines, es la combinación del cauce y los bordes del río.
- XC Cut Lines, líneas perpendiculares al cauce cuyas distancias son las estimadas de la inundación.

Una vez que se generaron las capas, se procede a rellenarlas con datos de alturas, por lo cual se procede a generar

⁷⁶ Es una extensión para ArcGis 10.2, desarrollada conjuntamente por el *Hydrologic Engineering Center*, con los que se crean archivos de inportacion para Hec-Ras

un TIN a partir del MDE, para la cual en la opción "RAS Geometry/Layer Septup".

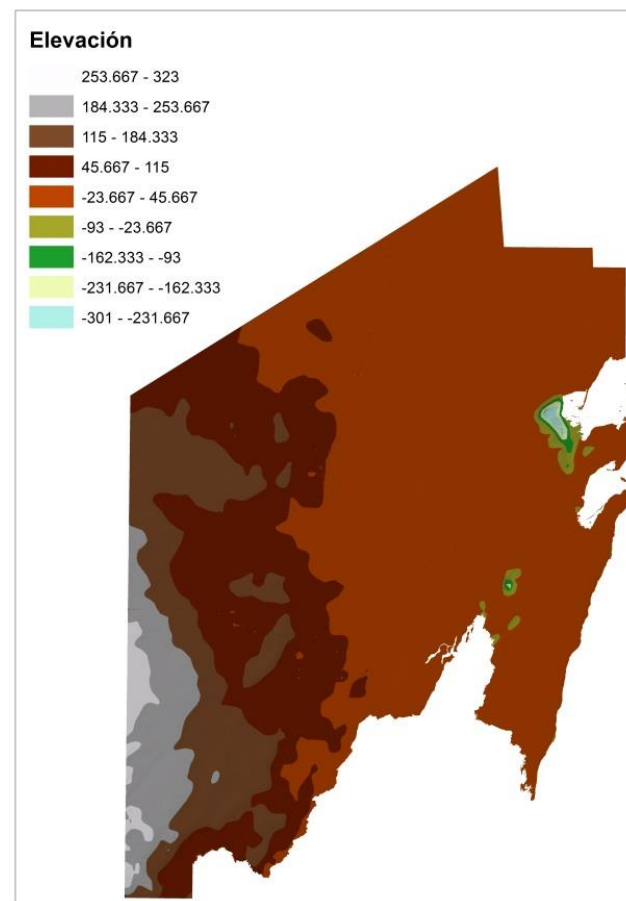


Figura 154. TIN resultante.

Con la obtención de los vectores anteriores, se procede a crear el fichero de importación para HEC-RAS, en la barra de inicio "Ras Geometry / Extract GI data", este fichero de texto se guarda con formato *sdf*.

(d) Creación del proyecto en HecRAS (simulación del tránsito de avenidas)

La simulación de inundación por lluvias a nivel de municipios, y la exportación de resultados hacia ArcGis, se llevo acabo en cinco etapas.

- ➔ Importación de datos geométricos en Hec-Ras.
- ➔ Complementación de la información geométrica.
- ➔ Información de los caudales que serán simulados.
- ➔ Condiciones de frontera en el rio.
- ➔ Ejecución del programa, verificación y exportación de los resultados.

Importación de datos Introducción

En esta etapa, se lee el archivo que contiene la información geométrica del proyecto creado en ArcGis, pero antes de importarlo se debe generar un nuevo proyecto y guardarlo, una vez que se generó el nuevo proyecto se procede a importar la

geometría.

En la opción de "River Reach Stream Lines", se verifica que la estructura que se importo sea correcta, después de confirmar que toda la información que se está importando es correcta, se selecciona "Finished - Import Data". En ese momento se desplegará el modelo que será simulado en Hec-RAS, el cual debe coincidir con la estructura creada en ArcGis.

(e) Completado de la información

La información que se ingresa son los datos mínimos requeridos para realizar una simulación

En la ventana donde se importó la estructura geométrica, se procedió a definir el coeficiente "n" de Manning para cada sección, mediante el menú de herramientas se seleccionó "Tables/Mannin´s n or k values", para definir el coeficiente de rugosidad, se seleccionó n#1, n#2 y n#3, seguido de "set values..", en la ventana que emerge se tecleo como coeficiente de rugosidad "0.0035", seguido del botón "ok", con este procesos se completa las zonas del cauce con el coeficiente de rugosidad.

Tabla 72. Coeficiente de rugosidad. Coeficientes de Manning, fuente www.fao.org

Canales sin vegetación	Rugosidad de Manning
Secciones transversales, alineación regular si guijarros ni vegetación, en suelos sedimentarios finos.	0.016
Secciones transversales uniformes, alineación regular, sin guijarros ni vegetación, con suelo de arcillas duros u horizontales endurecidos	0.018
Secciones transversales uniformes, alineación regular, con pocos guijarros, escasa vegetación, en tierra franca arcillosa.	0.020
Pequeñas variaciones en las secciones transversales, alineación bastante regular, pocas piedras, hierbas finas en las orillas, en suelos arenosos o arcillosos, y también en canales limpios y rastrillados	0.0225
Alineación irregular, con ondulaciones en el fondo, en suelo grava o esquistos arcillosos, con orillas irregulares o vegetación	0.025
Sección transversal y alineación irregular, rocas dispersas y grava suelta en el fondo, o con considerable vegetación en los márgenes inclinados.	0.030
Canales irregulares erosionados, o canales abiertos en la roca.	0.030
Canales con vegetacion	
Gramineas cortas (50-150mm)	0.030-0.060
Gramineas medias (150-250mm)	0.030-0.085
Gramineas largas (250-600m)	0.040-0.150
Canales corriente natural	
Limpios y rectos	0.025-0.030
Con muchas hierbas altas, sinuosos	0.033-0.040

(f) Gastos

Previamente a este paso, ya se había realizado el cálculo de los gastos/caudal para cada cuenca de interés, esto, asociados con diferentes periodos de retorno (índice 4.5 cálculo del gasto caudal para cada tiempo de retorno).

La información referente a caudales se ingresó a través del menú "Steady Flow Data", que se activó seleccionando el ícono "Edit/Enter steady flow data", desde la pantalla principal de HecRAS, el número de perfiles que se simularán corresponde a los gastos que se ingresarán a través de la opción "Enter/Edit Number of Profiles". En este trabajo se obtuvieron 9 valores, correspondientes a 9 periodos de retorno, para cada una de las ciudades.

En la misma ventada donde se ingresaron los caudales; igualmente se registraron las condiciones de frontera, para lo cual se seleccionó el botón "Reach Boundry Conditions"; seguidamente, la columna que hace referente al rio tanto en "Upstream" y "Downstream", para ambos casos se seleccionó la opción "Critical Depth".

(g) Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera deben establecerse en todos los extremos de la red de drenaje.

(h) Ejecución del programa e interpretación de resultados

Una vez que se completaron los datos requeridos, se procede a ejecutar la simulación, en donde se selecciona un régimen de flujo mixto. Con este proceso obtenemos los resultados de la zona de inundación.

(i) Verificación y exportación de resultados

El primer paso fue convertir el formato exportado de Hec-Ras a formato compatible con Arcgis, seguidamente se usó la barra de herramienta "RAS Mapping", donde se seleccionó la opción "Layer Setup", y se ingresaron datos de entrada como son:

- El nombre con el cual se guardará el proyecto.
- El archivo exportado de Hec-Ras, previamente convertido.
- Se ingresa la ubicación del TIN, usado anteriormente.
- Finalmente se ingresa la ubicación en donde se guardará los resultados.

Después de ingresar los datos seleccionamos "ok", lo que generó un nuevo proyecto en Arcgis, en donde aparece el TIN con el que le dimos alturas a la estructura trazada; seguidamente se seleccionó "RAS Mapping/Import Ras Data", el cual genera polígonos, en donde se marcarán las Zonas inundadas.

El primer paso fue convertir el formato exportado de Hec-Ras a formato compatible con Arcgis, seguidamente se usó la barra de herramienta "RAS Mapping", donde se seleccionó la opción "Layer Setup", y se ingresaron datos de entrada como son:

- El nombre con el cual se guardará el proyecto.
- El archivo exportado de Hec-Ras, previamente convertido.
- Se ingresa la ubicación del TIN, usado anteriormente.
- Finalmente se ingresa la ubicación en donde se guardará los resultados.

Después de ingresar los datos seleccionamos "ok", lo que generó un nuevo proyecto en Arcgis, en donde aparece el TIN con el que le dimos alturas a las estructuras trazadas; seguidamente se seleccionó "RAS Mapping/Import Ras Data", el cual genera polígonos, en donde se marcarán las Zonas inundadas.

(i) Mapas de inundación

Para visualizar las zonas inundables para cada tiempo de retorno, lo primero es generar un TIN, que contenga las alturas de inundación, para lo cual se tiene que ir a "RAS Mapping/ Inundation Mapping/ Water Surface Generation" y seleccionar los tiempos de retorno de nuestro interés para la generación de su respectivo TIN.

Una vez que se obtuvieron los TIN de las zonas que se desean calcular, se procedió a generar las zonas de inundación, con la opción "RAS Mapping/ Inundation Mapping/ Floodplain Delineation Using Rasters", con los resultados de este análisis procedemos a generar nuestros mapas de inundación.

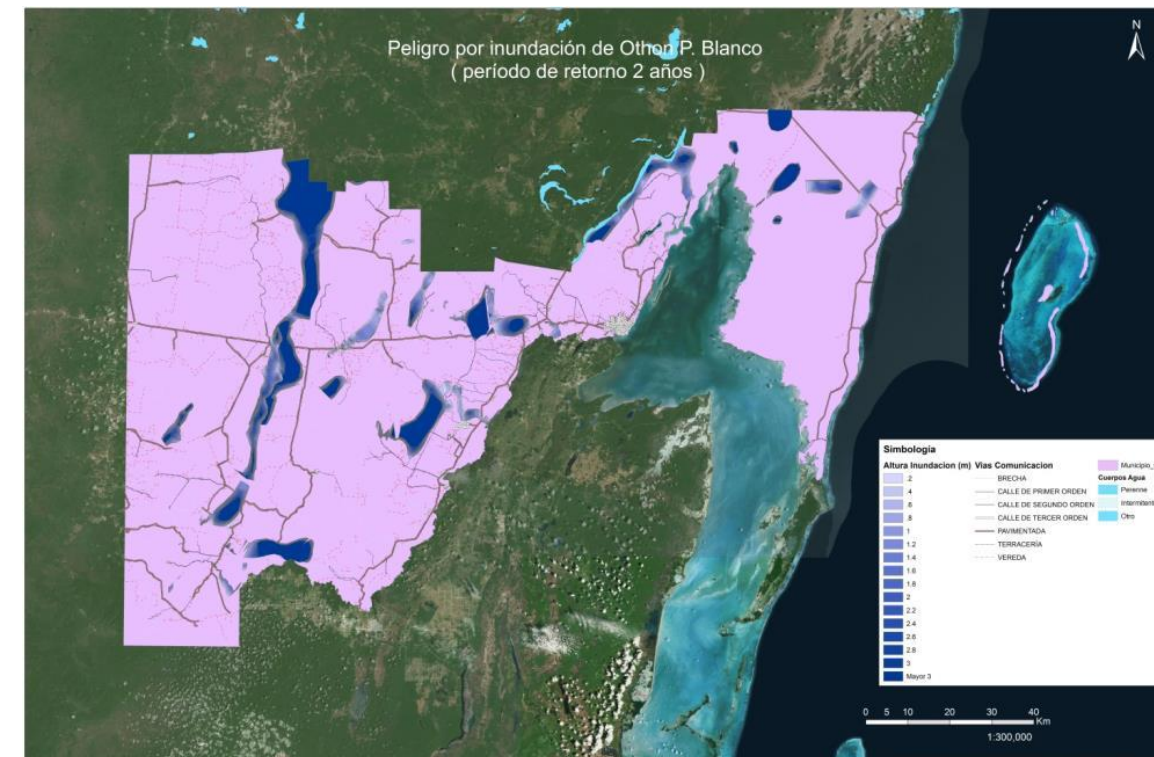
(k) Importación del resultado de la simulación

Los resultados de la simulación se exportan de nueva cuenta a ArcGis, una vez que se importa los datos estos se convierten en formato .XML para que puedan ser leídos y poder generar las zonas de inundación.

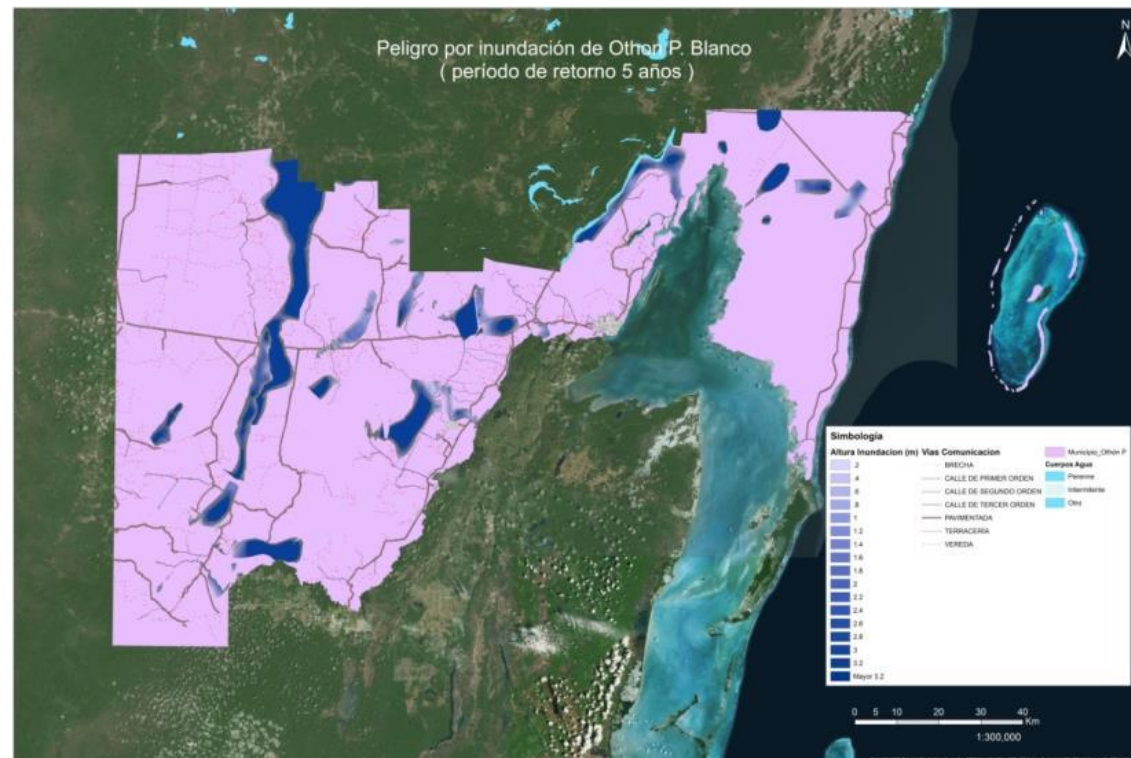
(l) Mapas de inundación

a) Resultados

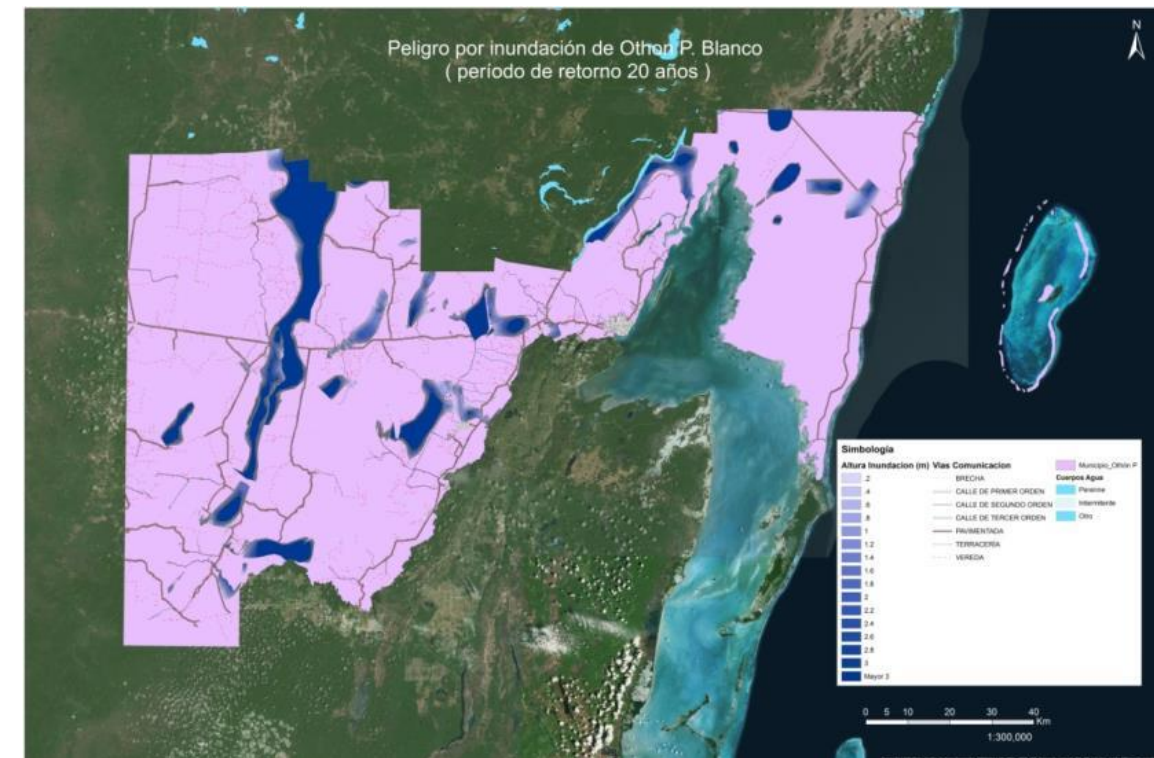
Municipio de Othón P. Blanco



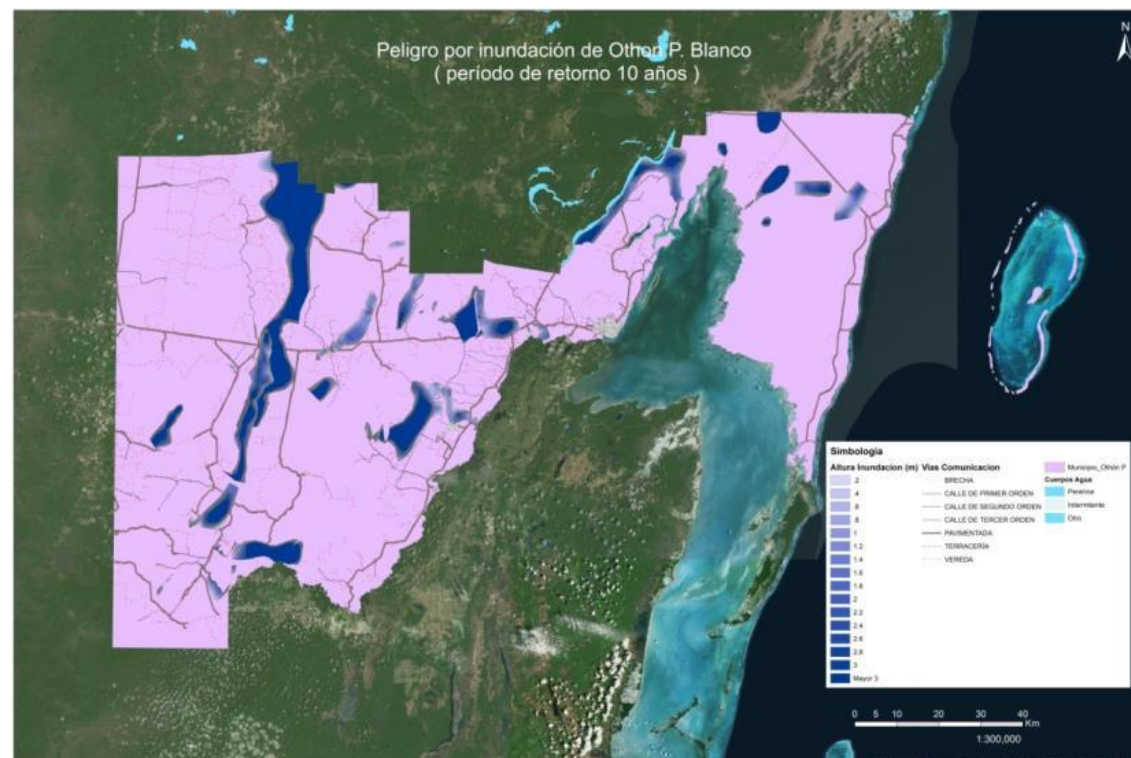
Mapa 93. Inundación municipal de Othón P. Blanco, para un tiempo de retorno de 2 años.



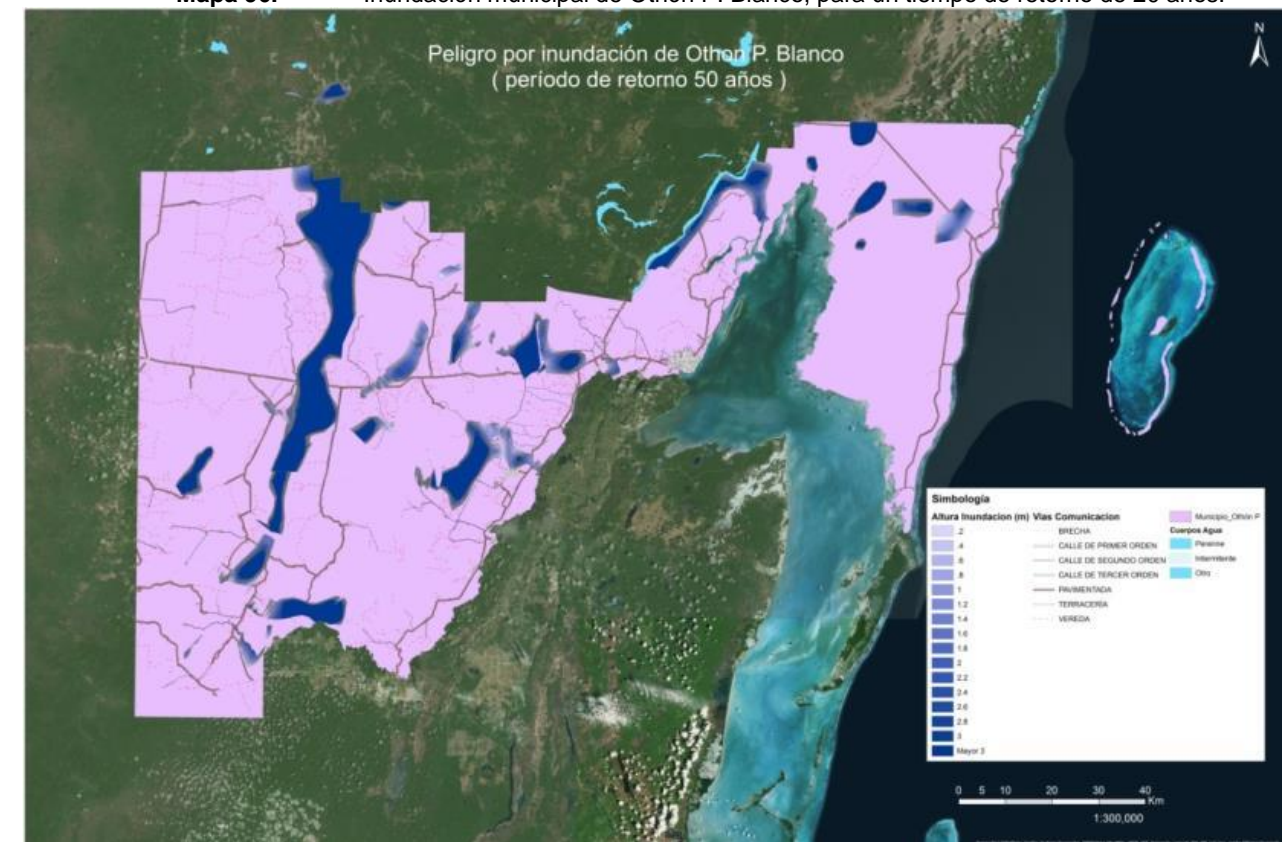
Mapa 94. Inundación municipal de Othón P. Blanco, para un tiempo de retorno de 5 años.

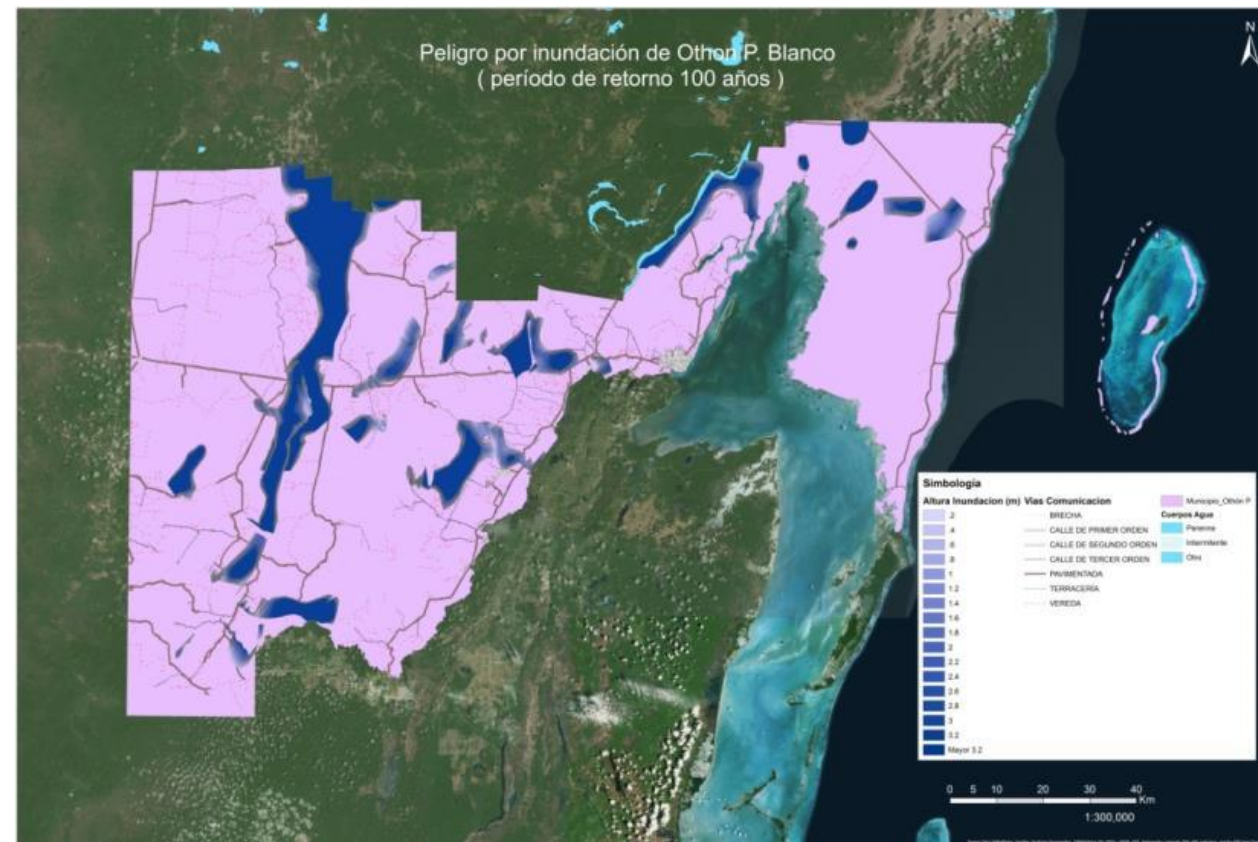


Mapa 96. Inundación municipal de Othón P. Blanco, para un tiempo de retorno de 20 años.

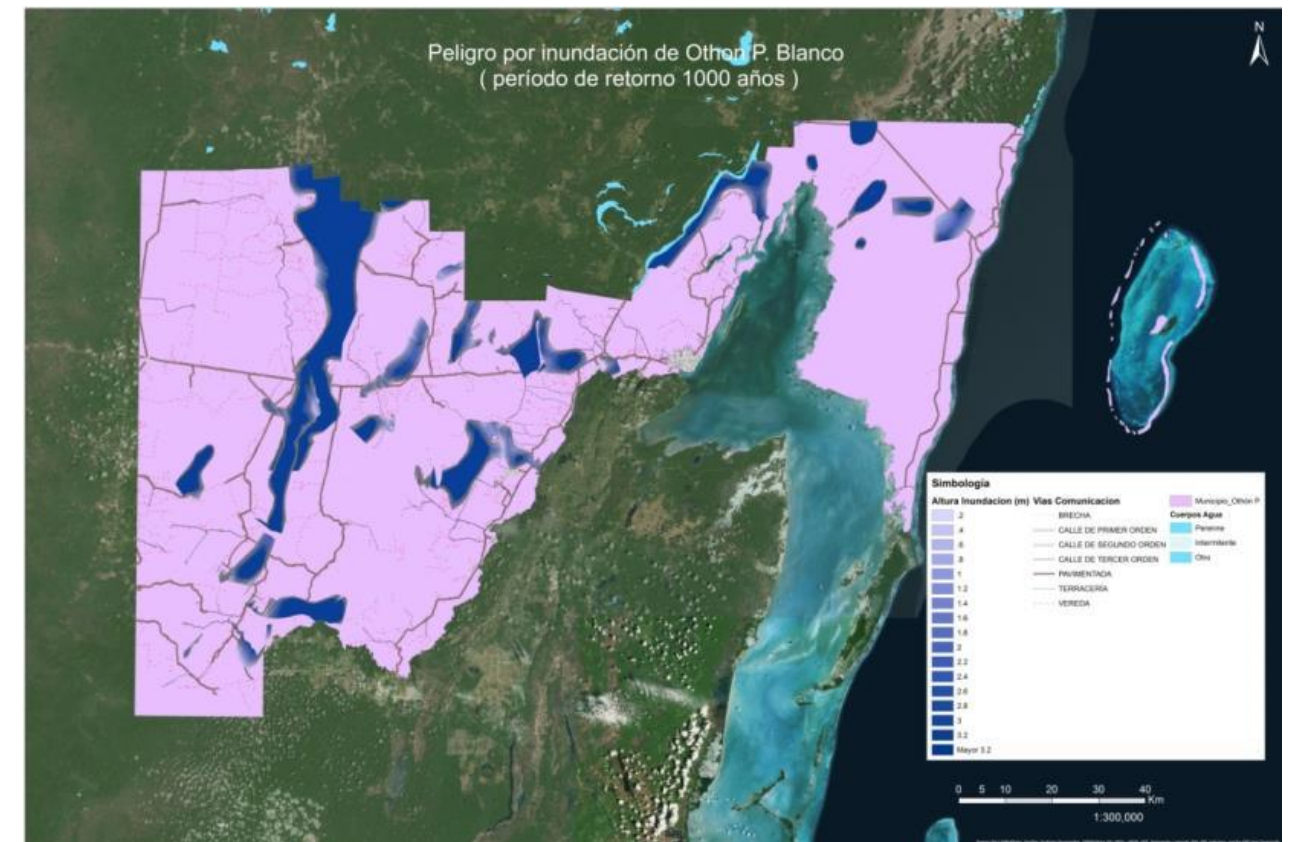


Mapa 95. Inundación municipal de Othón P. Blanco, para un tiempo de retorno de 10 años.

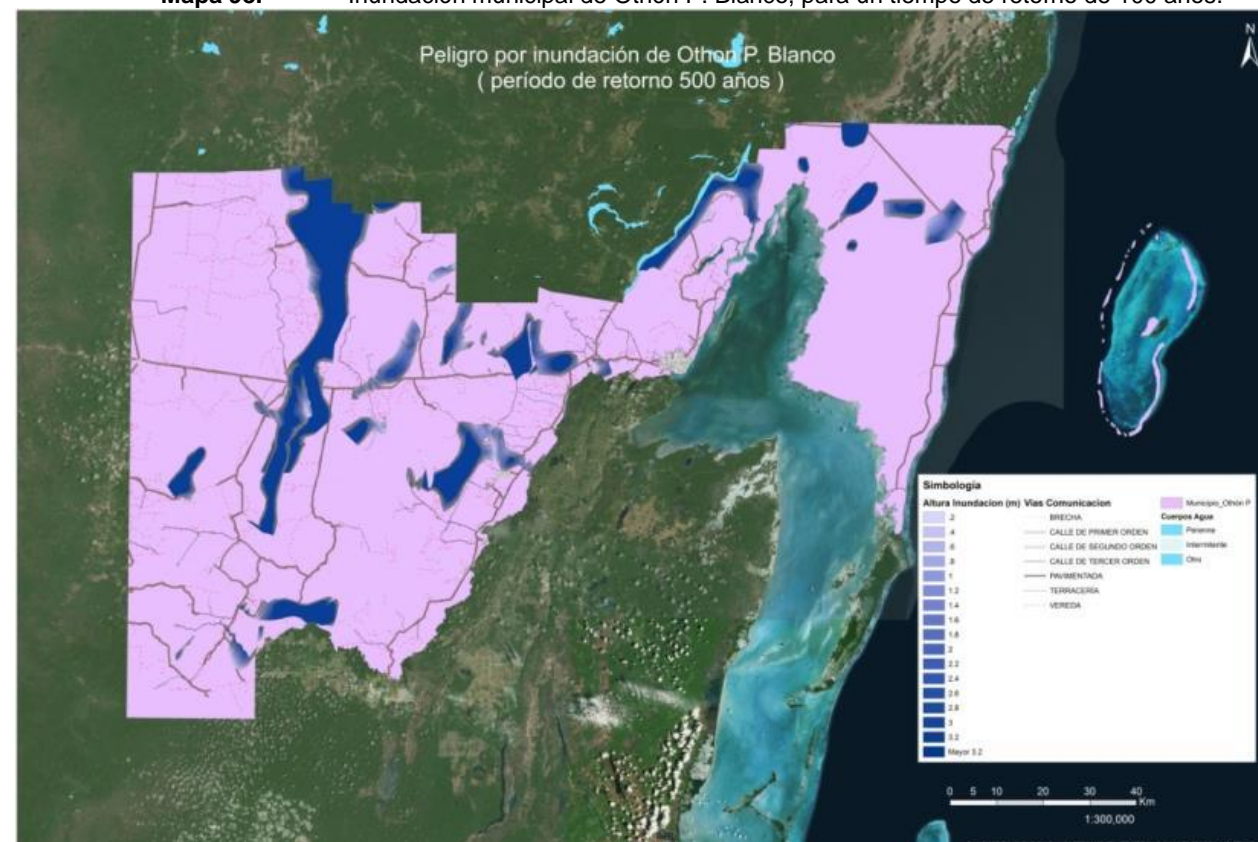




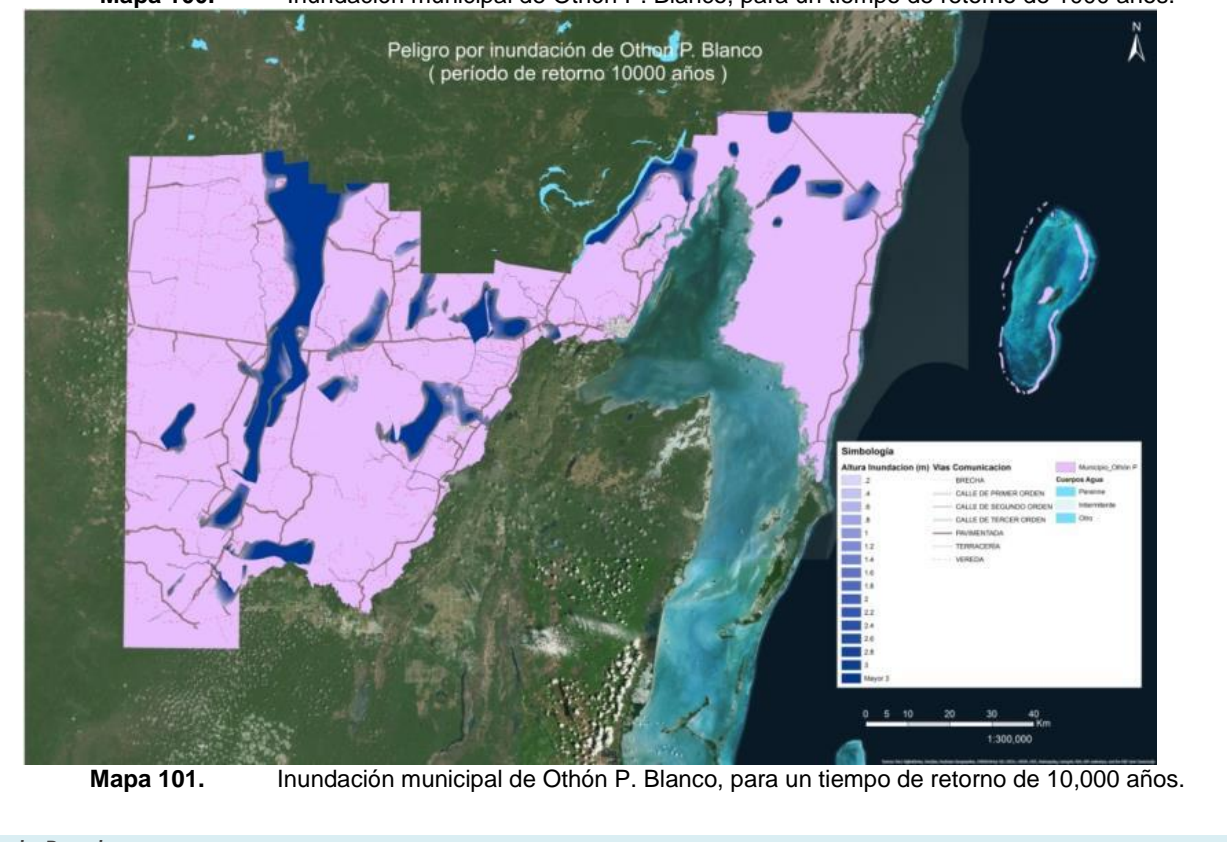
Mapa 98. Inundación municipal de Othón P. Blanco, para un tiempo de retorno de 100 años.



Mapa 100. Inundación municipal de Othón P. Blanco, para un tiempo de retorno de 1000 años.

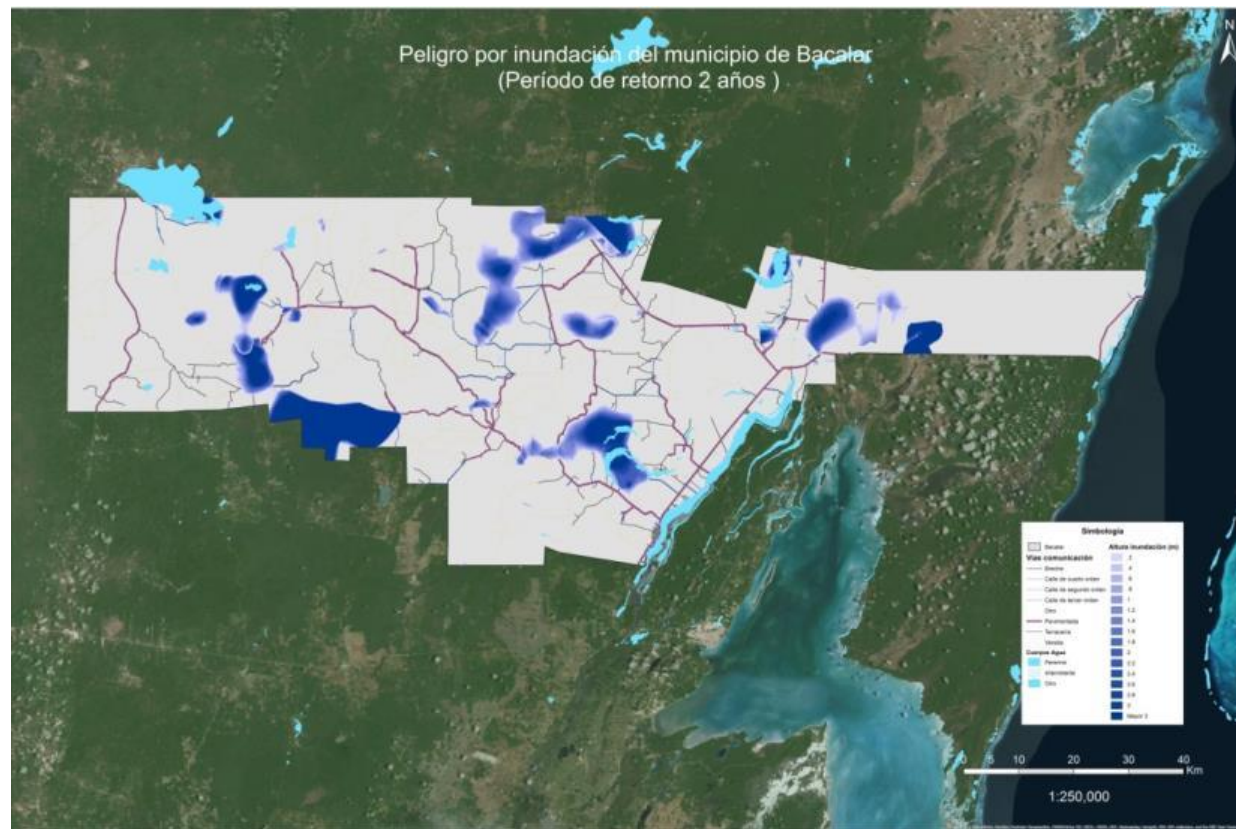


Mapa 99. Inundación municipal de Othón P. Blanco, para un tiempo de retorno de 500 años.

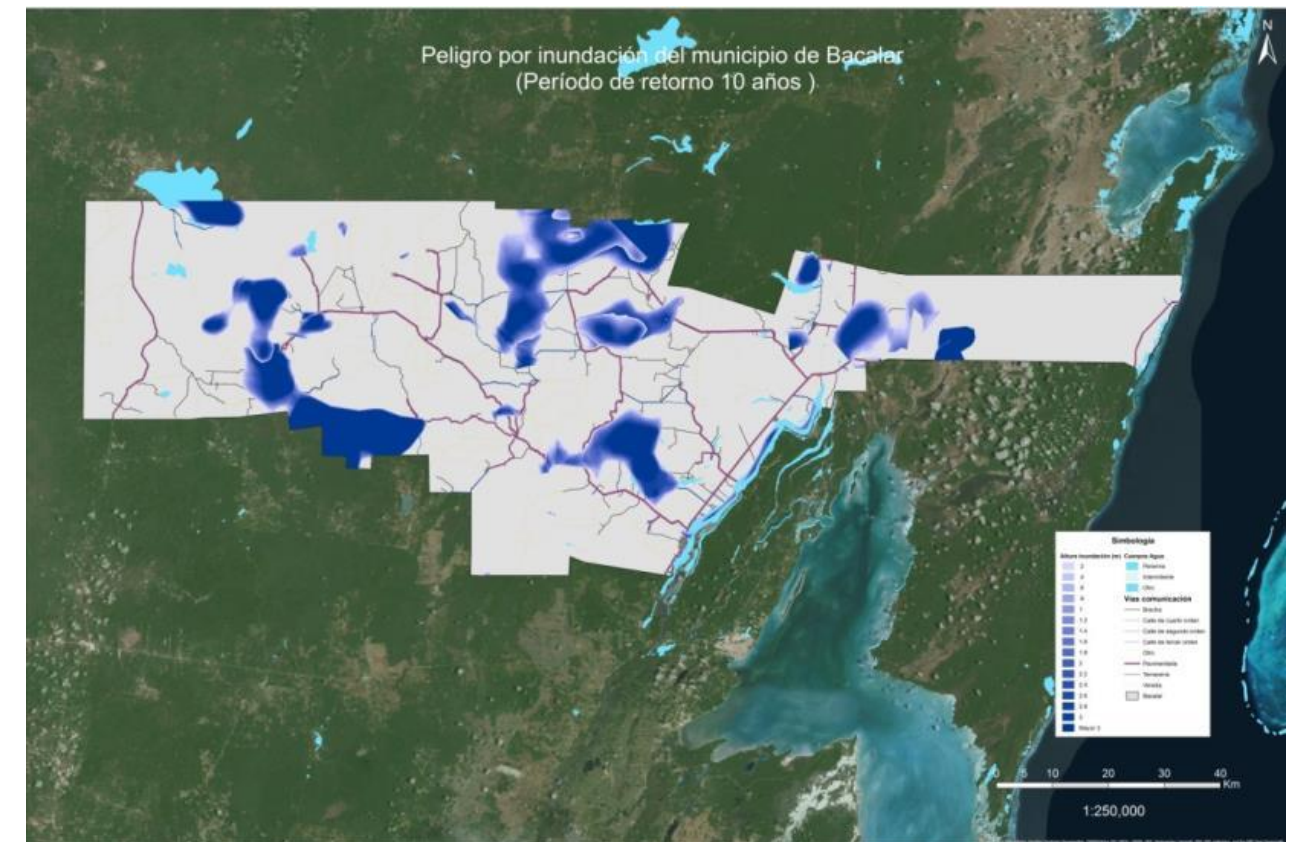


Mapa 101. Inundación municipal de Othón P. Blanco, para un tiempo de retorno de 10,000 años.

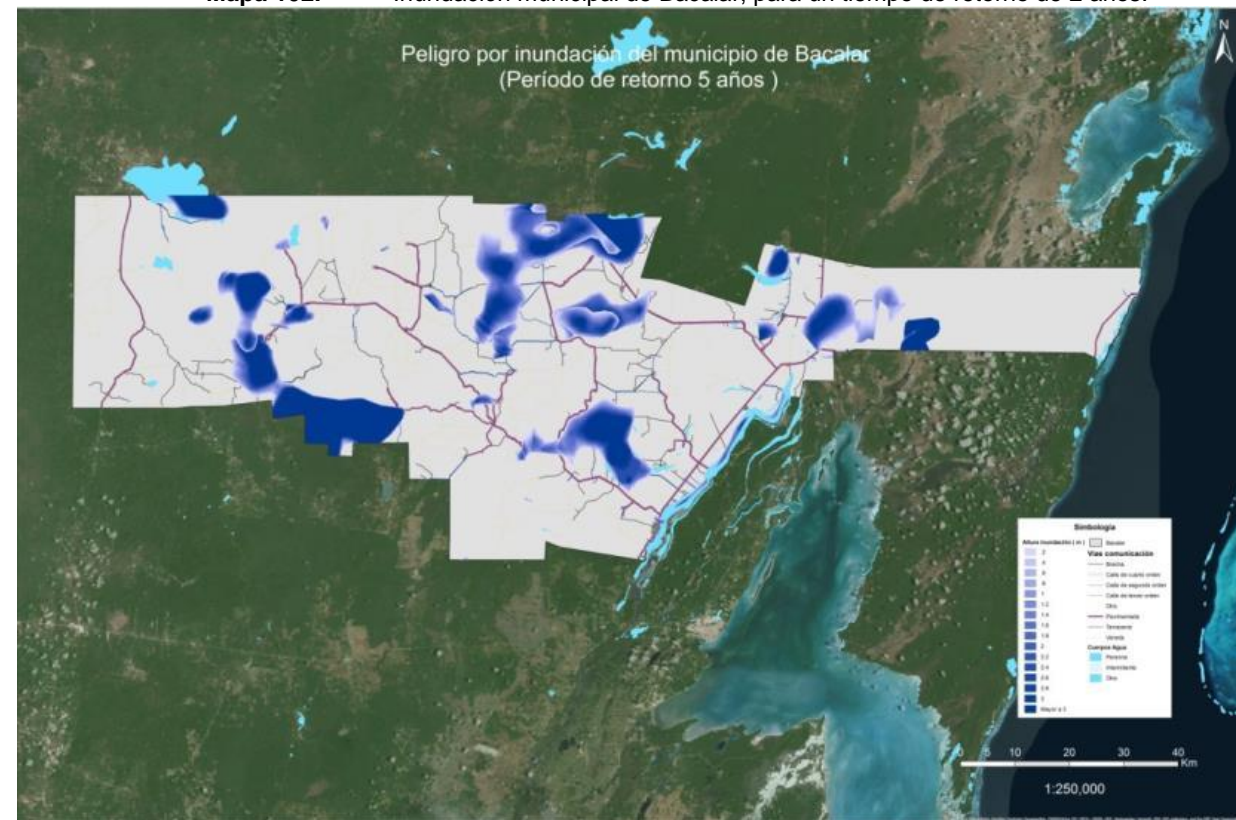
Municipio de Bacalar



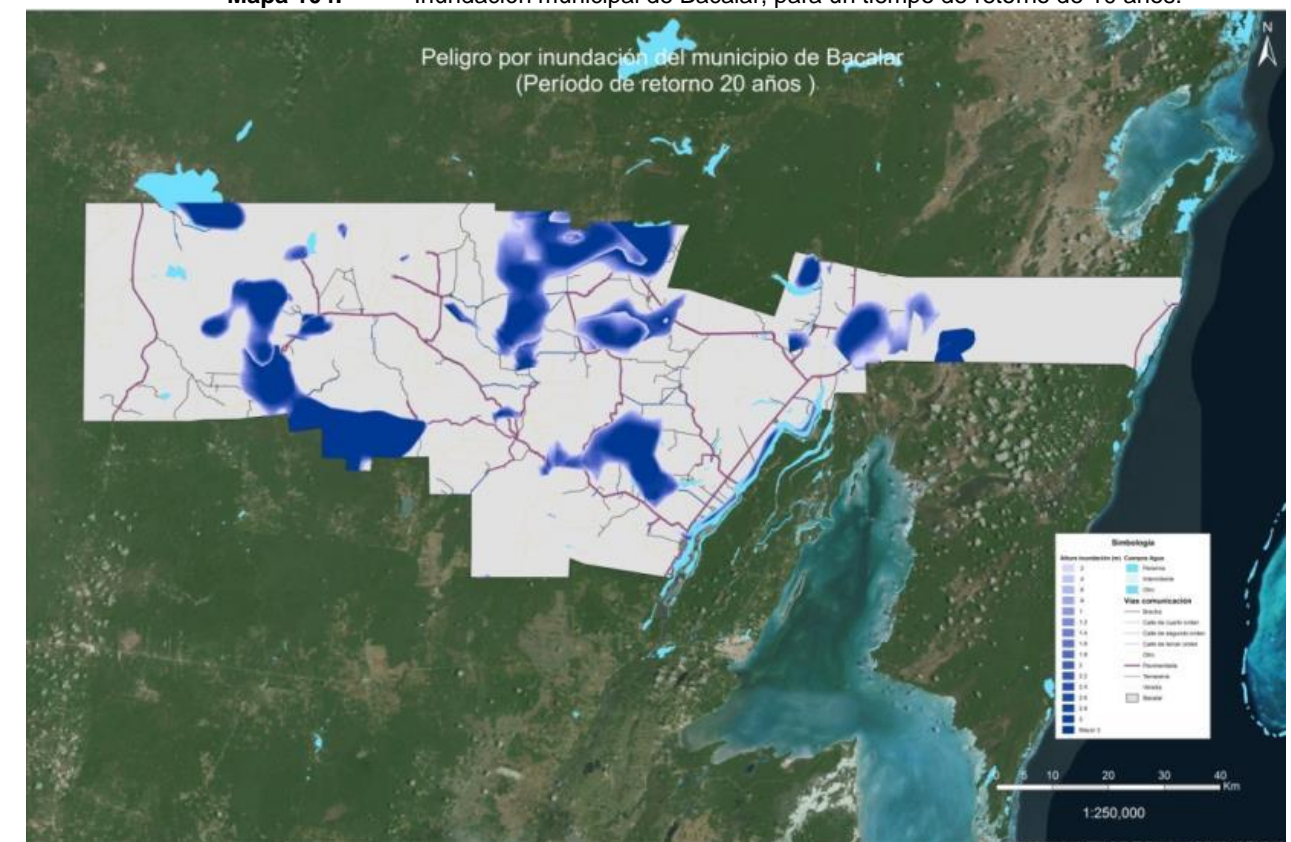
Mapa 102. Inundación municipal de Bacalar, para un tiempo de retorno de 2 años.



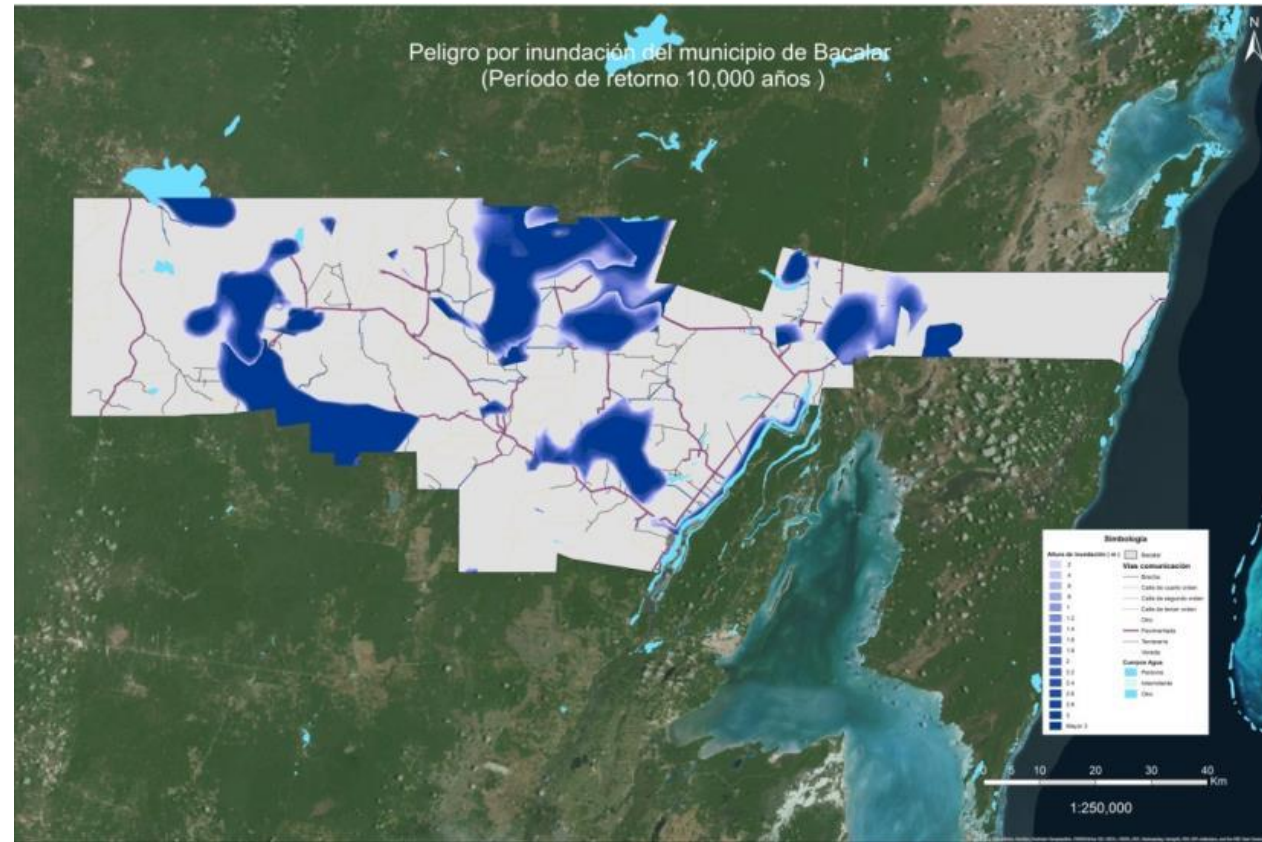
Mapa 104. Inundación municipal de Bacalar, para un tiempo de retorno de 10 años.



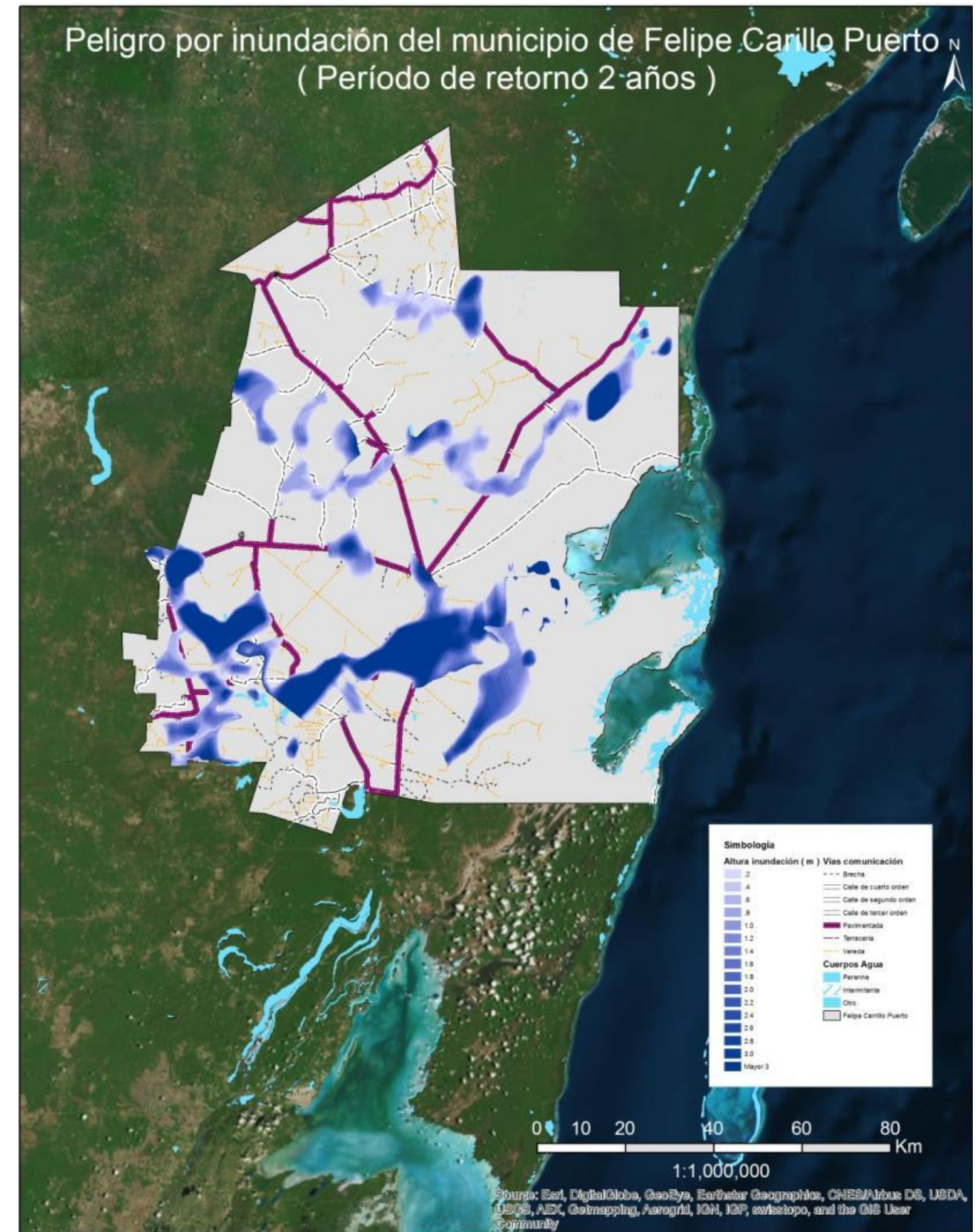
Mapa 103. Inundación municipal de Bacalar, para un tiempo de retorno de 5 años.



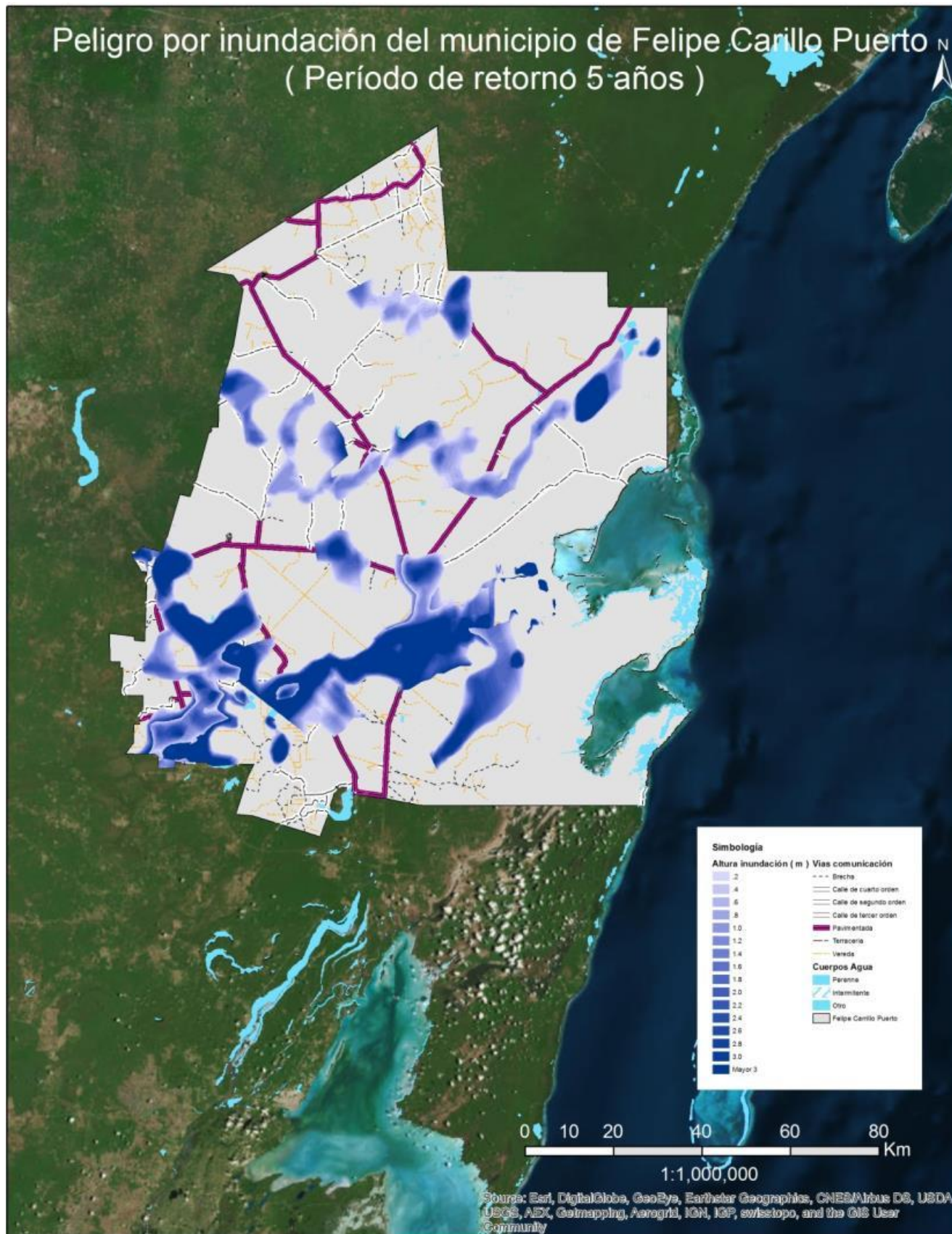
Mapa 105. Inundación municipal de Bacalar, para un tiempo de retorno de 20 años.



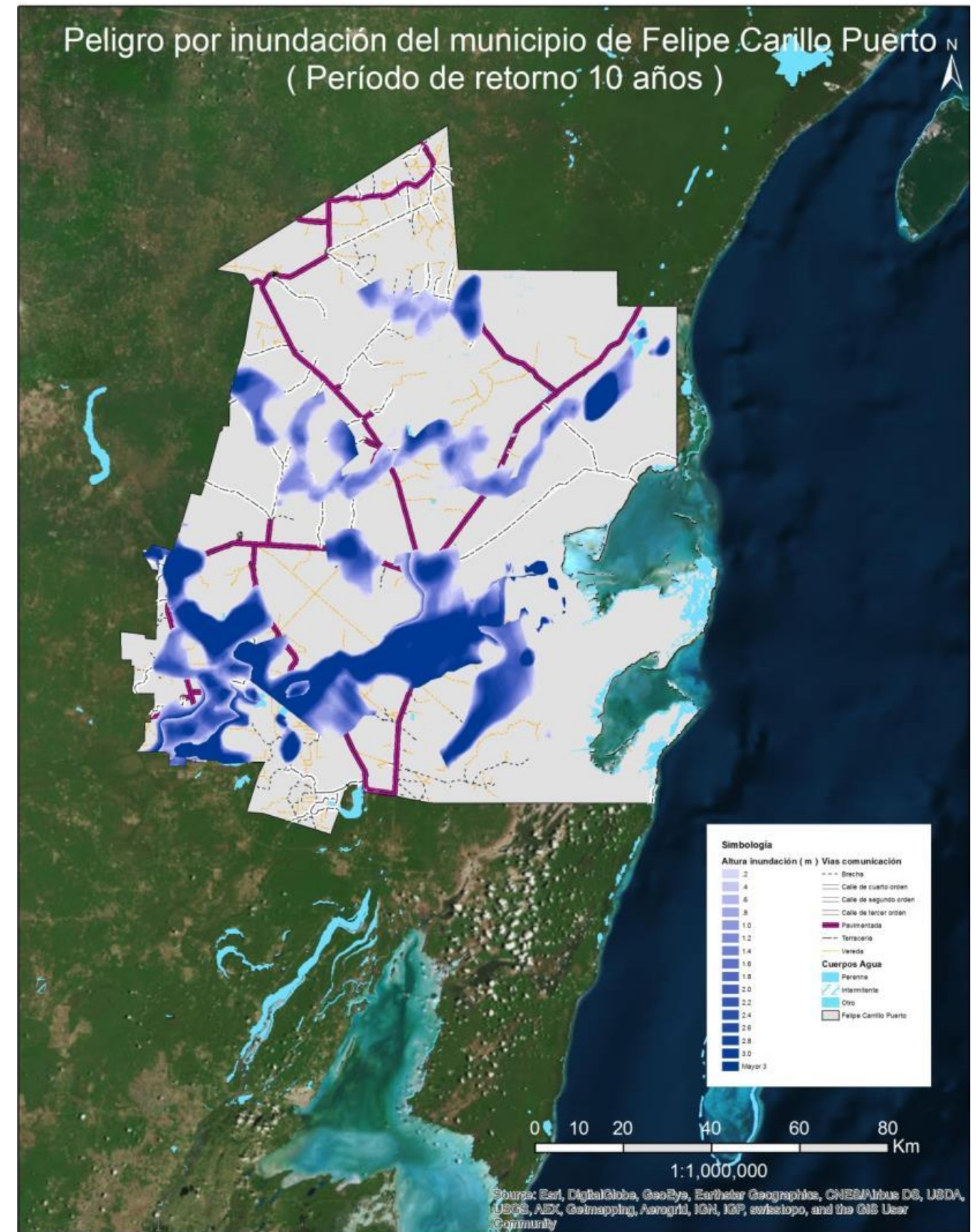
Mapa 110. Inundación municipal de Bacalar, para un tiempo de retorno de 10,000 años.
Municipio de Felipe Carrillo Puerto.



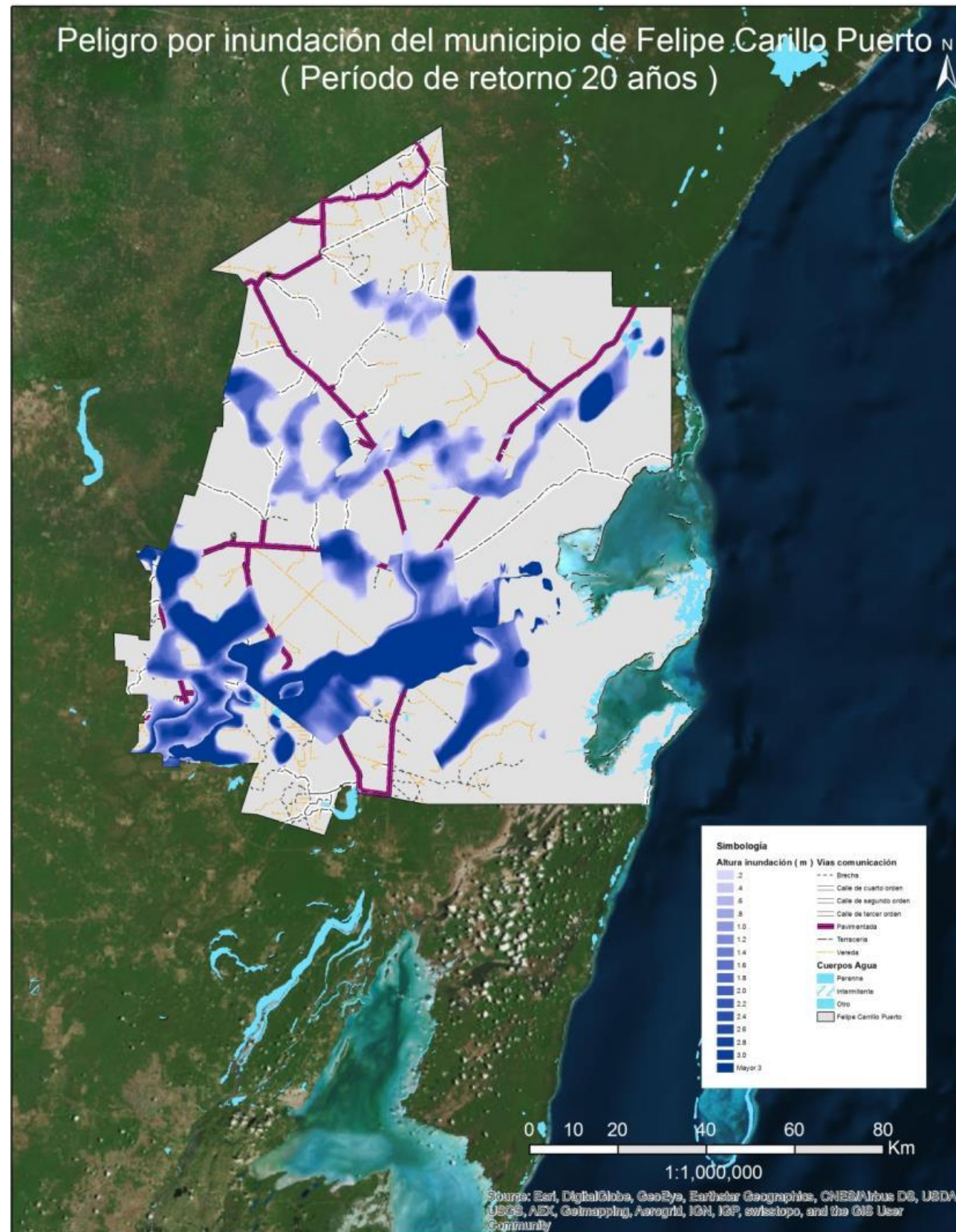
Mapa 111. Inundación municipal de Felipe Carrillo Puerto, para un tiempo de retorno de 2 años.



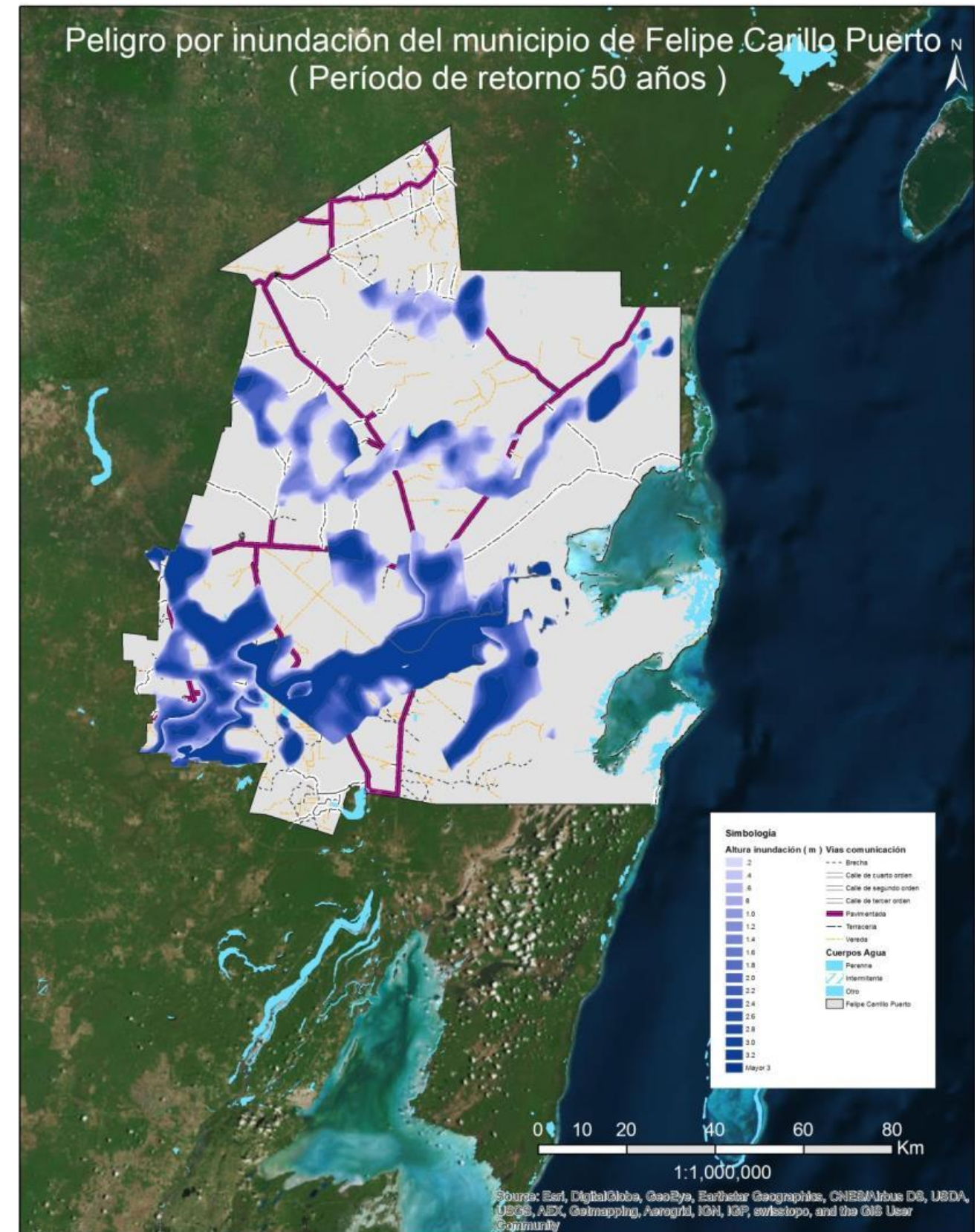
Mapa 112. Inundación municipal de Felipe Carrillo Puerto, para un tiempo de retorno de 5 años.



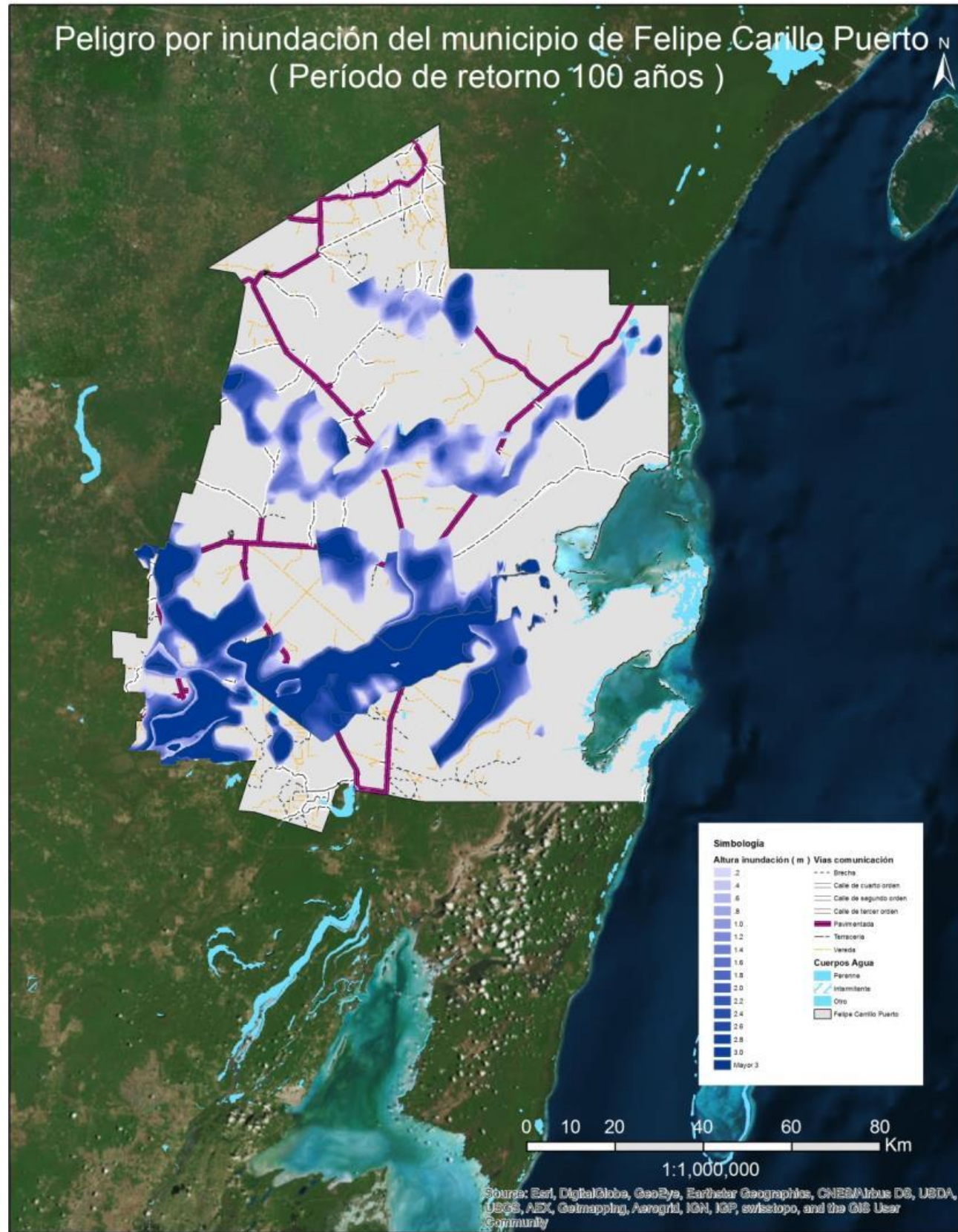
Mapa 113. Inundación municipal de Felipe Carrillo Puerto, para un tiempo de retorno de 10 años.



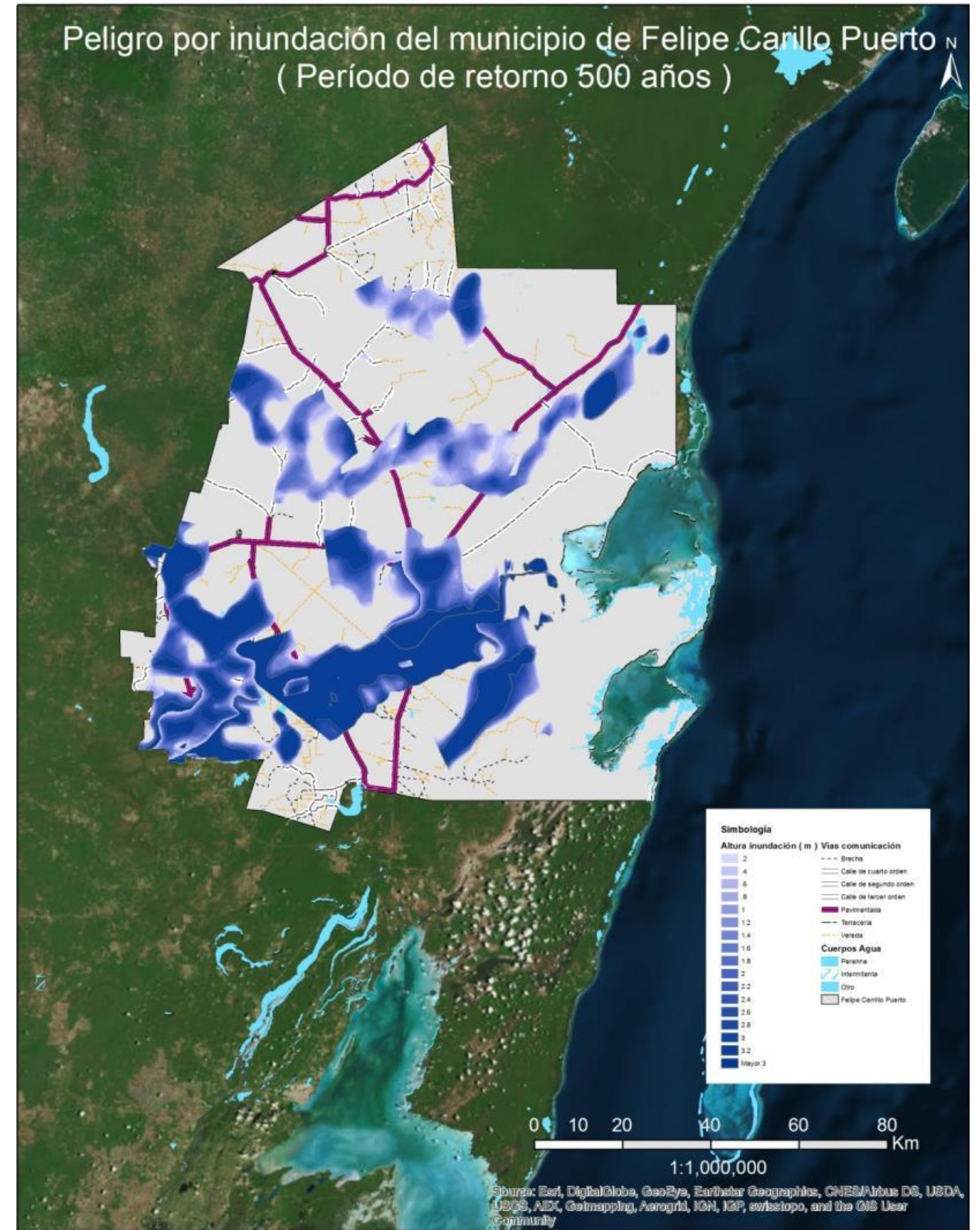
Mapa 114. Inundación municipal de Felipe Carrillo Puerto, para un tiempo de retorno de 20 años.



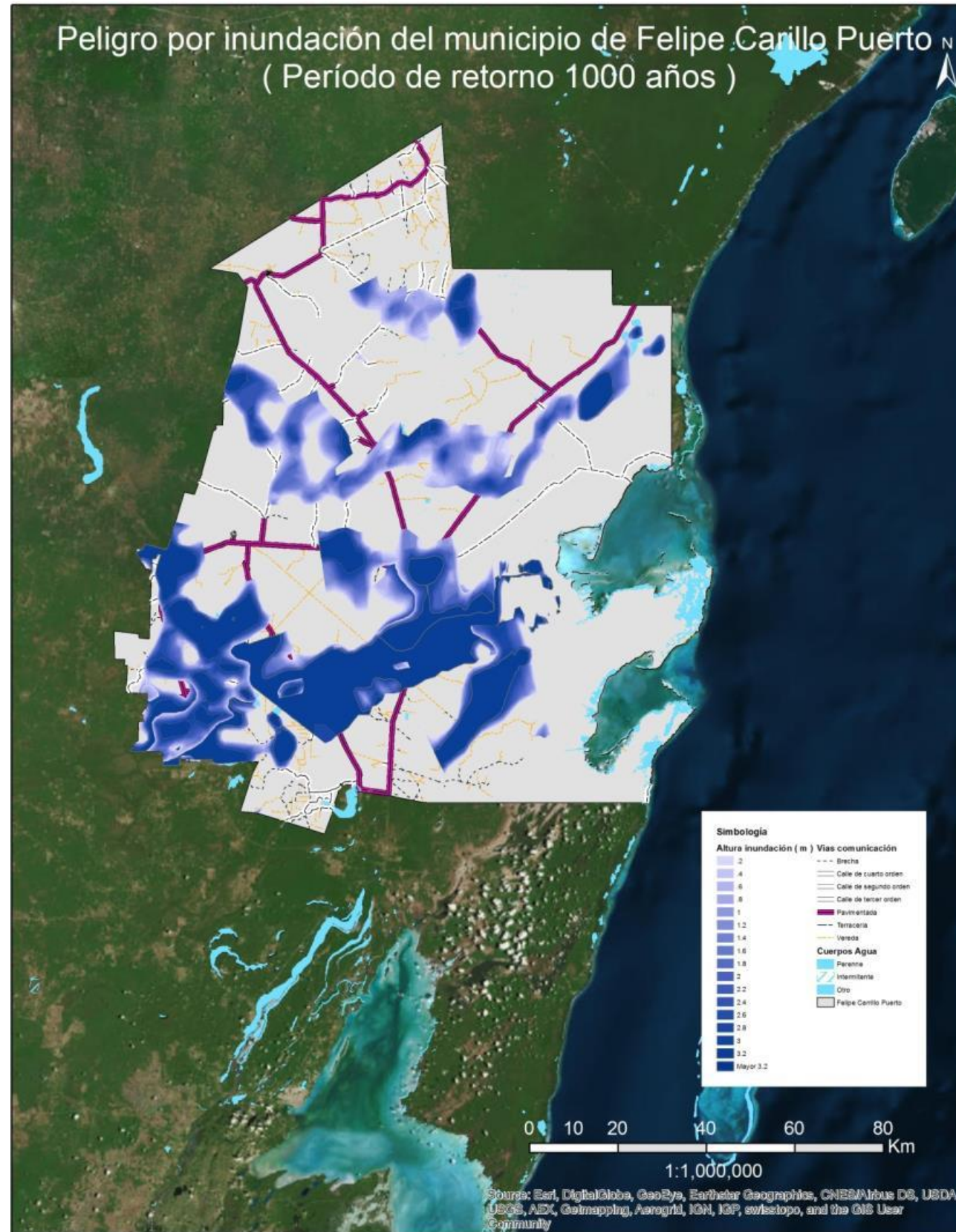
Mapa 115. Inundación municipal de Felipe Carrillo Puerto, para un tiempo de retorno de 50 años.



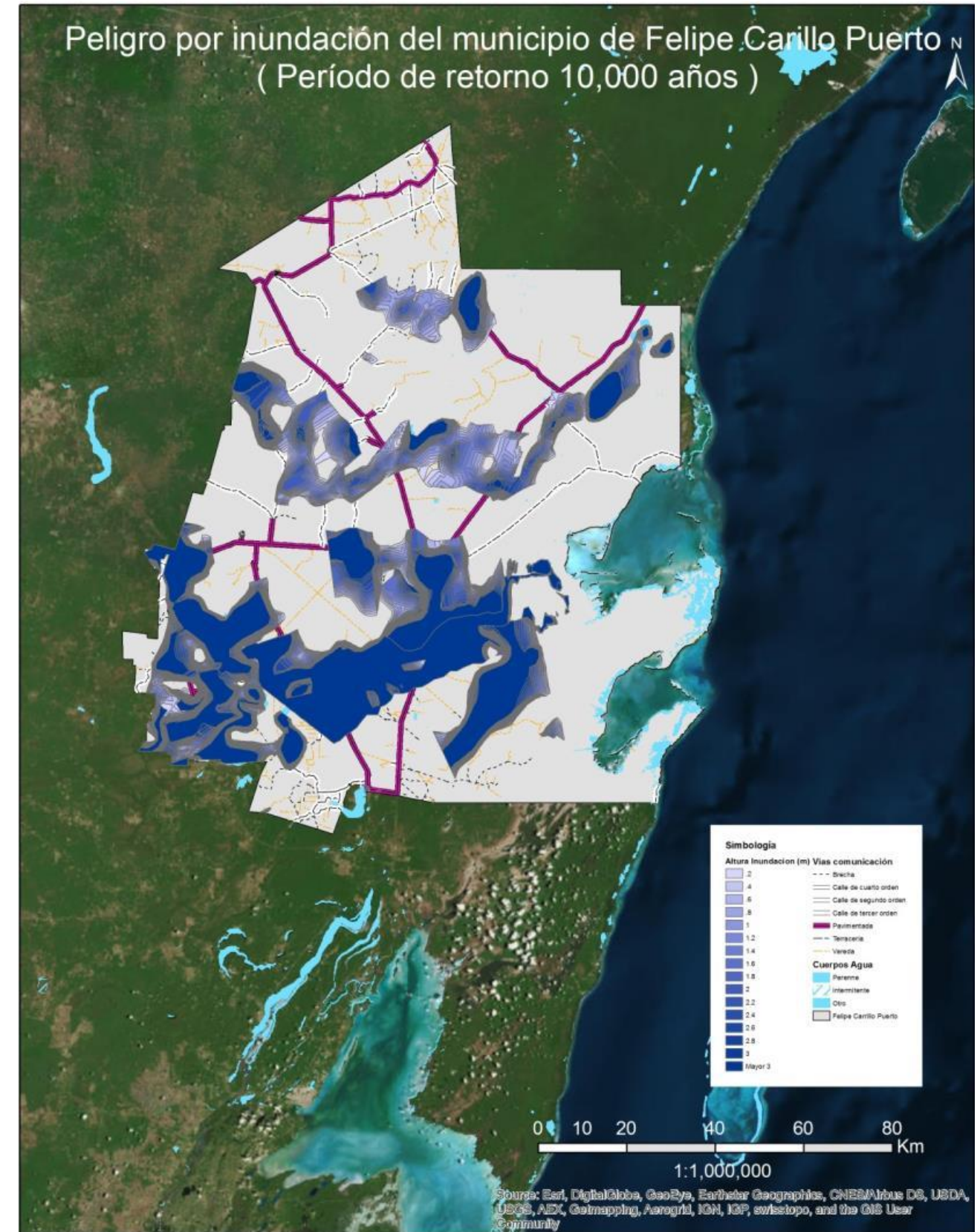
Mapa 116. Inundación municipal de Felipe Carrillo Puerto, para un tiempo de retorno de 100 años.



Mapa 117. Inundación municipal de Felipe Carrillo Puerto, para un tiempo de retorno de 500 años.

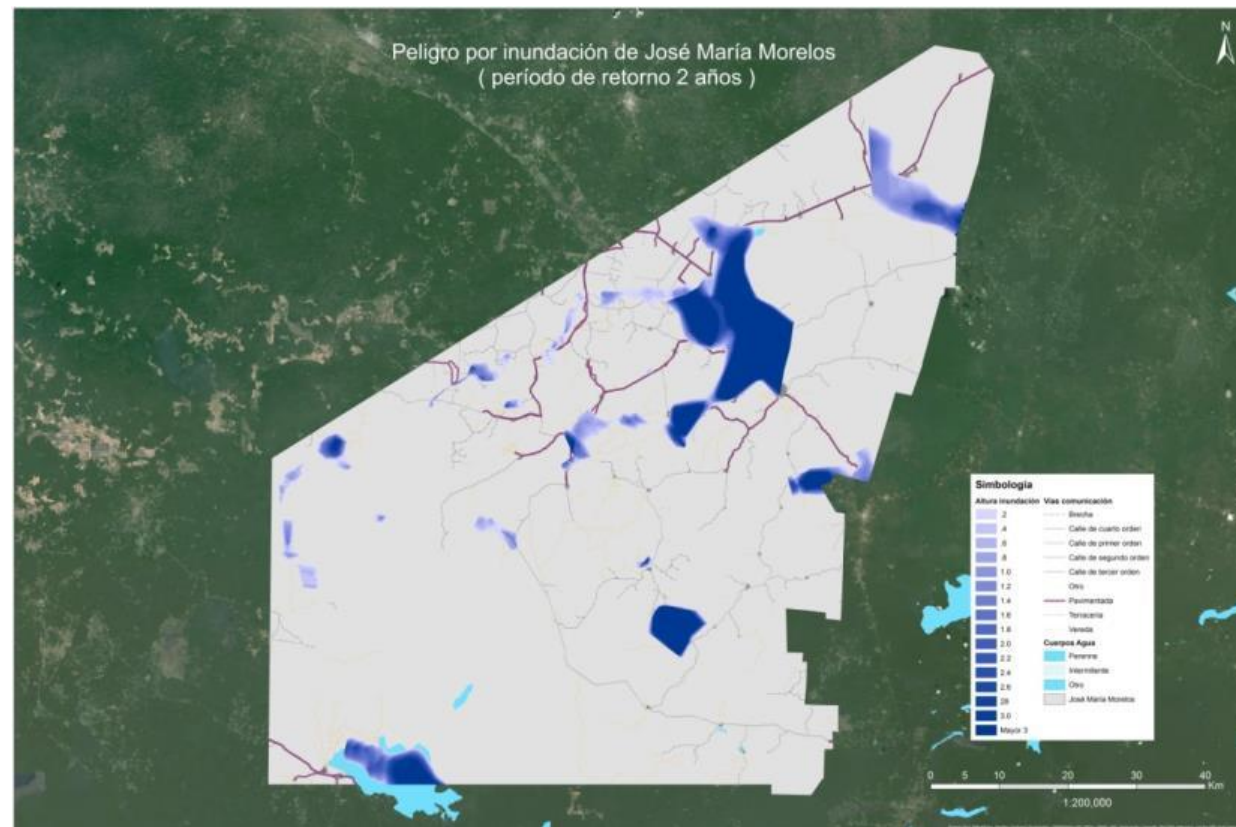


Mapa 118. Inundación municipal de Felipe Carrillo Puerto, para un tiempo de retorno de 1000 años.

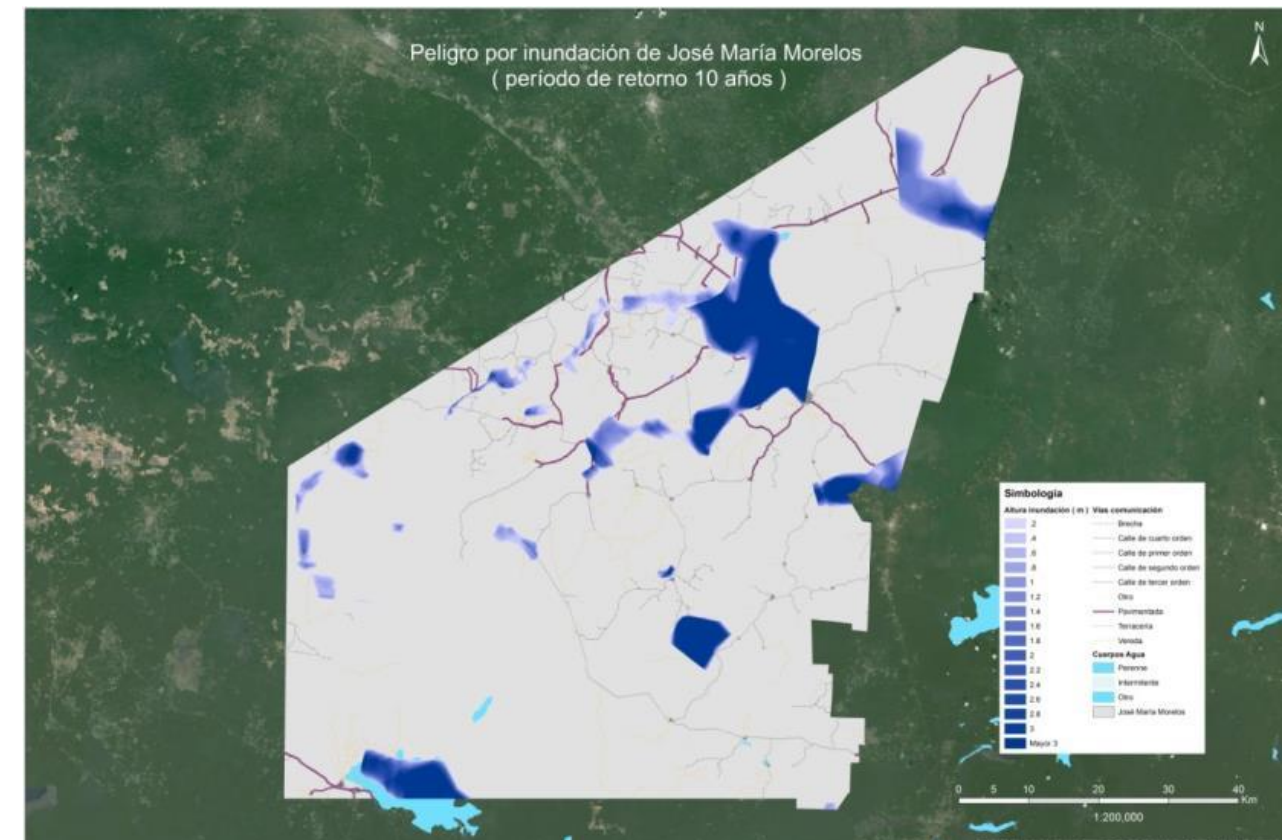


Mapa 119. Inundación municipal de Felipe Carrillo Puerto, para un tiempo de retorno de 10,000 años.

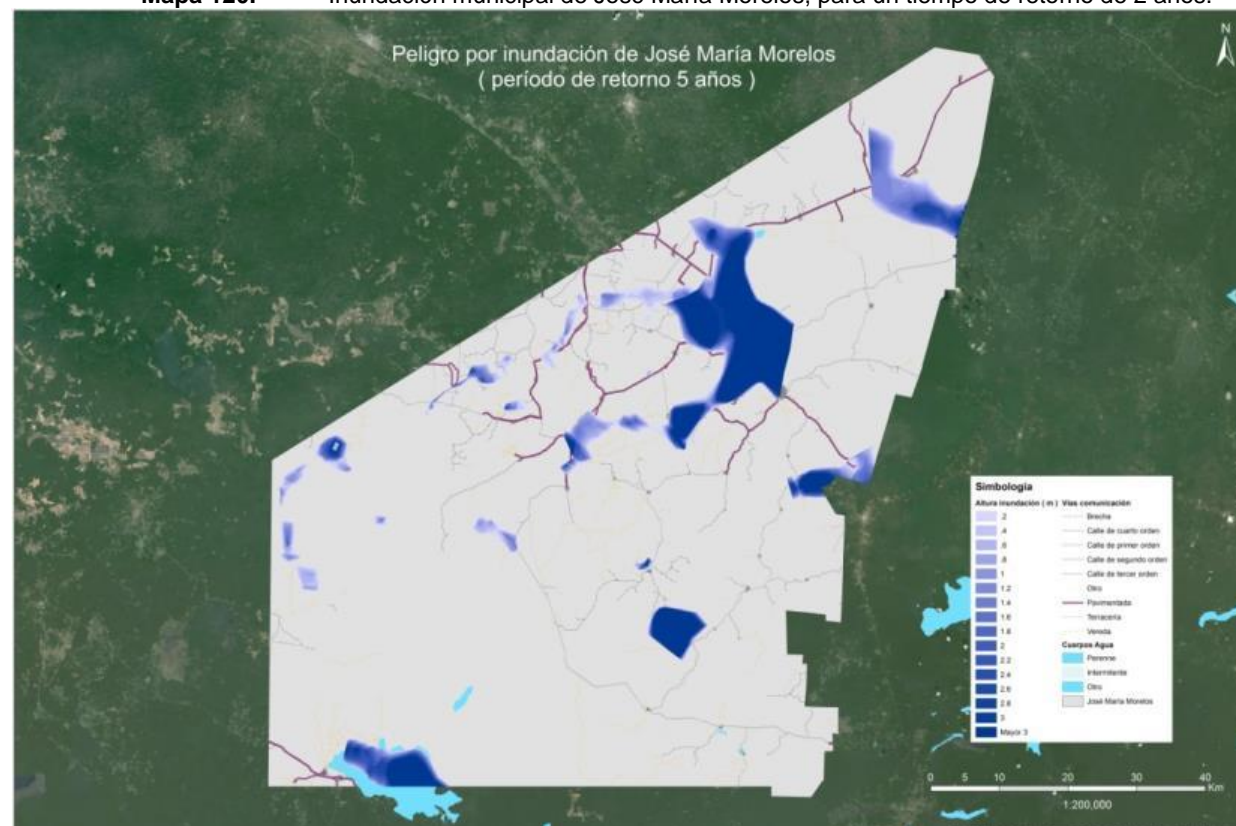
Municipio de José María Morelos.



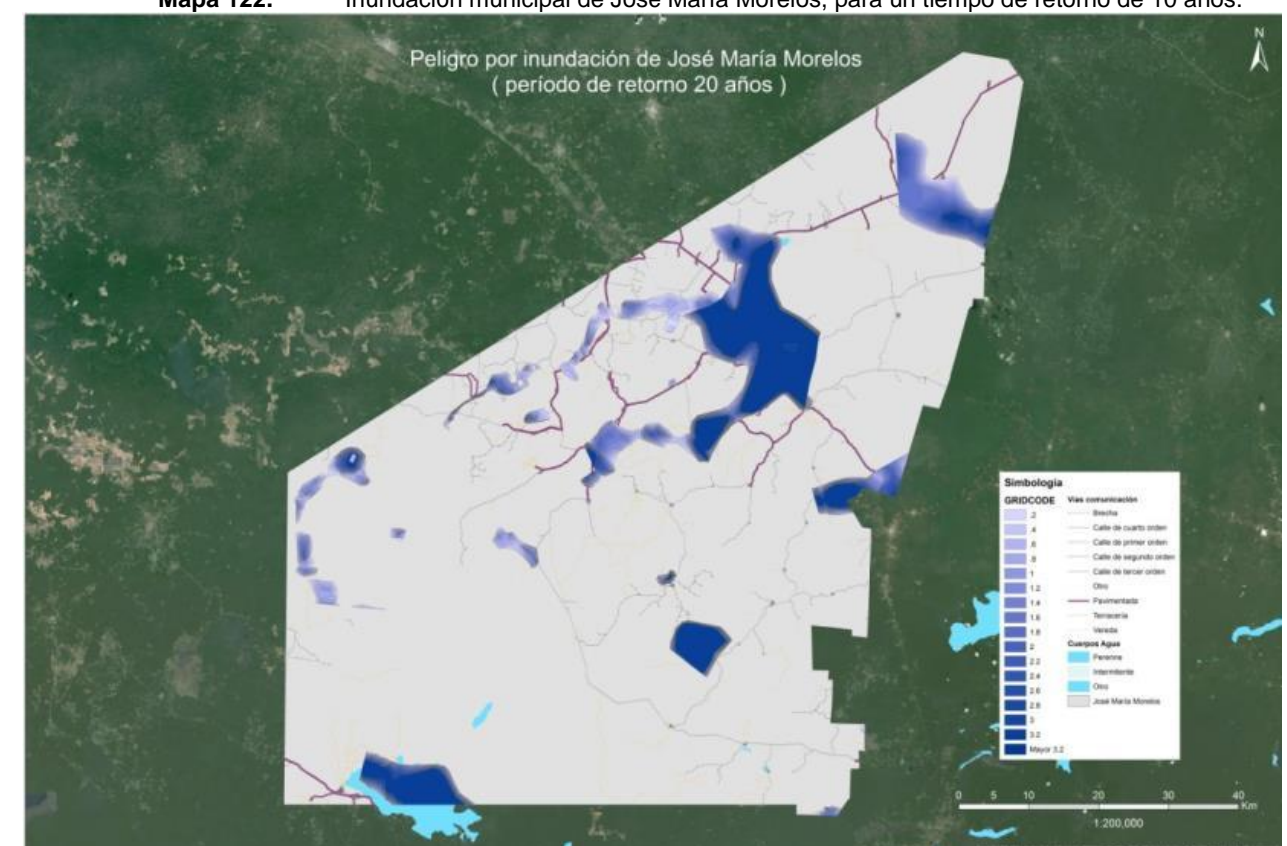
Mapa 120. Inundación municipal de José María Morelos, para un tiempo de retorno de 2 años.



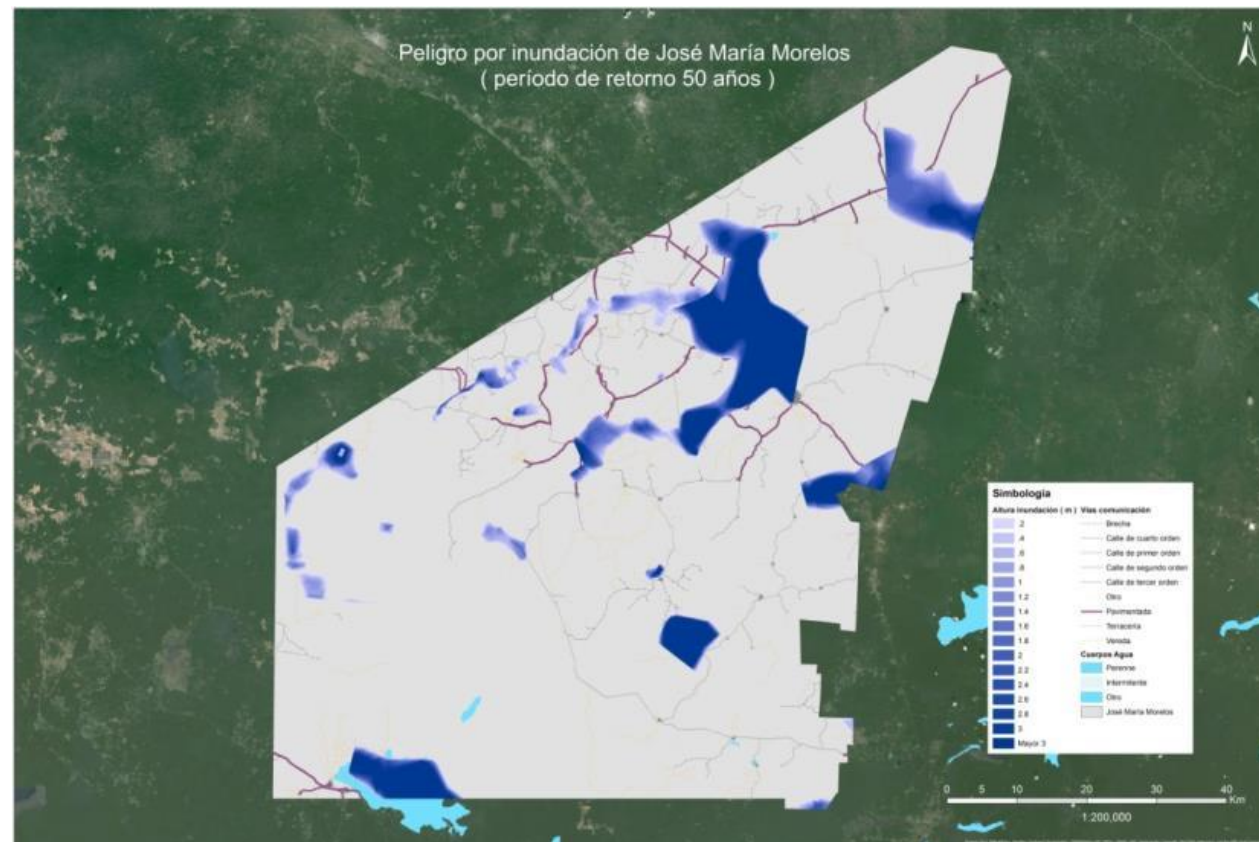
Mapa 122. Inundación municipal de José María Morelos, para un tiempo de retorno de 10 años.



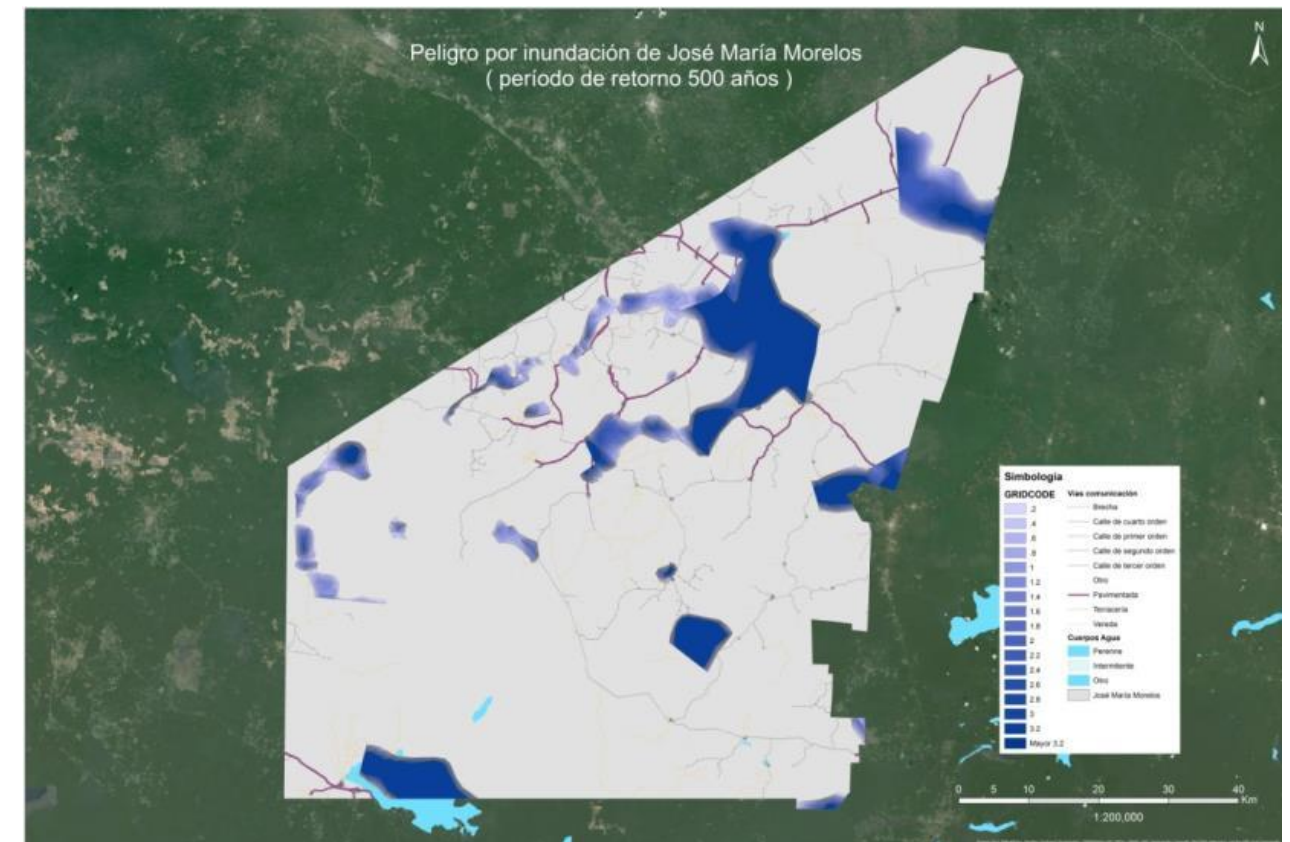
Mapa 121. Inundación municipal de José María Morelos, para un tiempo de retorno de 5 años.



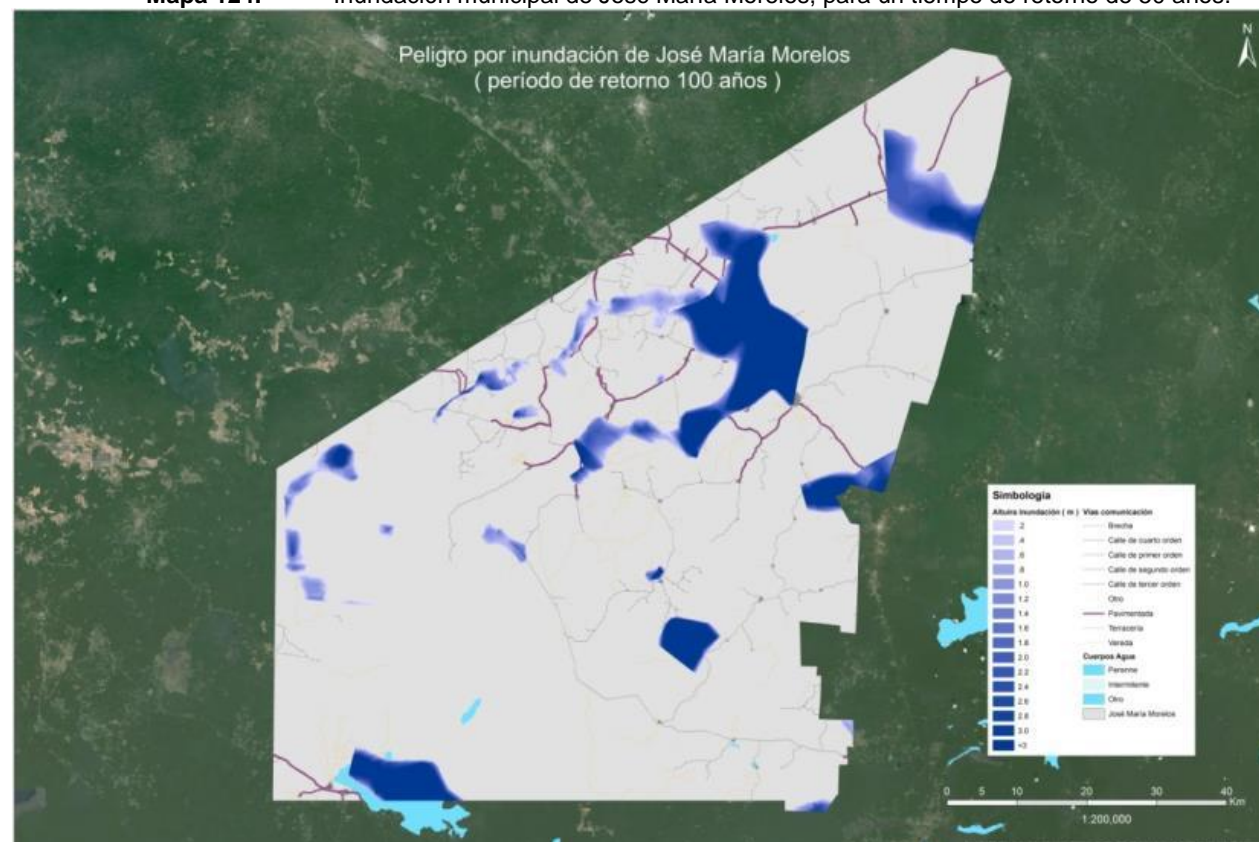
Mapa 123. Inundación municipal de José María Morelos, para un tiempo de retorno de 20 años.



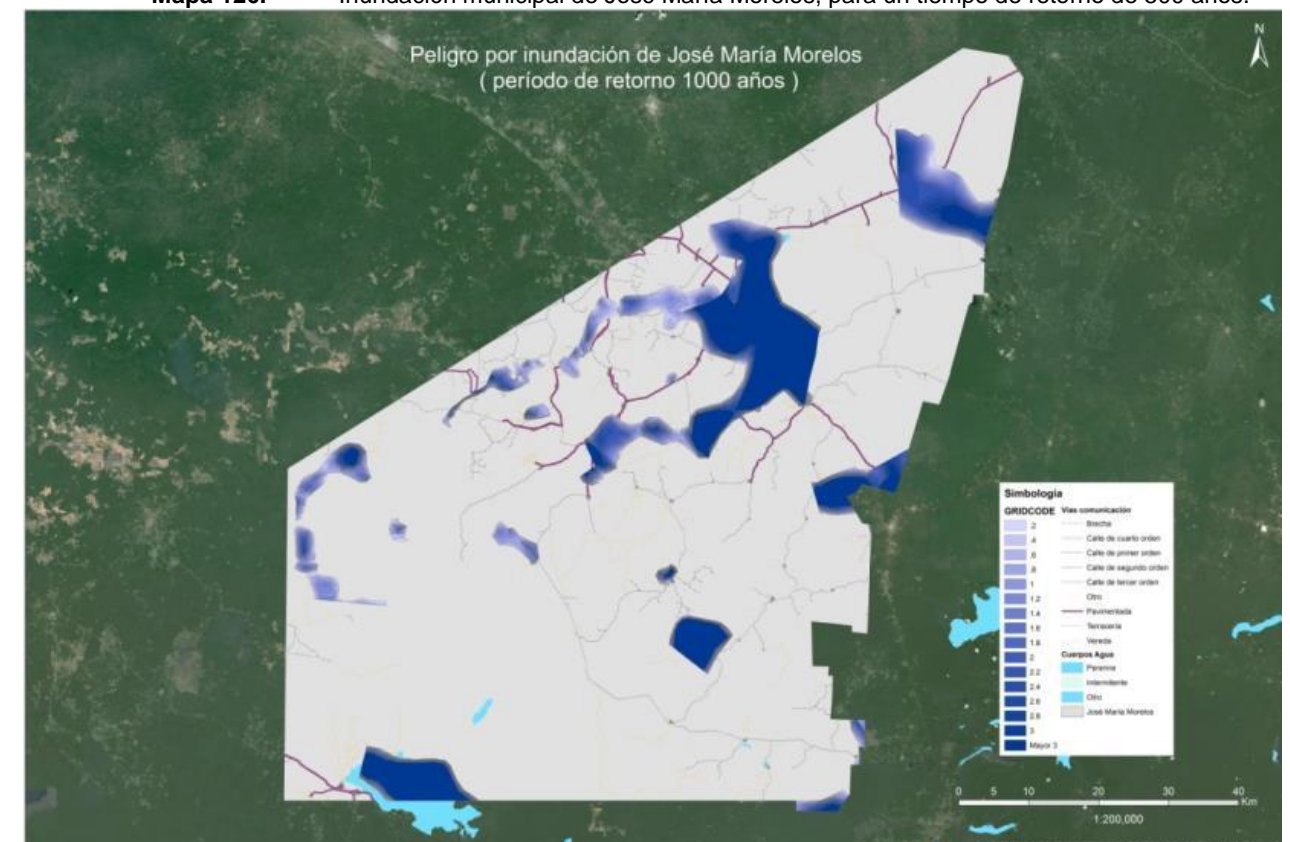
Mapa 124. Inundación municipal de José María Morelos, para un tiempo de retorno de 50 años.



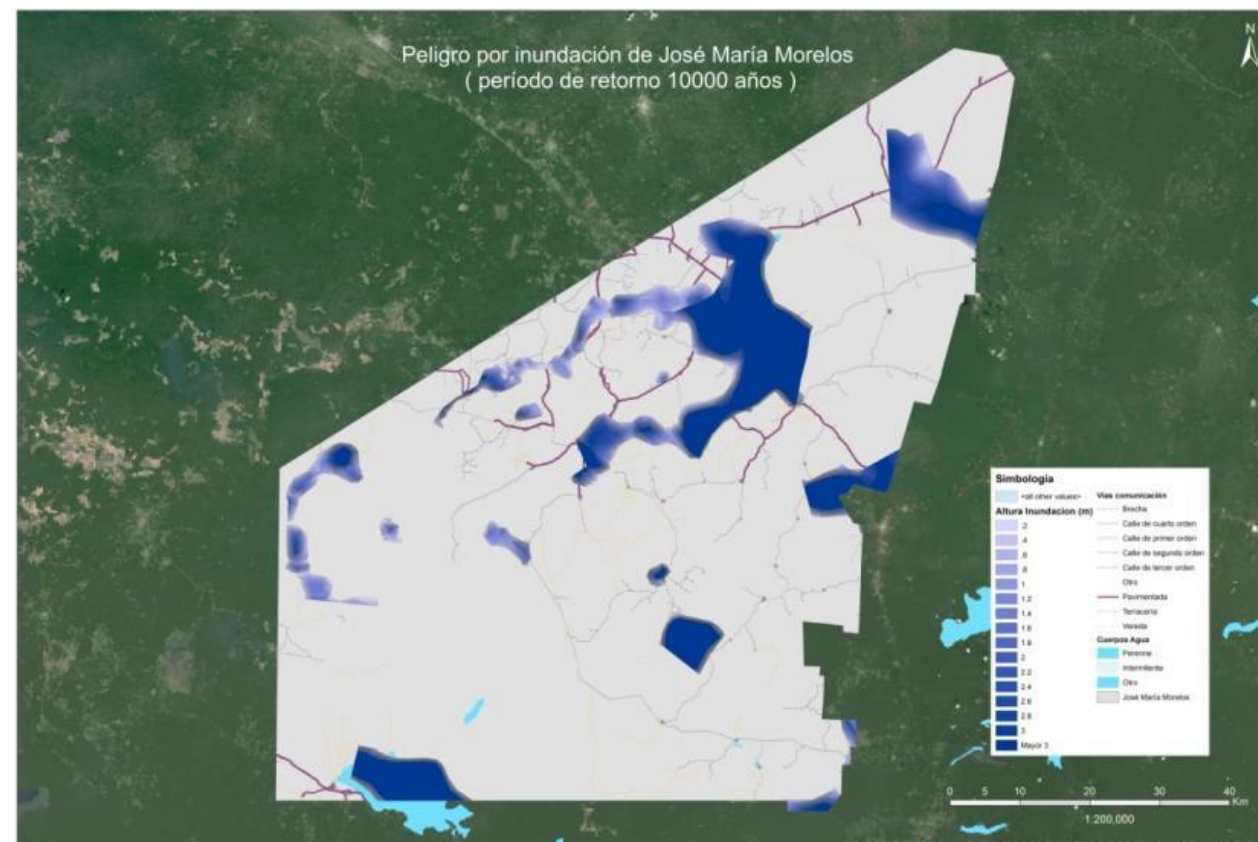
Mapa 126. Inundación municipal de José María Morelos, para un tiempo de retorno de 500 años.



Mapa 125. Inundación municipal de José María Morelos, para un tiempo de retorno de 100 años.



Mapa 127. Inundación municipal de José María Morelos, para un tiempo de retorno de 1000 años.



Mapa 128. Inundación municipal de José María Morelos, para un tiempo de retorno de 10,000 años.

Los mapas anteriores son resultado de un análisis hidrológico, en los que se estimaron las zonas de inundación para cada municipio de interés, en donde conforme el tiempo de retorno es mayor la zona de inundación igual se ve más extensa, lo que refleja que el comportamiento de modelo es el adecuado.

Los municipios que presentaron mayor zona de inundación fueron los de Bacalar y Felipe Carrillo Puerto, cabe mencionar que una parte de la inundación que presenta Felipe Carrillo Puerto, es por escorrentía de la inundación que inicia en Bacalar.

Por otra parte, la cartografía de peligro de inundación generada para cada municipio constituye una importante herramienta de apoyo, que puede ser utilizada para la optimización de los planes de ordenamiento territorial de las ciudades, la optimización de los sistemas de alerta y emergencia, el diseño de obras de protección y la evaluación del riesgo.

4.2.1.4 Vulnerabilidad

Con el fin de estimar la vulnerabilidad física de la vivienda ante inundaciones, se utilizó la información recopilada en campo con respecto al tipo de materiales predominantes utilizados en la construcción de las mismas en las localidades rurales de cada municipio. Cabe señalar que el análisis a este nivel únicamente contempla a los municipios de Bacalar, Felipe Carrillo Puerto, José María Morelos y Othón P. Blanco de acuerdo con lo estipulado en los términos de referencia.

Con base en dicha información, se procedió a tipificar las viviendas de acuerdo con los parámetros propuestos por el

CENAPRED⁷⁷, por lo que las 17 combinaciones encontradas en el Estado se agruparon en cinco niveles diferentes para inferir su comportamiento ante una inundación, según se observa en la siguiente tabla. Cabe destacar que I representa una vulnerabilidad muy alta y V muy baja.

Tabla 73. Combinación de materiales encontrados en el estado de Quintana Roo y tipología asignada.

Combinación	Muros	Techos	Tipología asignada
1	Bahareque	Palma	III
2	Bahareque	Lámina	II
3	Bloque hueco de concreto	Palma	IV
4	Bloque hueco de concreto	Lámina	IV
5	Bloque hueco de concreto	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	V
6	Concreto colado	Lámina	IV
7	Concreto colado	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	V
8	Desecho	Lámina	I
9	Lámina de cartón	Lámina	I
10	Madera	Lámina	II
11	Madera	Palma	III
12	Piedra sobre piedra	Lámina	IV
13	Piedra sobre piedra	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	V
14	Piedra sobre piedra	Palma	IV
15	PVC relleno de concreto	Lámina	IV
16	Simple Piedra sobre piedra	Palma	IV
17	Simple Piedra sobre piedra	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	V

Fuente: Elaboración propia.

El único ajuste que se realizó con respecto a la clasificación sugerida en la Guía del Cenapred, fue que aquellas viviendas con muros de madera y techos de palma o lámina se consideraron tipo III y II, respectivamente, ya que guardan más similitudes con las construidas de bahareque que con las de mampostería.

Otra situación que originó modificaciones en las funciones de vulnerabilidad para el menaje de casa de cada tipo de vivienda fue el hecho de que, en la entidad, la mayoría de las viviendas son únicamente de un nivel, por lo que las clasificadas como tipo IV y V aumentaron su proporción de daños en sus enseres domésticos a menor tirante de agua.

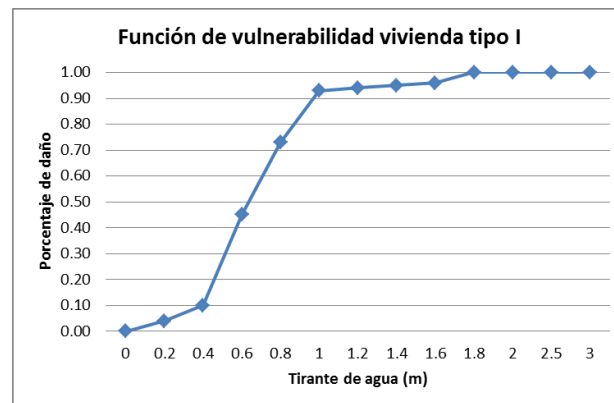
Para los tipos de vivienda I, II y III, se utilizaron las funciones de vulnerabilidad del CENAPRED. Para las tipo IV y V, se hizo un ejercicio en dos viviendas promedio de un sólo nivel. Los cambios con respecto a las de los primeros tres tipos no fueron muy significativos. Únicamente se observó un daño más paulatino al identificarse enseres o menaje de casa de valor considerable en las partes altas de las viviendas, tal es el caso de ventiladores de techo o aires acondicionados, así como pantallas o electrodomésticos.

Vivienda Tipo I	
Descripción general	Función de vulnerabilidad

⁷⁷ CENAPRED. Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Fenómenos hidrometeorológicos. 2006.

De las combinaciones de materiales detectadas en la entidad, sólo dos se consideraron como viviendas tipo I, las de muros de lámina o de desecho y techos de lámina. Estas viviendas regularmente son habitadas por las familias de menores recursos. Se observó una mayor presencia de estas en los municipios de Bacalar y Othón P. Blanco.

Las afectaciones más severas para el menaje de este tipo de viviendas se observan entre los 40 y 80 centímetros y el costo promedio del mismo se estimó en 12,500 pesos



Gráfica 62. Función de vulnerabilidad vivienda tipo I

Fuente: Elaboración propia con información de CENAPRED.

Vivienda Tipo II	
Descripción general	Función de vulnerabilidad
<p>Aquellas viviendas con muros de madera o bahareque y techos de lámina fueron consideradas como tipo II. Estas regularmente son de autoconstrucción y utilizando materiales de la región. Othón P. Blanco fue el que tuvo mayor presencia de este tipo de viviendas.</p> <p>Entre los 60 y 80 centímetros se observa el mayor impacto en el menaje de casa de este tipo de viviendas. El costo del mismo se estimó en 50,000 pesos.</p>	

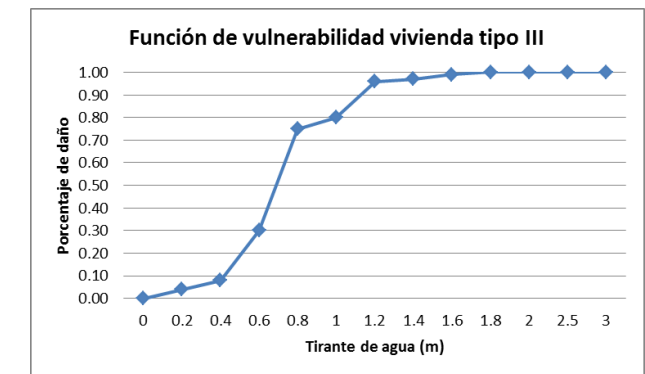
Gráfica 63. Función de vulnerabilidad vivienda tipo II

Fuente: Elaboración propia con información de CENAPRED.

Vivienda Tipo III	
Descripción general	Función de vulnerabilidad

Las viviendas tipo III también son de muros de bahareque o madera, sin embargo, el techo es de palma, material que tiene un mejor comportamiento ante este tipo de fenómeno. Felipe Carrillo Puerto fue el municipio con mayor presencia de este tipo de viviendas.

Entre los 40 y 80 centímetros se observa un impacto en el menaje de casa de casi el 70%. El costo estimado del menaje fue el mismo que para las viviendas tipo II (50,000 pesos), ya que las características de ambas viviendas y de la población que las habita son muy similares..



Gráfica 64. Función de vulnerabilidad vivienda tipo III

Fuente: Elaboración propia con información de CENAPRED.

Vivienda Tipo IV	
Descripción general	Función de vulnerabilidad
<p>En total, fueron siete combinaciones de materiales que se consideraron como viviendas tipo IV. Básicamente la característica principal es que los muros son de mampostería o concreto colado, la mayoría incluyen elementos estructurales y los techos son de material flexible (Lámina o palma).</p> <p>Entre los 60 y 160 centímetros se observa el mayor impacto en el menaje de casa, alrededor del 60%. El costo promedio estimado del menaje para este tipo de vivienda fue de 300,000 pesos</p>	

Gráfica 65. Función de vulnerabilidad vivienda tipo IV

Fuente: Elaboración propia con información de CENAPRED.

Vivienda Tipo V	
Descripción general	Función de vulnerabilidad
<p>Las viviendas tipo V son todas aquellas que están construidas de mampostería o concreto colado en muros y cuyos techos también son de losa de concreto o vigueta y bovedilla. Este tipo de viviendas están construidas con acabados u elementos decorativos que incrementan su valor considerablemente. El menaje es considerado de mejor calidad, por lo que su costo se estimó en 450,000 pesos.</p> <p>Las localidades en las que predominó este tipo de viviendas están regularmente cerca de alguna zona urbana.</p>	

Gráfica 66. Función de vulnerabilidad vivienda tipo V

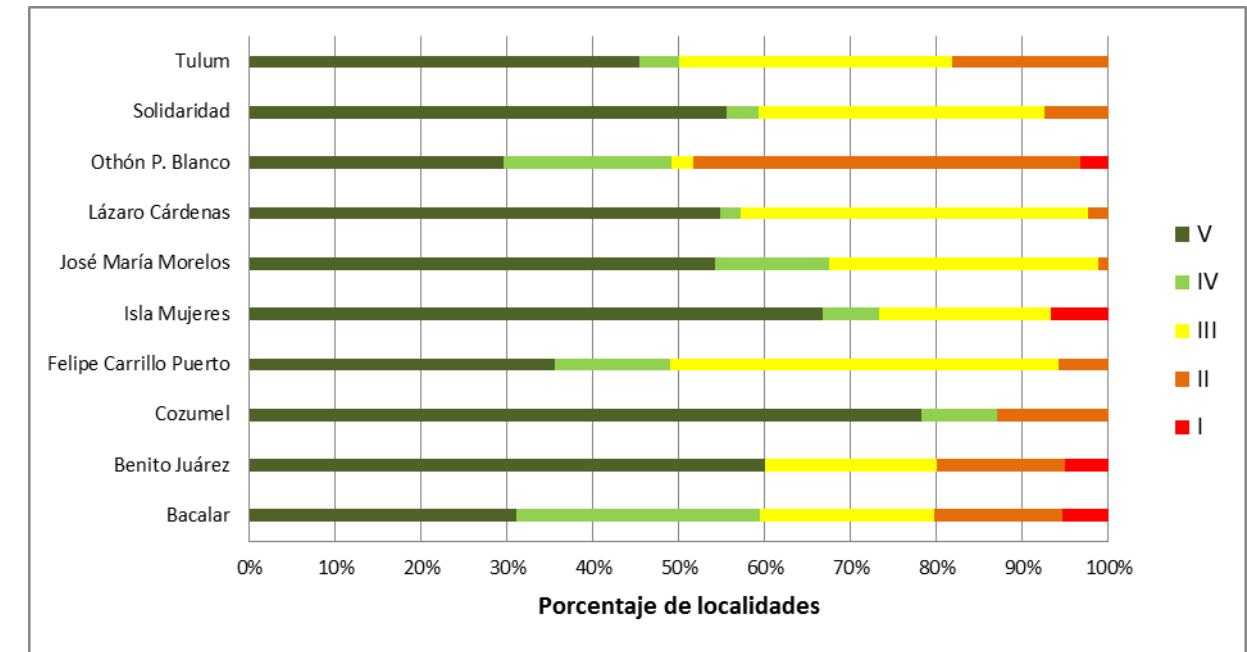
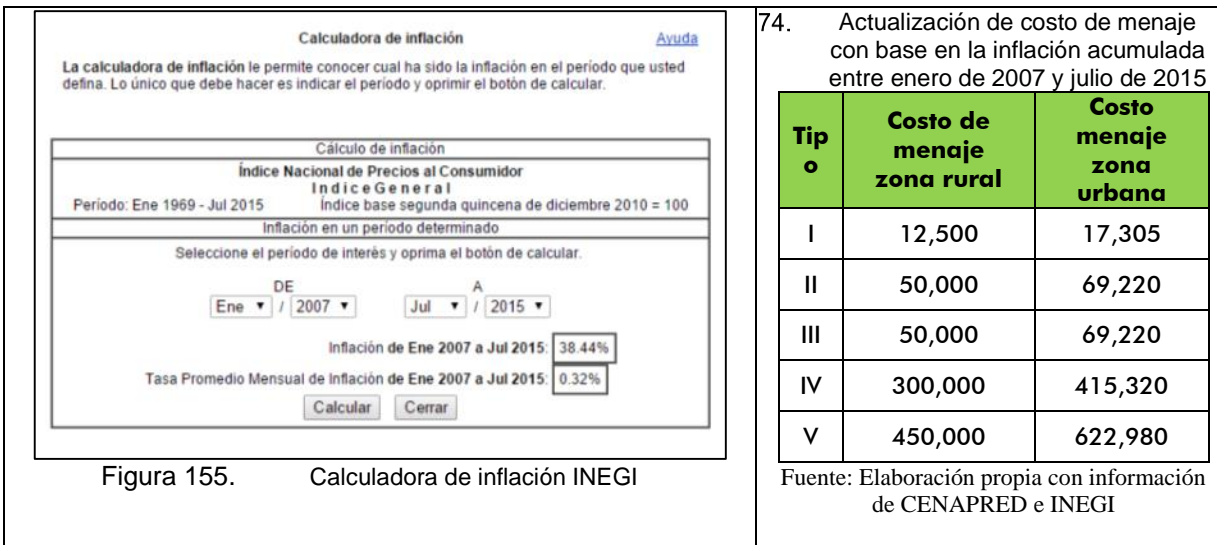
Fuente: Elaboración propia con información de CENAPRED.

Es importante mencionar que para estimar los costos del menaje para cada tipo de vivienda se utilizaron los propuestos en la metodología del CENAPRED, y únicamente para las zonas urbanas se incrementaron de acuerdo con la inflación acumulada en el periodo 2007-2015. Para lograrlo se recurrió a la calculadora de inflación del INEGI, que es un "instrumento que permite calcular la tasa de inflación porcentual implícita de un índice de precios, en un intervalo

determinado⁷⁸.

Así, una vez realizado el ejercicio, se obtuvo una inflación acumulada de 38.44% para el periodo mencionado, por lo que los costos aproximados de menaje para cada tipo de vivienda quedaron de la siguiente manera: (Ver Tabla 4 y Figura 155).

Cabe aclarar también, que las viviendas tipo II y III se consideraron con un menaje de valor similar, puesto que la única diferencia entre ambas viviendas era el material en techos, sin embargo, las características de la población que las habita en cuanto a nivel socioeconómico se refiere, son muy similares.



Gráfica 67. Porcentaje de localidades según vulnerabilidad física de la vivienda ante inundación por municipio.

A continuación, se muestran los mapas de vulnerabilidad física ante inundación a nivel municipal, sin tomar en cuenta las ciudades principales, ya que en el siguiente capítulo se realizará el análisis de las zonas urbanas.

Se utilizó en código propuesto en la guía metodológica del CENAPRED, mismo que se indica a continuación:

Tabla 75. Índice de vulnerabilidad según el tipo de vivienda.

Tipo	Índice de vulnerabilidad	Color propuesto
I	Alto	Rojo
II	Medio-alto	Naranja
III	Medio	Amarillo
IV	Medio-bajo	Verde
V	Bajo	Blanco

Fuente: CENAPRED.

La información recopilada en campo permite únicamente conocer el tipo de vivienda predominante en cada una de las localidades estudiadas, por ende, ese es el dato que se consideró para todas las viviendas de la localidad. Si bien se podría cuestionar la veracidad del presente ejercicio por este motivo, es probable que en futuras etapas del Atlas se pueda ir afinando la información hasta obtener datos a nivel vivienda.

A nivel municipal, Cozumel fue el que registró una mayor proporción de localidades en las que predominó la vivienda tipo V, con cerca del 80%. En cambio, en Othón P. Blanco, menos del 30% de sus localidades registraron predominancia de este tipo de viviendas.

Bacalar

En Bacalar, se trabajaron un total de 74 localidades rurales en las cuales, según datos del Censo de Población y Vivienda 2010, existen 5,618 viviendas habitadas por un total de 24,265 personas, es decir, aproximadamente el 75.8% de la población total del municipio.

De acuerdo con los resultados obtenidos después de clasificar las localidades según el tipo de vivienda predominante en cada una de ellas, en Bacalar se observó que en 23 localidades la vulnerabilidad ante inundaciones es baja, en 21 media-

⁷⁸ INEGI. Calculadora de inflación. <http://www.inegi.org.mx/sistemas/indiceprecios/calculadorainflacion.aspx>

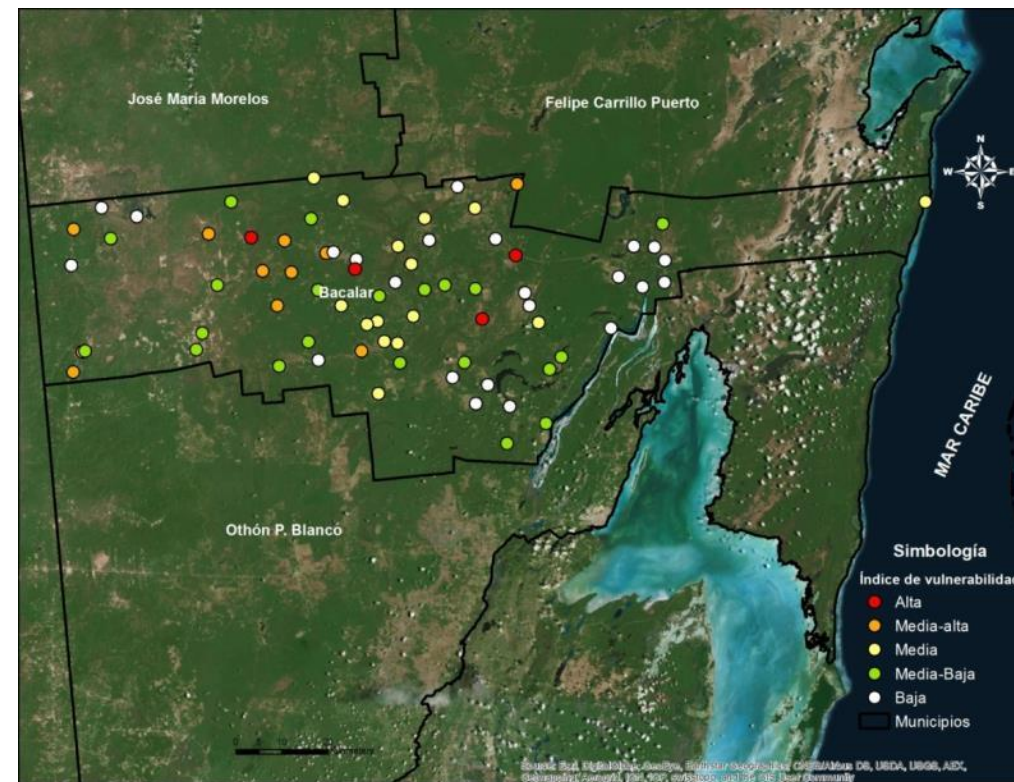
baja, en 15 media, en 11 media-alta y en 4 alta. En la siguiente tabla se puede observar esta misma información incorporando el número de viviendas y de habitantes.

Tabla 76. Nivel de vulnerabilidad ante inundación en localidades rurales del municipio de Bacalar.

Concepto	Índice de vulnerabilidad					Total
	Bajo	Medio-bajo	Medio	Medio-alto	Alto	
Número de localidades	23	21	15	11	4	74
Número de viviendas	2,512	1,416	937	376	377	5,618
Número de habitantes	10,518	6,573	4,102	1,595	1,477	24,265

Fuente: Elaboración propia

Las localidades que registraron una mayor vulnerabilidad ante inundación en el municipio de Bacalar fueron Valentín Gómez Farías, Gabino Vázquez, Blanca Flor y Manuel Ávila Camacho.



Mapa 129. Vulnerabilidad ante inundación en localidades rurales de Bacalar.

El valor total del sistema expuesto, es decir, el costo de reposición del menaje de cada una de las viviendas existentes en las localidades rurales de Bacalar, según su índice de vulnerabilidad, se estimó en 1,625.6 millones de pesos. Esta información es de gran utilidad, ya que, correlacionando el valor del sistema expuesto, la vulnerabilidad y el peligro, en los siguientes apartados se podrá calcular el riesgo (daños esperados), para diferentes periodos de retorno.

Felipe Carrillo Puerto

El municipio de Felipe Carrillo Puerto concentra a la mayoría de su población en las zonas rurales, por lo que el análisis de vulnerabilidad a nivel municipal involucró un total de 104 localidades, en las cuales existen aproximadamente 8,132 viviendas que son habitadas por 36,654 personas, mismas que representan el 48.8% de la población total del municipio.

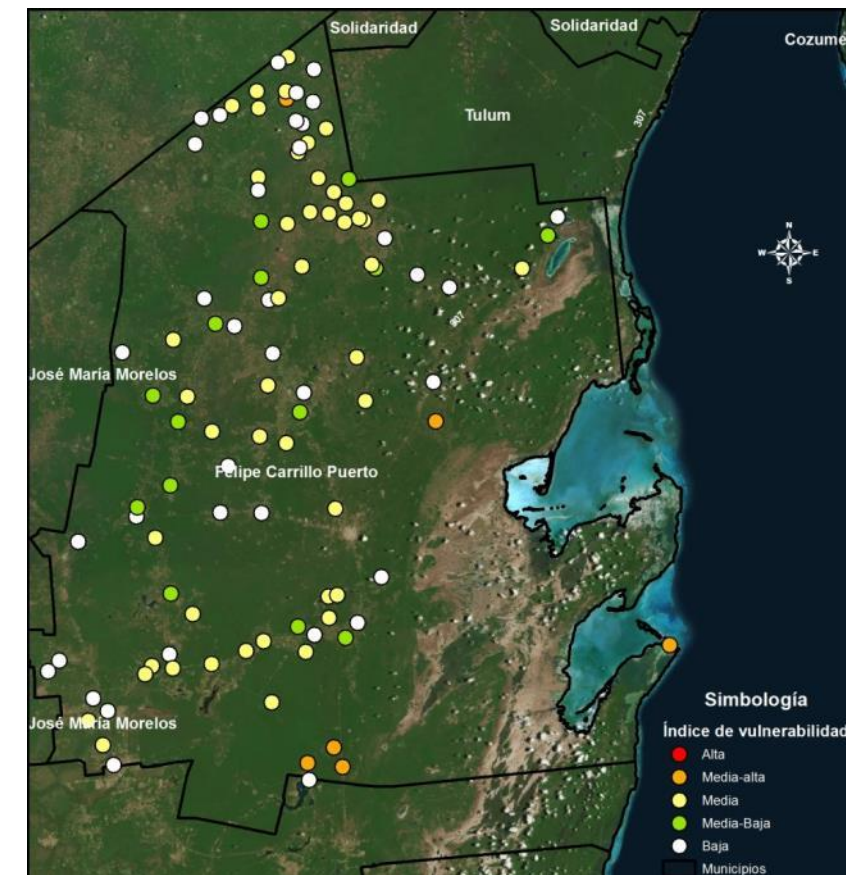
Los resultados arrojaron que en 37 de las localidades la vulnerabilidad ante inundaciones es baja, en 14 media-baja, en 47 media y solamente en seis se registró una vulnerabilidad ante inundación media-alta.

Tabla 77. Nivel de vulnerabilidad ante inundación en localidades rurales del municipio de Felipe Carrillo Puerto.

Concepto	Índice de vulnerabilidad					Total
	Bajo	Medio-bajo	Medio	Medio-alto	Alto	
Número de localidades	37	14	47	6	0	104
Número de viviendas	3,374	1,711	2,804	243	0	8,132
Número de habitantes	14,947	7,761	12,911	1,035	0	36,654

Fuente: Elaboración propia.

Las localidades que registraron mayores niveles de vulnerabilidad fueron Chibilub, Reforma Agraria, Santa Amalia, Andrés Quintana Roo, Punta Herrero y Polinkín, la mayoría ubicadas al Sur del municipio. (Ver Mapa 130).



Mapa 130. Vulnerabilidad ante inundación en localidades rurales de Felipe Carrillo Puerto.

El valor del sistema expuesto para las localidades rurales de Felipe Carrillo Puerto, con base en el costo del menaje de las viviendas y según su condición de vulnerabilidad, se estimó en 2,183.9 millones de pesos aproximadamente.

José María Morelos

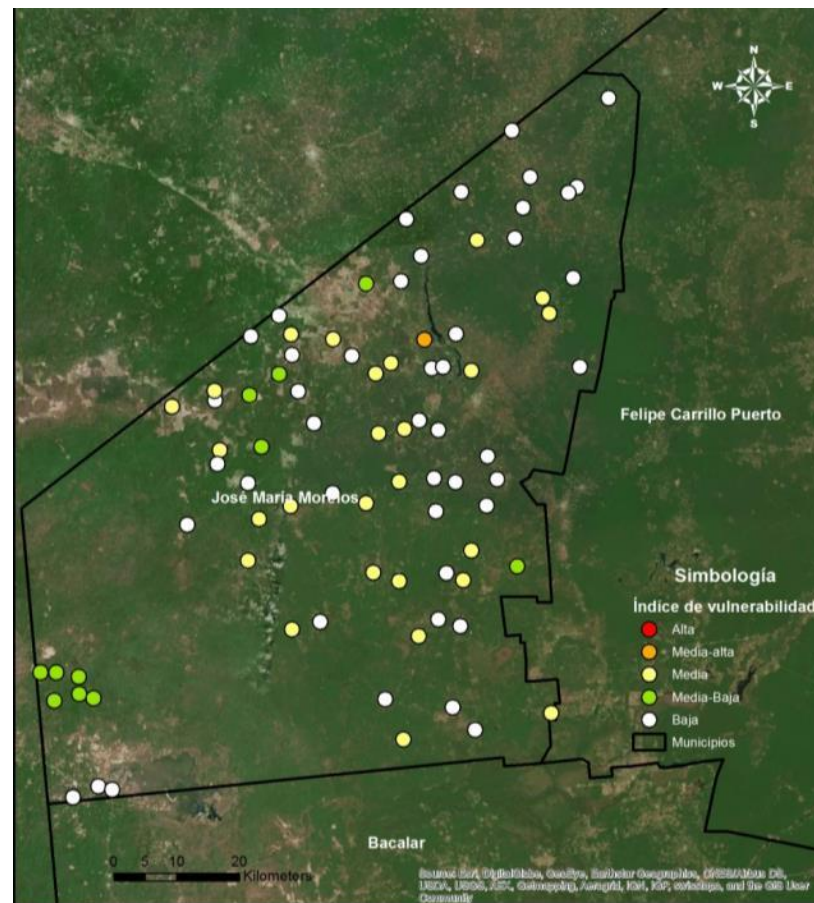
En José María Morelos se analizaron un total de 83 localidades rurales, en las cuales existen aproximadamente 6,207 viviendas habitadas por 27,831 personas. De acuerdo con el trabajo realizado, 45 localidades registraron un nivel de vulnerabilidad bajo, 11 medio-bajo, 26 medio y solamente Nuevo San Marcos se consideró con una vulnerabilidad medio-

alta.

Tabla 78. Nivel de vulnerabilidad ante inundación en localidades rurales del municipio de José María Morelos.

Concepto	Índice de vulnerabilidad					Total
	Bajo	Medio-bajo	Medio	Medio-alto	Alto	
Número de localidades	45	11	26	1	0	83
Número de viviendas	4,397	396	1,362	52	0	6,207
Número de habitantes	19,698	1,954	5,976	203	0	27,831

En municipios como José María Morelos, Bacalar y Felipe Carrillo Puerto, que podrían considerarse rurales, la presencia de viviendas tipo I, es decir, aquellas de material de desecho o lámina, no tienen una presencia importante, ya que es más fácil, económico y funcional para la región, construir una vivienda con los materiales propios de la zona (madera, bahareque y palma).



Mapa 131. Vulnerabilidad ante inundación en localidades rurales de José María Morelos

El valor estimado del sistema expuesto en las viviendas ubicadas en las localidades rurales de José María Morelos, se estimó en 2,168.1 millones de pesos.

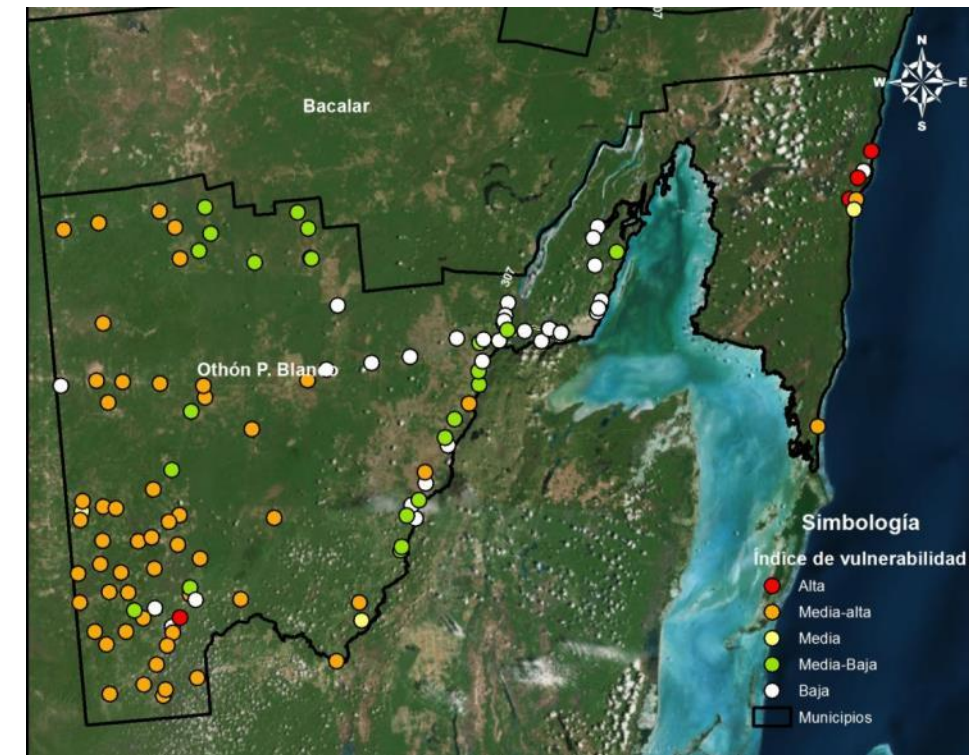
Othón P. Blanco

El municipio con mayor número de localidades rurales del estado es Othón P. Blanco. Para la realización del análisis de vulnerabilidad ante inundaciones se involucraron 122 localidades, en las cuales existen 13,039 viviendas habitadas por 51,338 personas. En total se registraron 36 localidades con un nivel bajo de vulnerabilidad ante inundaciones, 24 con medio-bajo, tres con medio, 55 con medio alto y cuatro con alto.

Tabla 79. Nivel de vulnerabilidad ante inundación en localidades rurales del municipio de Othón P. Blanco.

Concepto	Índice de vulnerabilidad					Total
	Bajo	Medio-bajo	Medio	Medio-alto	Alto	
Número de localidades	36	24	3	55	4	122
Número de viviendas	5,334	3,408	36	4,185	76	13,039
Número de habitantes	20,121	12,858	115	17,975	269	51,338

Las localidades que registraron los niveles más altos de vulnerabilidad fueron Río Indio, Santa Rosa, La Divina Esperanza y El Makulí, la mayoría ubicadas en la franja costera al Noreste del municipio.



Mapa 132. Vulnerabilidad ante inundación en localidades rurales de Othón P. Blanco.

El valor estimado del sistema expuesto, de acuerdo al menaje de las viviendas ubicadas en las localidades rurales analizadas se calculó en 3,634.7 millones de pesos.

En el siguiente apartado se calculará el riesgo por inundación en los municipios analizados para diferentes periodos de retorno, con base en la vulnerabilidad de las viviendas y el valor del sistema expuesto.

4.2.1.5 Riesgo

El riesgo a nivel municipal únicamente se calculó para Othón P. Blanco, Bacalar, Felipe Carrillo Puerto y José María Morelos, en apego a los términos de referencia acordados con el gobierno del Estado.

El procedimiento utilizado fue similar al empleado para estimar riesgo a nivel urbano, es decir, se cruzó la información de los mapas de peligro, vulnerabilidad y valor del sistema expuesto.

El componente principal del riesgo por inundación es justamente el nivel que alcanza el agua en las zonas en las cuales existe algún bien expuesto. Hay que recordar que para la estimación de riesgo, el único sistema expuesto que se analizó fue la vivienda de acuerdo con su nivel de vulnerabilidad, explicado en el apartado anterior.

Así, con base en los mapas de peligro, que indican el nivel que el agua alcanzaría según los diferentes periodos de retorno, se pudo estimar el tirante en cada una de las localidades de los municipios estudiados.

El siguiente paso fue utilizar los mapas de vulnerabilidad para estimar los posibles daños en cada tipo de vivienda, según su condición de vulnerabilidad, procedimiento que ya se explicó en el apartado anterior. Una vez identificadas las localidades que presentarían inundaciones en cada municipio se estimó el valor del sistema expuesto de cada una, es decir, se multiplicó el número de viviendas habitadas por el costo estimado del menaje para cada tipo de vivienda. Con dicha información, se obtuvieron los mapas de daños asociados para cada periodo de retorno.

Por último, se multiplicó el daño asociado por la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno con determinado periodo de retorno, con lo que se obtuvo el riesgo a nivel localidad para cada municipio. En la siguiente tabla se puede observar la probabilidad de ocurrencia de los periodos de retorno analizados.

Tabla 80. Probabilidad de ocurrencia para los periodos de retorno analizados.

Periodo de retorno	Probabilidad de ocurrencia
2	0.6000
5	0.2000
10	0.1200
20	0.0500
50	0.0200
100	0.0120
500	0.0020
1000	0.0010
10000	0.0001

Es importante señalar que el análisis contempla las localidades rurales de cada municipio, ya que las cabeceras municipales se analizaron en el apartado de inundaciones urbanas, con excepción José María Morelos. Con el fin de mostrar de una manera sencilla los resultados obtenidos, se optó por utilizar dos escalas distintas para la representación de los mapas. Una para los mapas de daños asociados y otra para los de riesgo.

Tabla 81. Criterios para determinar los niveles de daños y riesgo.

Nivel	Daños asociados (Pesos)	Riesgo (Pesos)
Muy alto	Más de 20 millones	Menos de 100 mil
Alto	Entre 10.1 y 20 millones	Entre 100 mil y 500 mil
Medio	Entre 5.1 y 10 millones	Entre 501 mil y 1 millón
Bajo	Entre 2.1 y 5 millones	Entre 1.1 y 2 millones
Muy bajo	Menos de 2 millones	Más de 2 millones

La expresión utilizada para calcular el riesgo fue la siguiente⁷⁹:

$$R(i) = C P(i) V(i)$$

En donde:

R(i) es el Riesgo para el próximo evento con periodo de retorno "i" en pesos.

C es el costo de la vivienda en función de su tipología en pesos.

P(i) es la probabilidad de ocurrencia del evento con periodo de retorno (i), adimensional.

V(i) es la vulnerabilidad de cada vivienda, adimensional.

En total se crearon 72 mapas (18 para cada municipio), la mitad correspondientes a los daños asociados y la otra mitad sobre el riesgo para los nueve diferentes periodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1000 y 10000 años). En el presente documento únicamente se muestran los mapas relacionados con los periodos de retorno de 2 y 100 años, sin embargo, el resto se encontrarán en el sistema del Atlas Estatal.

A continuación, se hace un análisis detallado de los resultados en cada uno de los municipios.

Bacalar

El municipio de Bacalar es de los de más reciente creación en el Estado, y su territorio consta de 7,161 kilómetros cuadrados. Para el presente ejercicio, se analizaron un total de 74 localidades, de las cuales sufren afectación entre 15 y 24 según el periodo de retorno. Los daños asociados van de 399.8 millones para el periodo de retorno de 2 años, a 611.8 millones para el de 10 mil. El riesgo en cambio, disminuye de 239.9 millones para el primer caso a 61 mil pesos para el segundo.

Tabla 82. Resultado del análisis de riesgo en el municipio de Bacalar para diferentes periodosde retorno.

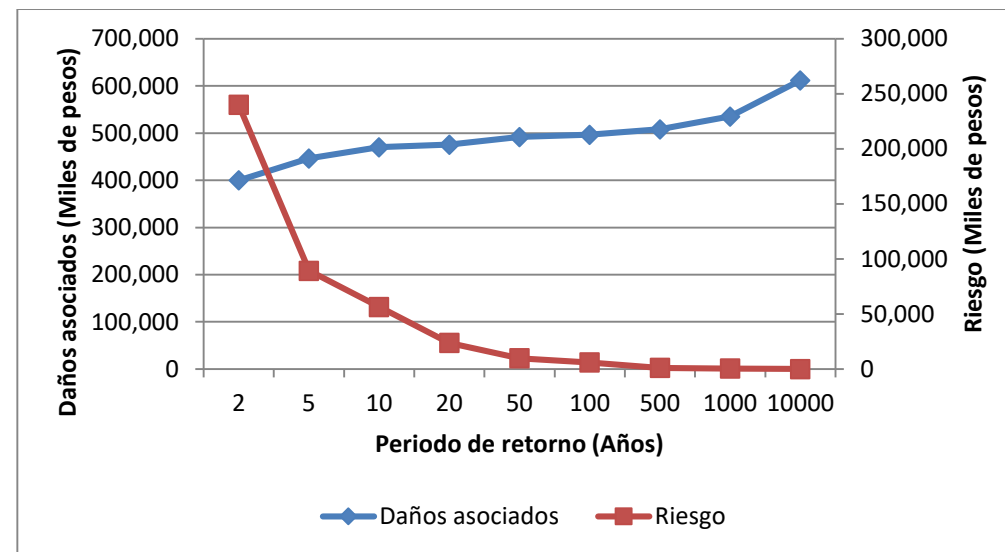
Periodo de retorno	Intensidad (mm en 24h)	Probabilidad de ocurrencia	Número de localidades afectadas	Daños asociados (Miles de pesos)	Riesgo (Miles de pesos)
2	91	0.6000	15	399,884	239,930
5	125	0.2000	18	446,463	89,293
10	156	0.1200	20	470,216	56,426
20	190	0.0500	20	475,432	23,772
50	227	0.0200	21	491,866	9,837

⁷⁹ CENAPRED. Guía p.29

100	254	0.0120	21	496,504	5,958
500	312	0.0020	21	507,996	1,016
1000	336	0.0010	23	535,253	535
10000	412	0.0001	24	611,809	61

Fuente: Elaboración propia.

Como ya se mencionó también en el apartado anterior, a pesar de que los daños asociados a eventos con periodos de retorno más amplios son mayores, puesto que la intensidad del fenómeno es mayor, el riesgo en realidad va disminuyendo, puesto que la probabilidad de ocurrencia es menor.



Gráfica 68. Variación de los daños y el riesgo en función del periodo de retorno para el municipio de Bacalar.

Otra característica que se observó después de analizar la información fue que, al realizar el análisis a nivel localidad, los daños asociados a los diferentes periodos de retorno no crecen exponencialmente, esto se debe a que el sistema expuesto en las zonas rurales del municipio no es equiparable con el existente en zonas urbanas.

Los niveles de riesgo más altos se observaron en las localidades de Reforma, Vallehermoso y Huatusco. Por otra parte, el área inundada para el periodo de 2 años se estimó en 985 km², lo que representa el 13.8% de la superficie total del municipio, mientras que para el de 100 años, aumenta a 1,982 Km², es decir el 27.7%. En los siguientes mapas se observan tanto los daños asociados como el riesgo para los periodos de retorno de 2 y 100 años.

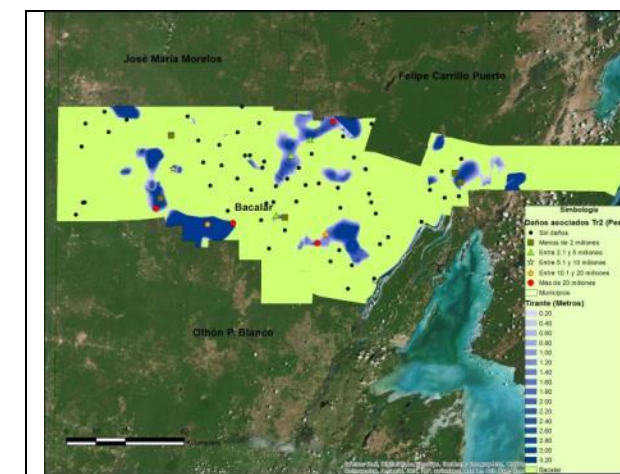


Figura 156. Daños asociados para un periodo de retorno de 2 años

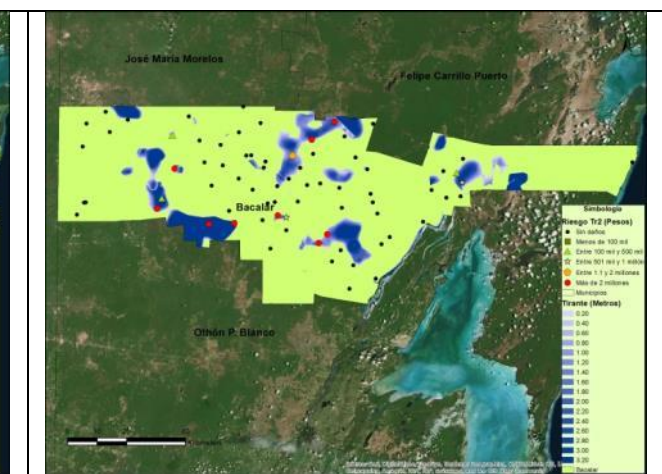


Figura 157. Riesgo para un periodo de retorno de 2 años

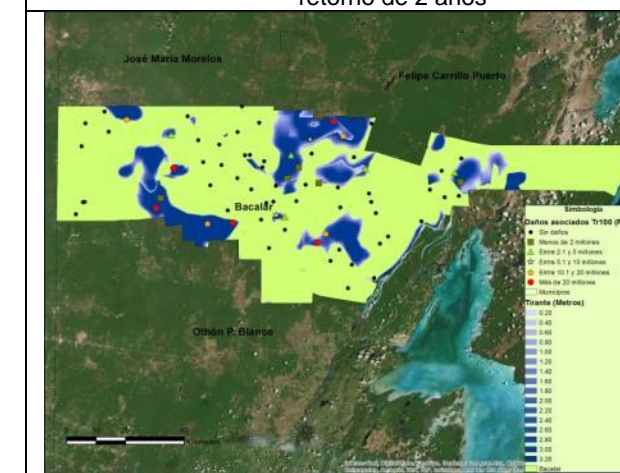


Figura 158. Daños asociados para un periodo de retorno de 100 años

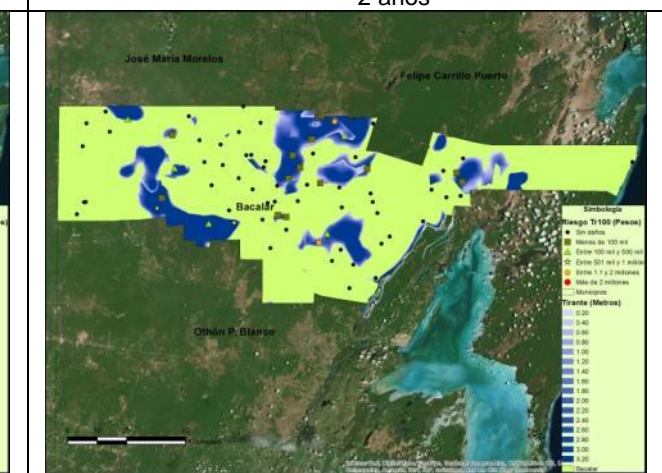


Figura 159. Riesgo para un periodo de retorno de 100 años

El riesgo per cápita para los periodos de 2 y 100 años se estimó en 7,498 y 186 pesos respectivamente.

Felipe Carrillo Puerto

La extensión territorial de Felipe Carrillo Puerto es de 13,806 kilómetros cuadrados y en 2010 contaba con una población de 75,026 habitantes. Para el presente ejercicio se analizaron un total de 104 localidades.

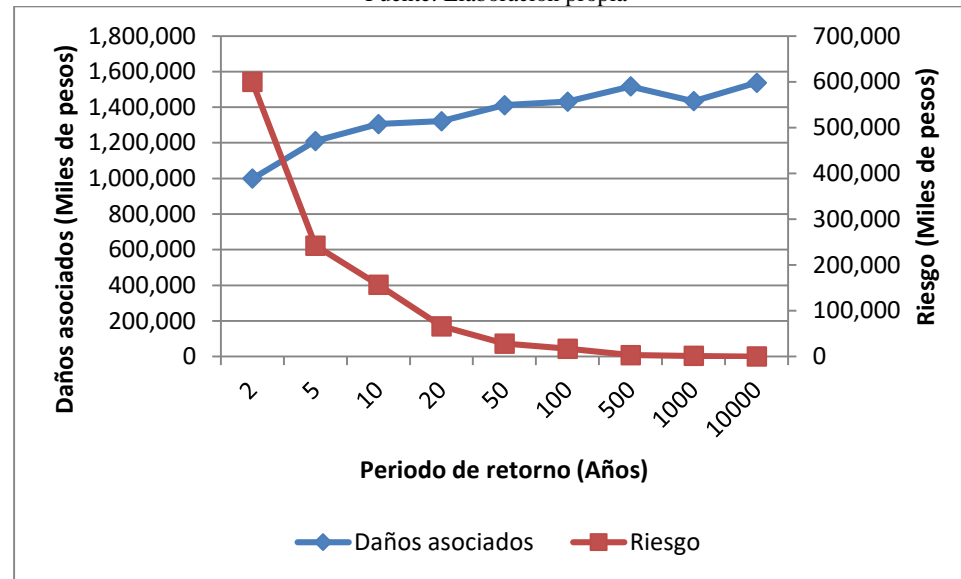
De acuerdo con los mapas de peligro, para el periodo de retorno de 2 años son 33 las localidades que registran algún tipo de afectación, sin embargo, éstas incrementan a 50 para eventos con periodo de retorno de 10 mil años. Los daños asociados van de 999.6 millones para el periodo de retorno más corto (2 años) y ascienden a 1,537.6 para el más largo (10,000 años). Por otro lado, el riesgo se estimó en 599.7 millones para el primer caso y en 154 mil pesos para el segundo (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

Tabla 83. Resultado del análisis de riesgo en el municipio de Felipe Carrillo Puerto para diferentes periodos de retorno.

Periodo de retorno	Intensidad (mm en 24h)	Probabilidad de ocurrencia	Número de localidades afectadas	Daños asociados (Miles de pesos)	Riesgo (Miles de pesos)
2	82	0.6000	33	999,574	599,745

5	113	0.2000	40	1,210,349	242,070
10	141	0.1200	43	1,305,290	156,635
20	172	0.0500	43	1,321,412	66,071
50	206	0.0200	46	1,411,699	28,234
100	230	0.0120	48	1,431,135	17,174
500	282	0.0020	50	1,516,539	3,033
1000	304	0.0010	50	1,434,387	1,434
10000	416	0.0001	50	1,537,607	154

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 69. Variación de los daños y el riesgo en función del periodo de retorno para el municipio de Felipe Carrillo Puerto.

Las localidades que presentaron los niveles más altos de riesgo en la demarcación fueron Polyuc, Noh-Bec y X-Hazil Sur. La superficie inundada crece de 2,417 km² para eventos con periodo de retorno de 2 años, a 5,541 km² para los de 10 mil años, lo que representa el 17.5% y el 40.1% del territorio municipal, respectivamente.

En los siguientes mapas se puede observar que existe una proporción mayor de localidades con niveles de riesgo altos en el Sur del municipio, sin embargo también se observan algunas en el Centro y Norte de la demarcación (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

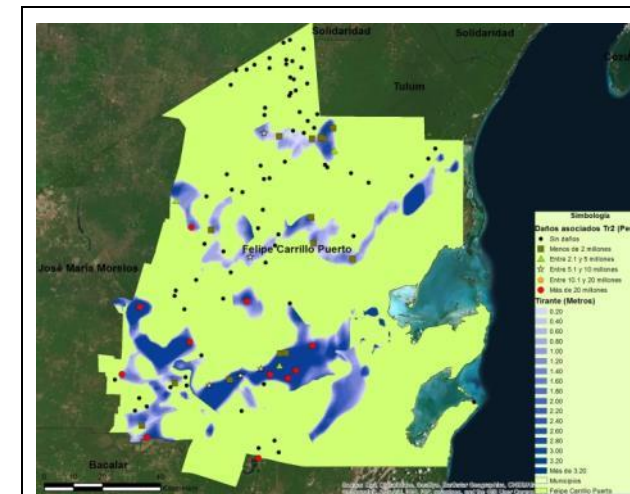


Figura 160. Daños asociados para un periodo de retorno de 2 años

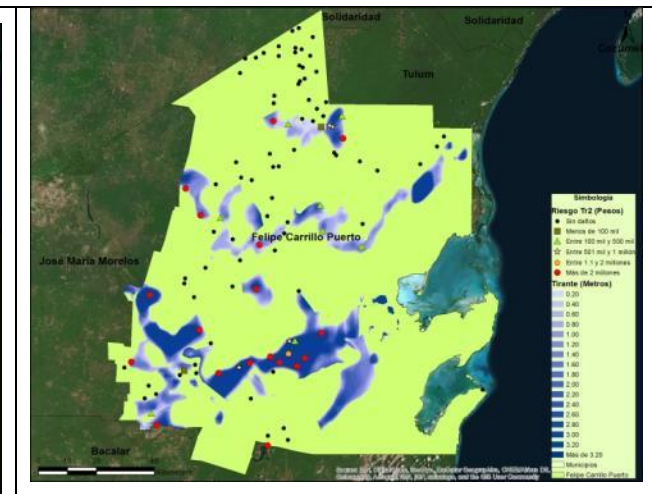


Figura 161. Riesgo para un periodo de retorno de 2 años

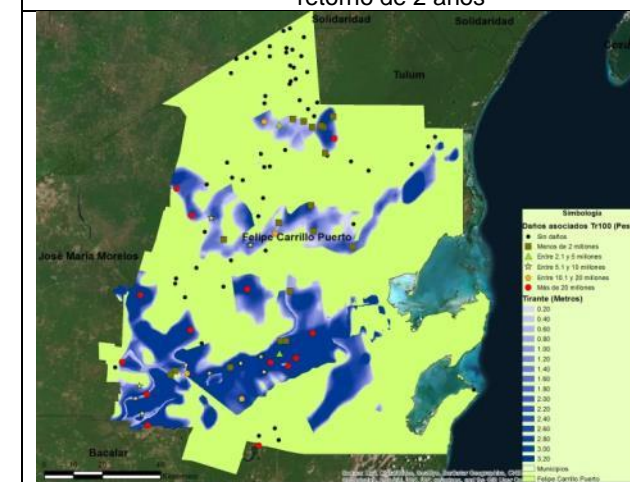


Figura 162. Daños asociados para un periodo de retorno de 100 años

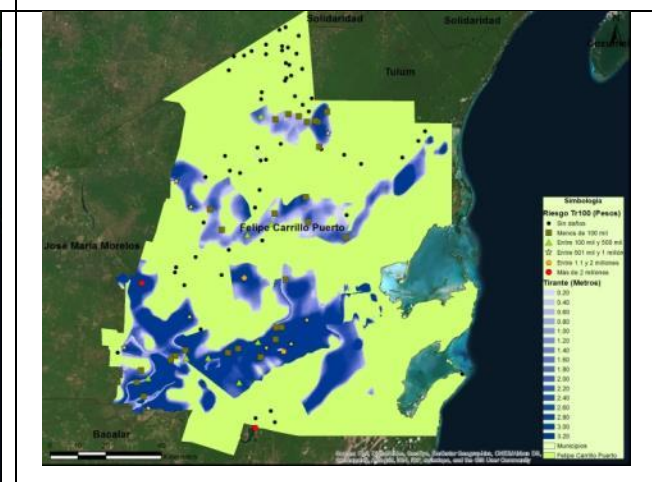


Figura 163. Riesgo para un periodo de retorno de 2 años

De igual forma, se aprecia el aumento de los daños asociados y la disminución del riesgo, según el periodo de retorno, debido a que mientras en el de dos años sólo se observan 11 localidades con daños superiores a los 20 millones de pesos, para el de 100 años aumentan a 14. En cambio, el riesgo calculado para el periodo de retorno de dos años se consideró muy alto para 18 localidades y para el de 100 años únicamente dos.

El riesgo per cápita se estimó en 7,994 pesos para el periodo de retorno de 2 años y en 229 pesos para el de 100 años.

José María Morelos

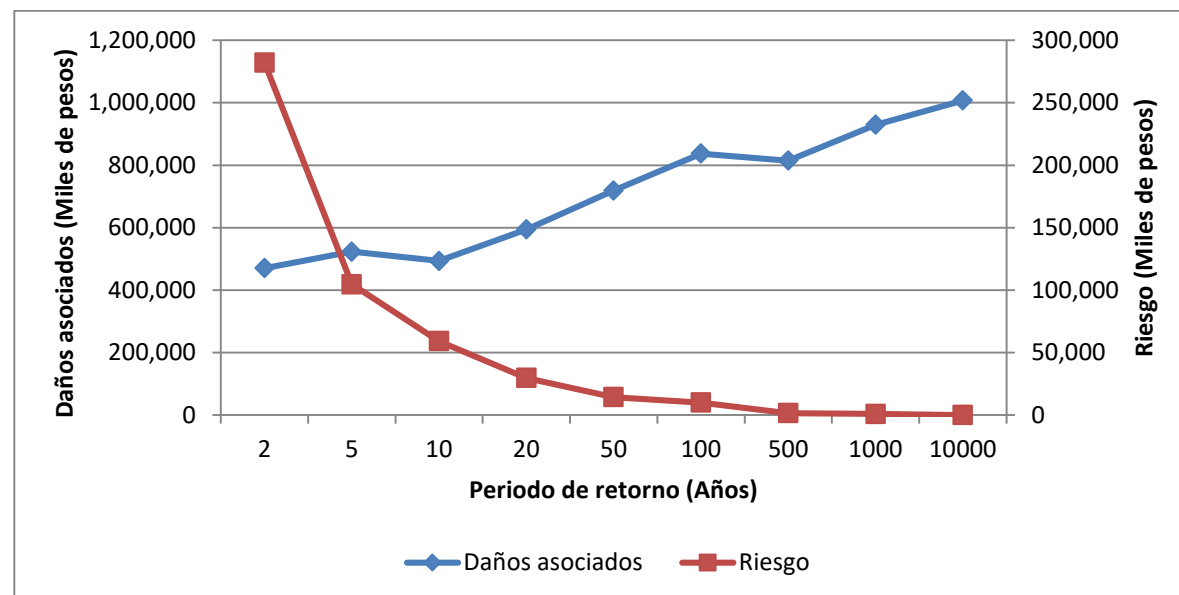
El municipio de José María Morelos tiene una extensión territorial de 6,739 Kilómetros cuadrados y era habitado en 2010 por 36,179 habitantes. El análisis de riesgo se llevó a cabo en 83 localidades rurales de la demarcación. Al igual que en los casos anteriores, se estimaron los daños asociados y el riesgo para los diferentes periodos de retorno, mismos que fueron, en el caso de los daños asociados, de 470.4 millones para el de dos años a 1,007.4 millones para el de 10 mil, y en materia del riesgo de 282.2 millones a 101 mil pesos en los mismos periodos de retorno.

Tabla 84. Resultado del análisis de riesgo en el municipio de José María Morelos para diferentes periodos de retorno.

Periodo de retorno	Intensidad (mm en 24h)	Probabilidad de ocurrencia	Número de localidades afectadas	Daños asociados (Miles de pesos)	Riesgo (Miles de pesos)
2	87	0.6000	11	470,364	282,218
5	119	0.2000	13	523,283	104,657
10	150	0.1200	14	493,569	59,228
20	182	0.0500	15	594,322	29,716
50	218	0.0200	16	719,079	14,382
100	244	0.0120	16	836,965	10,044
500	300	0.0020	19	814,835	1,630
1000	323	0.0010	19	929,482	929
10000	399	0.0001	20	1,007,384	101

Fuente: Elaboración propia.

En este caso en particular, si se observa un incremento importante en los daños asociados según va aumentando el periodo de retorno, esto se debe principalmente a que el número de localidades afectadas aumenta de 11 en el de dos años a 20 en el de 10 mil y el tirante de la inundación es más alto.



Gráfica 70. Variación de los daños y el riesgo en función del periodo de retorno para el municipio de José María Morelos.

De acuerdo con el análisis realizado, las localidades en las cuales existe un nivel de riesgo más alto fueron La Presumida, Santa Gertrudis y San Diego, todas ubicadas al Noreste del municipio. Las áreas afectadas van de 682.3 km² para eventos con periodo de retorno de 2 años a 898.8 Km² para el de 100 años, lo que representa el 10.1% y el 13.3%, respectivamente.

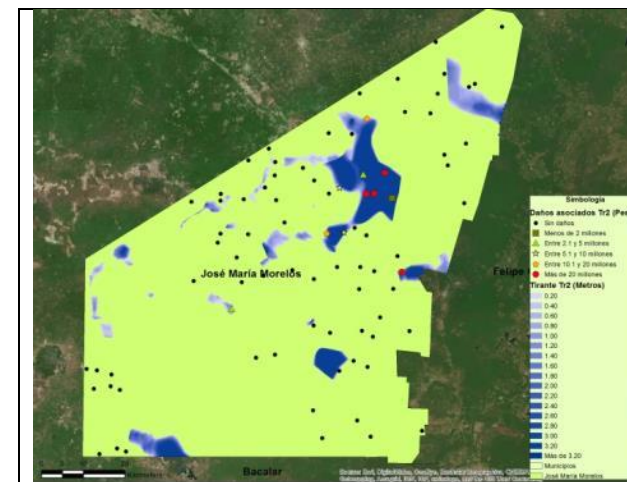


Figura 164. Daños asociados para un periodo de retorno de 2 años

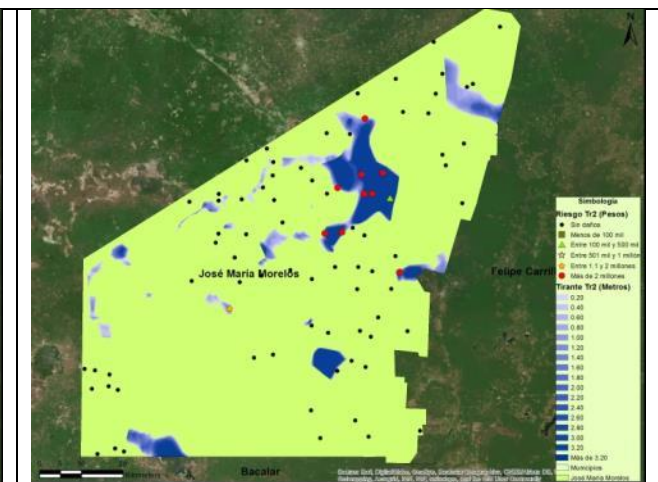


Figura 165. Riesgo para un periodo de retorno de 2 años

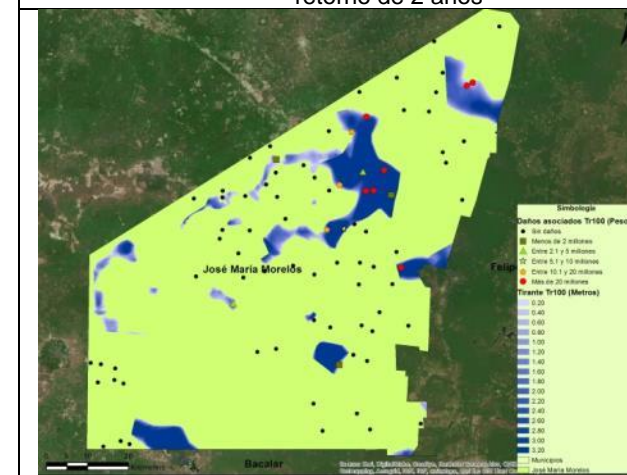


Figura 166. Daños asociados para un periodo de retorno de 100 años

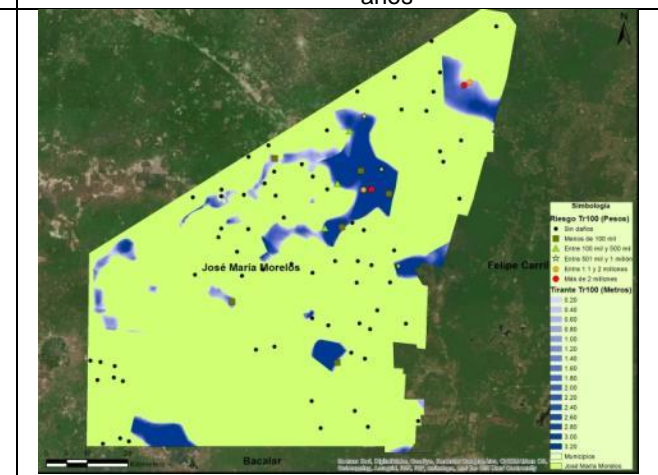


Figura 167. Riesgo para un periodo de retorno de 100 años

El riesgo per cápita para un periodo de retorno de 2 años se estimó en 7,800 pesos, mientras que para el de 100 años fue de 278 pesos aproximadamente.

Othón P. Blanco

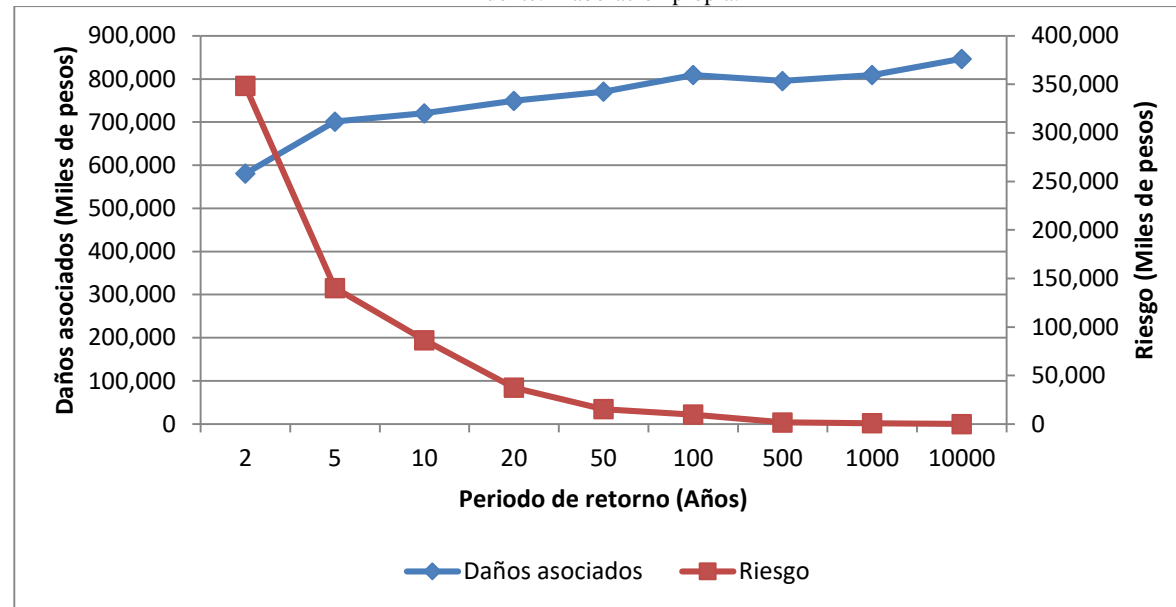
El municipio de Othón P. Blanco cuenta con una extensión territorial de 17,190 km², y era habitado en 2010 por 219,763 personas. Cabe recordar que en 2011, el municipio de Bacalar se segregó de Othón P. Blanco, por lo cual los datos demográficos se ajustaron, aunque la fuente de la información utilizada corresponde al Censo de Población y Vivienda 2010.

Para el análisis de riesgo por inundación a nivel municipal, se tomaron en cuenta un total de 122 localidades de la demarcación. Los daños asociados a los diferentes periodos de retorno se incrementaron de 580.8 millones para el de dos años, a 846.6 millones para el de 10 mil. El riesgo por su parte, se estimó en 348.5 millones para el periodo de retorno más corto y en 85 mil pesos para el más largo (**iError! No se encuentra el origen de la referencia. y iError! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Tabla 85. Resultado del análisis de riesgo en el municipio de Othón P. Blanco para diferentes periodos de retorno.

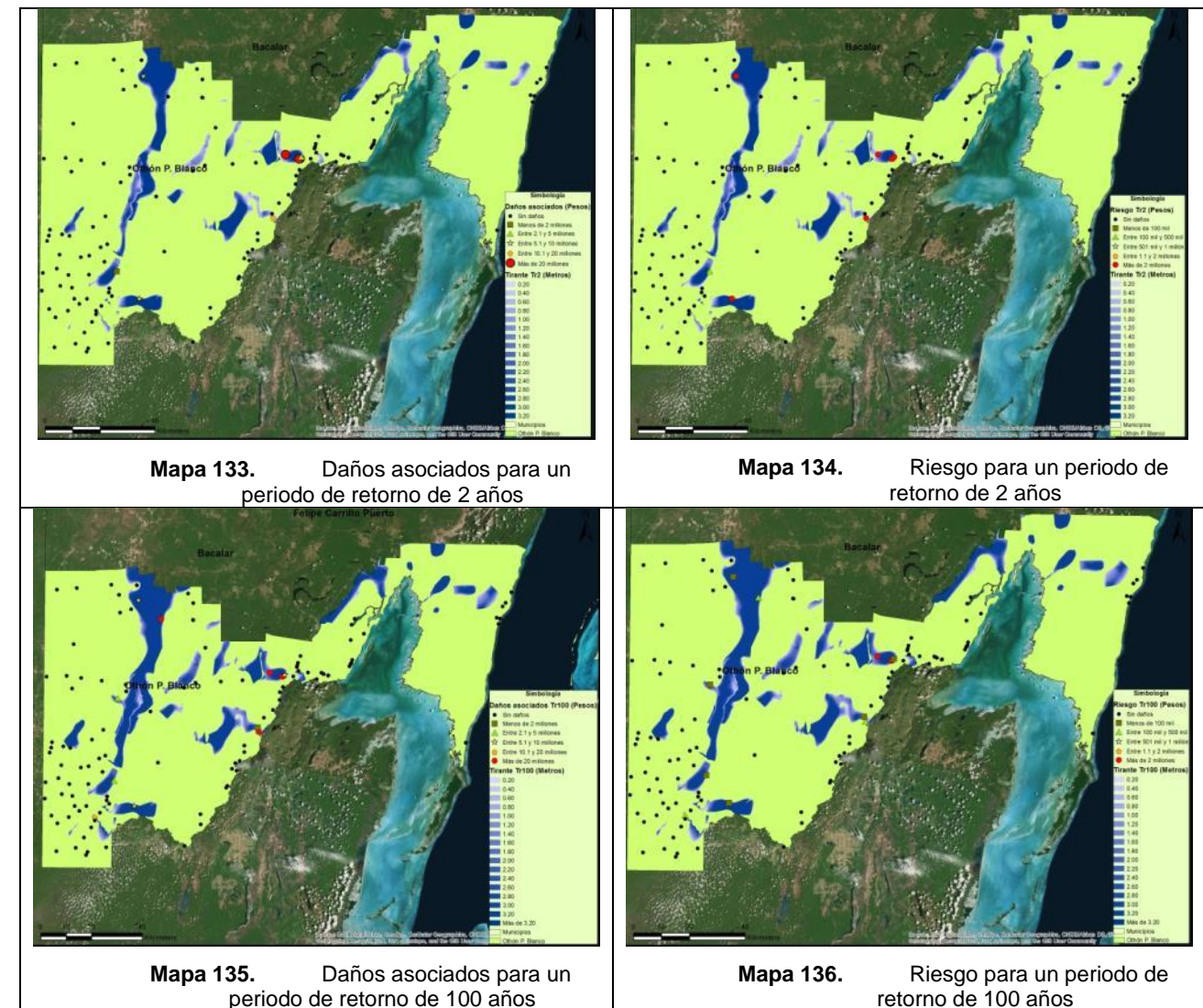
Periodo de retorno	Intensidad (mm en 24h)	Probabilidad de ocurrencia	Número de localidades afectadas	Daños asociados (Miles de pesos)	Riesgo (Miles de pesos)
2	115	0.6000	8	580,750	348,450
5	158	0.2000	11	701,064	140,213
10	198	0.1200	11	720,451	86,454
20	240	0.0500	11	749,556	37,478
50	288	0.0200	11	770,631	15,413
100	321	0.0120	12	809,147	9,710
500	395	0.0020	11	795,280	1,591
1000	425	0.0010	12	809,147	809
10000	512	0.0001	12	846,612	85

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 71. Variación de los daños y el riesgo en función del periodo de retorno para el municipio de Othón P. Blanco.

Las localidades con mayores niveles de riesgo en el municipio fueron Sergio Butrón Casas, Carlos A. Madrazo y Ucum, todas ubicadas en la misma zona al Oeste de la ciudad de Chetumal. Cabe resaltar que a pesar de que Othón P. Blanco es la demarcación más grande del estado y el de mayor número de localidades, únicamente 12 de estas serían afectadas en eventos con periodos de retorno mayores a 100 años. Las áreas inundadas para eventos con periodo de retorno de dos años se estimaron en 1,139 Km² y en 1,627.1 km² para el de 100 años, lo que representa el 6.6% y el 9.5% del total del territorio del municipio, respectivamente (**iError! No se encuentra el origen de la referencia., iError! No se encuentra el origen de la referencia., iError! No se encuentra el origen de la referencia. y iError! No se encuentra el origen de la referencia.**).



El riesgo per cápita se estimó en 1,586 pesos para el periodo de retorno de dos años y en apenas 44 pesos para el de 100 años.

4.2.1.6 Referencias bibliográficas

Aparicio, J. (2011). Fundamentos de hidrología de superficie. Mexico: Limusa.

Eslava H., Jiménez M., Salas M. A., García F. (2006). Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligro y riesgo, Fenomenos Hidrometeorológicos. Mexico: Secretaría de Gobernación.

Frances Garcia, Félix y otros. (200). Un ejemplo de análisis regional del riesgo de inundación en el marco de planificación territorial. España: Serie Grafica.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (s.f.). Recuperado el 13 de 06 de 2015, de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continuo/elevaciones.aspx>

Leonardo s. Nania, Emilio Morelo. (2007). Manual Básico Hec-Ras 3.1.3 y HecGeo-Ras 3.1.1. Granada: Leonardo S. Nania Escobar.

Marco Antonio Salas, Héctor Eslava. (2001). Diagnóstico de peligro e identificación de riesgos de desastre en Mexico. En Diagnóstico de peligro e identificación de riesgos de desastre en Mexico (págs. 104,105,105,139). Mexico: Secretaría de Gobernacion.

Salina, M. A. (2011). Metodología para la elaboracion de mapas de riesgo de inundacion en zonas urbanas. Mexico: Secretaria de Gobernacion.

SIATL simulador de flujos de agua de cuancas hidrograficas. (s.f.). Recuperado el 15 de 09 de 2015, de SIATL simulador de flujos de agua de cuancas hidrograficas: http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/#

4.2.2 Inundación de ciudad

4.2.2.1 Introducción

Las inundaciones pluviales son consecuencia de la precipitación, se presenta cuando el terreno se ha saturado y el agua de lluvia excedente comienza a acumularse, pudiente permanecer horas o días, hasta que se evapore y el terreno recupere su capacidad de infiltración.

Clasificación de acuerdo con el tiempo en el que suceden:

- Inundaciones lentas. Ocurren en grandes áreas de poca pendiente, por lo que suelen presentarse en cuestión de días, dando oportunidad de evacuar.
- Inundaciones súbitas. Son aquellas que suceden en cuestión de minutos, como consecuencia de lluvias intensas que caen sobre una superficie pequeña con fuerte pendiente y están relacionadas con avalanchas de lodo; por ello, se consideran las más peligrosas.

4.2.2.2 Metodología

La metodología que se aplicó para determinar el peligro por inundaciones pluviales, para diferentes tiempos de retornos es la propuesta por CENAPRED, que es "Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas".

Para poder desarrollar y aplicar la metodología de una manera efectiva se considera necesario que se cumplan unas series de requerimientos, como son:

- Insumos digitales obtenidos de fuentes oficiales, como el Modelo Digital de Elevación (MDE) continuo de elevaciones mexicano.
- Archivos shape file de las ciudades de Chetumal, Cancún, Cozumel, Playa del Carmen, Tulum, Isla Mujeres y Felipe Carrillo puerto.
- Archivo shape file de los municipios de Othón p. Blanco, Benito Juárez, Cozumel, Isla Mujeres, Solidaridad, Tulum y Felipe Carrillo Puerto.
- Manejo de software como VELL⁸⁰, Hec-Ras⁸¹ y ArcGis⁸².

⁸⁰ Visualizador de escenarios de lluvia (VELL), sirve para obtener la lluvia de diseños para cada Tr.

➤ Google Earth.

4.2.2.3 Peligro

4.2.2.4 Desarrollo

Tratamiento del modelo digital

En ArcGis, usando el modelo digital de elevación, más los archivos shapefile de los municipios y ciudades, se procedió a extraer un MDE para cada municipio, esto con la herramienta de "Extract by Mask". Para los MDE obtenidos, se hizo una serie de tratamientos para la obtención de la red hidrica y obtención de cuencas de interés, estos procesos fueron realizados en ArcGis y son los siguientes.

Cabe mencionar que la cuenca de interés es donde se encuentra la ciudad.

Identificación y relleno de depresiones.

Uno de los principales problemas al usar un MDE es la calidad de los datos, sobre todo en zonas planas, debido a que pequeñas variaciones en la elevación pueden generar cambios significativos en el análisis hidrológico.

En caso de pasar por alto esta situación, es posible que la red de drenaje generada sea defectuosa, por lo que es importante que primero se corrija, por lo cual se usa la herramienta llenado de depresiones FILL.

Con esta herramienta se obtiene un nuevo Raster, que aunque a simple vista no se note diferencia alguna entre MDE y Raster obtenido en el proceso, las redes de drenaje obtenidas pueden variar significativamente y con mayor exactitud, ya que rellena sumideros para quitar pequeñas imperfecciones en los datos.



Figura 168. MDE de la cuenca 33Ac, donde se ubica la ciudad de Chetumal.

Dirección de flujo.

Con el resultado obtenido anteriormente, se procede a obtener un nuevo Raster, usando de igual forma el ArcGis, utilizando la herramienta Flow Direction, como resultado obtenemos la dirección del flujo en cada celda, existen ocho posibles direcciones relacionadas con el escurrimiento de flujo, por lo cual el flujo viaja desde cada celda hasta su vecina con la

⁸¹ HecRas (Hydrologic Engineering Centers River Analisis System), es un programa que permite modelar flujos permanentes y flujos variables de agua.

⁸² ArcGis, es un software de información geográfica, que ayuda al geoprocetamiento espacial.

pendiente descendente más empinada.

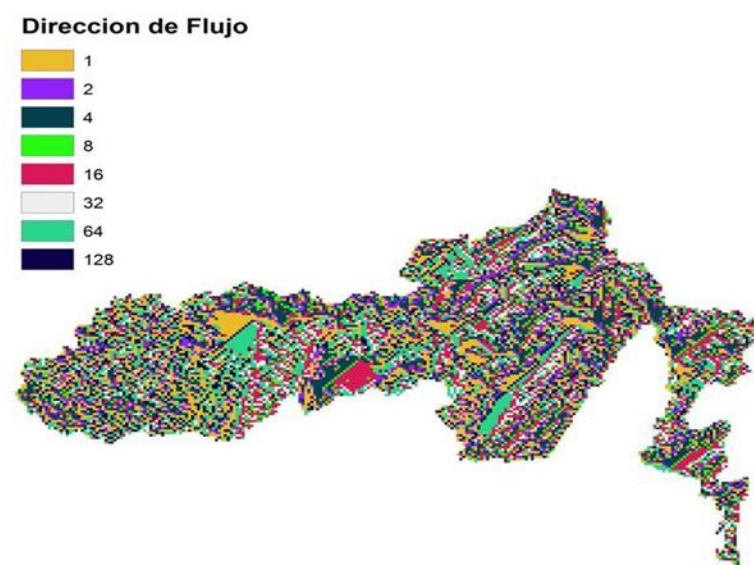


Figura 169. Raster que indica la dirección de flujo.

Flujo de Acumulación.

Usando el Raster de dirección de flujo se procesa para obtener un tercer Raster con la herramienta Flow Accumulation, el cual marca la acumulación de flujo, las celdas con una acumulación de flujo alta son áreas de flujo concentrado y es útil para identificar canales de ríos, tanto principales como sus ramificaciones.



Figura 170. Raster que indica la acumulación de flujo.

Red de drenaje.

Con el Raster resultante de acumulación de flujo, se procede a construir la red de drenaje con la herramienta "CON" y esto de manera automática por medio de un condicional, pero hay que tener en cuenta que esto depende del tamaño del Raster ya que dependiendo del tamaño es el valor asignado, este valor asignado permite clasificar las celdas con acumulación de flujo superior a un umbral especificado. Por ejemplo, al ingresar un valor bajo como resultado, mostrará afluentes pequeños de la red de drenaje, pero mientras más alto sea el valor se obtendrá una red de drenaje de mayor tamaño, este

archivo es un Raster para lo cual se convirtió a formato shape.

Delimitación de cuenca

Una vez obtenido la red de drenaje se procede a delimitar las cuencas, para lo cual se usa la herramienta Basin, y el Raster de dirección de flujo, "una cuenca es una porción de terreno delimitada geográficamente por divisiones de agua, y están limitadas por la cima de las colinas o montañas que rodean el terreno"⁸³.



Figura 171. Raster que indica y delimita las cuencas existentes.

Cuenca de interés

El Raster resultante se procede a convertirlo en un polígono shapefile, del cual se procedió a extraer la cuenca más cercana a la ciudad de interés, para eso se cargó el shapefile de la ciudad.

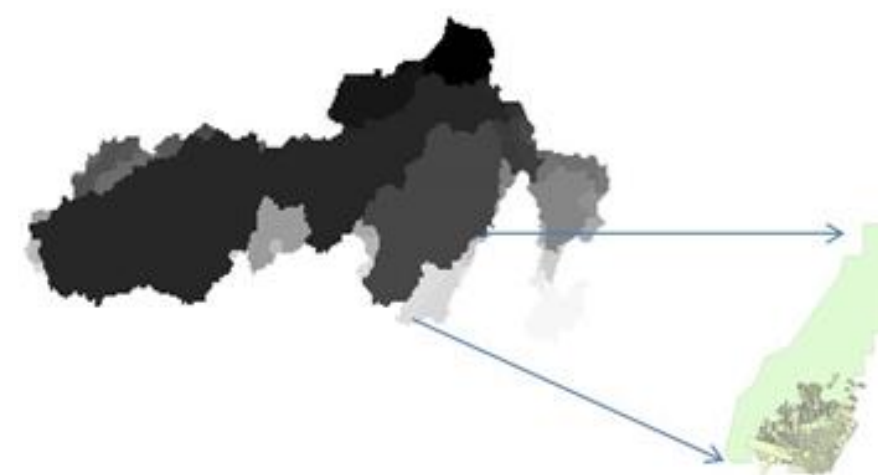


Figura 172. Extracción de la cuenca de interés.

⁸³ Jorge Núñez Solís.

Cálculo de gastos de diseño

Para calcular los gastos de diseños en cualquier cuenca de nuestro interés, se requiere la siguiente información.

- Área de la cuenca.
- Cálculo de la pendiente media del cauce.
- Cálculo de la lluvia de diseño.
- Cálculo del número de escurrimiento.

Estos datos se ingresan a una hoja de cálculo de Excel, que fue proporcionado por CENAPRED.

Cálculo área de la cuenca

Para el cálculo del área de la cuenca, se usa el shapefile de la cuenca de interés, donde seleccionamos su tabla de atributos, así se crea una nueva columna de tipo numérica con el nombre de Área, luego se seleccionó y con un anticlick se procedió a calcular el área, este cálculo debe estar en las unidades de kilómetros cuadrados, ya que hay más opciones de unidades.

Cálculo de la pendiente media y longitud del cauce.

Este cálculo se hace por el método de Taylor-Schwartz, a través de la fórmula.

$$S_{media} = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2 =$$

Donde S es la pendiente media del cauce principal; L es la longitud total del cauce principal; S₁, S₂,..., S_m son las pendientes de cada tramo; y L₁, L₂,...,L_m son las longitudes de cada tramo.

Para conocer las pendientes medias y la longitud media de cada tramo se usó el Google Earth, con el objetivo de tener un dato preciso de los perfiles de elevación y longitudes.

Cálculo de la lluvia de diseño

Para la lluvia de diseño, se usó el software visualizador de escenarios de lluvia (VELL), el cual utiliza las isoyetas y ajustes de probabilidad, el cual fue revisado y aprobado por el CENAPRED.

Al abrir el VELL, podemos buscar la lluvia de diseño para cada región hidrográfica, así como por coordenadas. La lluvia de diseño que nos proporciona el programa es de suma importancia en el momento de hacer el cálculo de los gastos. Dicha lluvia de diseño se presenta en una tabla especificando sus tiempos de retornos.

Cálculo del número de escurrimiento

Existen diversos problemas al determinar el número de escurrimiento, sin embargo, estos datos son necesarios para el cálculo caudal, los parámetros que son recurrentes en el proceso de calcular el número de escurrimiento son: las características generales (forma, pendiente, vegetación, tipo y uso de suelo).

Para el presente trabajo se usó la hoja de Excel proporcionada por CENAPRED, con el nombre de Racional. Como dato importante, el número de escurrimiento no puede ser menor a 55 ni mayor a 90.

Calculo del gasto, para cada tiempo de retorno.

El gasto/caudal es la cantidad de agua que pasa por un canal en determinado tiempo, para determinar este gasto, se usó la hoja de Excel con nombre Racional, por lo que es importante tener a la mano los datos obtenidos anteriormente:

- Área de la Cuenca.
- Pendiente media y longitud de la cuenca.
- Calculo de la lluvia de diseño.
- Calculo de número de escurrimiento.

El método por el cual se calculó el gasto máximo es "método racional", que implica la fórmula.

$$Qd = 0.278 C I A$$

Donde:

Qd= Gasto calculado.

C= Numero de escurrimiento.

I= Intensidad de la lluvia.

A= Área de la cuenca.

Para determinar el "Qd" para cada tiempo de retorno, se sustituye "I" por cada intensidad de lluvia calculada.

Preparación de archivos en ArcGis y Hec-Ras

Creación de la estructura de la dirección del flujo

Usando la red de drenaje generada y con ayuda de la extensión Hec-GeoRas84, se procede a digitalizar el cauce de interés, la digitalización se realizó de aguas arriba a aguas abajo.

La información mínima que se digitalizo para usar en Hec-Ras, es la siguiente:

- Stream Centerline, que es el cauce del río.
- Flow Path Centerlines, es la combinación del cauce y los bordes del río.
- XC Cut Lines, son las distancias a las cuales se estima la inundación.

Una vez que se generaron las capas, se procede a rellenarlas con datos de alturas por lo cual se procede a usar el TIN, el cual se generó desde MDE, en la opción "RAS Geometry/Layer Septup".

Con la obtención de los vectores anteriores, se procede a crear el fichero de importación para HEC-RAS, en la barra de inicio "Ras Geometry / Extract GI data", este fichero de texto se guarda con formato .sdf.

Creación de proyecto en Hec-Ras

⁸⁴ Es una extensión para ArcGis 10.2, desarrollada conjuntamente por el *Hydrologic Engineering Center*, con los que se crean archivos de inportacion para Hec-Ras

La simulación de inundación por lluvias a nivel de municipios, y la exportación de resultados hacia ArcGis, se llevó a cabo en cinco etapas.

- Importación de datos geométricos en Hec-Ras.
- Complementación de la información geométrica.
- Información de los caudales que serán simulados.
- Condiciones de frontera en el río.
- Ejecución del programa, verificación y exportación de los resultados.

Importación de datos

En esta etapa se lee el archivo que contiene la información geométrica del proyecto creado en ArcGis, pero antes de importarlo es importante generar un nuevo proyecto y guardarlo, una vez que se generó el nuevo proyecto se procede a importar la geometría.

En la opción de "River Reach Stream Lines", se verifica que la estructura que se importó sea la correcta, después de confirmar que toda la información que se está importando es correcta, se selecciona "Finished – Import Data". En ese momento se desplegará el modelo que será simulado en Hec-RAS, el cual debe coincidir con la estructura creada en ArcGis.

Complementación de la información

La información que se ingresa son los datos mínimos requeridos para realizar una simulación

En la ventana donde se importó la estructura geométrica, se procedió a definir el coeficiente "n" de Manning, para cada sección, mediante el menú de herramientas se seleccionó "Tables/Mannin´s n or k values", para definir el coeficiente de rugosidad, se seleccionó n#1, n#2 y n#3, seguido de "set values..", en la ventana que emerge se tecleó como coeficiente de rugosidad "0.0035" (ver Tabla 86), seguido del botón "ok", con este procesos se completa las zonas del cauce con el coeficiente de rugosidad.

Tabla 86. Coeficientes de Manning, fuente www.fao.org

Canales sin vegetación	Rugosidad de Manning
Secciones transversales, alineación regular si guijarros ni vegetación, en suelos sedimentarios finos.	0.016
Secciones transversales uniformes, alineación regular, sin guijarros ni vegetación, con suelo de arcillas duros u horizontales endurecidos	0.018
Secciones transversales uniformes, alineación regular, con pocos guijarros, escasa vegetación, en tierra franca arcillosa.	0.020
Pequeñas variaciones en las secciones transversales, alineación bastante regular, pocas piedras, hierbas finas en las orillas, en suelos arenosos o arcillosos, y también en canales limpios y rastrillados	0.0225
Alineación irregular, con ondulaciones en el fondo, en suelo grava o esquistos arcillosos, con orillas irregulares o vegetación	0.025
Sección transversal y alineación irregular, rocas dispersas y grava suelta en el fondo, o con considerable vegetación en los márgenes inclinados.	0.030
Canales irregulares erosionados, o canales abiertos en la roca.	0.030
Canales con vegetación	
Gramineas cortas (50-150mm)	0.030-0.060
Gramineas medias (150-250mm)	0.030-0.085
Gramineas largas (250-600m)	0.040-0.150
Canales corriente natural	
Limpios y rectos	0.025-0.030
Con muchas hierbas altas, sinuosos	0.033-0.040

Introducción de Gastos/Caudal

Previamente a este paso, ya se ha realizado el cálculo de los gastos/caudal para cada cuenca de interés, asociados con diferentes periodos de retorno (índice 4.5 cálculo del gasto caudal para cada tiempo de retorno).

La información referente a caudales se ingresó a través del menú "Steady Flow Data", que se activó seleccionando el ícono "Edit/Enter steady flow data", desde la pantalla principal de HecRAS, el número de perfiles que se simularán corresponde a los gastos que se ingresarán a través de la opción "Enter/Edit Number of Profiles". En este trabajo se obtuvieron 9 valores, correspondientes a 9 periodos de retorno, para cada una de las ciudades.

En la misma ventada donde se ingresaron los caudales, se ingresaron las condiciones de frontera, para lo cual se ha seleccionando el botón "Reach Boundry Conditions", seguidamente la columna que hace referente al río, tanto en "Upstream" y "Downstream", para ambos casos se seleccionó la opción "Critical Depth".

Simulación de inundación

Una vez que se completaron los datos requeridos, se procede a ejecutar la simulación, en donde se selecciona un régimen de flujo mixto. Con este proceso obtenemos los resultados de las zonas de inundación.

Importación de los resultados

Los resultados de la simulación se exportaron de nueva cuenta a ArcGis, una vez que se importa los datos, estos se convierten en formato .XML para que puedan ser leídos y poder generar las zonas de inundación.

Obtención de zonas de inundación

El primer pasó, fue convertir el formato exportado de Hec-Ras, a formato compatible con Arcgis, seguidamente se usó la barra de herramienta "RAS Mapping", donde se seleccionó la opción "Layer Setup", e ingresamos datos de entrada como son:

- ∞ El nombre con el cual se guardará el proyecto.
- ∞ El archivo exportado de Hec-Ras, previamente convertido.
- ∞ Se ingresa la ubicación del TIN, usado anteriormente.
- ∞ Finalmente, se ingresa la ubicación en donde se guardarán los resultados.

Después de ingresar los datos seleccionamos "ok", lo que genera un nuevo proyecto en Arcgis, en donde aparece el TIN con el que le dimos alturas a la estructura trazada, seguidamente se seleccionó "RAS Mapping/Import Ras Data", el cual genera poligonos, en donde se marcaran las Zonas inundadas.

Para visualizar las zonas inundables para cada tiempo de retorno, lo primero es generar un TIN, que contenga las alturas de inundación, para lo cual se tiene que ir a "RAS Mapping/ Inundation Mapping/ Water Surface Generation" y seleccionar los tiempos de retorno de nuestro interés para la generación de su respectivo TIN.

Una vez que se obtuvieron los TIN de las zonas que se desea calcular, se procedió a generar las zonas de inundación, con la opción "RAS Mapping/ Inundation Mapping/ Floodplain Delineation Using Rasters", con los resultados de este análisis procedemos a generar nuestros mapas de inundación.

b) Resultados

Resultados del cálculos de diseño y zonas de inundación..

Las zonas de inundación se clasifican de acuerdo a su tiempo de retorno⁸⁵ de la siguiente manera:

- a) Zonas de inundación habitual, se debe a precipitaciones con periodos de retorno de 2 años.
- b) Zonas de Inundación frecuente, se debe a precipitaciones con periodos de retorno de 5 años.
- c) Zonas de inundación ocasional, se debe a precipitaciones con periodos de retorno de 10 años.
- d) Zonas de inundación ocasional máxima, se debe a precipitaciones con periodos de retorno de 20 años.
- e) Zonas de inundación esporádica, se debe a precipitaciones con periodos de retorno de 50 años.
- f) Zonas de inundación excepcional, se debe a precipitaciones con periodos de retorno de 100 años.
- g) Zonas de inundación extraordinarias, se debe a precipitaciones con periodos de retorno de 500 años.
- h) Zona de inundación extrema, se debe a precipitaciones con periodos de retorno de 1000 años.
- i) Zonas de inundación extrema máximas, se debe a precipitaciones con periodos de retorno de 10,000 años.

Usando la metodología para el cálculo de diseños, se obtienen los datos que se observan en las tablas siguientes de cada ciudad, los cuales se utilizaron para calcular las zonas de inundación de interés, y poder generar un mapa de peligro por inundación.

Ciudad Bacalar

Tabla 87. Datos hidrológicos, Bacalar.

Área Cuenca	83 km ²	Longitud Cuenca	5.25 km
Numero de Escurrimiento	55 (adimensional)		
Tiempo de Retorno	Lluvia de Diseño	Caudal Calculado	
2 años	90mm	1 m ³ /s	
5 años	123 mm	11 m ³ /s	
10 años	154 mm	38 m ³ /s	
20 años	187 mm	83 m ³ /s	
50 años	225 mm	150 m ³ /s	
100 años	251 mm	205 m ³ /s	
500 años	308 mm	343 m ³ /s	
1000 años	332 mm	409 m ³ /s	
10,000 años	380 mm	549 m ³ /s	

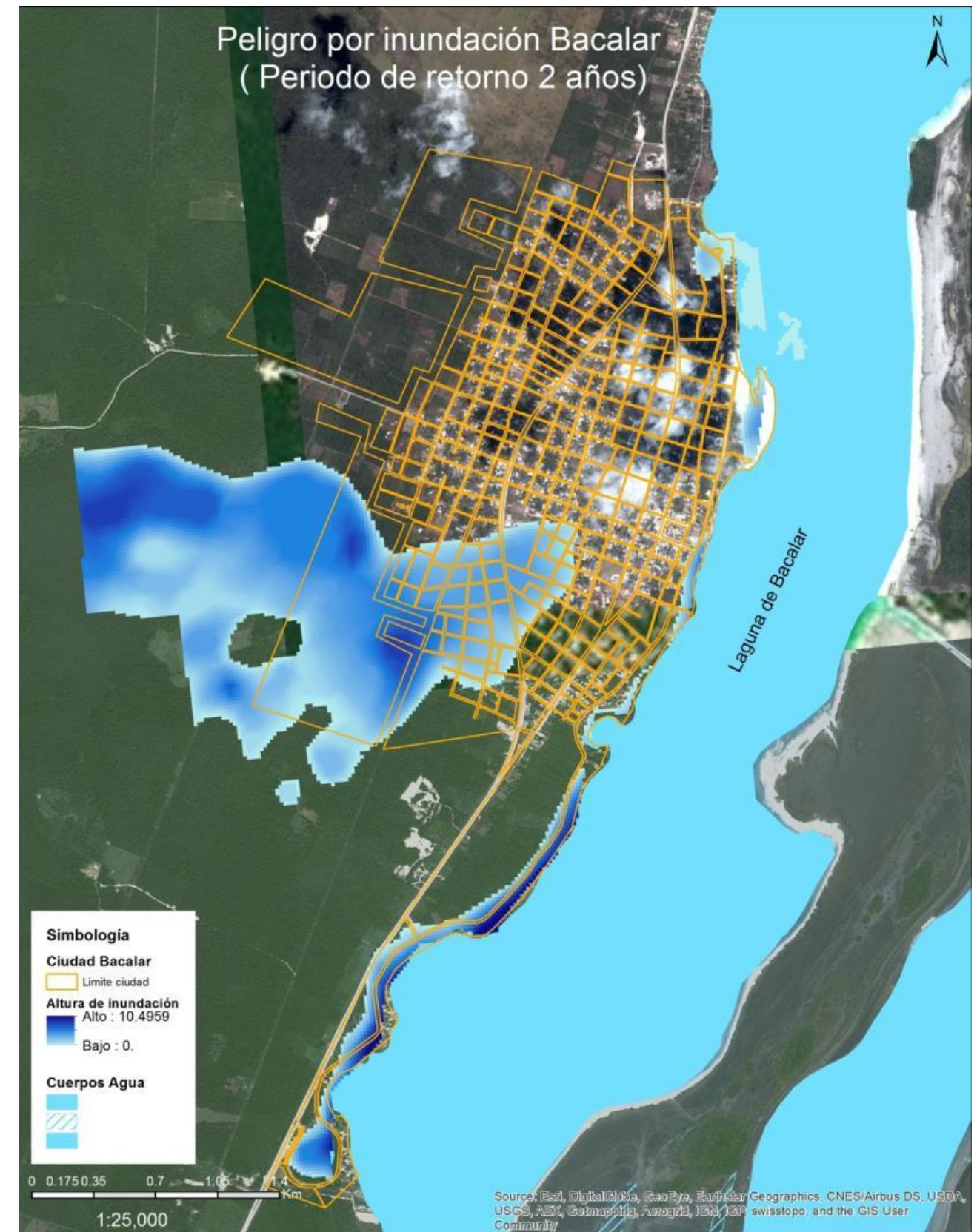


Figura 166.- Peligro por inundación Bacalar, periodo de retorno 2 años.

⁸⁵ Instituto de ingeniería de la UNAM

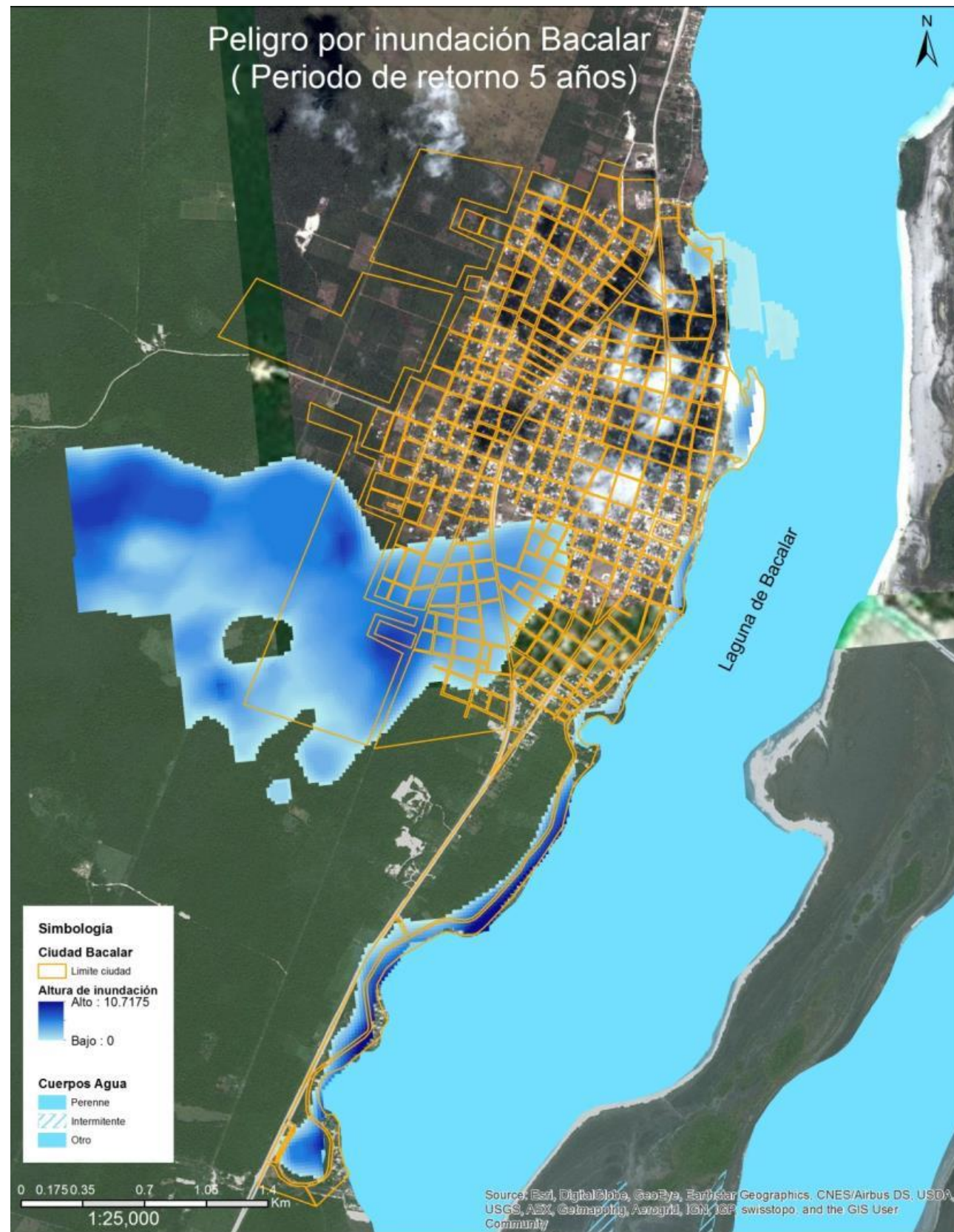


Figura 167.- Peligro por inundación Bacalar, periodo de retorno 5 años.

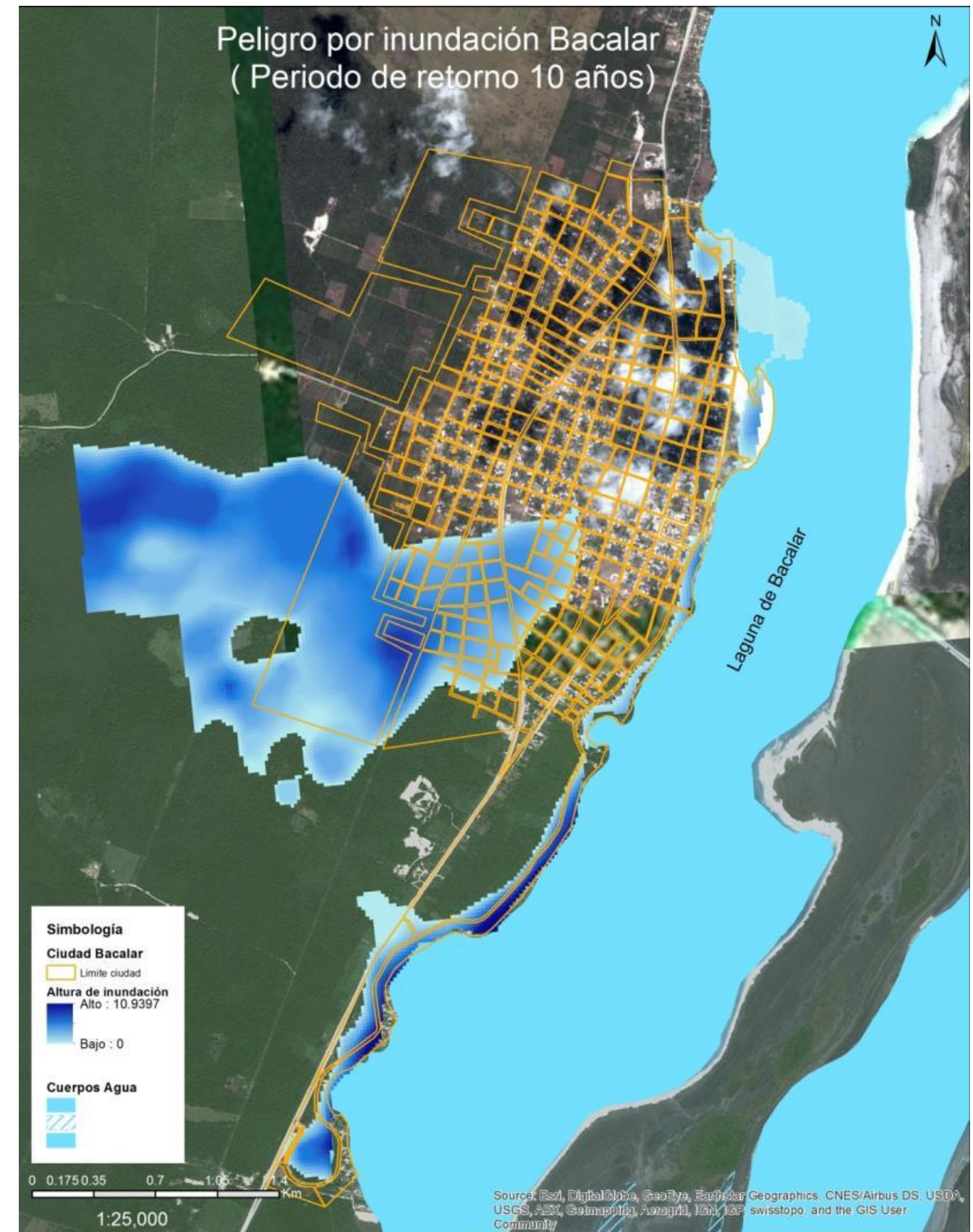


Figura 168.- Peligro por inundación Bacalar, periodo de retorno 10 años.

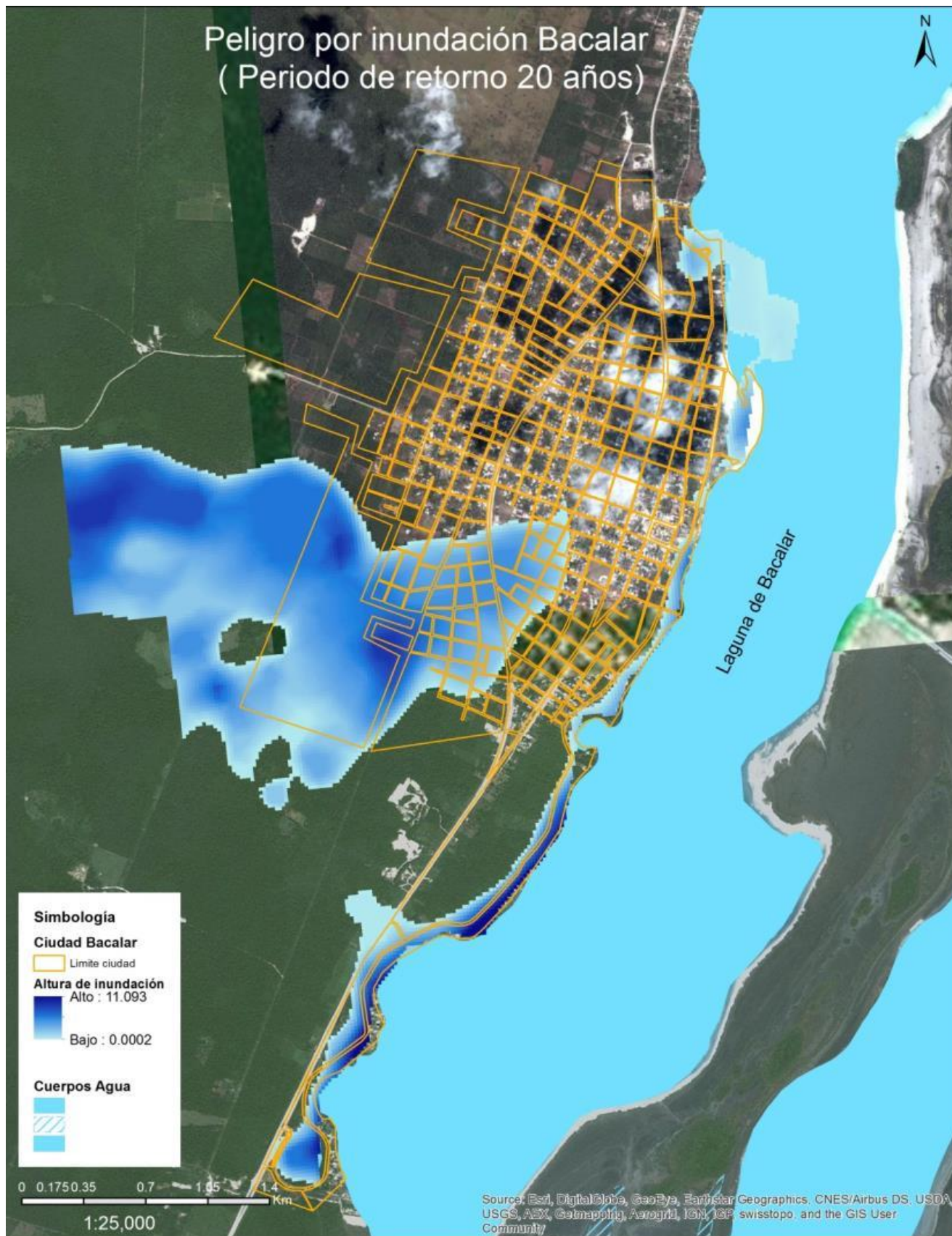


Figura 169.- Peligro por inundación Bacalar, periodo de retorno 20 años.

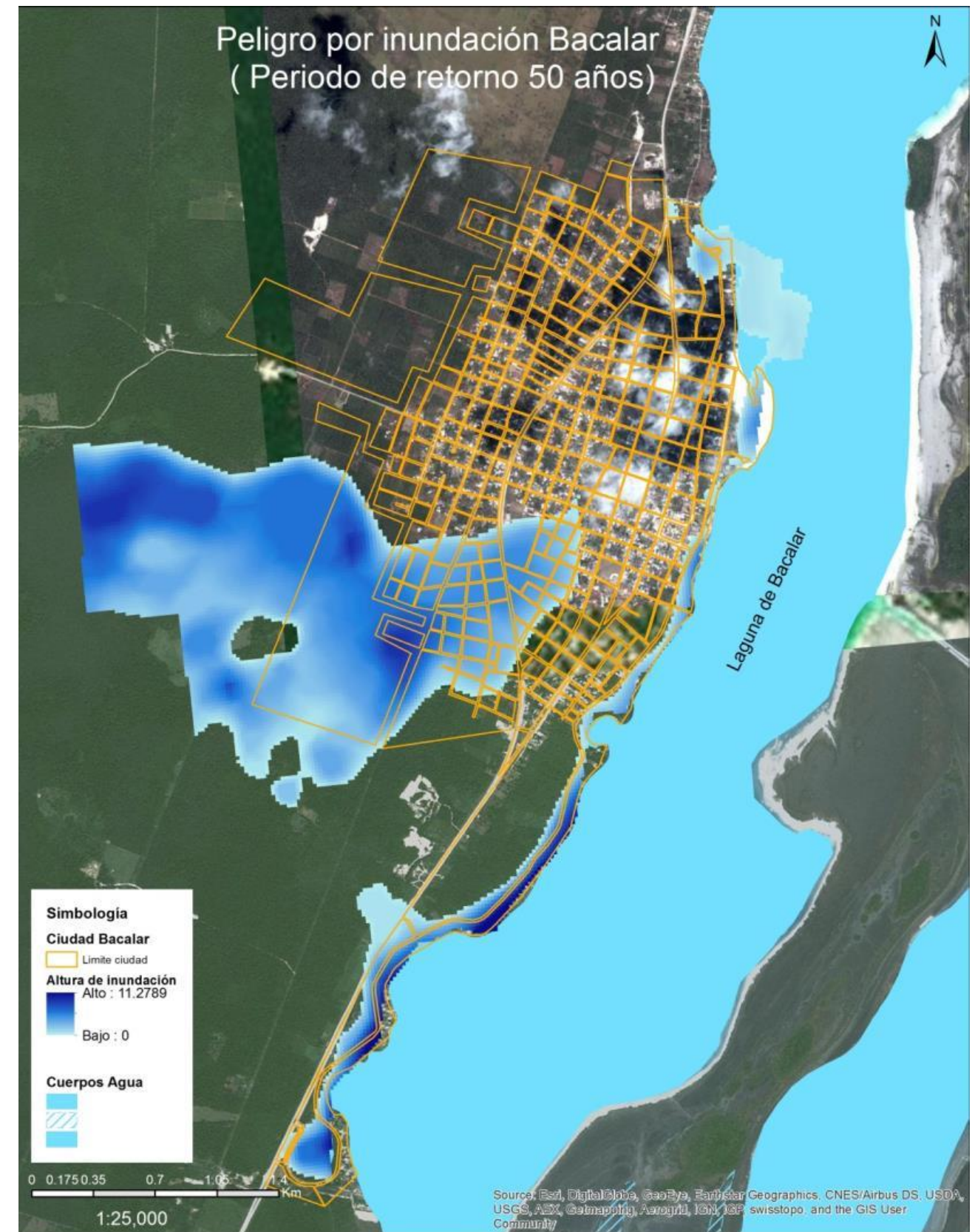


Figura 170.- Peligro por inundación Bacalar, periodo de retorno 50 años.

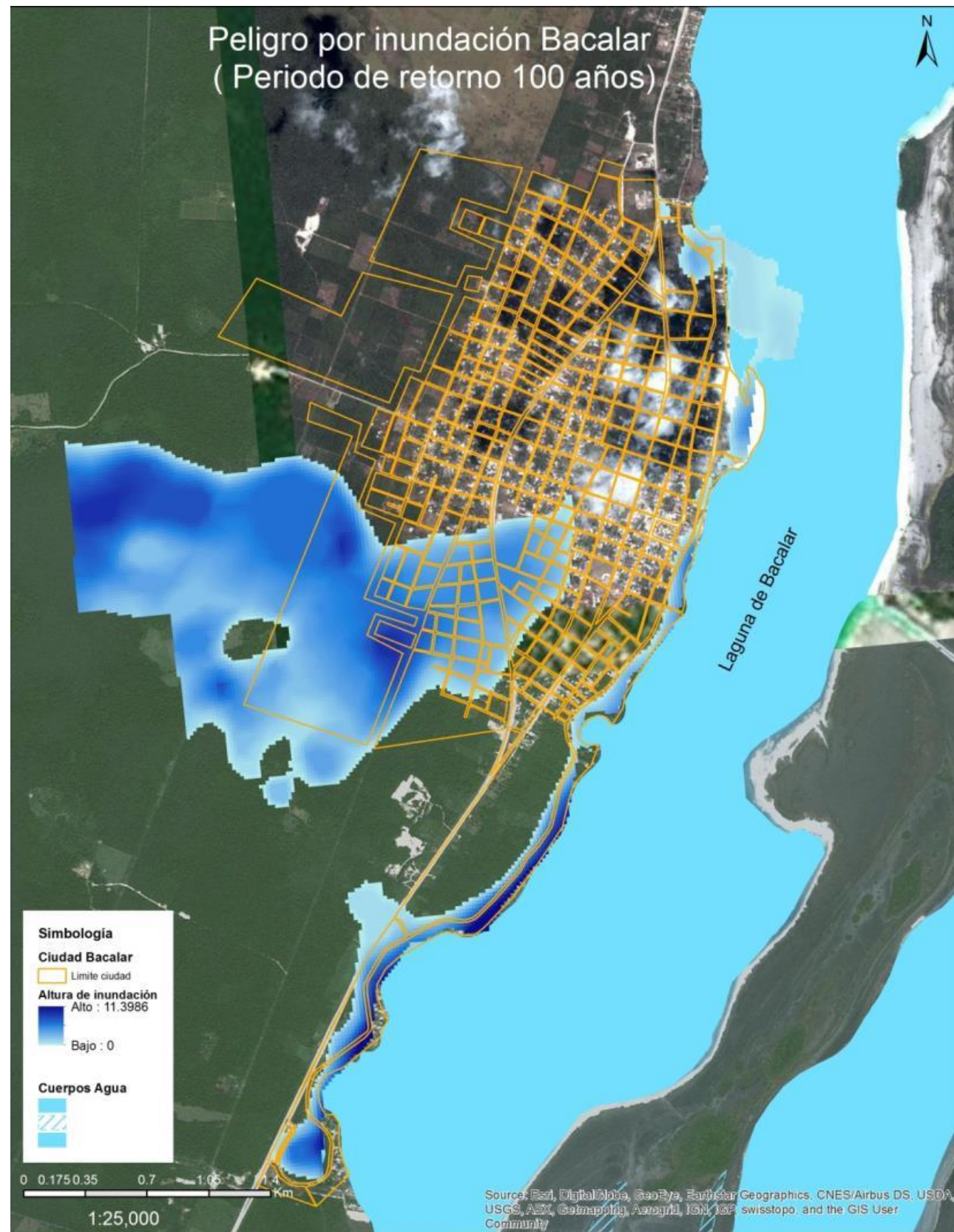


Figura 171.- Peligro por inundación Bacalar, periodo de retorno 100 años.

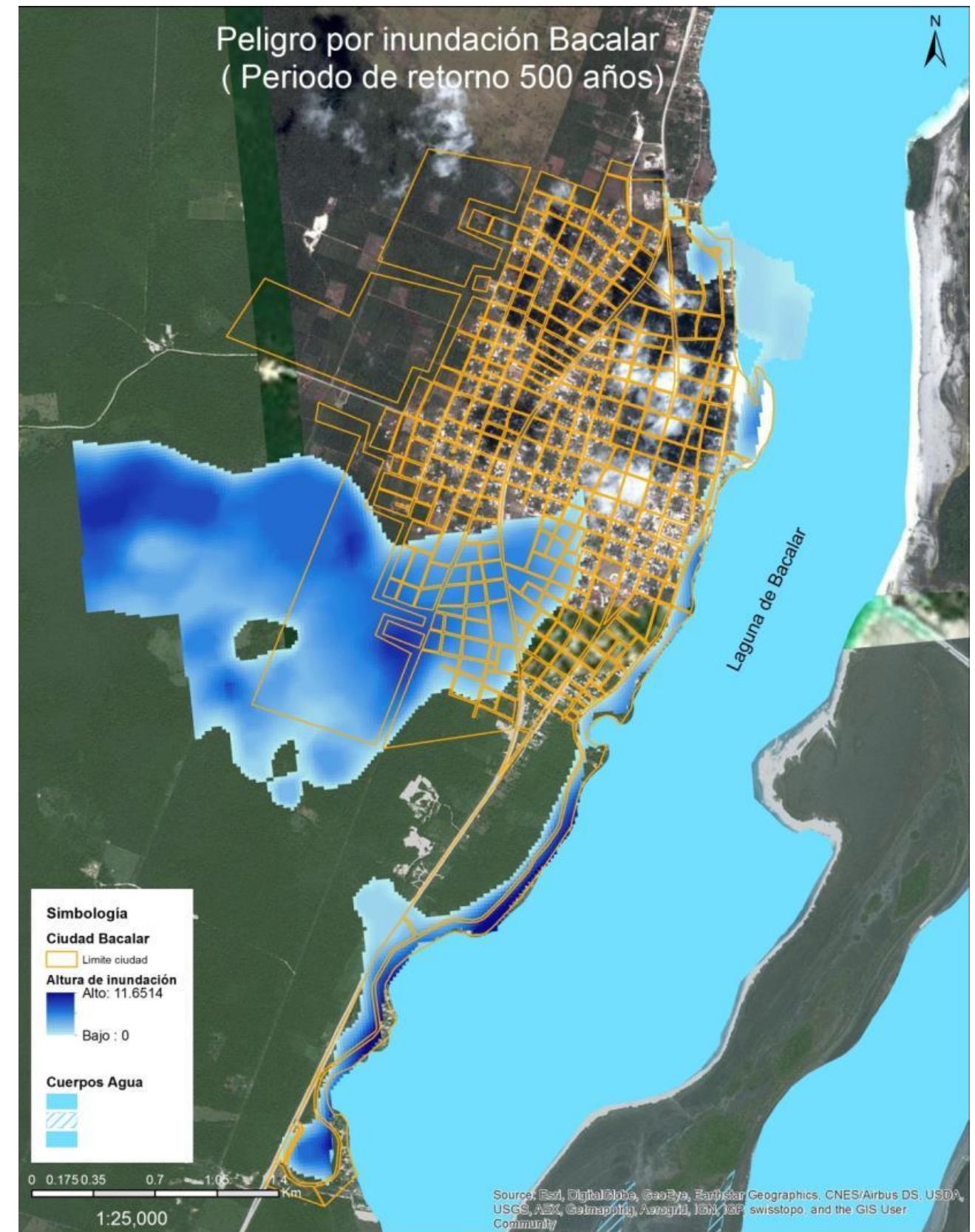


Figura 172.- Peligro por inundación Bacalar, periodo de retorno 500 años.

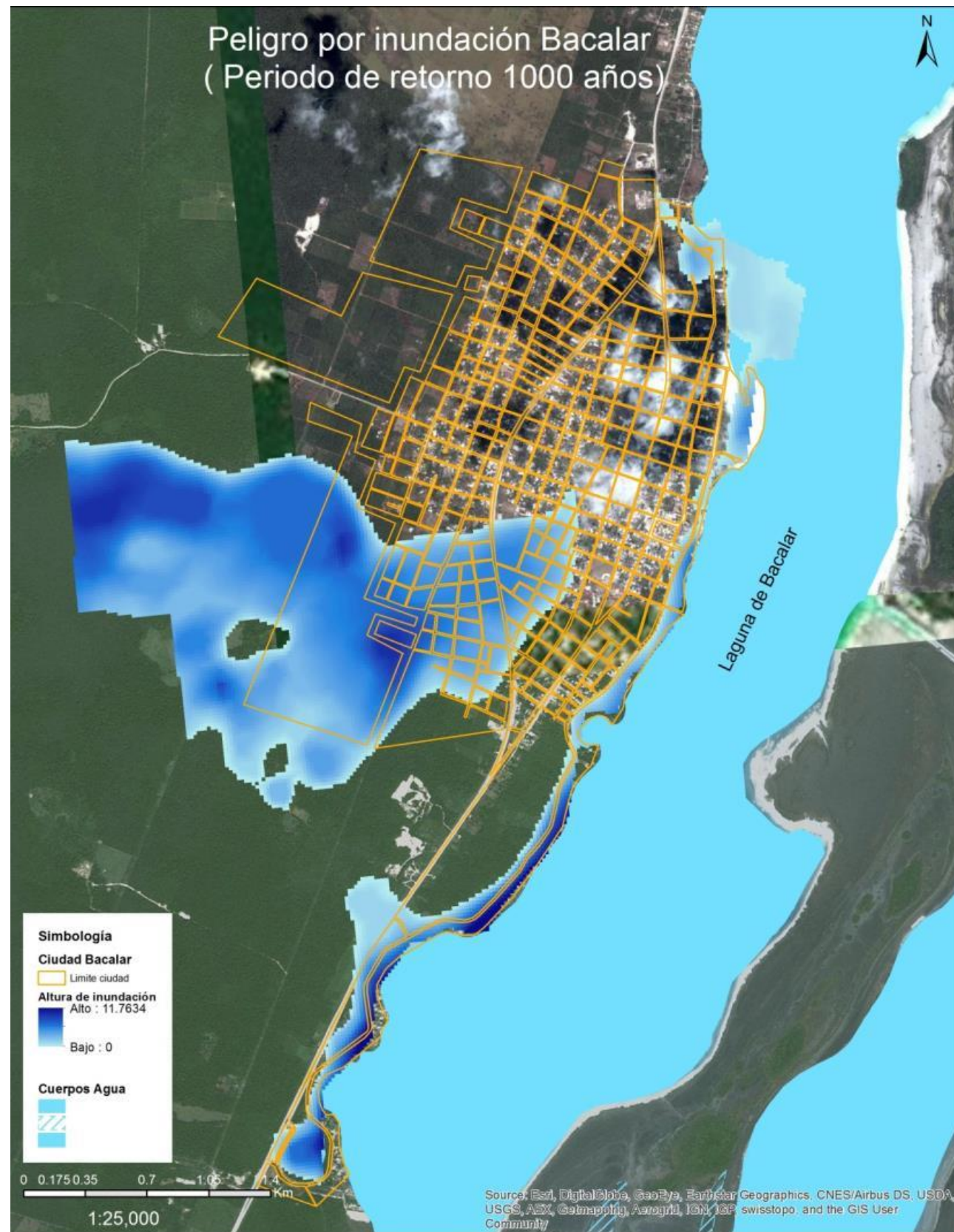


Figura 172.- Peligro por inundación Bacalar, periodo de retorno 1000 años.

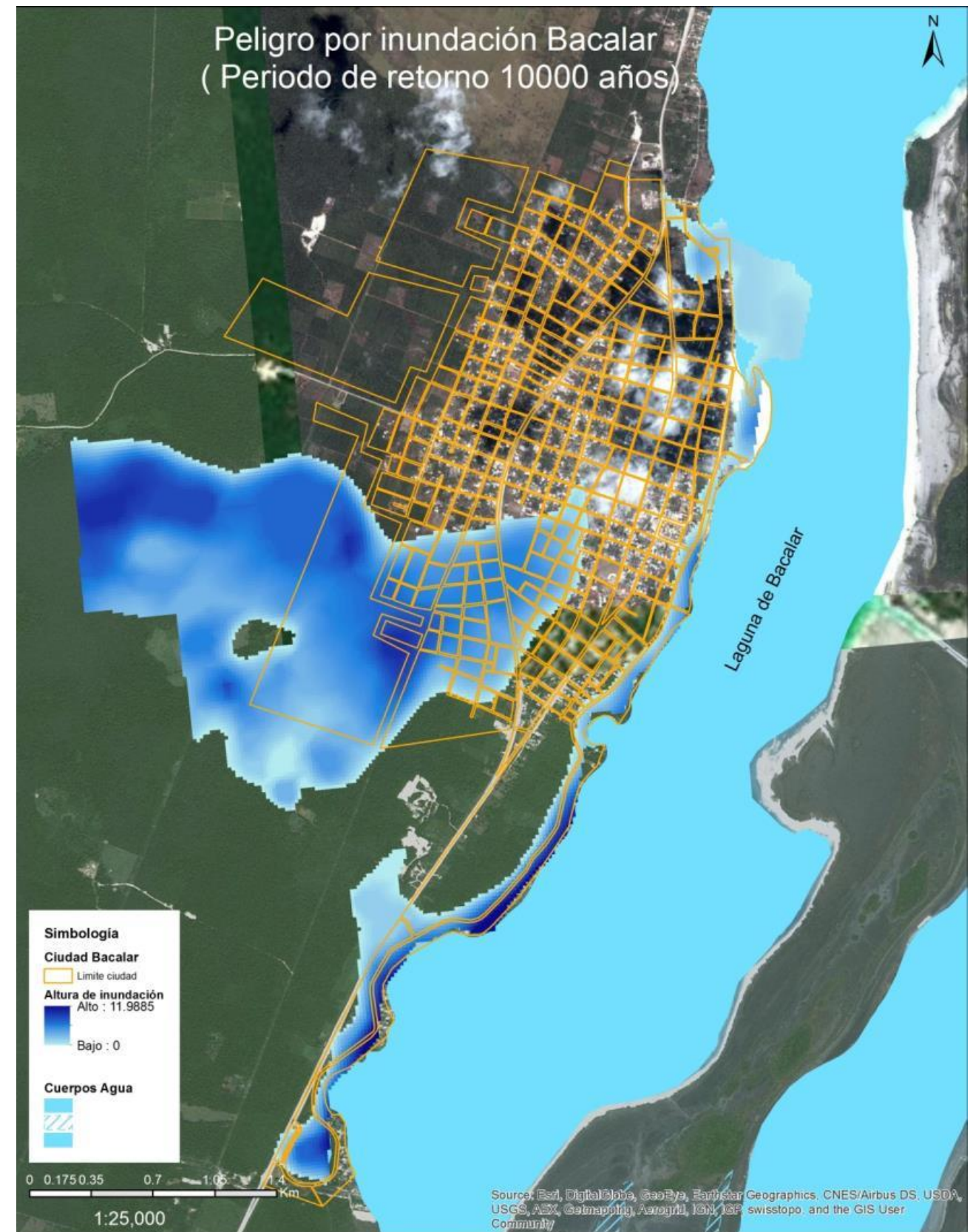


Figura 173.- Peligro por inundación Bacalar, periodo de retorno 10000 años.

Como se observa en los mapas de inundación de la ciudad de Bacalar, la inundación se presenta mayormente en la parte suroeste de la ciudad, y en la parte baja que pertenece a la costa. Las principales colonias que se ven afectadas por este tipo de fenómeno son las colonias Carlos Salinas de Gortari; Diego Rojas Zapata; y Mario Villanueva Madrid. La inundación afecta un total del 45% de la superficie de la ciudad, la inundación tiene un tiempo de retorno de 2 años y uno de 10,000 años, no varía mucho por lo tanto son las mismas colonias las afectadas.

Ciudad Cancún

Tabla 88. Datos hidrológicos, Cancún.

Área Cuenca	194.80 km ²	Longitud Cuenca	26.90 km
Numero de Escurrimiento	55 (adimensional)		
Tiempo de Retorno	Lluvia de Diseño	Caudal Calculado	
2 años	91 mm	14 m ³ /s	
5 años	127 mm	50 m ³ /s	
10 años	162 mm	100 m ³ /s	
20 años	201 mm	169 m ³ /s	
50 años	243 mm	255 m ³ /s	
100 años	272 mm	320 m ³ /s	
500 años	336 mm	475 m ³ /s	
1000 años	363 mm	544 m ³ /s	
10,000 años	424 mm	707 m ³ /s	

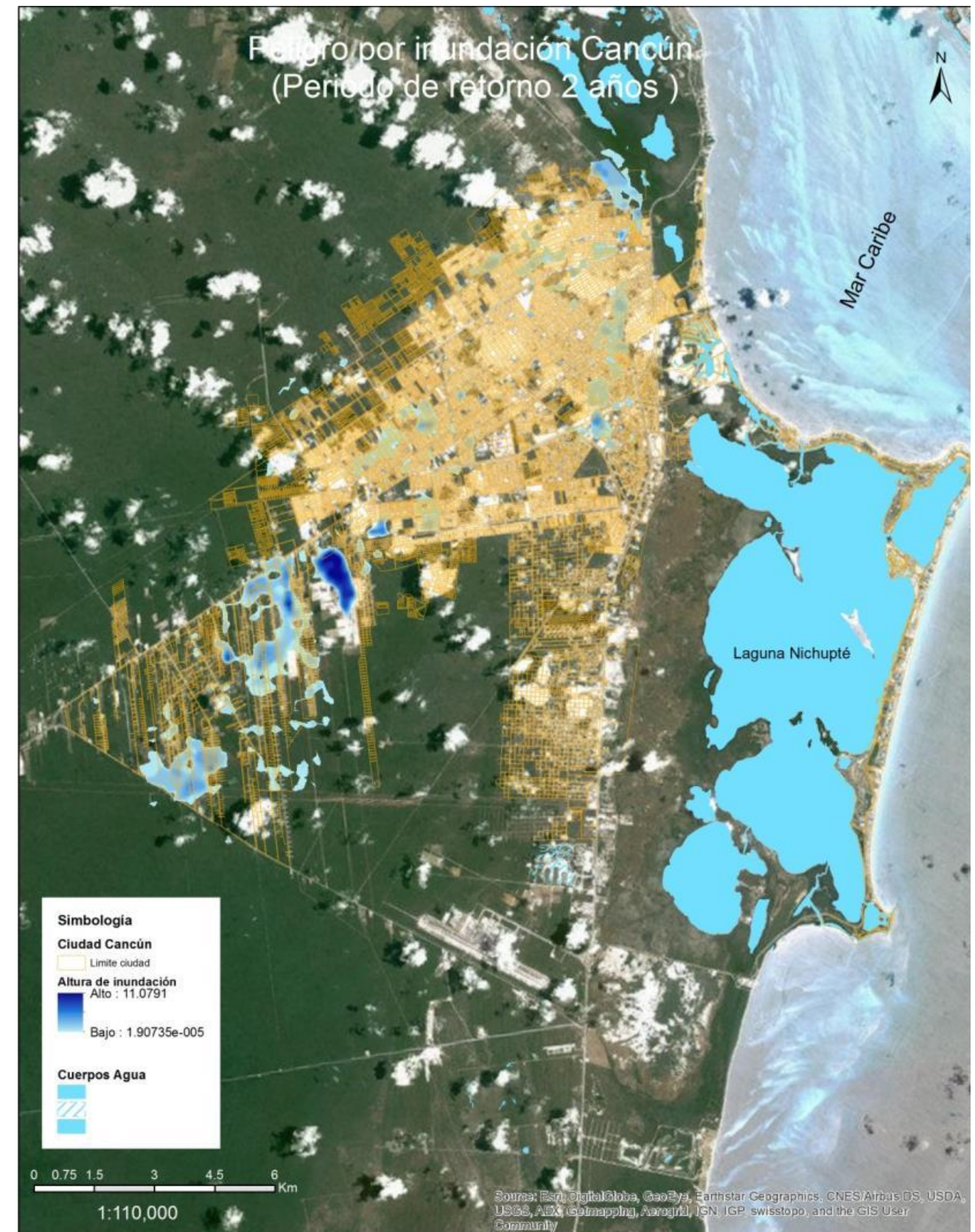


Figura 174.- Peligro por inundación Cancún, periodo de retorno 2 años.

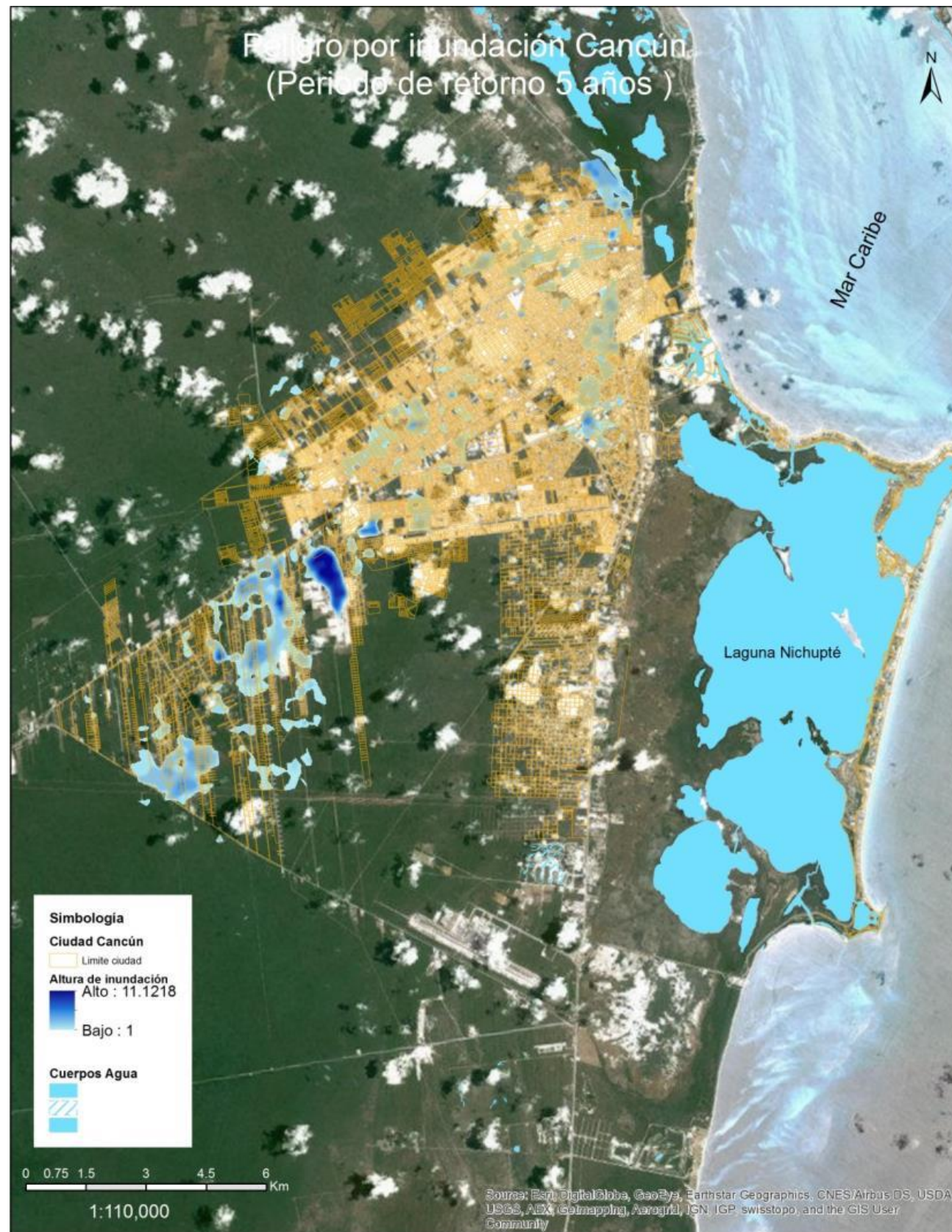


Figura 175.- Peligro por inundación Cancún, periodo de retorno 5 años.

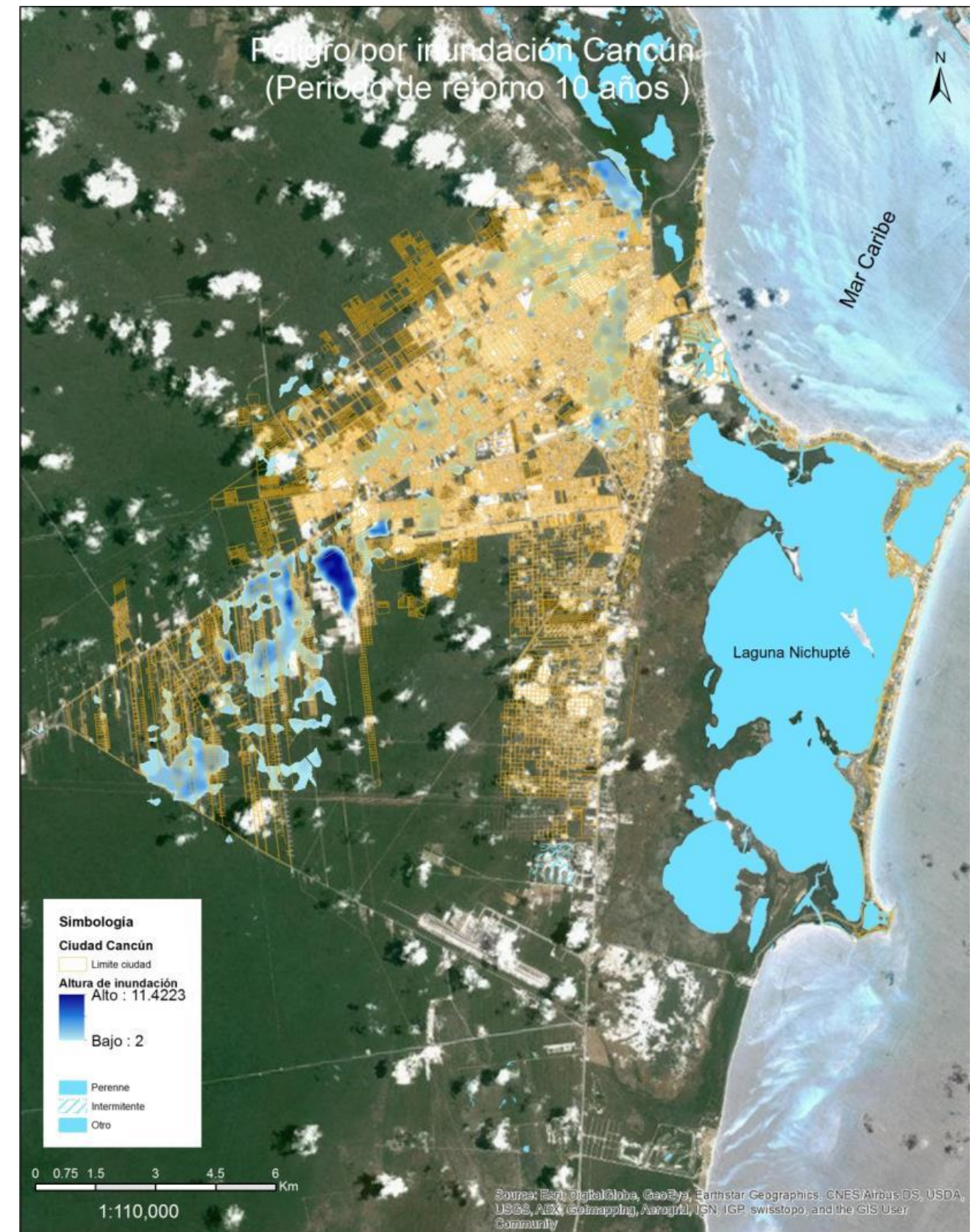


Figura 176.- Peligro por inundación Cancún, periodo de retorno 10 años.

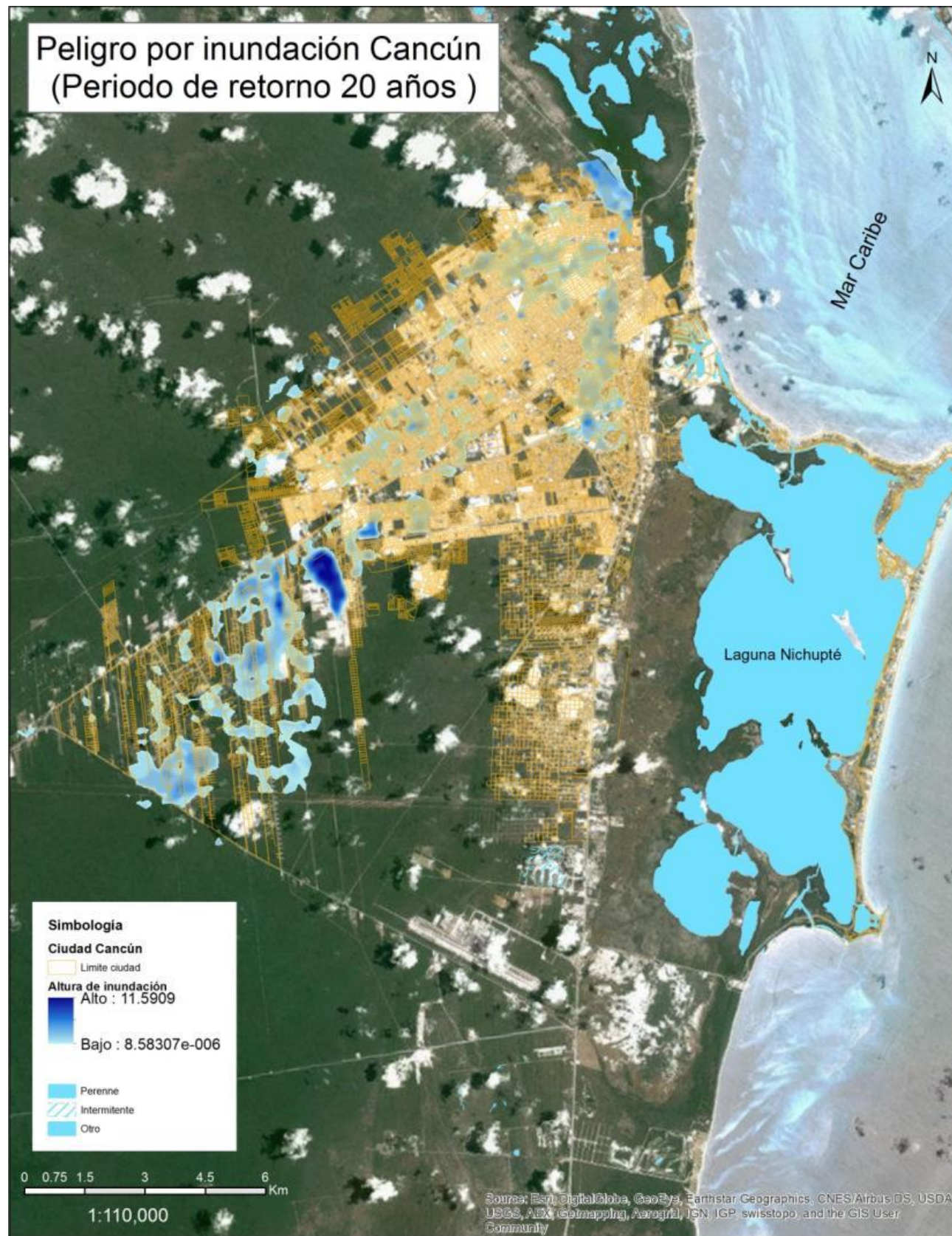


Figura 177.- Peligro por inundación Cancún, periodo de retorno 20 años.

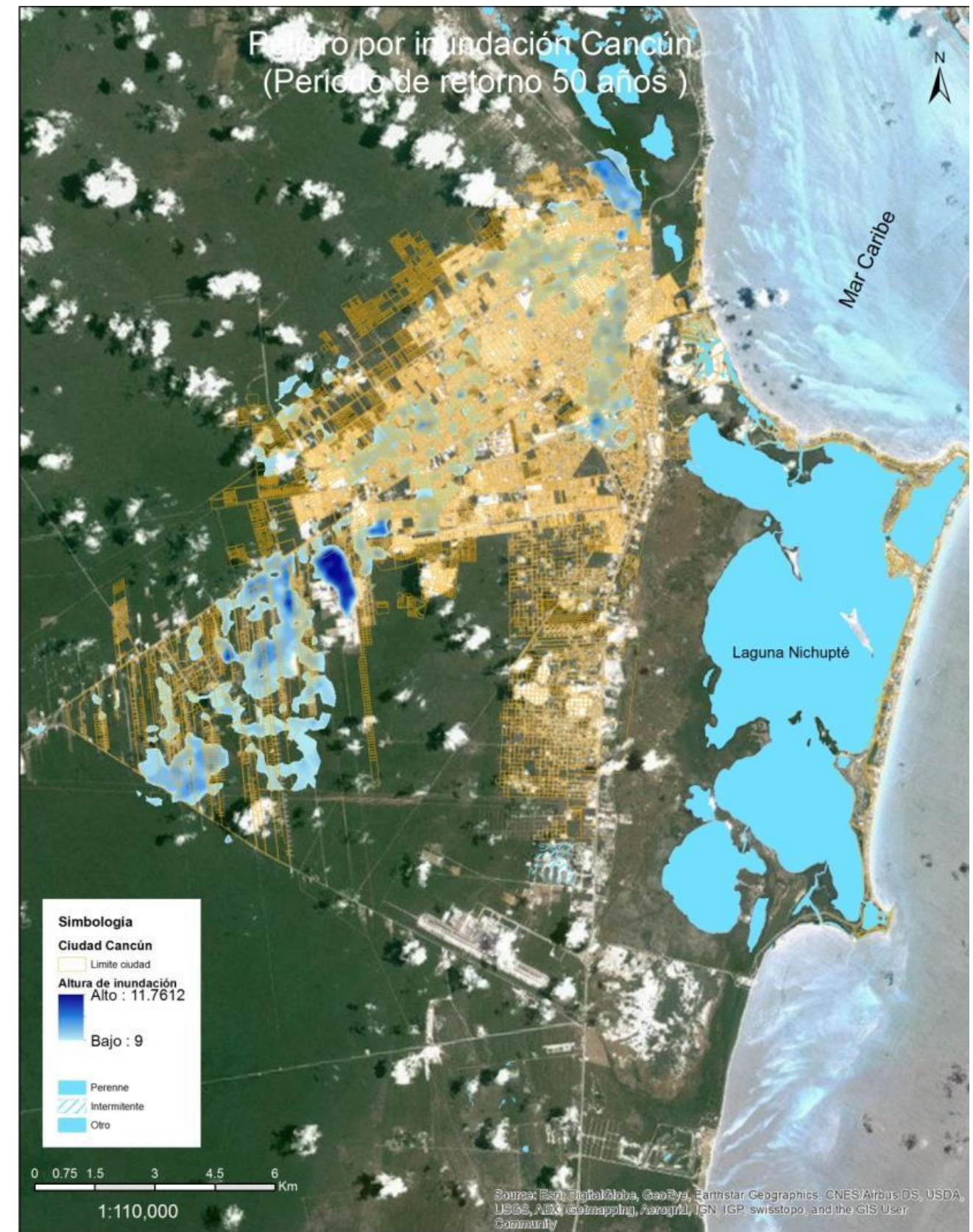


Figura 178.- Peligro por inundación Cancún, periodo de retorno 50 años.

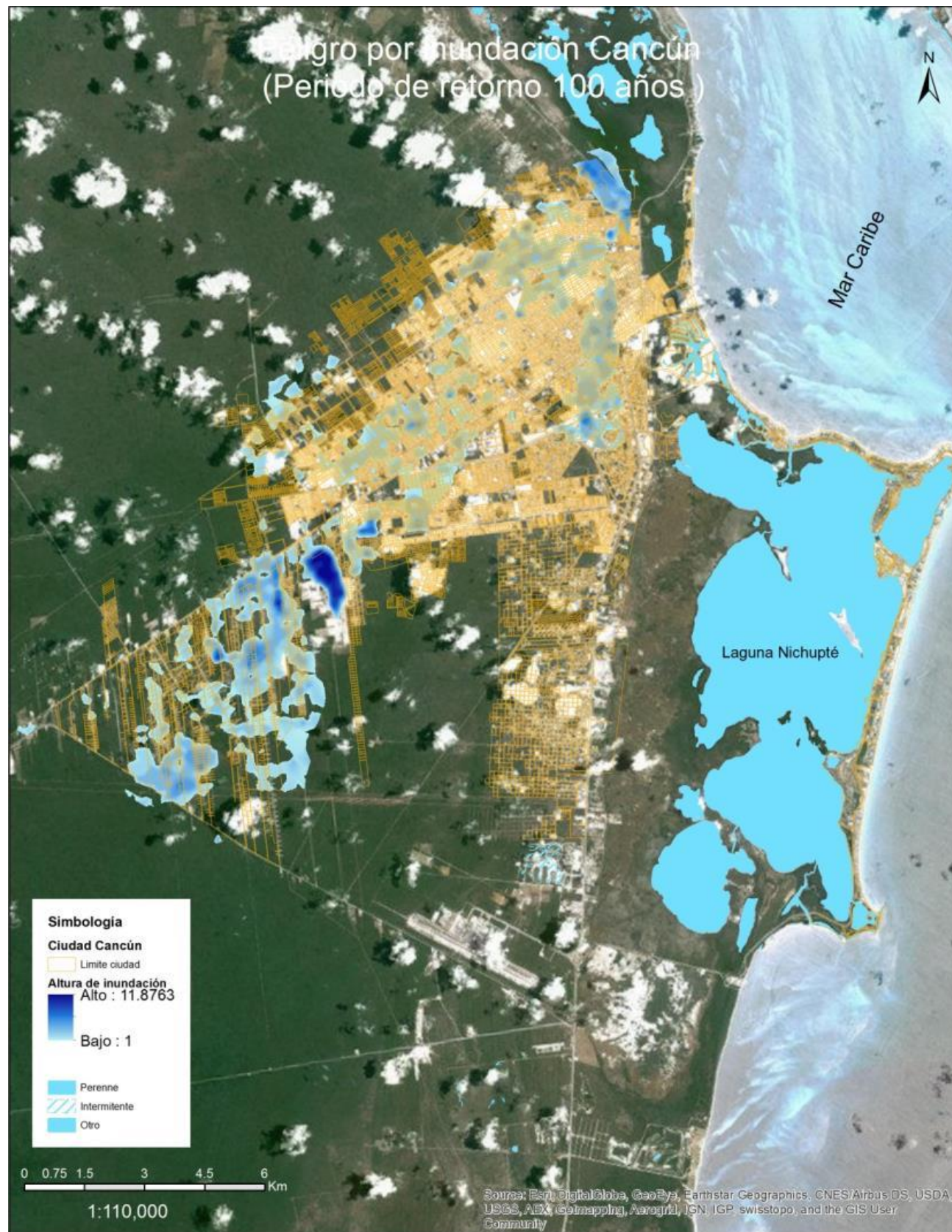


Figura 179.- Peligro por inundación Cancún, periodo de retorno 100 años.

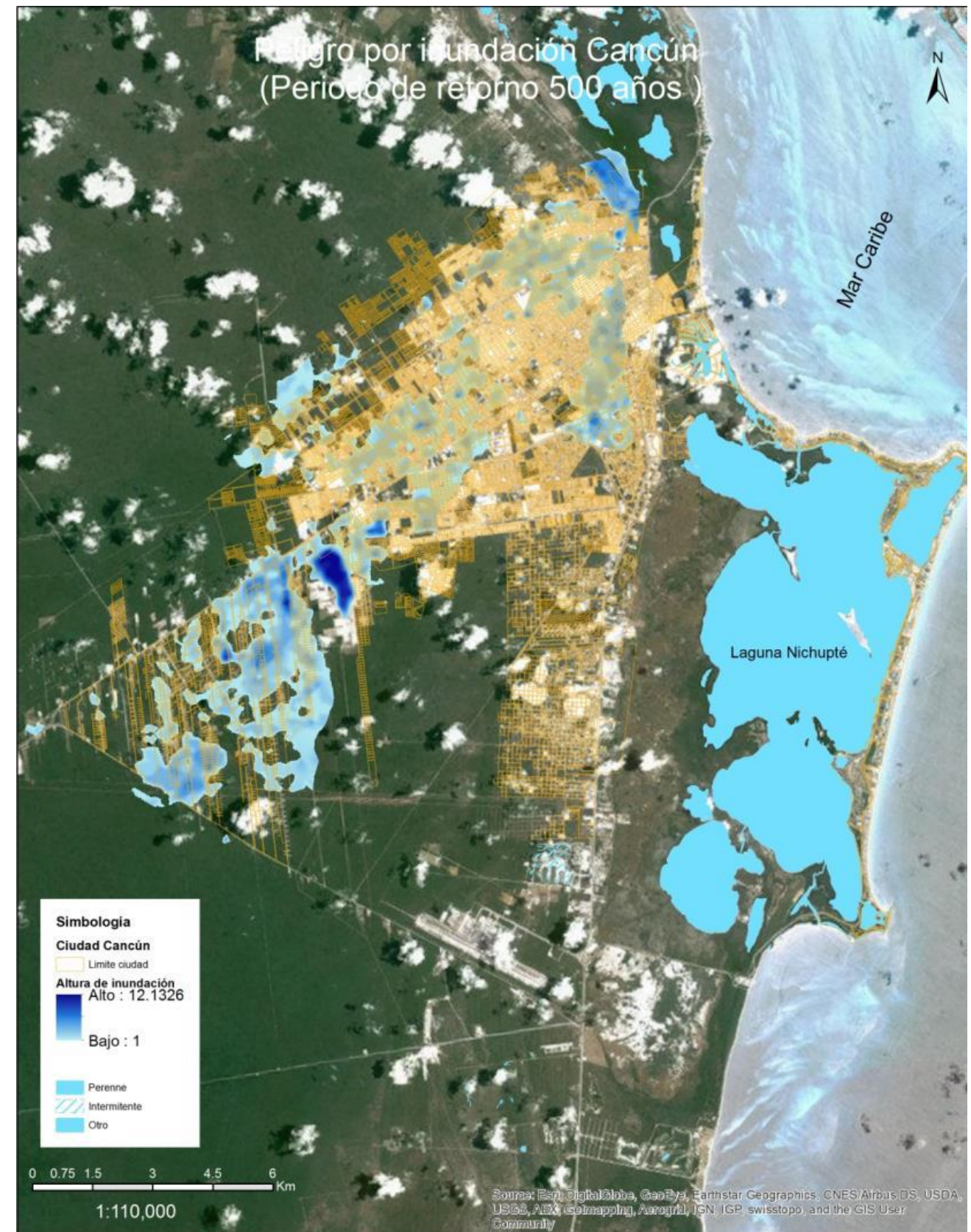


Figura 180.- Peligro por inundación Cancún, periodo de retorno 500 años.

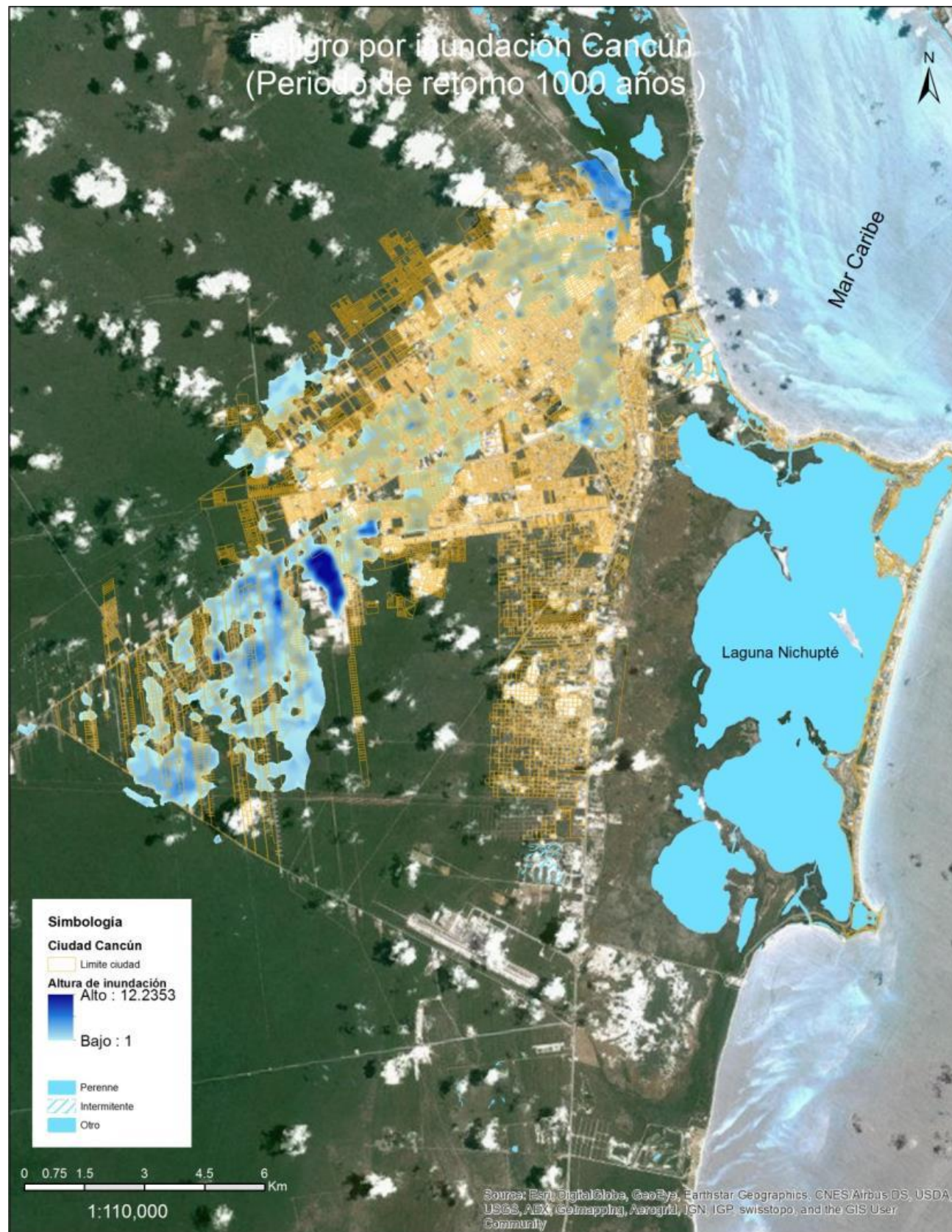


Figura 181.- Peligro por inundación Cancún, periodo de retorno 1000 años.

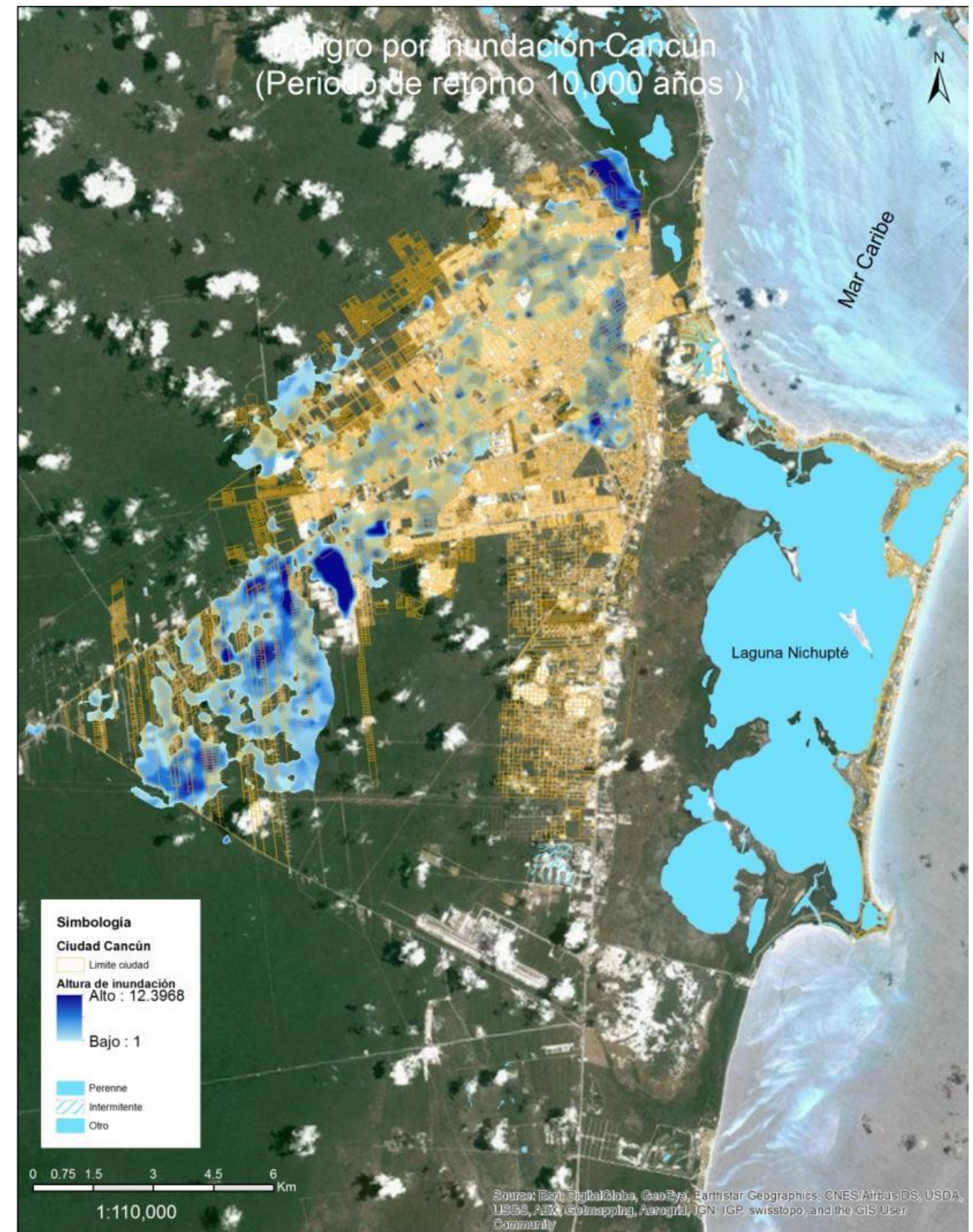


Figura 183.- Peligro por inundación Cancún, periodo de retorno 10000 años.

Como se observa en los mapas de inundación de la ciudad de Cancún, las zonas se presentan muy distribuidas entre un tiempo de retorno de 2 años a 10,000 años varía considerablemente independientemente de la altura de inundación.

Esto se entiende que, para cada tiempo de retorno, aparte de aumentar la altura de inundación y el área, igual aparecen nuevas zonas de inundación, como se pueden observar en los mapas.

Las principales zonas de afectación en la ciudad de Cancún corresponden a los siguientes;

- Regiones 103, 105, 106, 223, 228, 517.
- Fraccionamientos Ana Lucia 3, Del Sol y Asturias, Villas del Caribe, Izamal, Vista Hermosa, Isla Mujeres, Nuevo Amanecer, Paseo de las Palmas.
- Colonias Bethel, El Paraíso, Nuevo pedregal, Valle Verde.
- Super manzanas 20, 24, 22, 26,63, 64, 65, 66, 72, 75, 93, 94, 96, 97, 100, 101, 102, 203, 209, 219, 220, 227, 239.

Ciudad Chetumal

Tabla 89. Datos hidrológicos, Chetumal.

Área Cuenca	102.85 km ²	Longitud Cuenca	5.35 km
Numero de Escurrimiento	70 (adimensional)		
Tiempo de Retorno	Lluvia de Diseño	Caudal Calculado	
2 años	118 mm	16 m ³ /s	
5 años	164 mm	119 m ³ /s	
10 años	206 mm	280 m ³ /s	
20 años	250 mm	502 m ³ /s	
50 años	299 mm	802 m ³ /s	
100 años	334 mm	104 m ³ /s	
500 años	411 mm	1637 m ³ /s	
1000 años	443 mm	1906 m ³ /s	
10,000 años	541 mm	2787 m ³ /s	

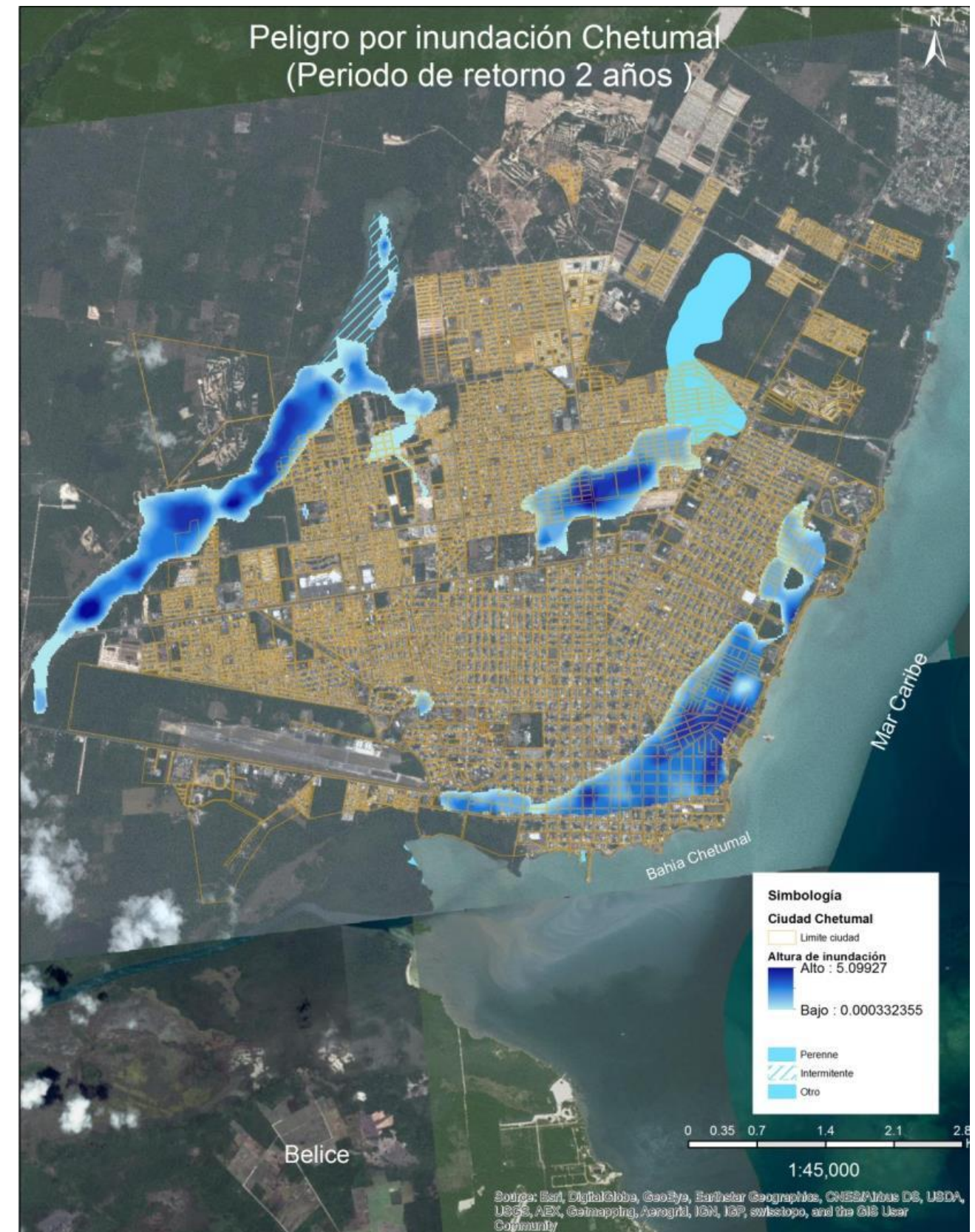


Figura 184.- Peligro por inundación Chetumal, periodo de retorno 2 años.

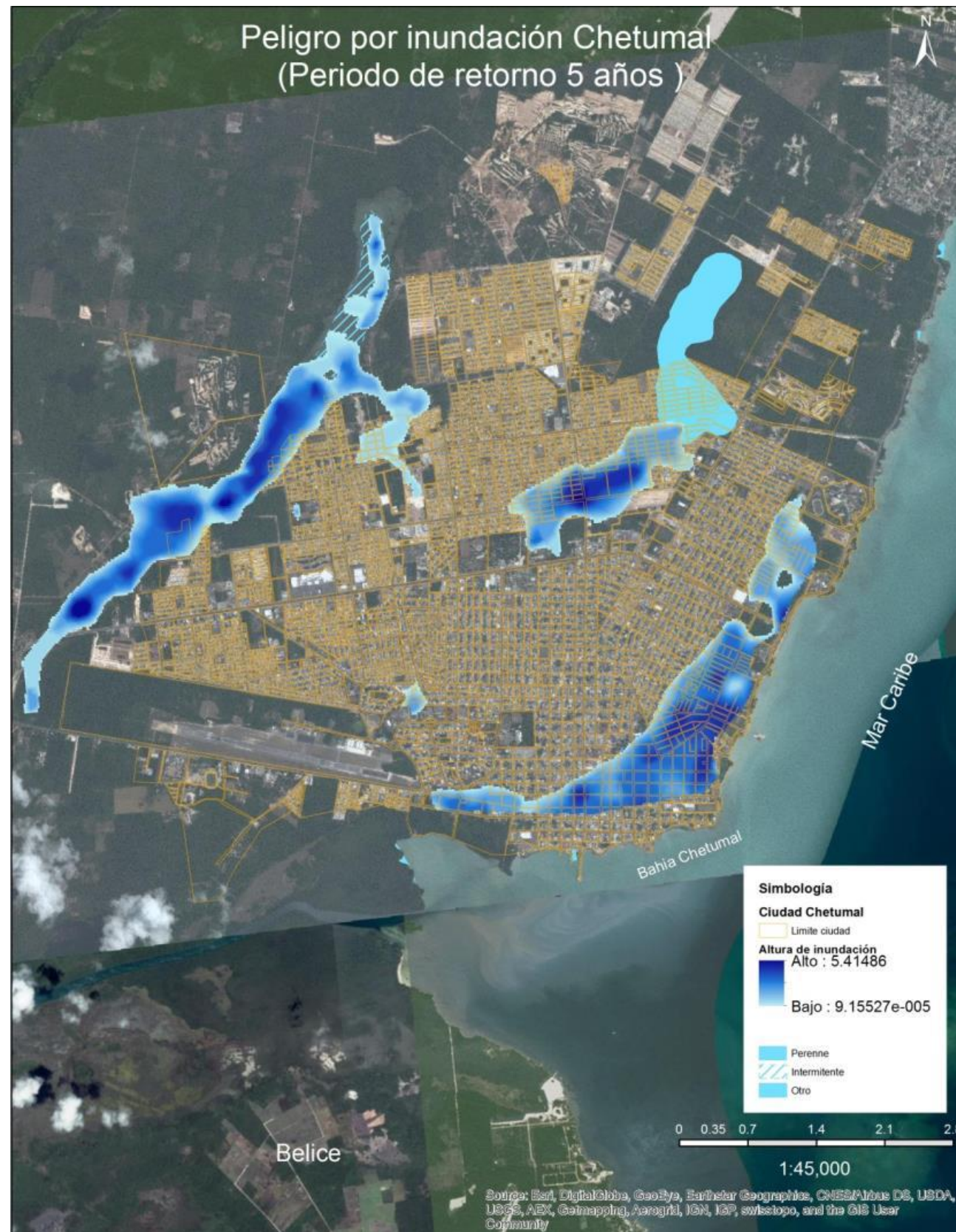


Figura 185.- Peligro por inundación Chetumal, periodo de retorno 5 años.

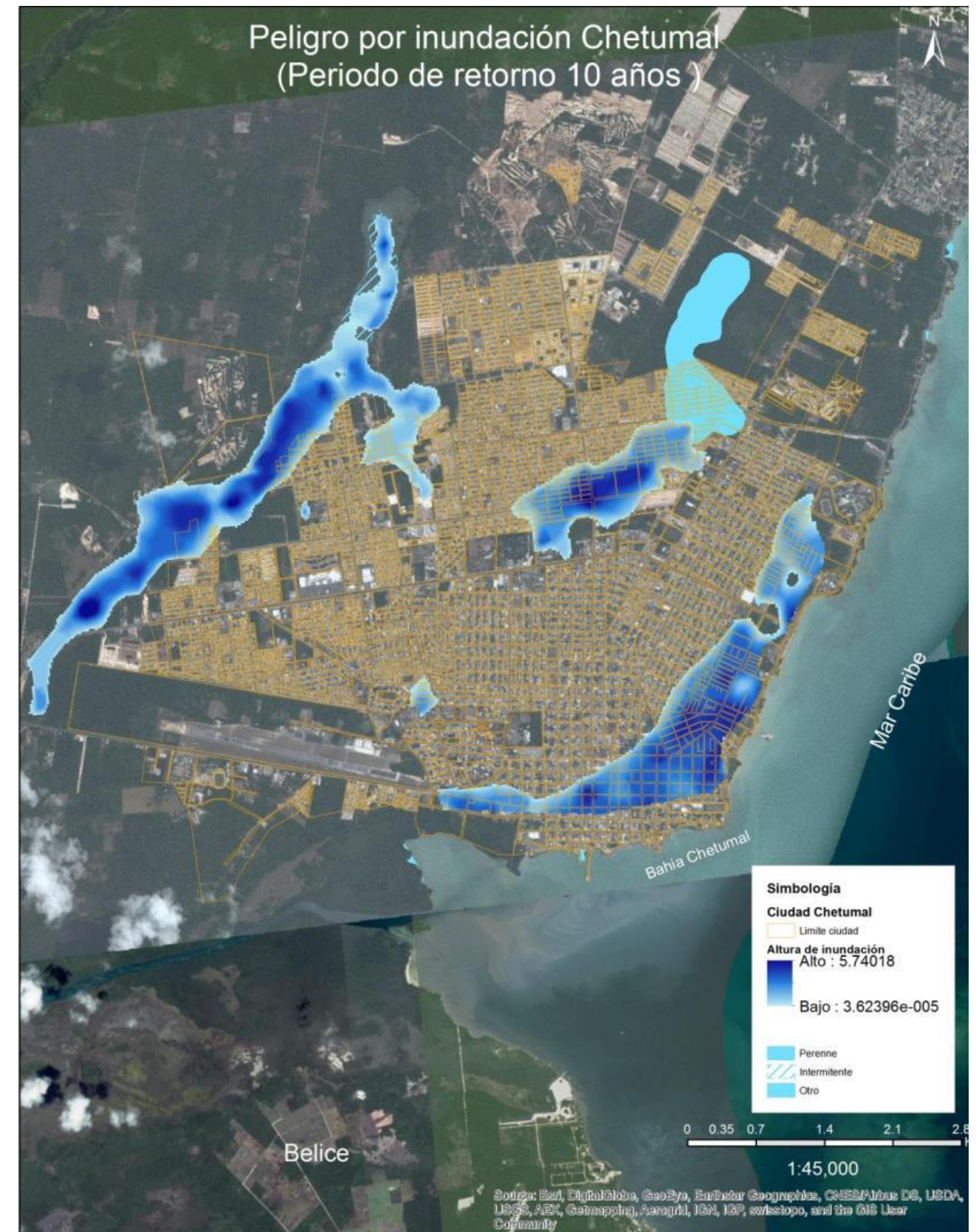


Figura 186.- Peligro por inundación Chetumal, periodo de retorno 10 años.

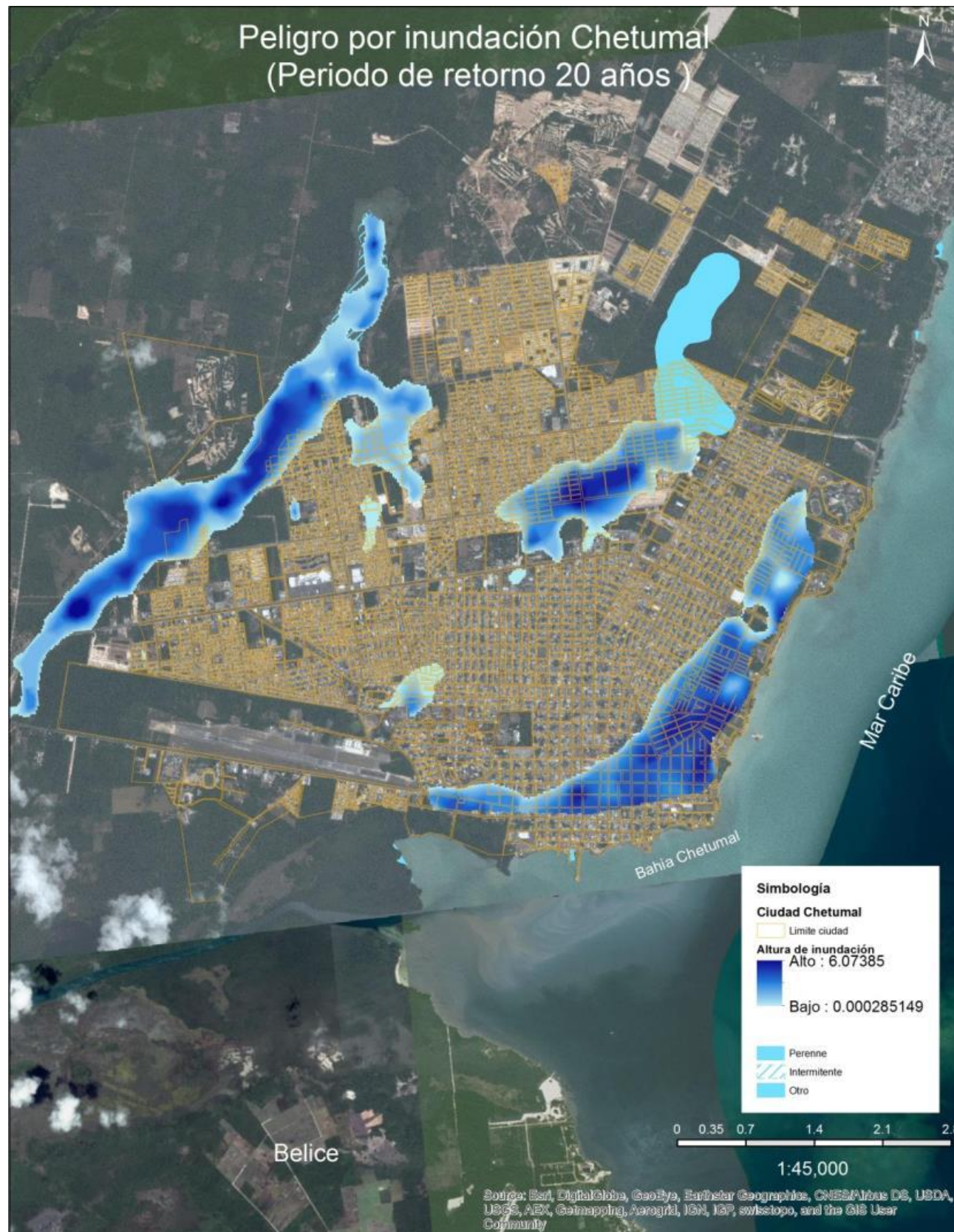


Figura 187.- Peligro por inundación Chetumal, periodo de retorno 20 años.

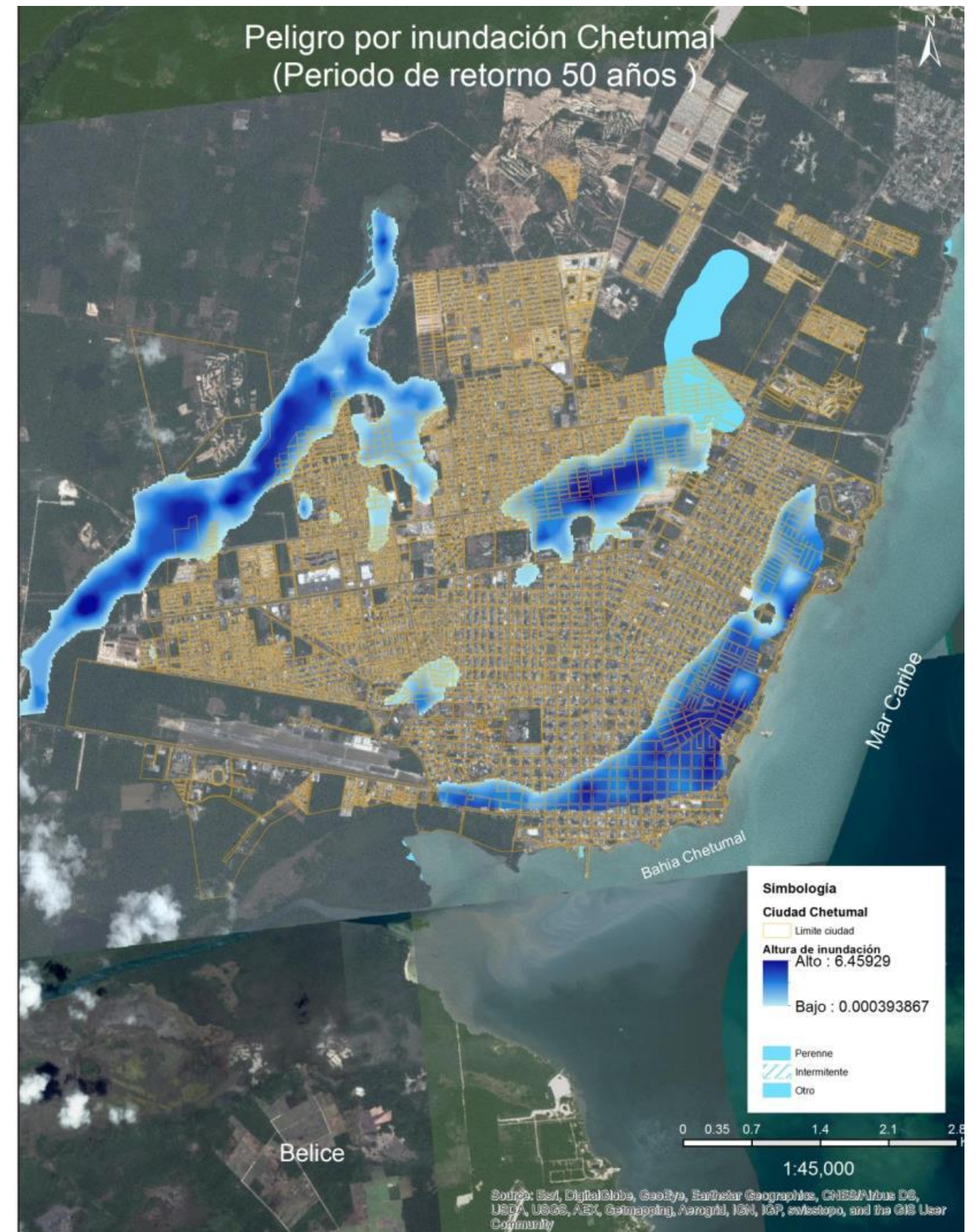


Figura 188.- Peligro por inundación Chetumal, periodo de retorno 50 años.

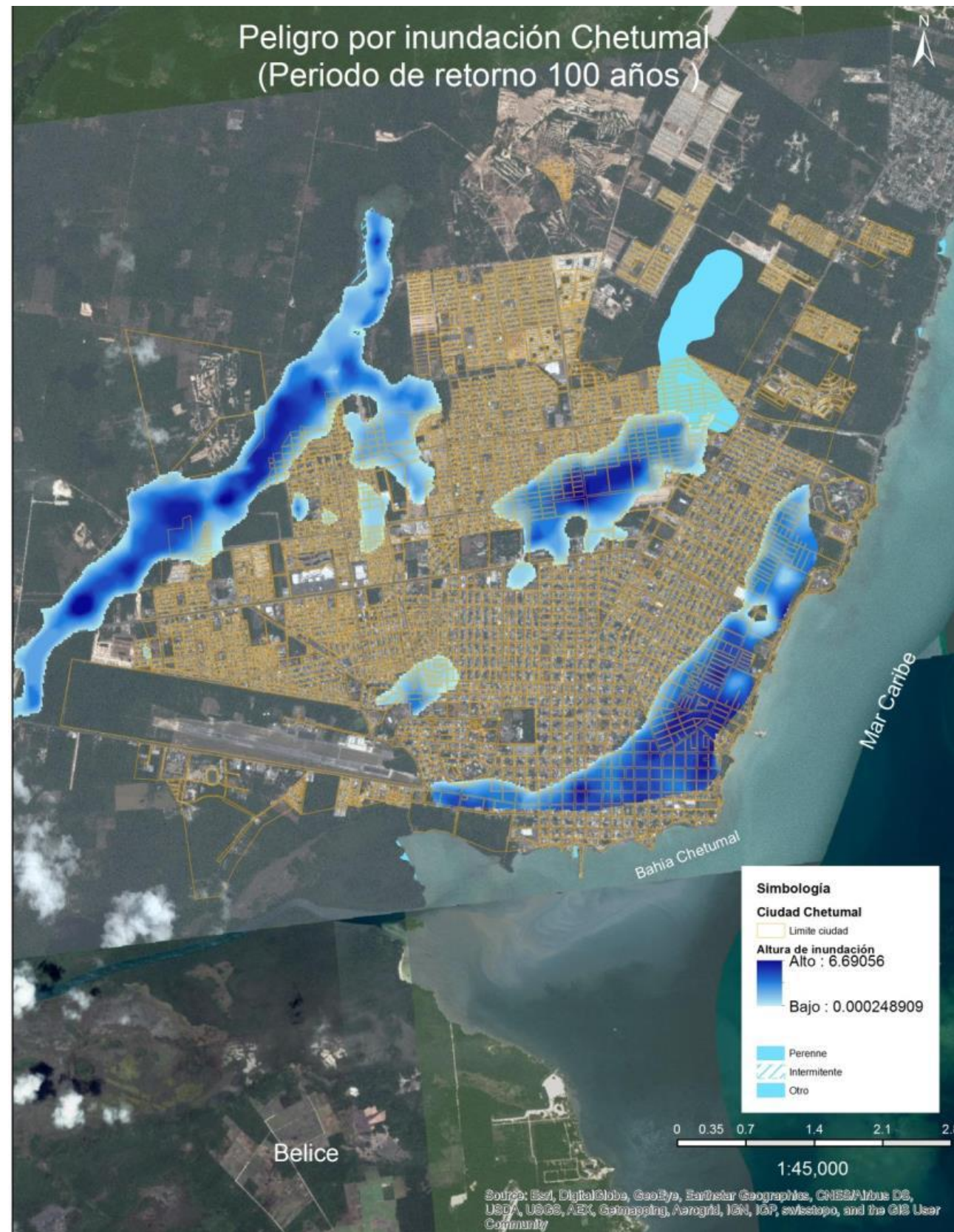


Figura 189.- Peligro por inundación Chetumal, periodo de retorno 100 años.

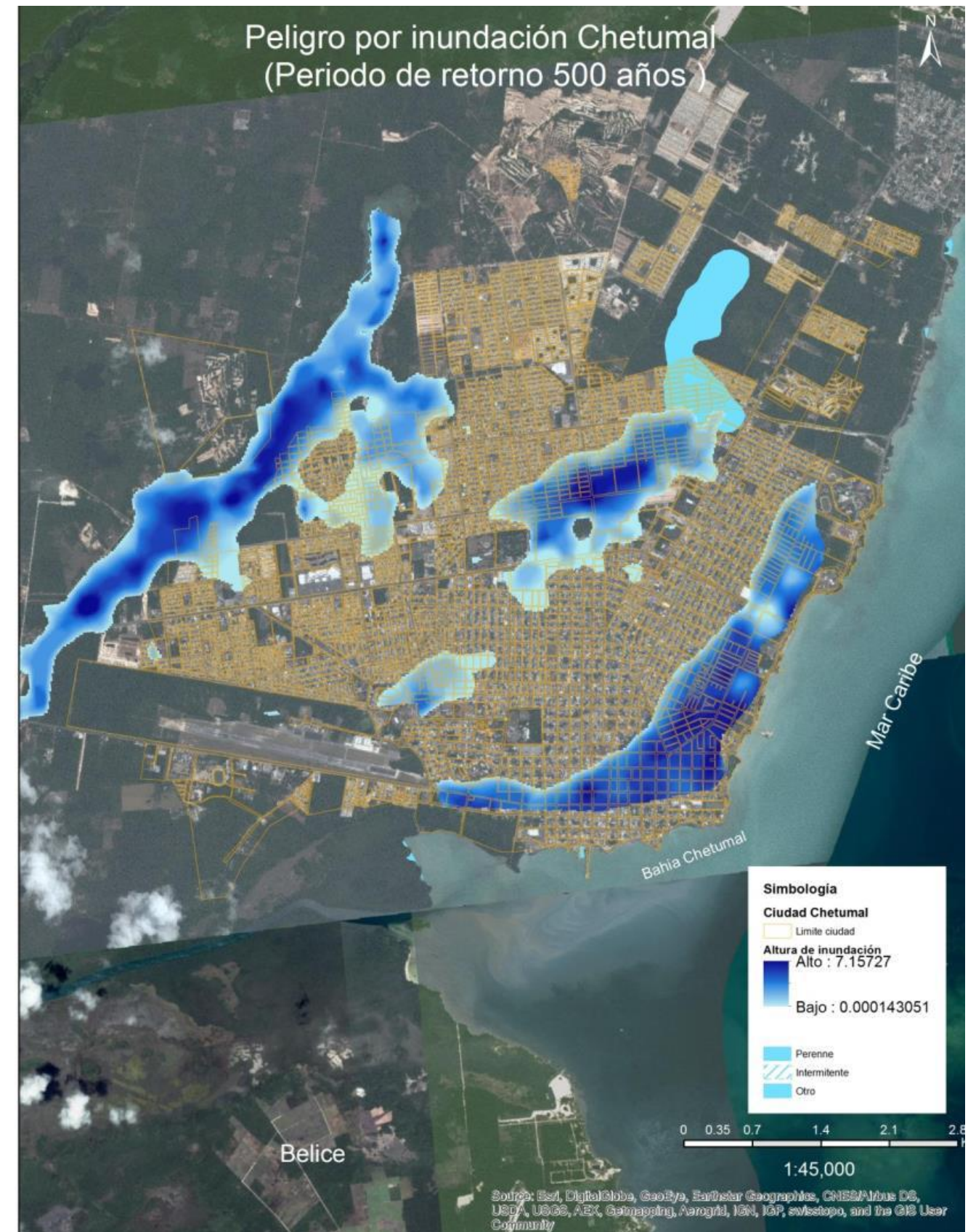


Figura 190.- Peligro por inundación Chetumal, periodo de retorno 500 años.

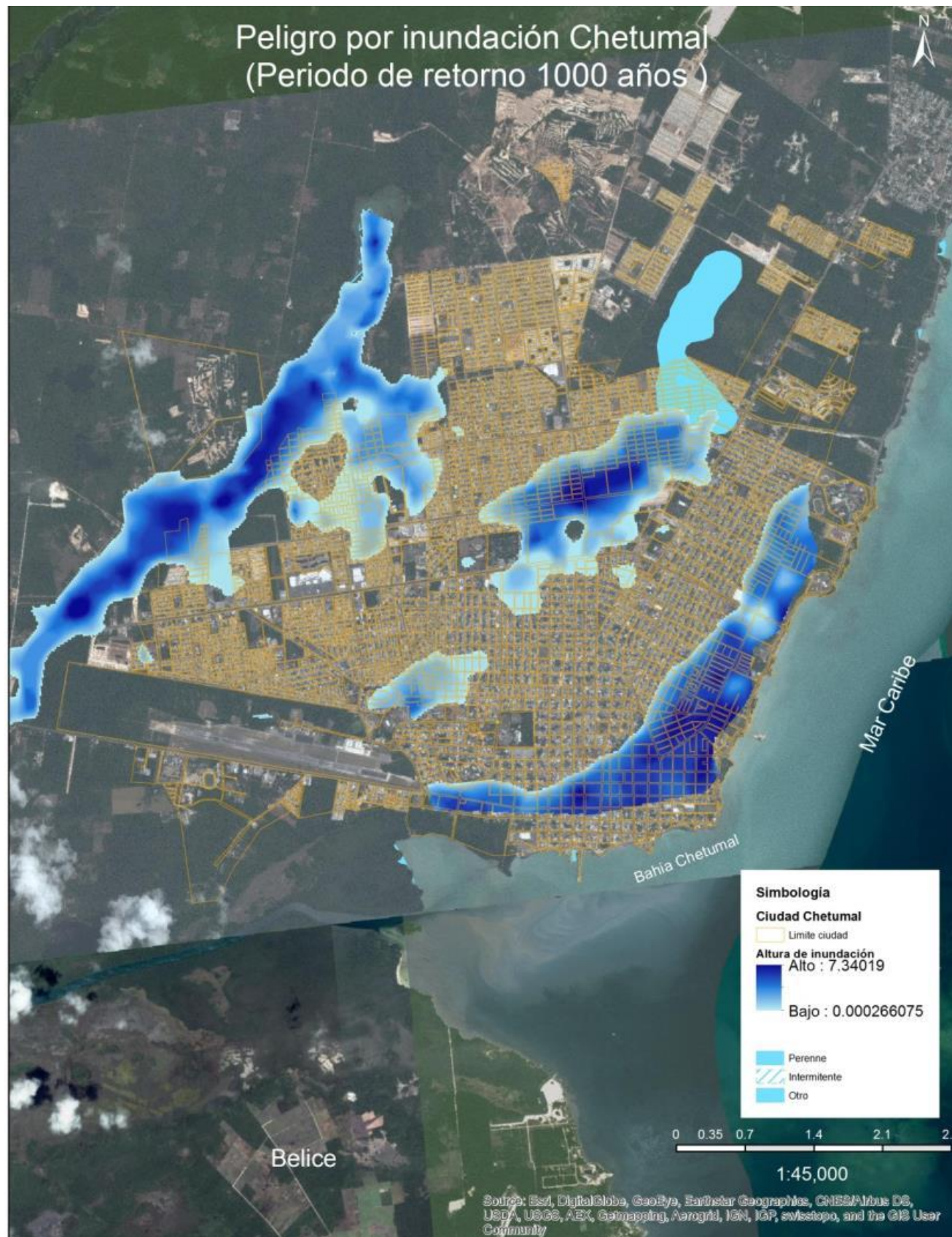


Figura 191.- Peligro por inundación Chetumal, periodo de retorno 1000 años.

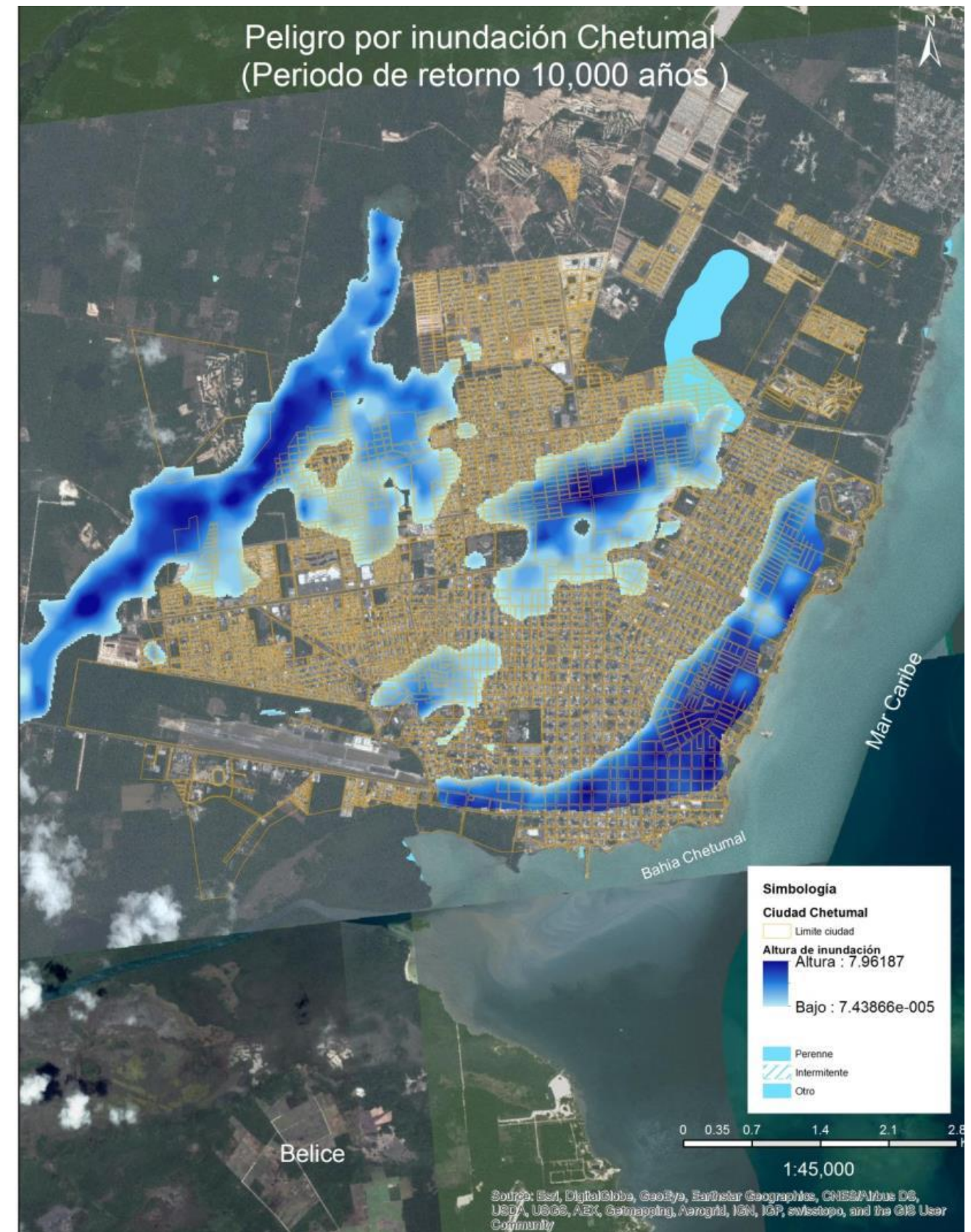


Figura 192.- Peligro por inundación Chetumal, periodo de retorno 10000 años.

Como se observa en los mapas de inundación de la ciudad de Chetumal, las zonas de inundación se presentan en la parte este, oeste y centro de la ciudad, entre un tiempo de retorno de 2 años a 10,000 años varía considerablemente independientemente de la altura de inundación.

Con el aumento de los tiempos de retornos, las zonas considerables que muestran un cambio son las zonas del este y centro de la ciudad, por lo cual las zonas afectadas en la inundación son:

- Colonia Centro, Barrio Bravo, 5 de abril, Fovissste 5ta etapa, Los Almendros, Andres Quintana Roo Poligono 2, Benito Juarez, Campestre, Sahop, Solidaridad, Proterritorio, Magisterio, Payo Obispo, Los Monos, Lagunitas.
- Fraccionamientos Bahía, Del Mar, Residencial Del Sol, Framboyanes, Guadalupe Victoria, Milenio.

Ciudad Cozumel.

Tabla 90. Datos hidrológicos, Cozumel

Área Cuenca	77.68 km ²	Longitud Cuenca	9.74 km
Numero de Escurrimiento	60 (adimensional)		
Tiempo de Retorno	Lluvia de Diseño	Caudal Calculado	
2 años	86 mm	93 m ³ /s	
5 años	116 mm	160 m ³ /s	
10 años	144 mm	229 m ³ /s	
20 años	182 mm	328 m ³ /s	
50 años	230 mm	459 m ³ /s	
100 años	261 mm	546 m ³ /s	
500 años	329 mm	740 m ³ /s	
1000 años	358 mm	824 m ³ /s	
10,000 años	453 mm	1101 m ³ /s	

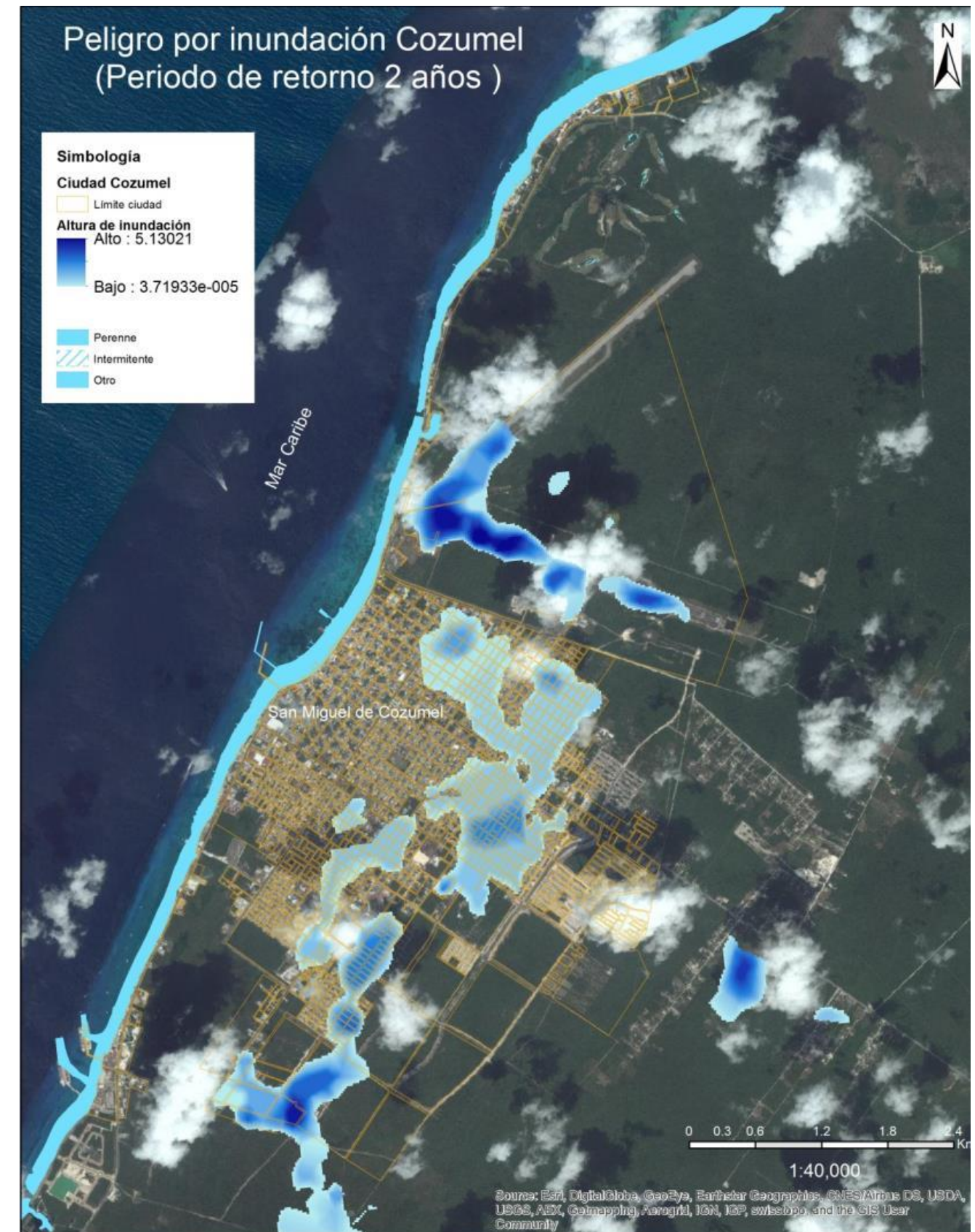


Figura 193.- Peligro por inundación Cozumel, periodo de retorno 2 años.

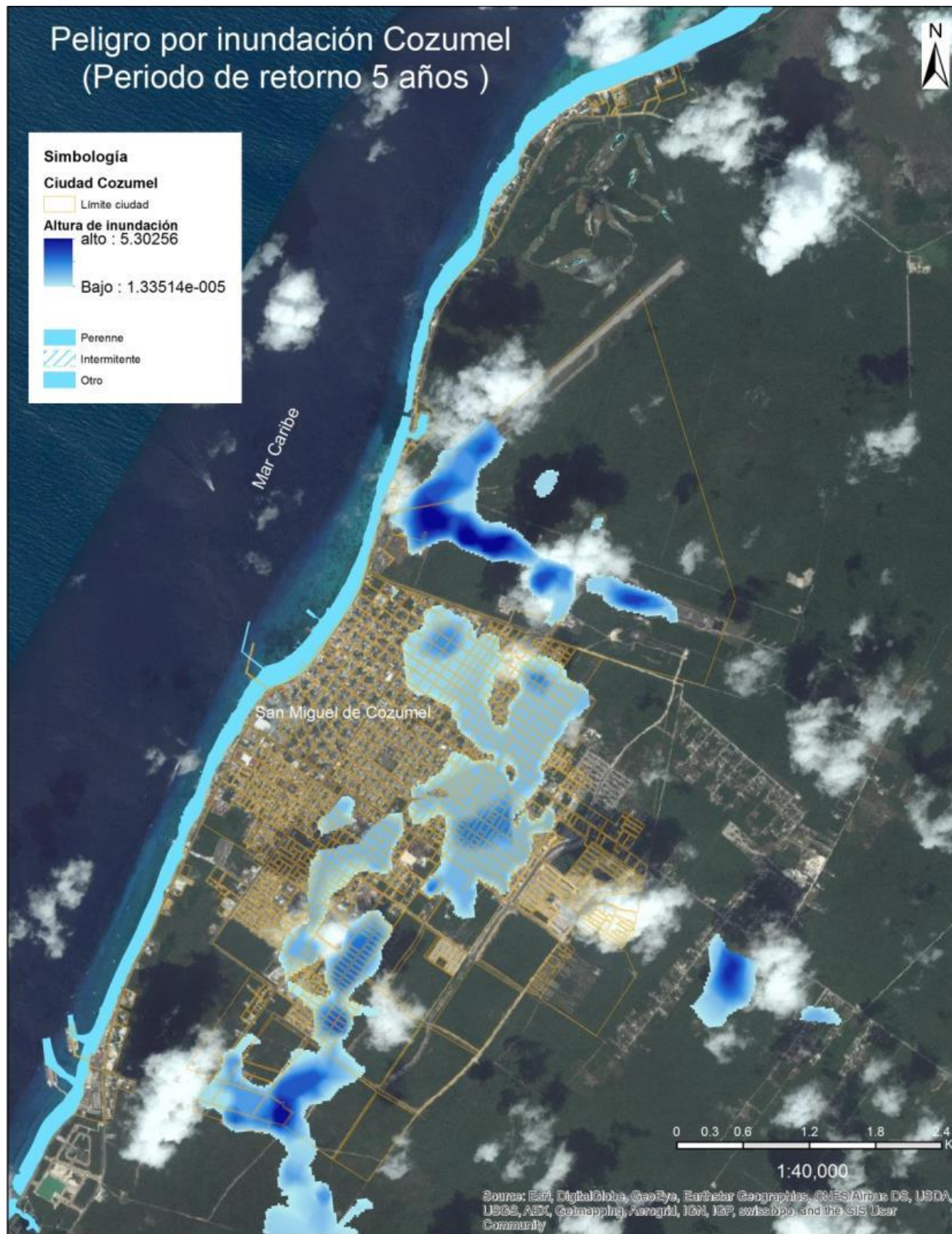


Figura 194.- Peligro por inundación Cozumel, periodo de retorno 5 años.

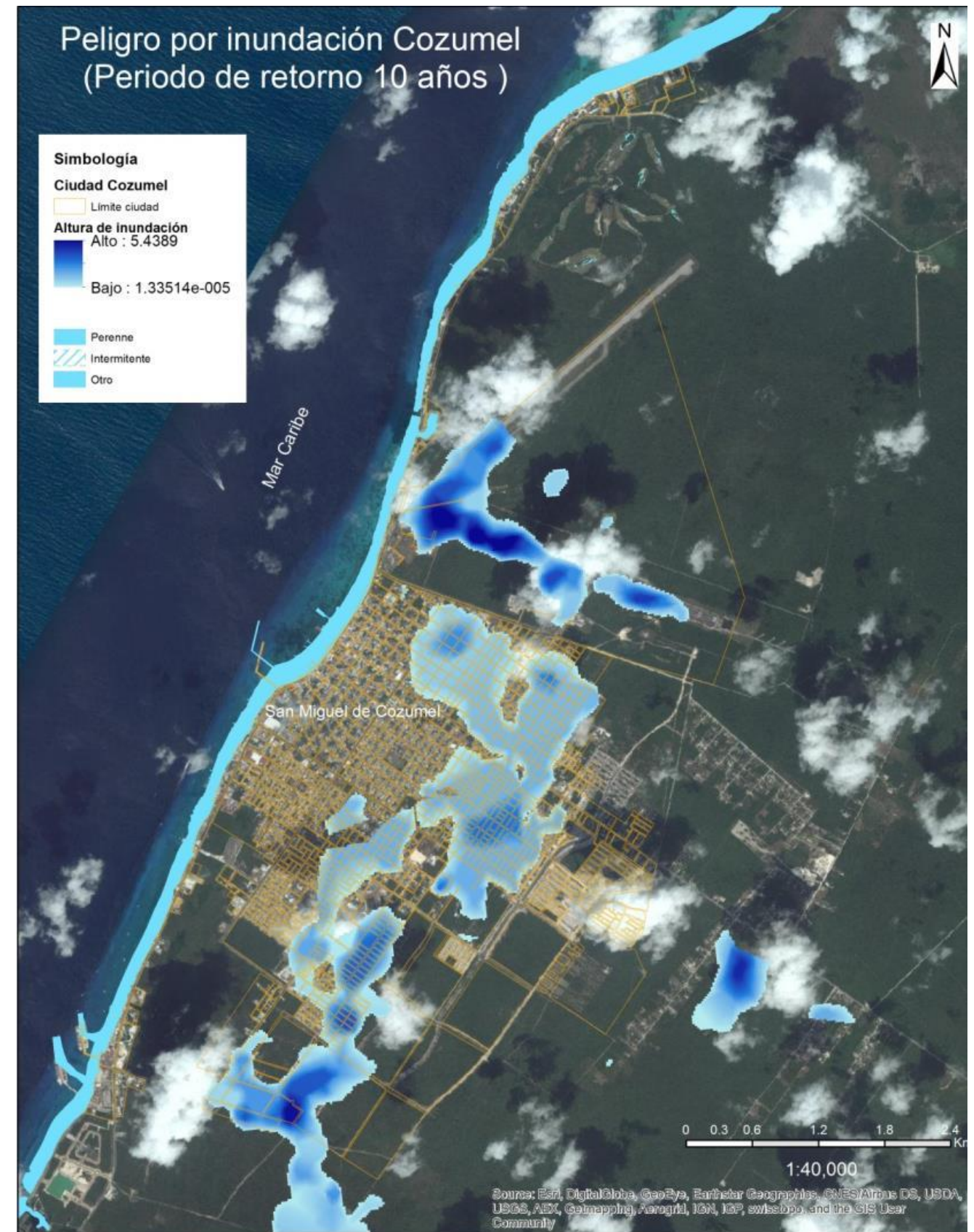


Figura 195.- Peligro por inundación Cozumel, periodo de retorno 10 años.

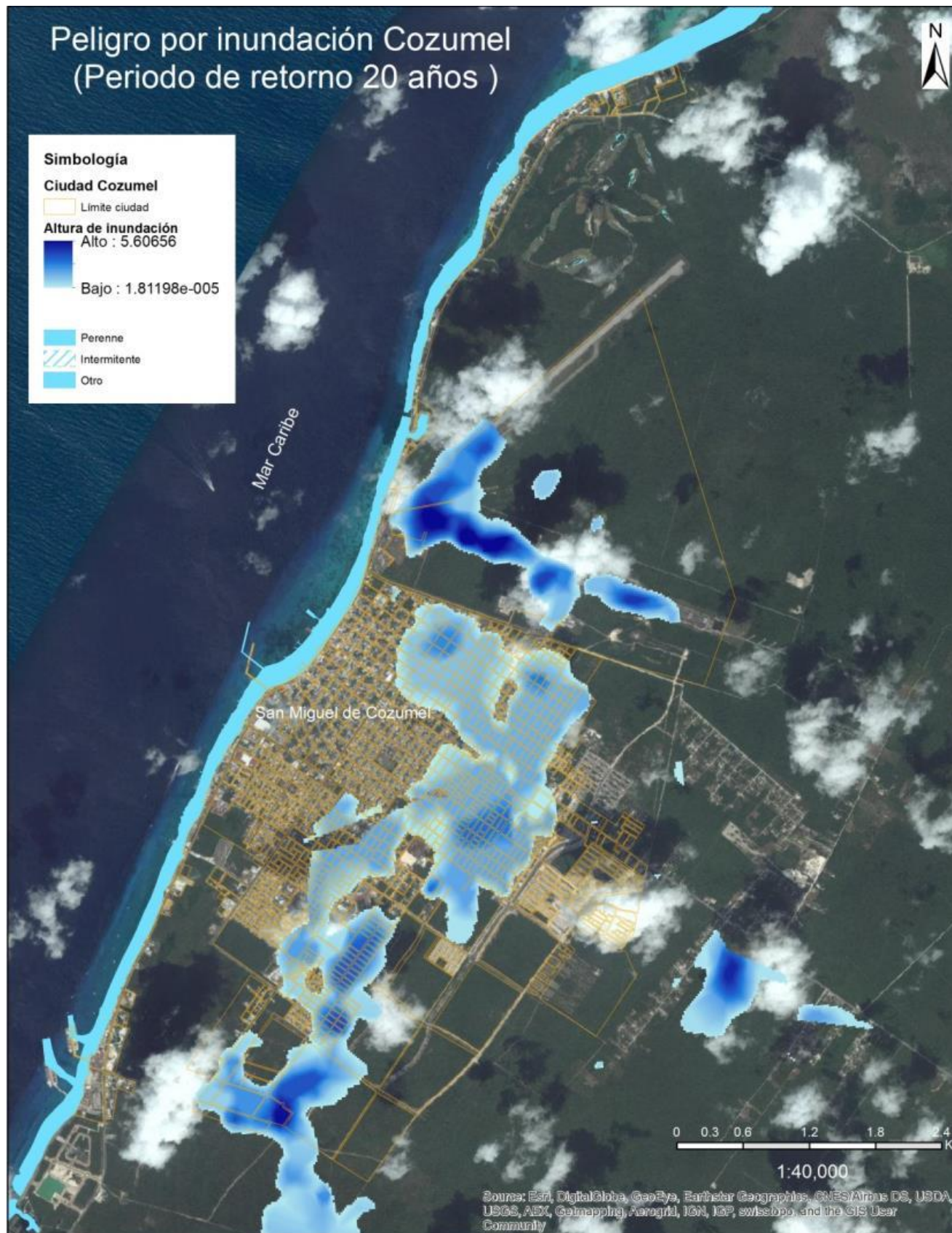


Figura 196.- Peligro por inundación Cozumel, periodo de retorno 20 años.

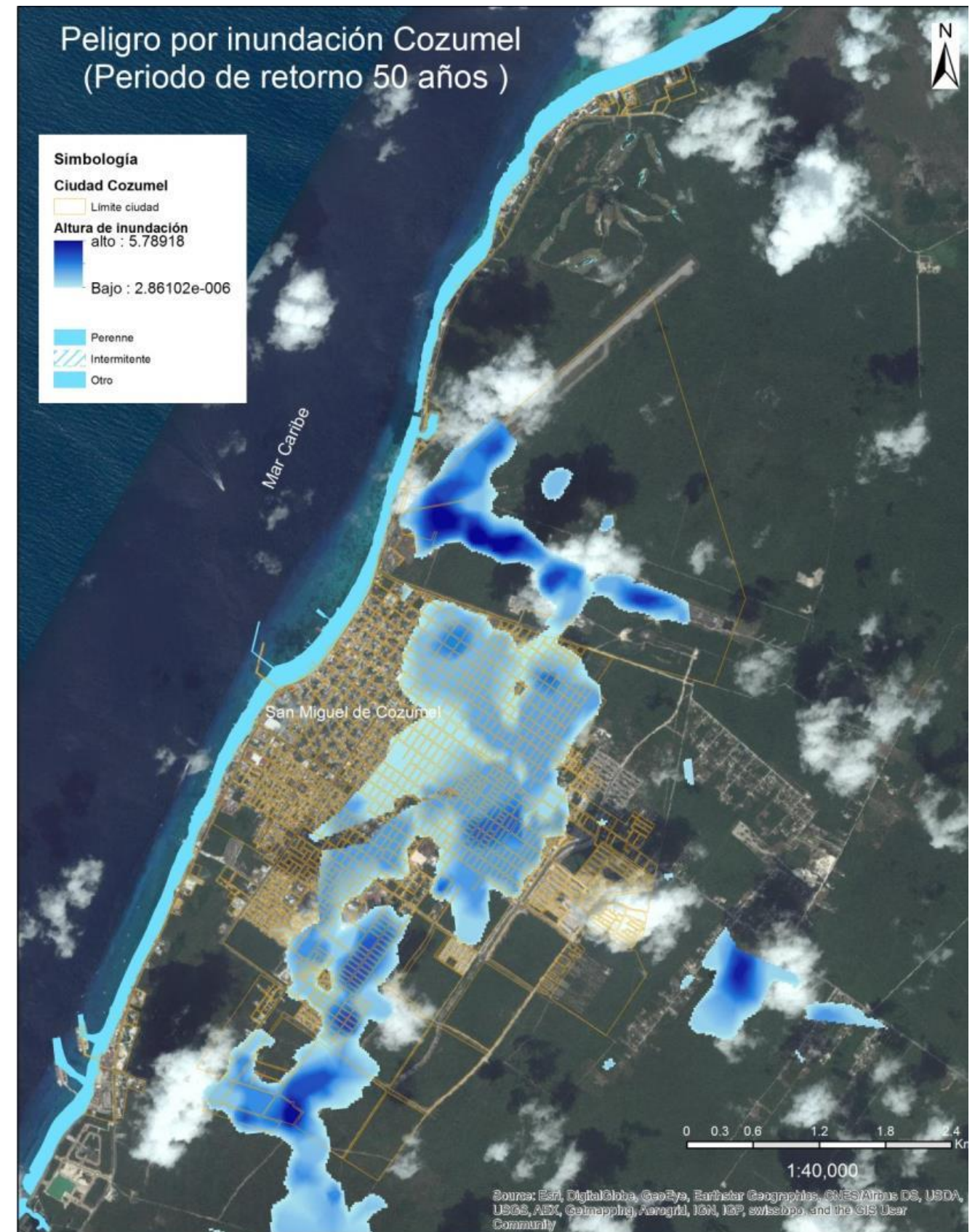


Figura 197.- Peligro por inundación Cozumel, periodo de retorno 50 años.

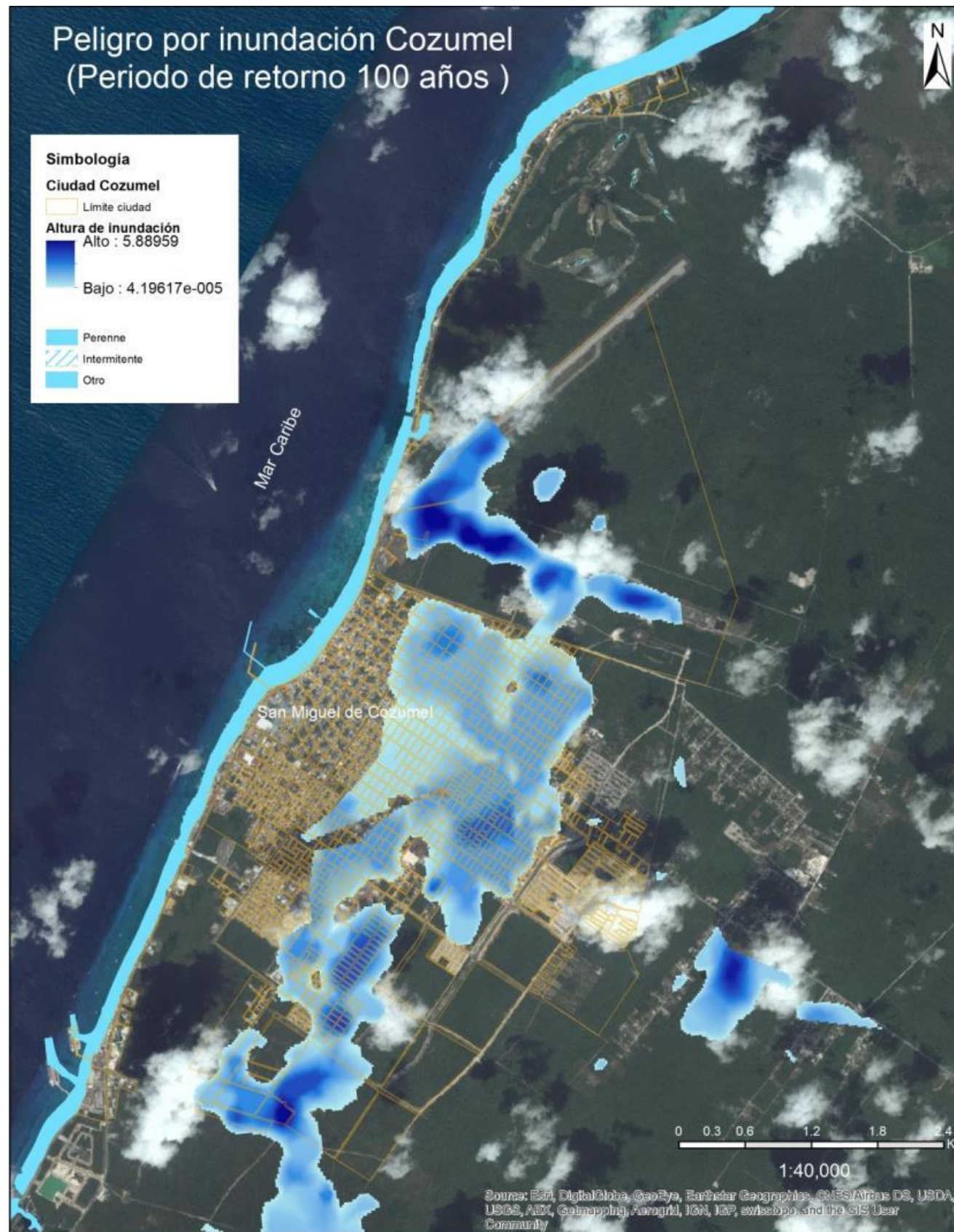


Figura 198.- Peligro por inundación Cozumel, periodo de retorno 100 años.

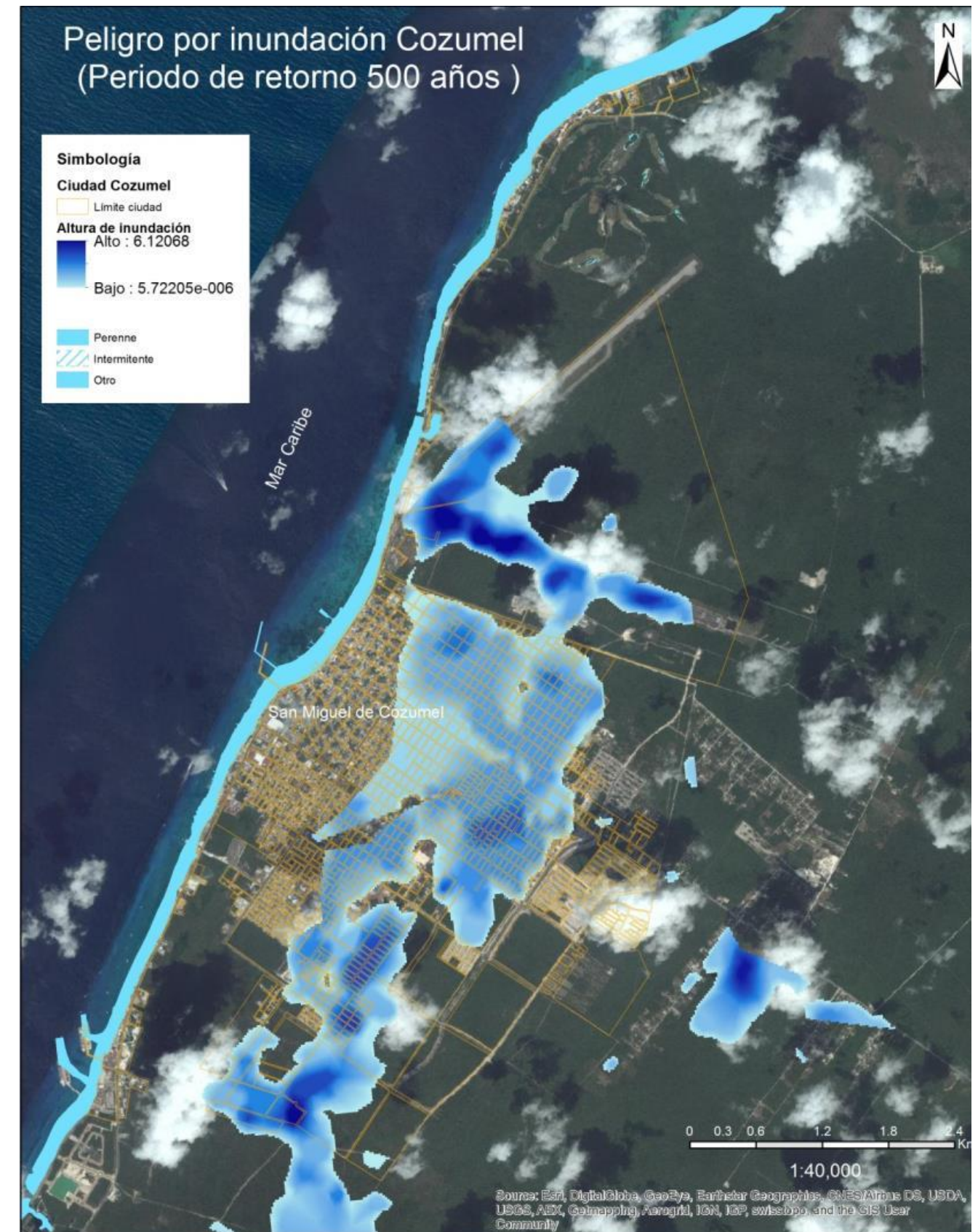


Figura 199.- Peligro por inundación Cozumel, periodo de retorno 500 años.

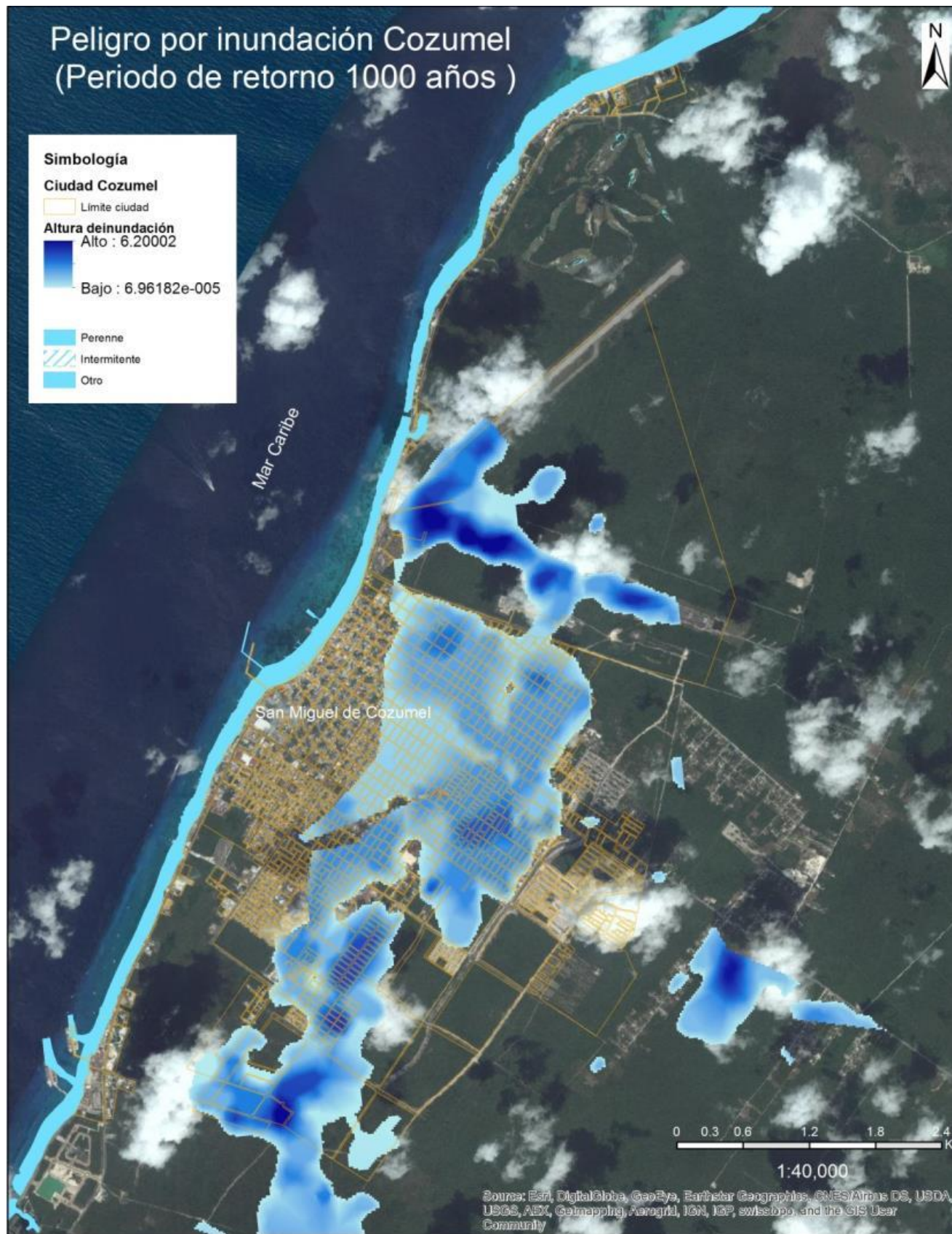


Figura 200.- Peligro por inundación Cozumel, periodo de retorno 1000 años.

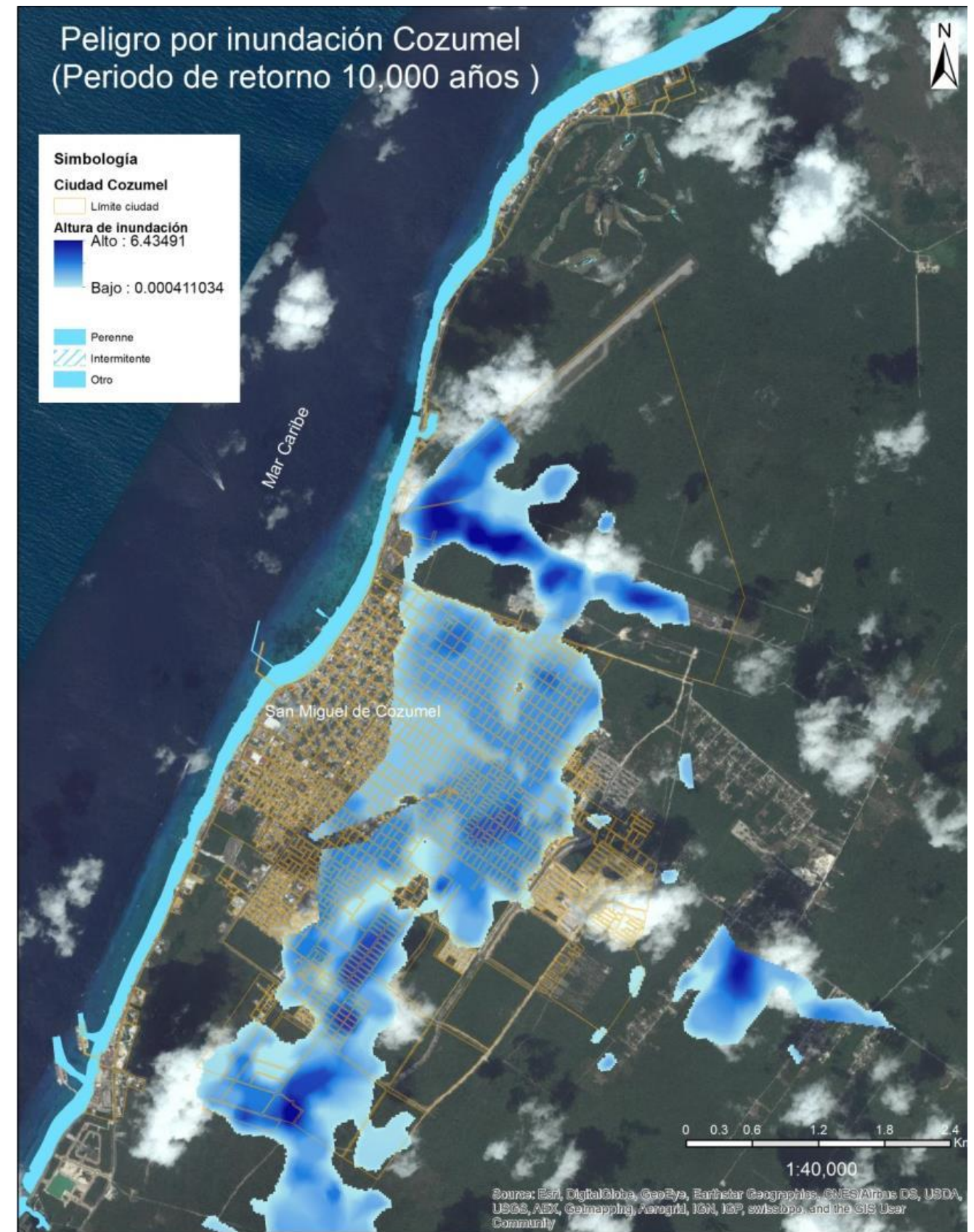


Figura 201.- Peligro por inundación Cozumel, periodo de retorno 10000 años.
Como se observa en los mapas de inundación de la ciudad de Cozumel, las zonas de inundación se presentan en la parte

norte, sur y centro de la ciudad, entre un tiempo de retorno de 2 años a 10,000 años varía considerablemente independientemente de la altura de inundación.

Las zonas afectadas con la inundación son:

- Colonia Emiliano Zapata, Chen Tuk, Magisterio, Nueva generación, Maravilla, San Miguel, Flamingo 2, Taxistas, y CTM.

Ciudad Felipe Carrillo Puerto

Tabla 91. Datos hidrológicos, Felipe Carrillo Puerto.

Área Cuenca	989.91 km ²	Longitud Cuenca	21.9 km
Numero de Escurrimiento	70 (adimensional)		
Tiempo de Retorno	Lluvia de Diseño	Caudal Calculado	
2 años	87 mm	52 m ³ /s	
5 años	119 mm	200 m ³ /s	
10 años	149 mm	400 m ³ /s	
20 años	181 mm	673 m ³ /s	
50 años	217 mm	1029 m ³ /s	
100 años	242 mm	1301 m ³ /s	
500 años	297 mm	1958 m ³ /s	
1000 años	320 mm	2251 m ³ /s	
10,000 años	414 mm	3537 m ³ /s	

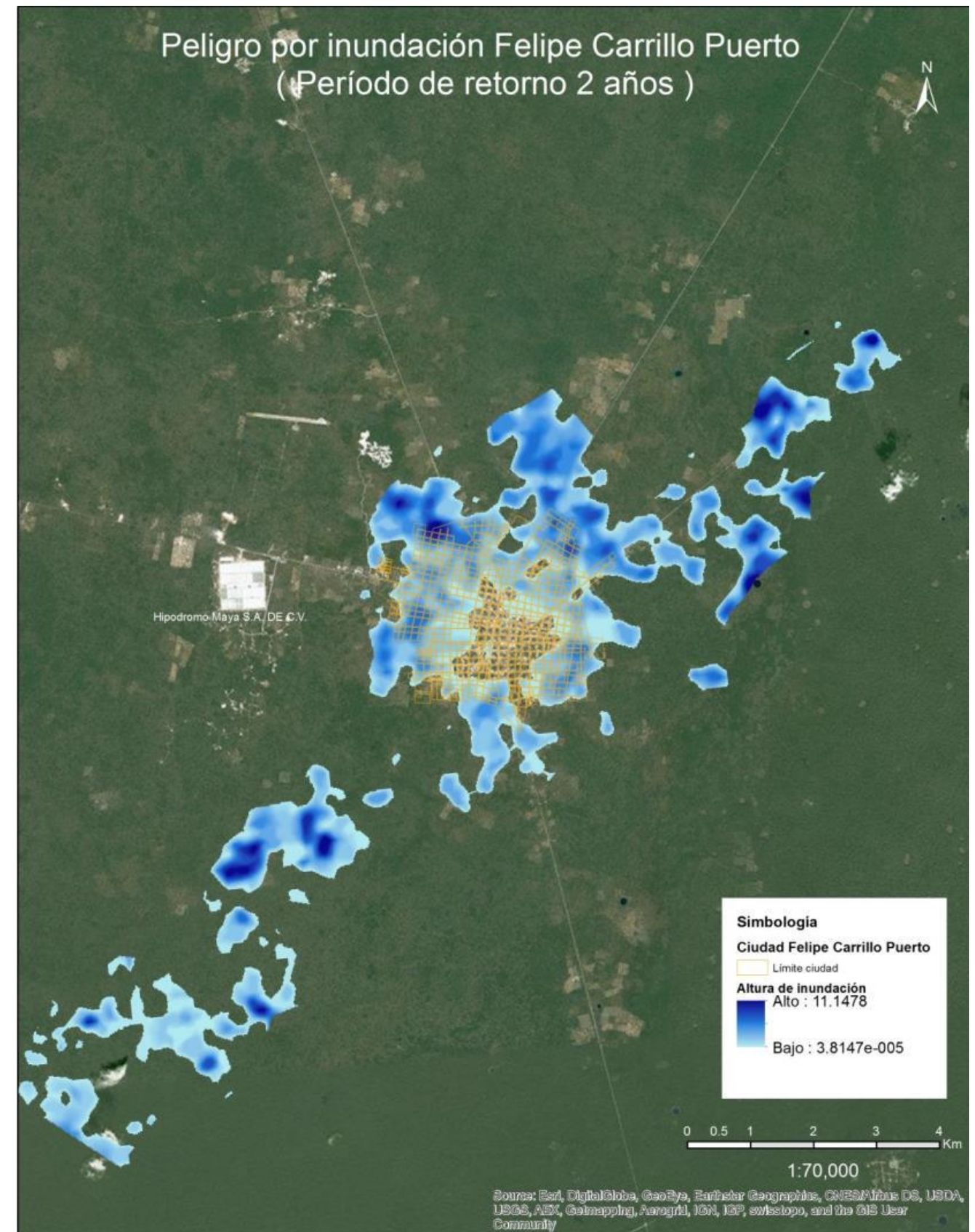


Figura 202.- Peligro por inundación Felipe Carrillo Puerto, periodo de retorno 2 años.

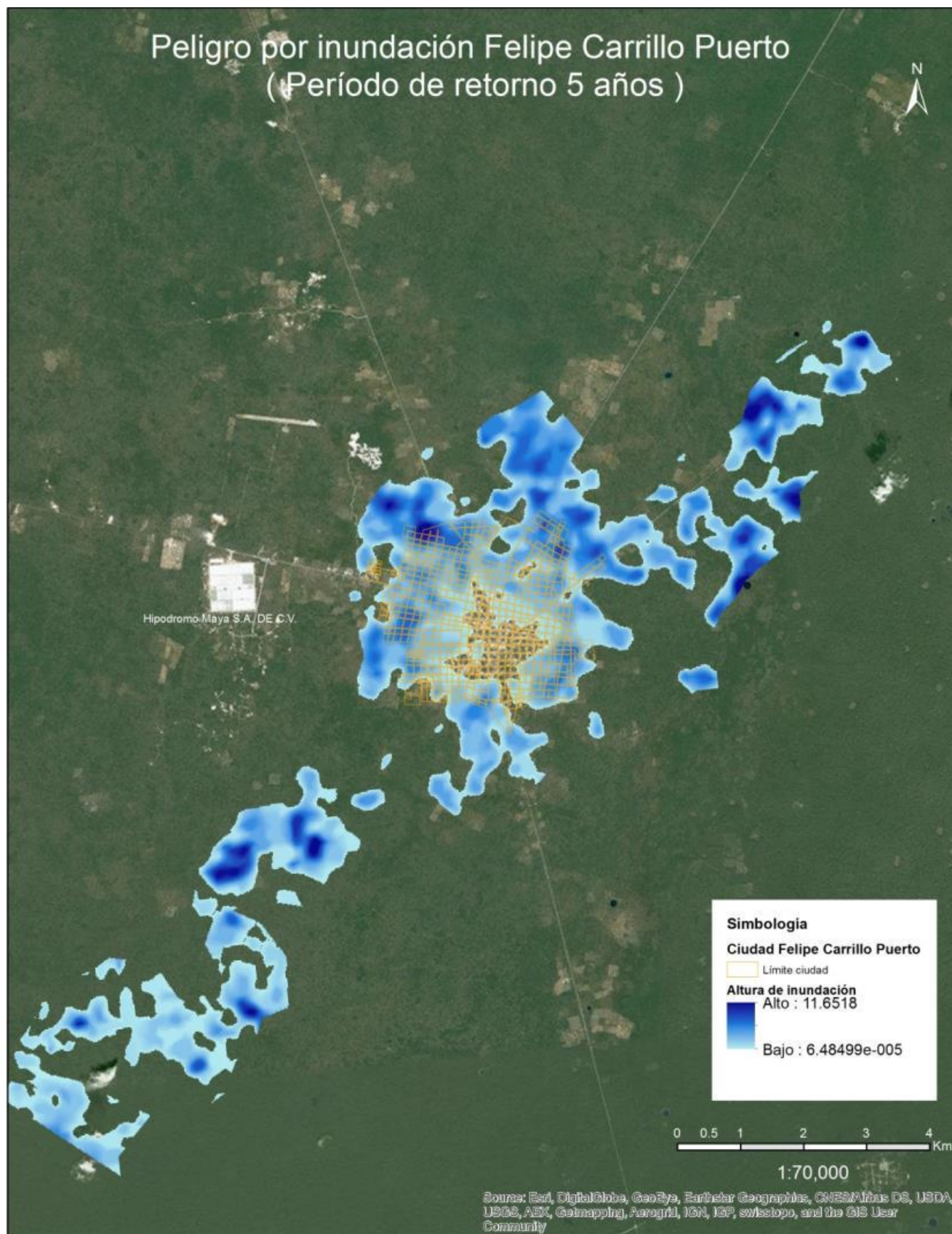


Figura 203.- Peligro por inundación Felipe Carrillo Puerto, periodo de retorno 5 años.

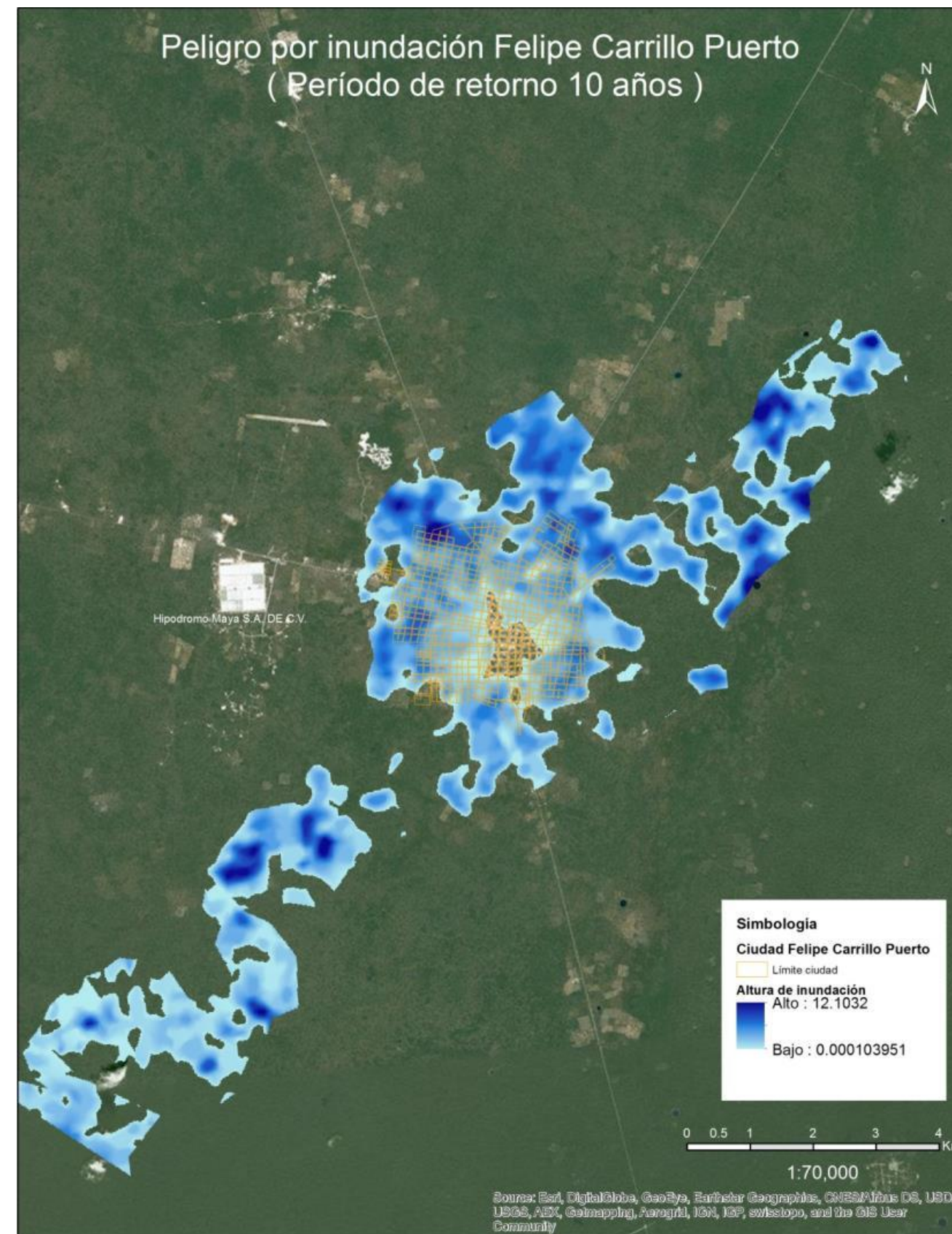


Figura 204.- Peligro por inundación Felipe Carrillo Puerto, periodo de retorno 10 años.

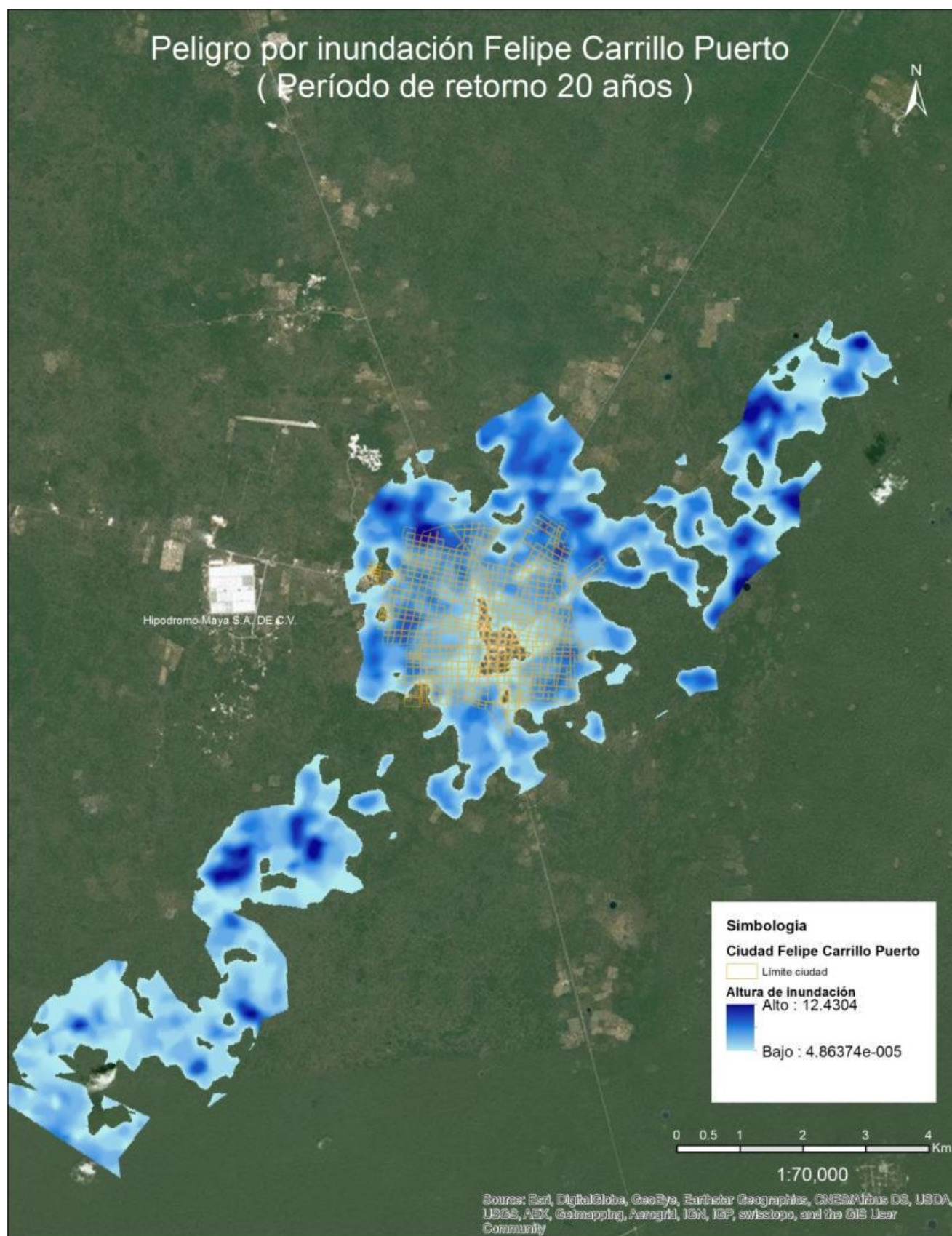


Figura 205.- Peligro por inundación Felipe Carrillo Puerto, periodo de retorno 20 años.

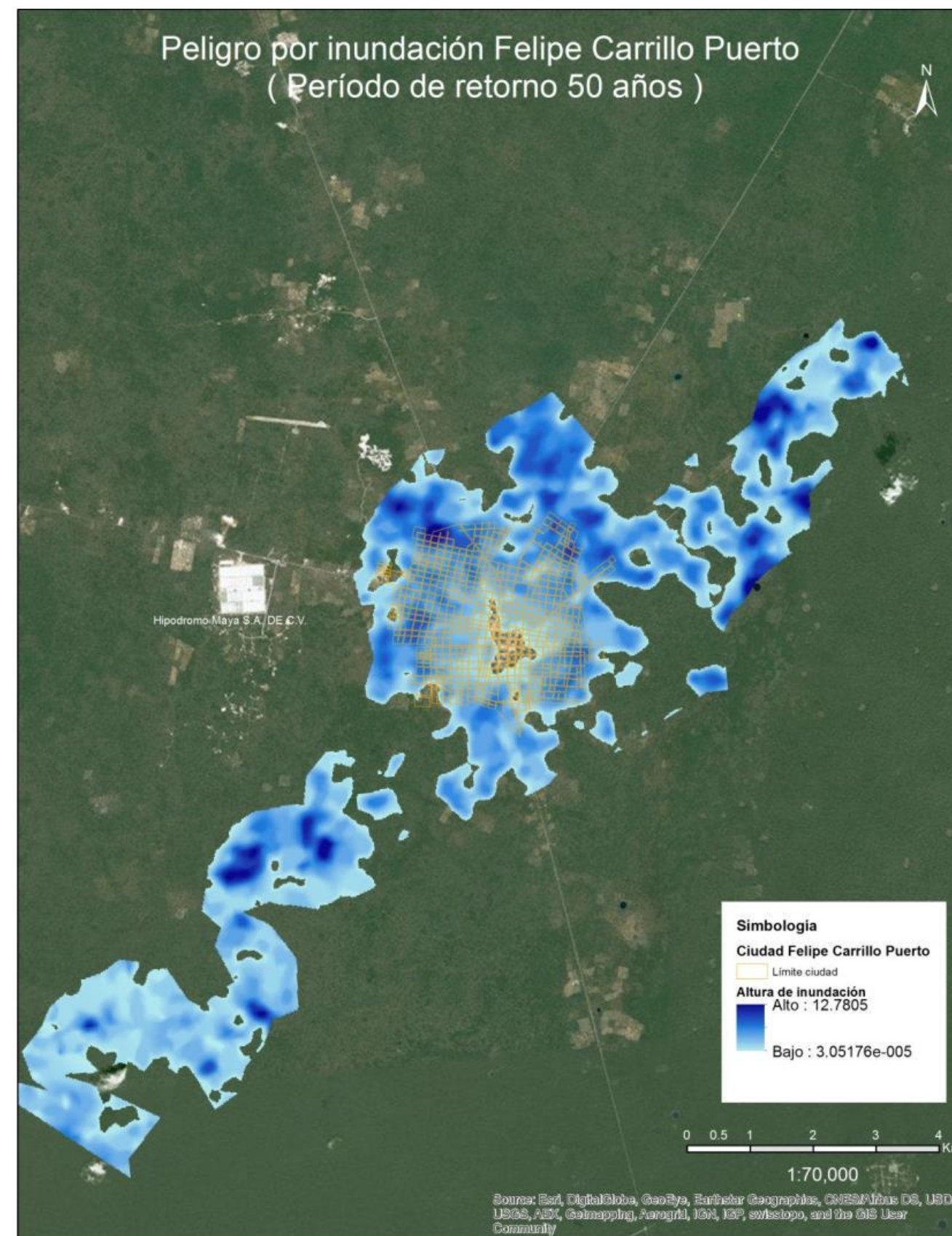


Figura 206.- Peligro por inundación Felipe Carrillo Puerto, periodo de retorno 20 años.

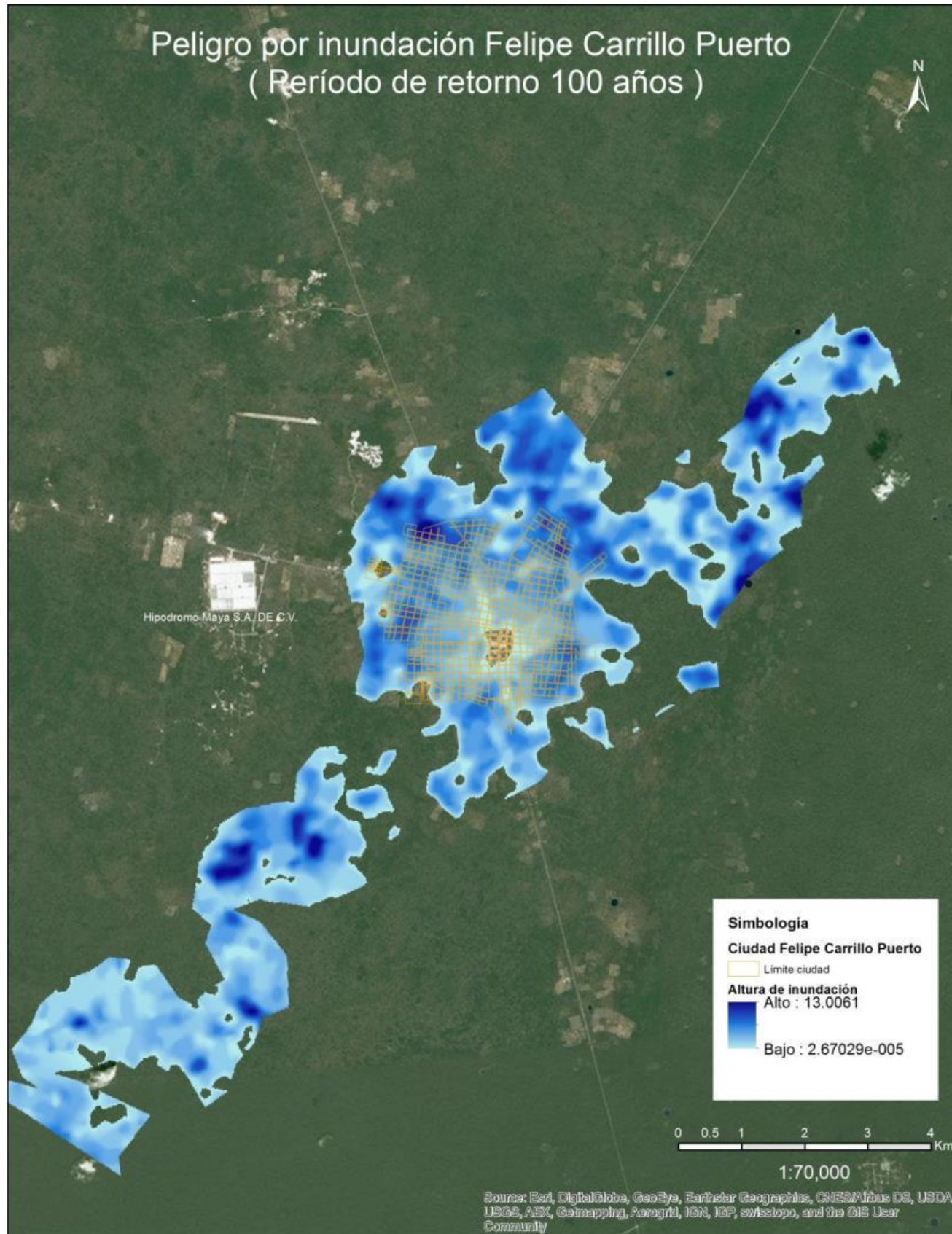


Figura 207.- Peligro por inundación Felipe Carrillo Puerto, periodo de retorno 100 años.

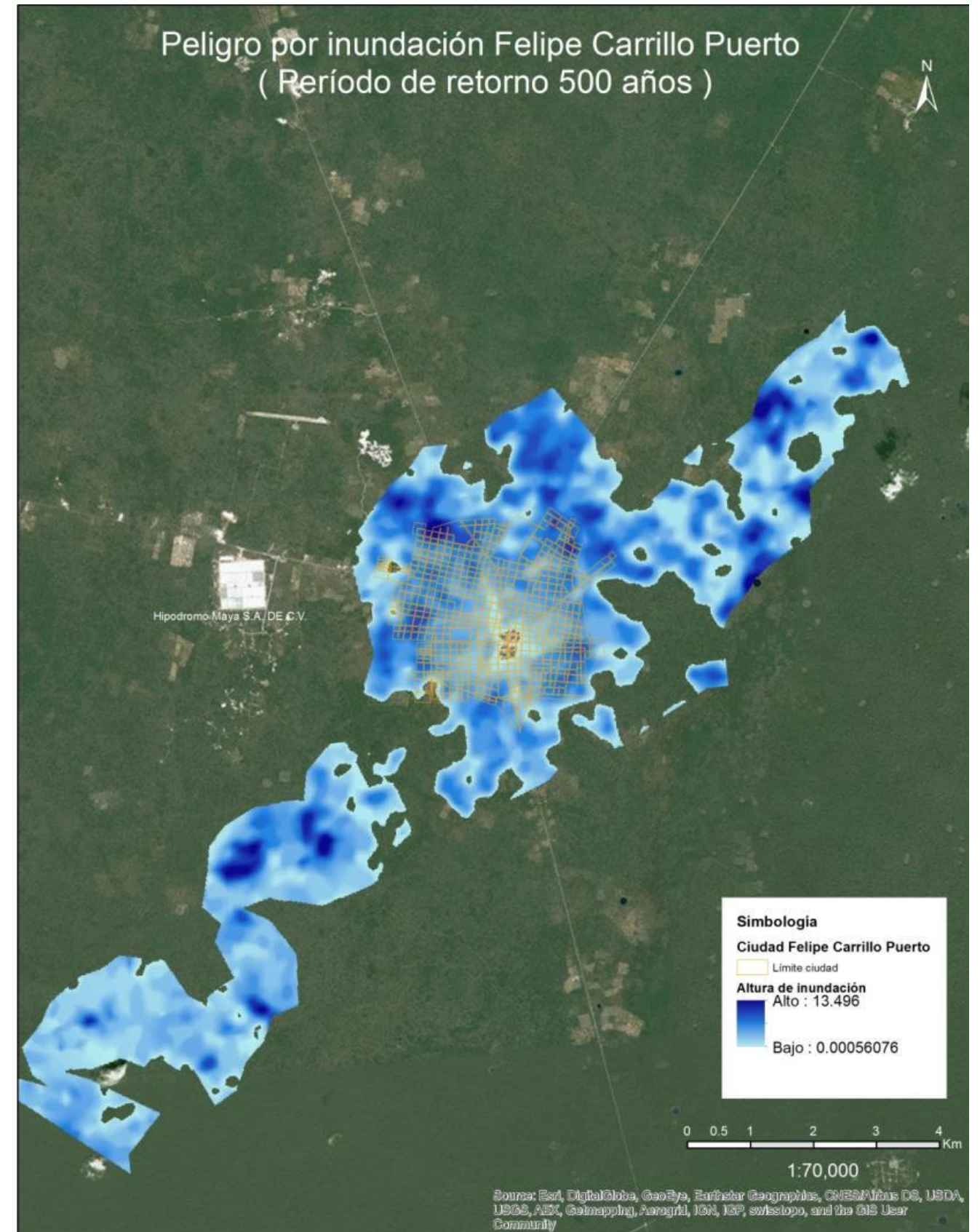


Figura 208.- Peligro por inundación Felipe Carrillo Puerto, periodo de retorno 500 años.

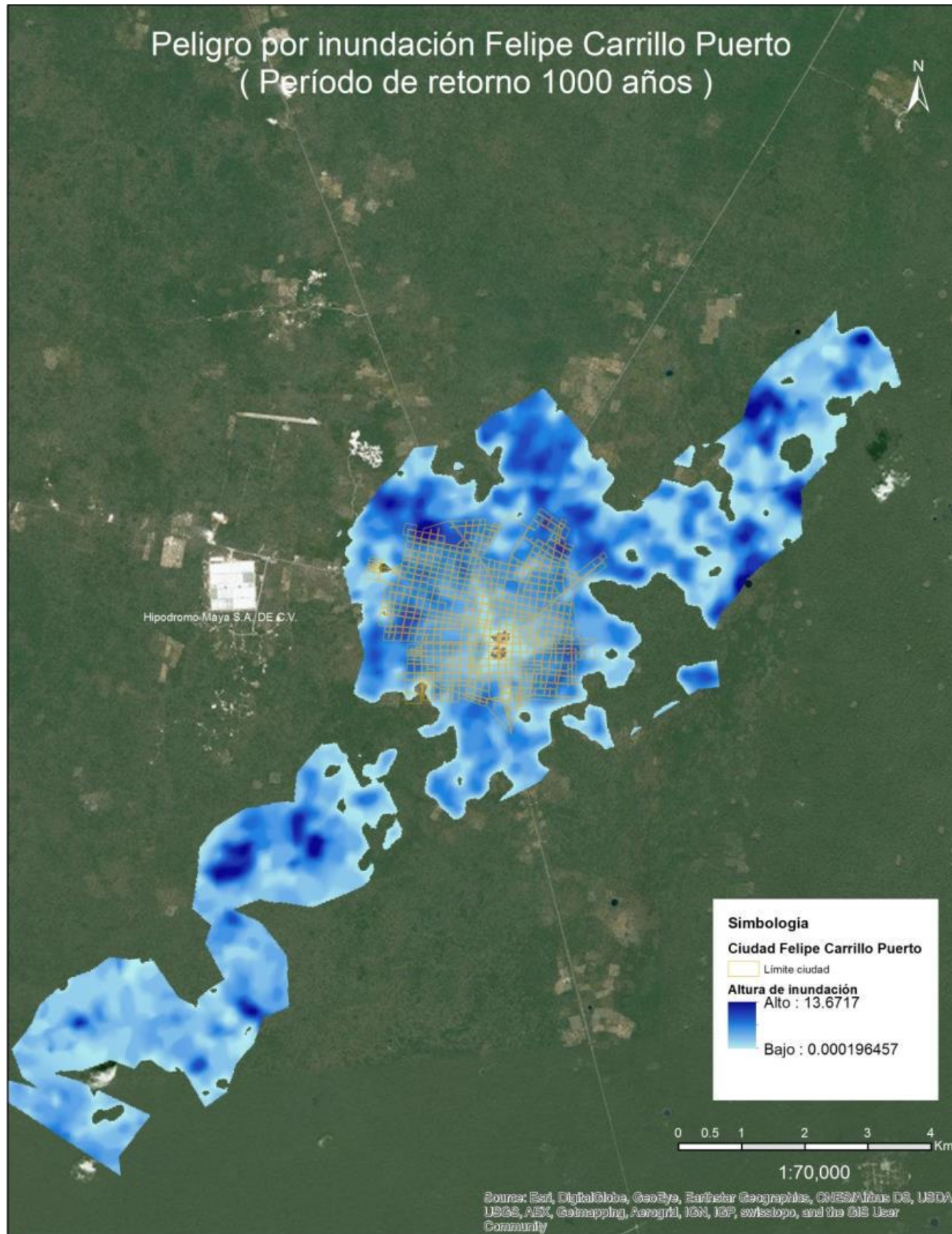


Figura 209.- Peligro por inundación Felipe Carrillo Puerto, periodo de retorno 1000 años.

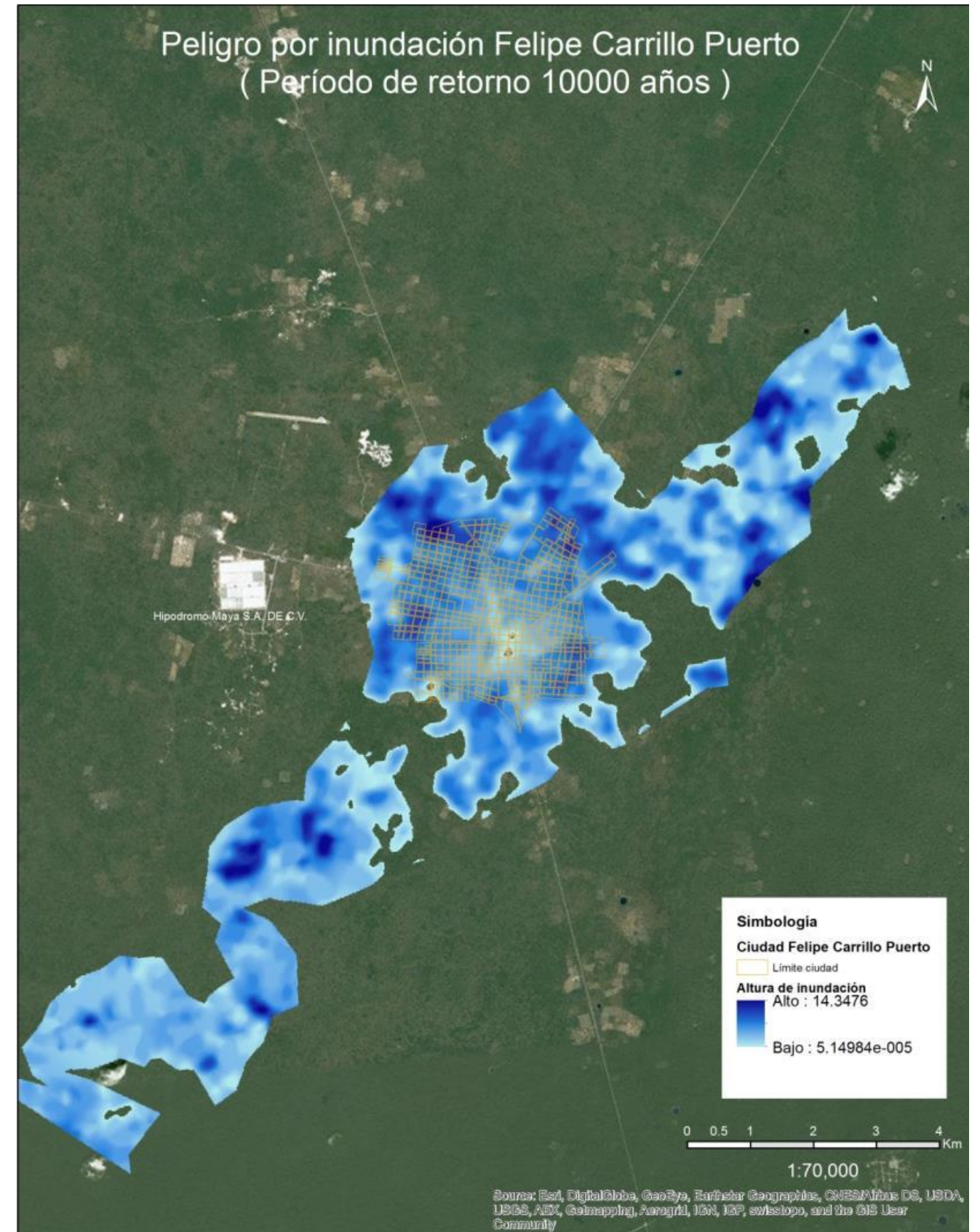


Figura 210.- Peligro por inundación Felipe Carrillo Puerto, periodo de retorno 10000 años. Los mapas de inundación de la Ciudad de Felipe Carrillo Puerto, muestran escenarios en donde la ciudad completa

queda inundada, a partir de una lluvia con tiempo de retorno de 2 años, pero es importante saber que, aunque la ciudad se muestre completamente inundada, la altura de la inundación es mínima. Este escenario muestra estos resultados debido a que la ciudad se encuentra en una zona baja, con respecto a la planicie del estado. La afectación por inundación es del 100% en la ciudad, pero como se mencionó, la altura de la inundación puede ser mínima.

Ciudad Isla Mujeres

Tabla 92. Datos hidrológicos, Isla Mujeres.

Área Cuenca	0.53 km ²	Longitud Cuenca	1.07 km
Numero de Escurrimiento	55 (adimensional)		
Tiempo de Retorno	Lluvia de Diseño	Caudal Calculado	
2 años	91 mm	0 m ³ /s	
5 años	127 mm	0 m ³ /s	
10 años	162 mm	0 m ³ /s	
20 años	201 mm	1 m ³ /s	
50 años	243 mm	1 m ³ /s	
100 años	272 mm	2 m ³ /s	
500 años	336 mm	4 m ³ /s	
1000 años	363 mm	5 m ³ /s	
10,000 años	424 mm	8 m ³ /s	

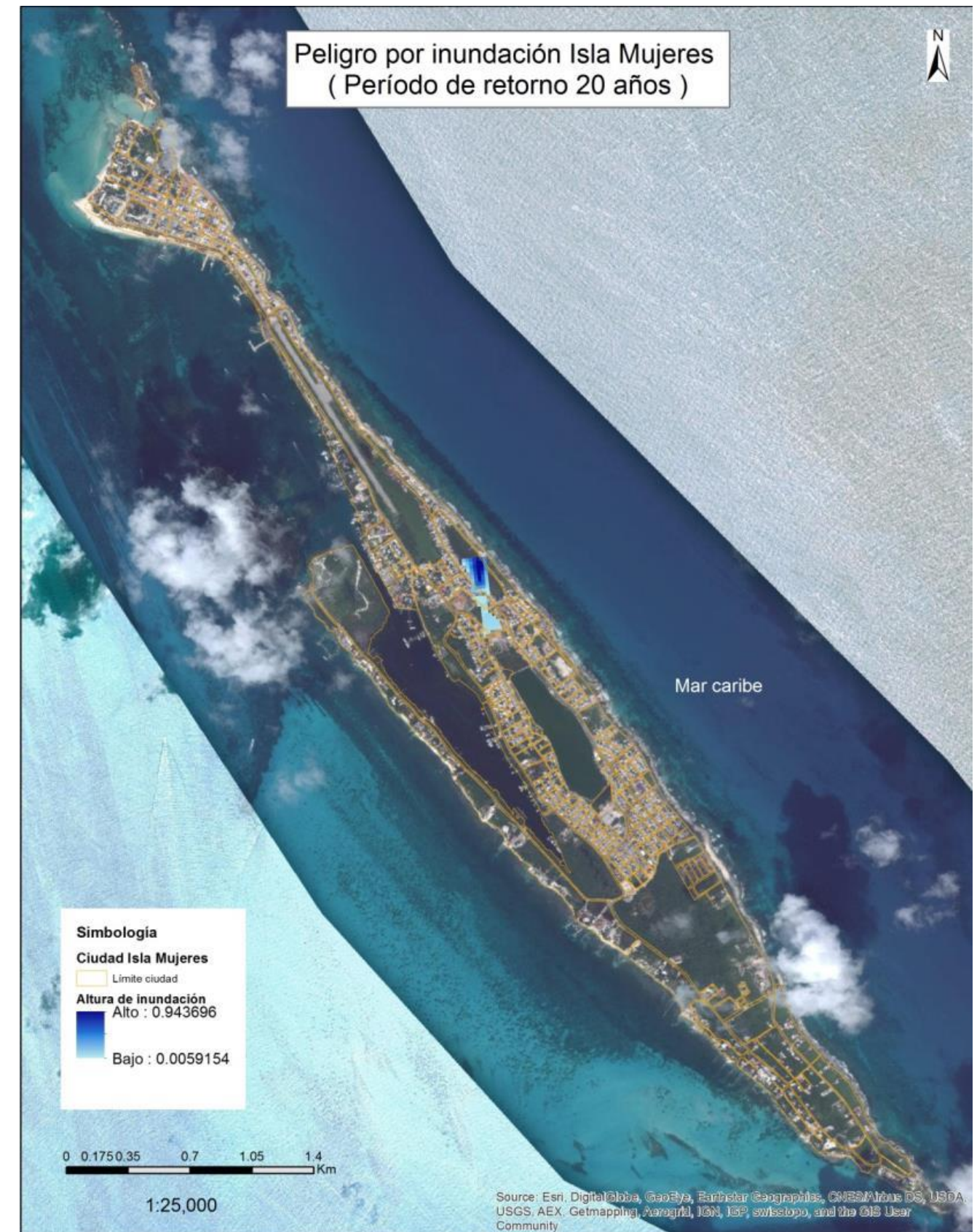


Figura 211.- Peligro por inundación Isla Mujeres, periodo de retorno 20 años.



Figura 212.- Peligro por inundación Isla Mujeres, periodo de retorno 50 años.

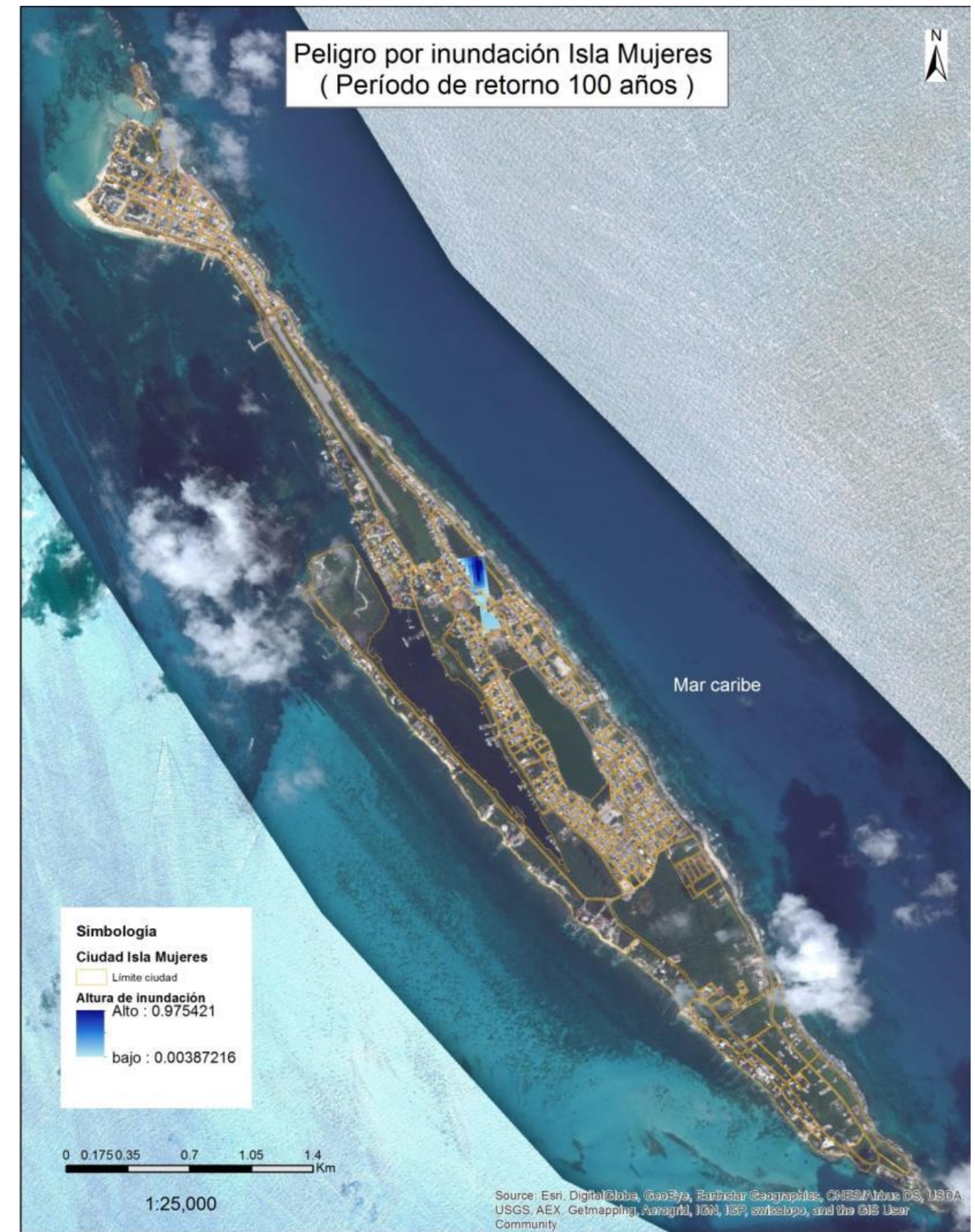


Figura 213.- Peligro por inundación Isla Mujeres, periodo de retorno 100 años.

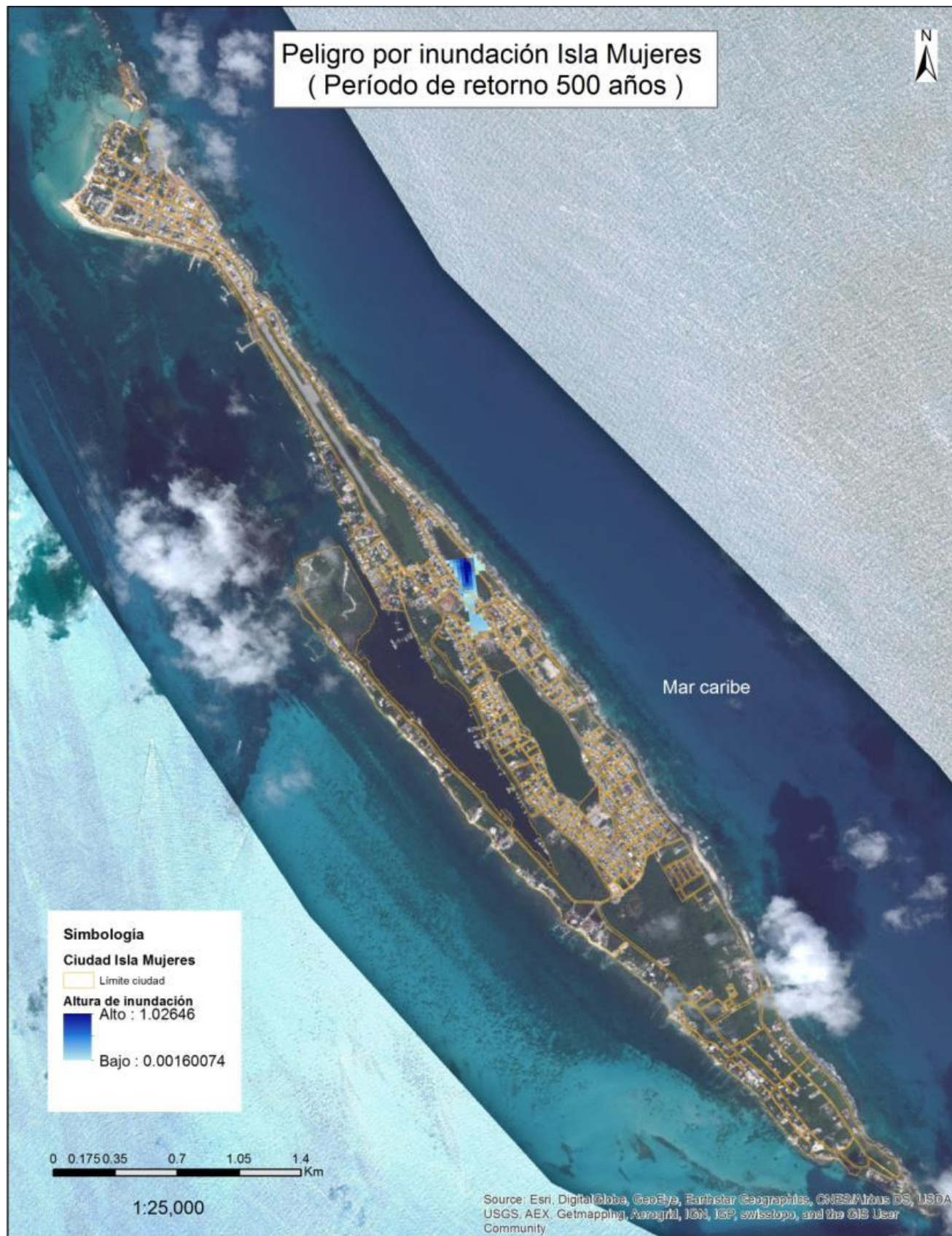


Figura 214.- Peligro por inundación Isla Mujeres, periodo de retorno 500 años.

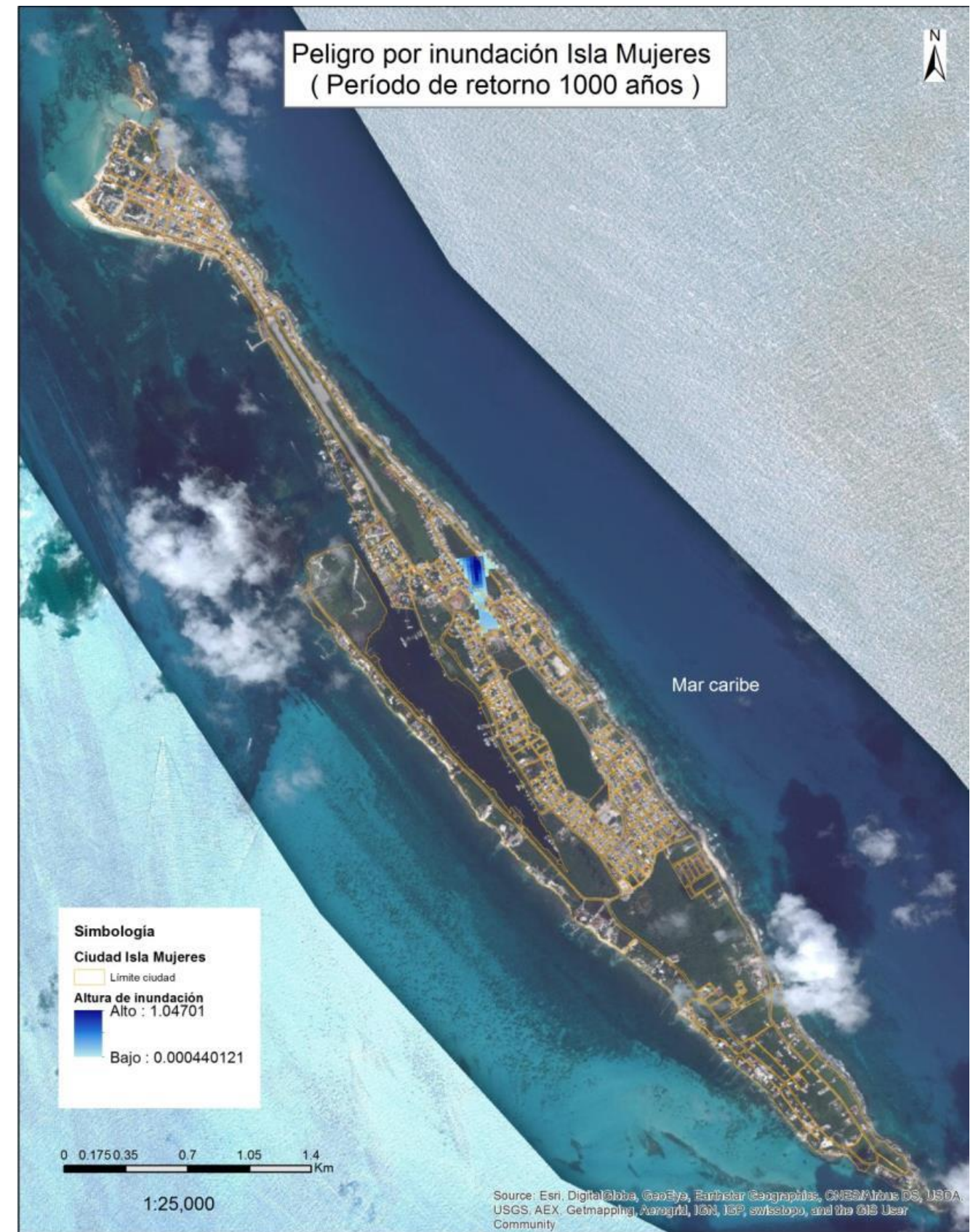
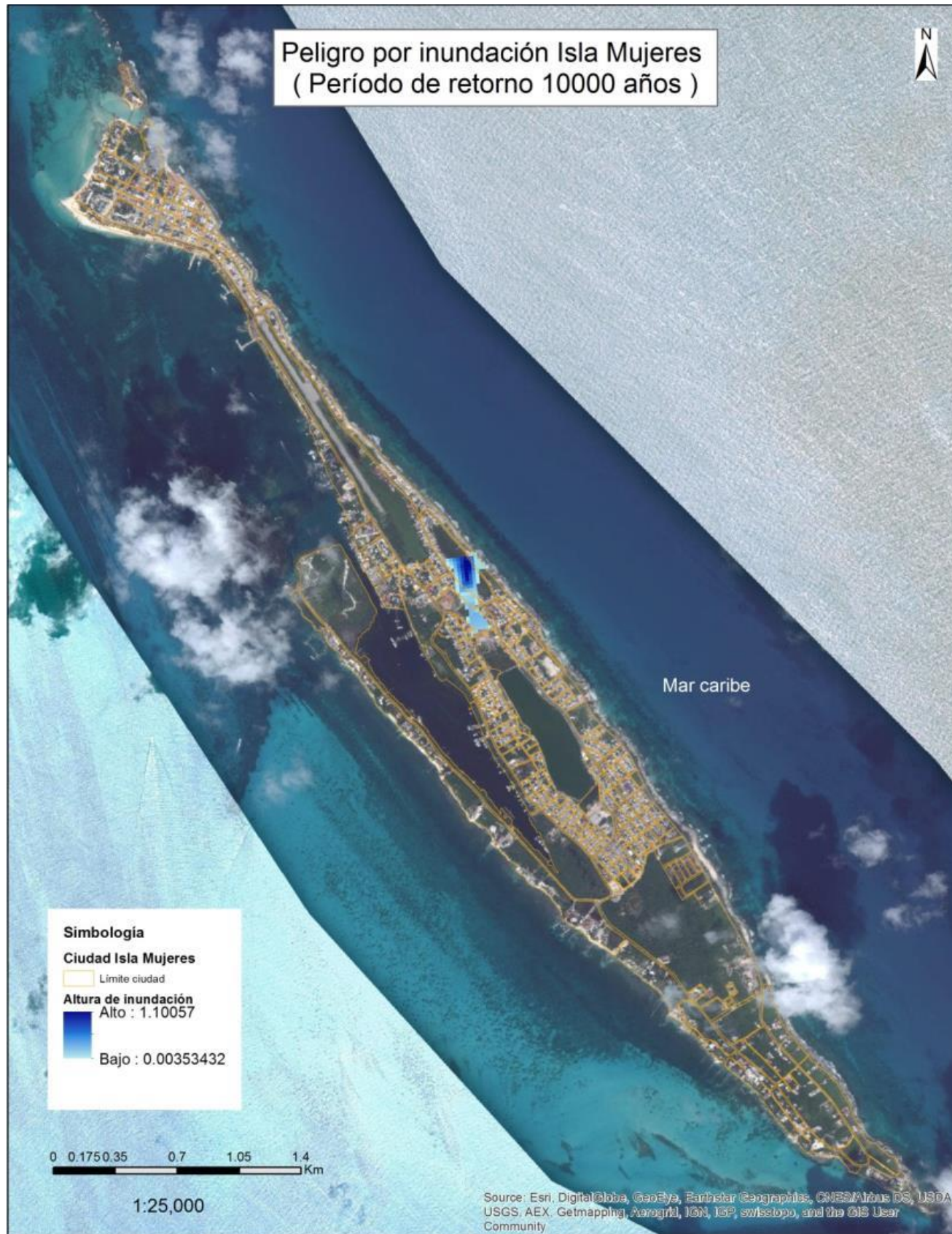


Figura 215.- Peligro por inundación Isla Mujeres, periodo de retorno 1000 años.



periodo de retorno de 20 años, y la parte afectada es mínima. La zona de inundación se presenta en la calle Martínez Ross. Solo en esa calle, ya que las demás zonas no se inundan, pues el agua escurre por los bordes de la isla hacia el mar.

Ciudad Playa del Carmen.

Tabla 93. Datos hidrológicos, Playa del Carmen.

Área Cuenca	287.25 km ²	Longitud Cuenca	14.2 km
Numero de Escurrimiento	70 (adimensional)		
Tiempo de Retorno	Lluvia de Diseño	Caudal Calculado	
2 años	91 mm	9 m ³ /s	
5 años	125 mm	54 m ³ /s	
10 años	158 mm	128 m ³ /s	
20 años	193 mm	231 m ³ /s	
50 años	232 mm	371 m ³ /s	
100 años	260 mm	483 m ³ /s	
500 años	319 mm	748 m ³ /s	
1000 años	345 mm	874 m ³ /s	
10,000 años	452 mm	1439 m ³ /s	

Figura 216.- Peligro por inundación Isla Mujeres, periodo de retorno 10000 años.

Como se observa en los mapas de inundación de la ciudad de Isla Mujeres, existe una afectación por inundación hasta en un

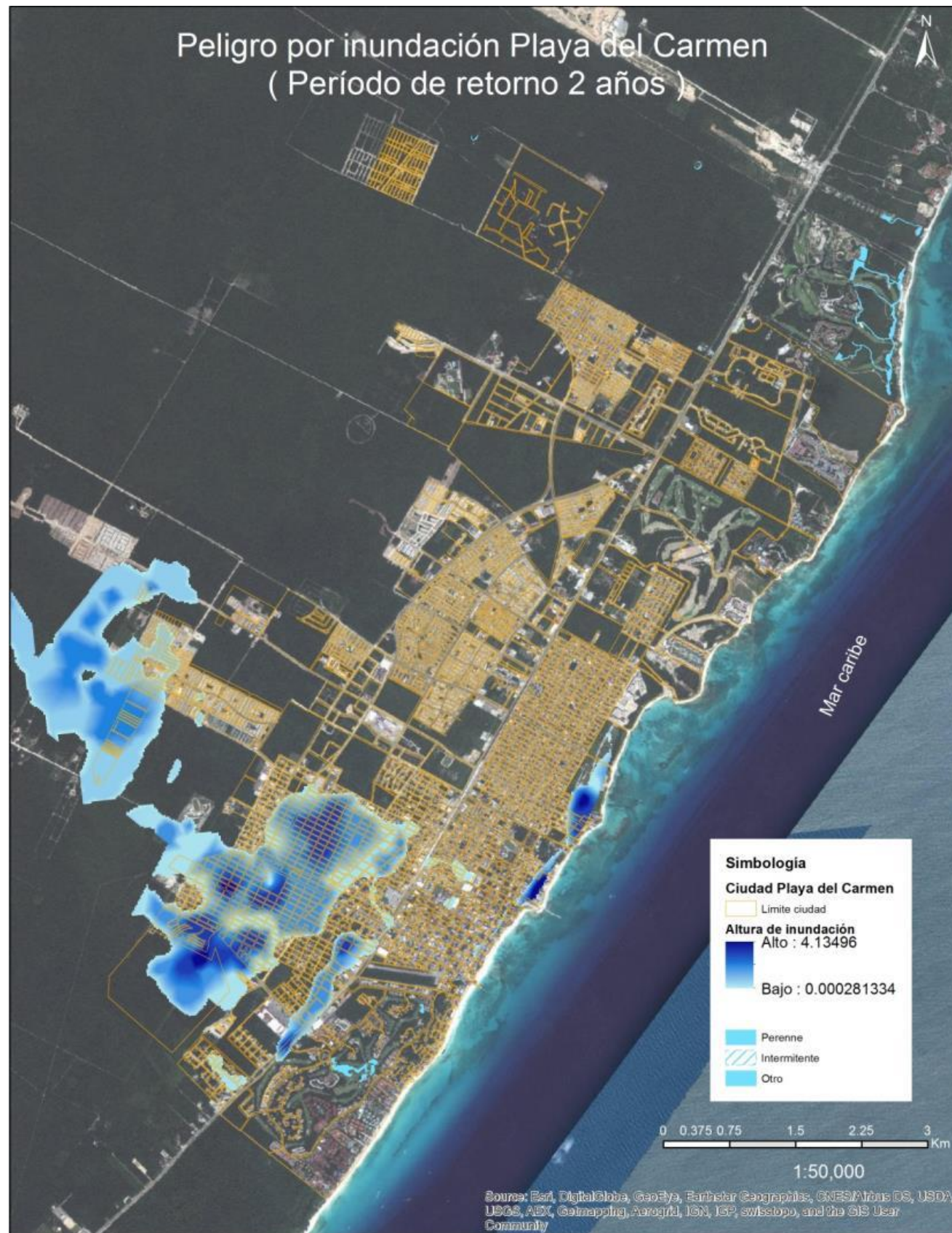


Figura 217.- Peligro por inundación Cd. Playa del Carmen, periodo de retorno 2 años.

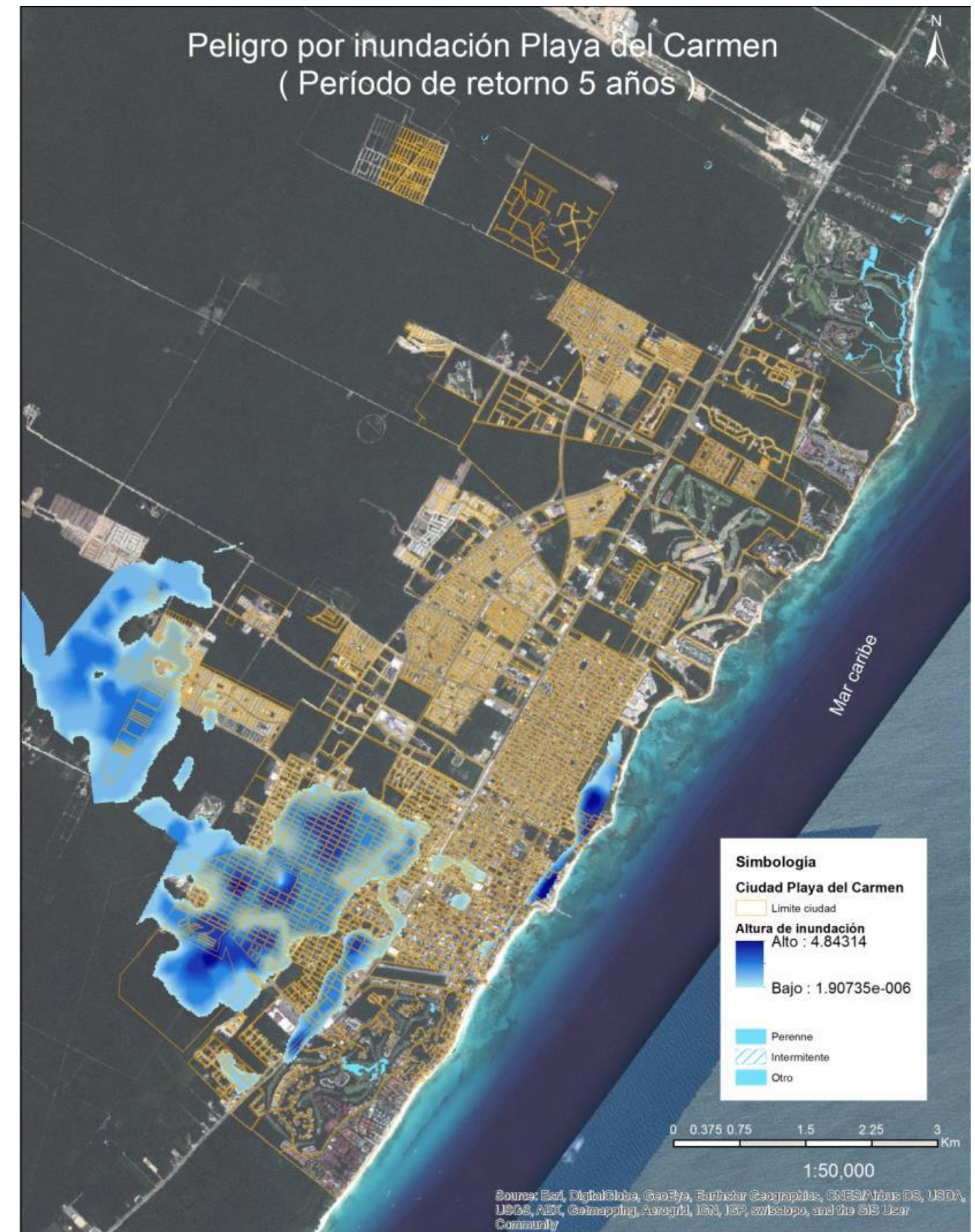


Figura 218.- Peligro por inundación Cd. Playa del Carmen, periodo de retorno 5 años.

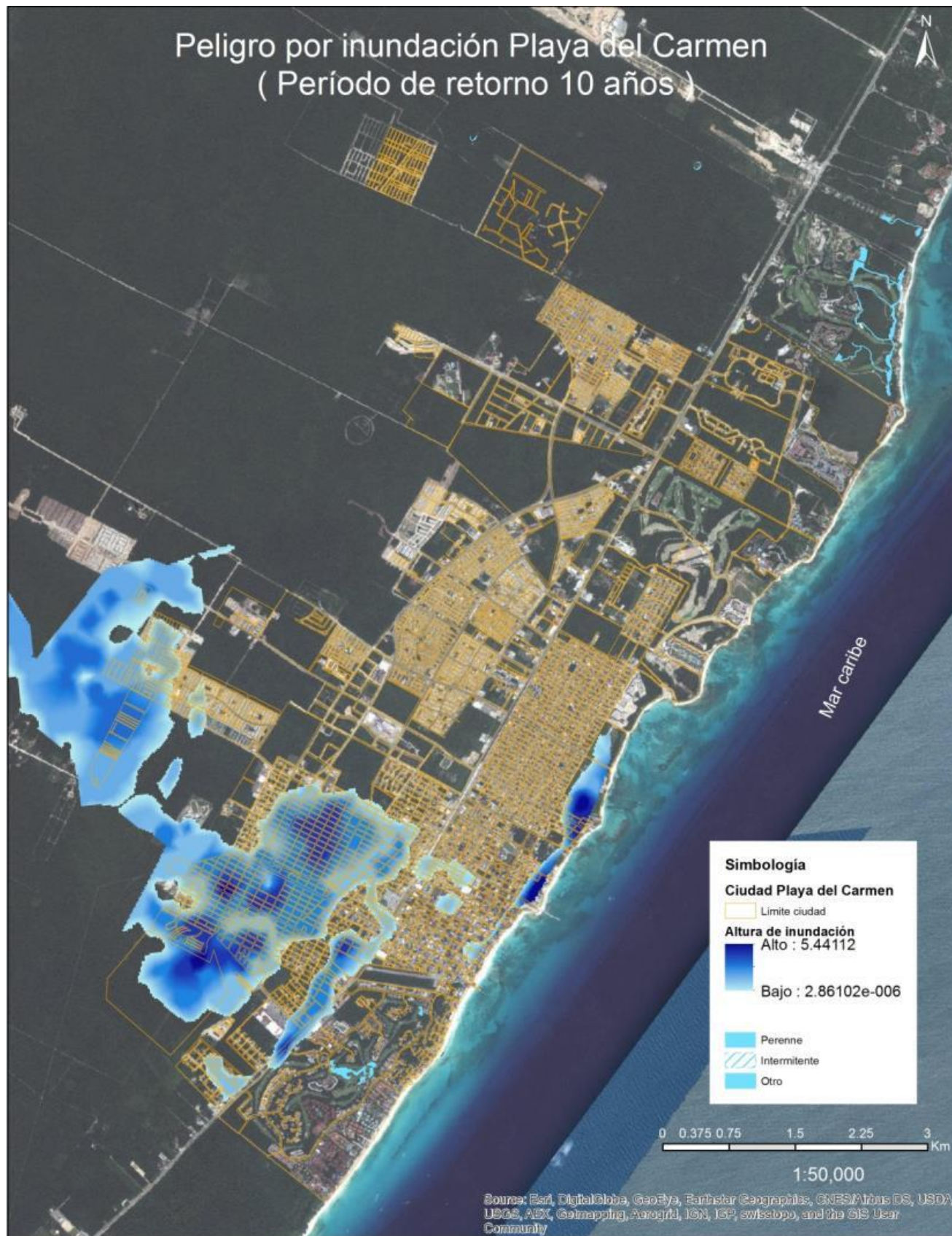


Figura 219.- Peligro por inundación Cd. Playa del Carmen, periodo de retorno 10 años.

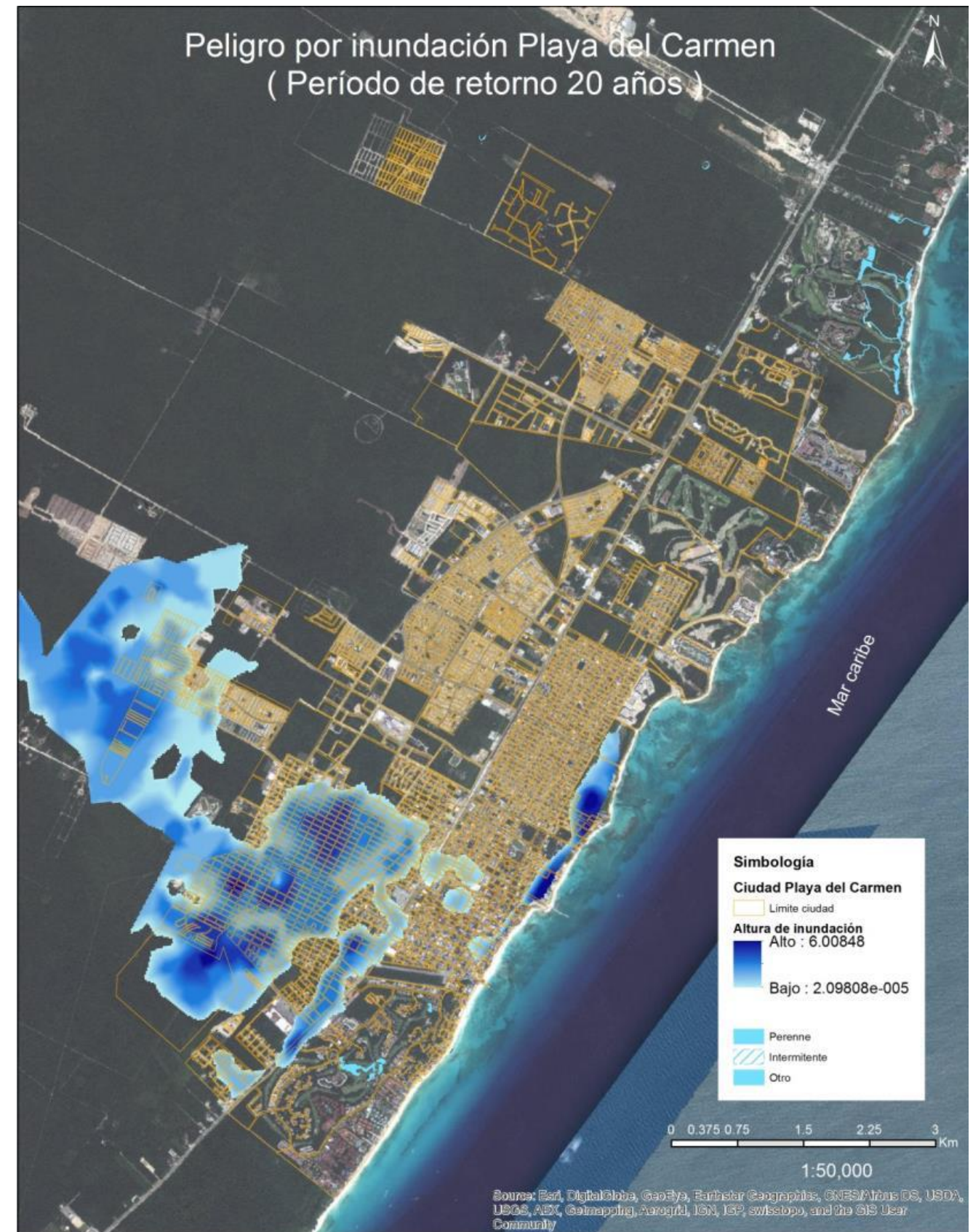


Figura 220.- Peligro por inundación Cd. Playa del Carmen, periodo de retorno 20 años.

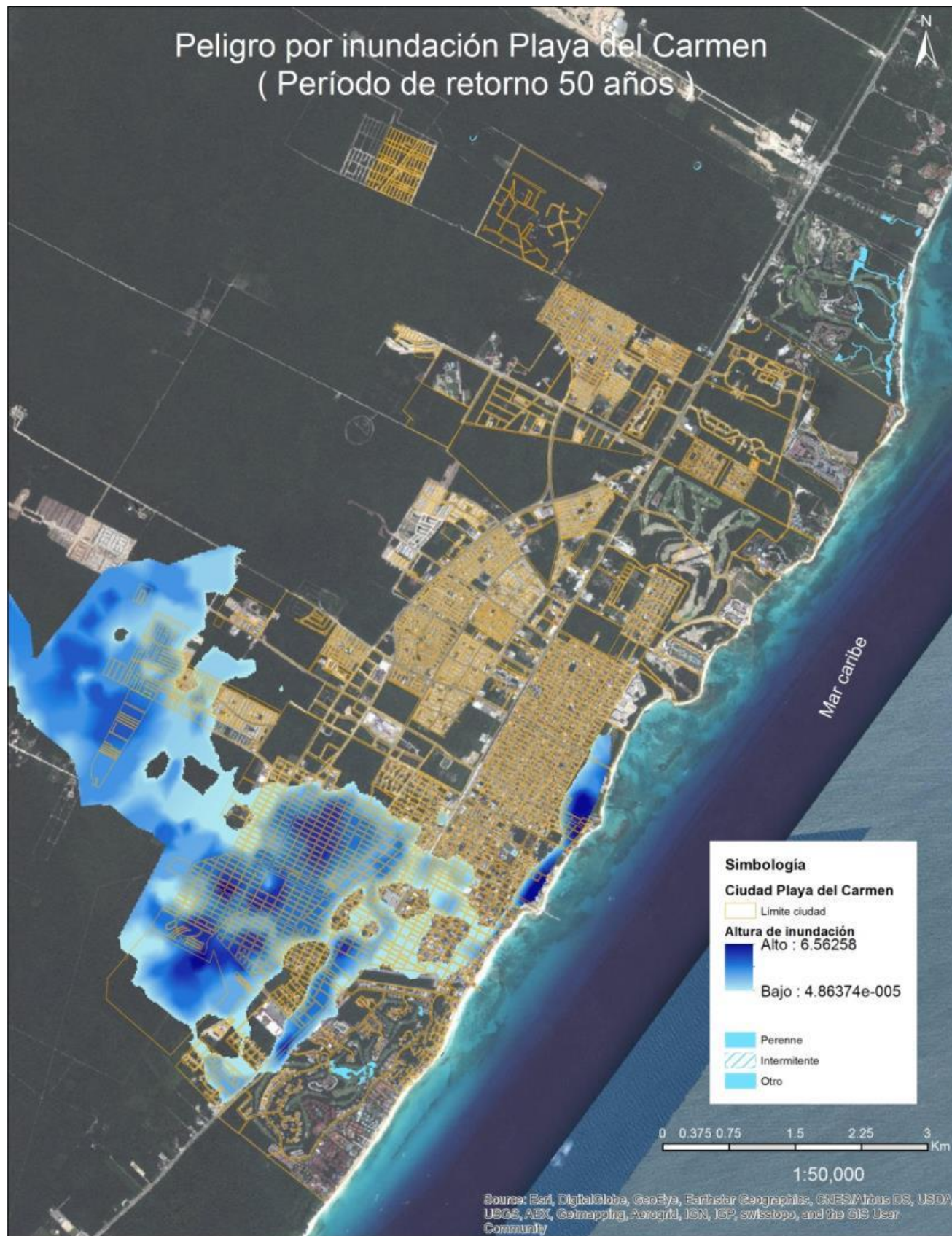


Figura 221.- Peligro por inundación Cd. Playa del Carmen, periodo de retorno 50 años.

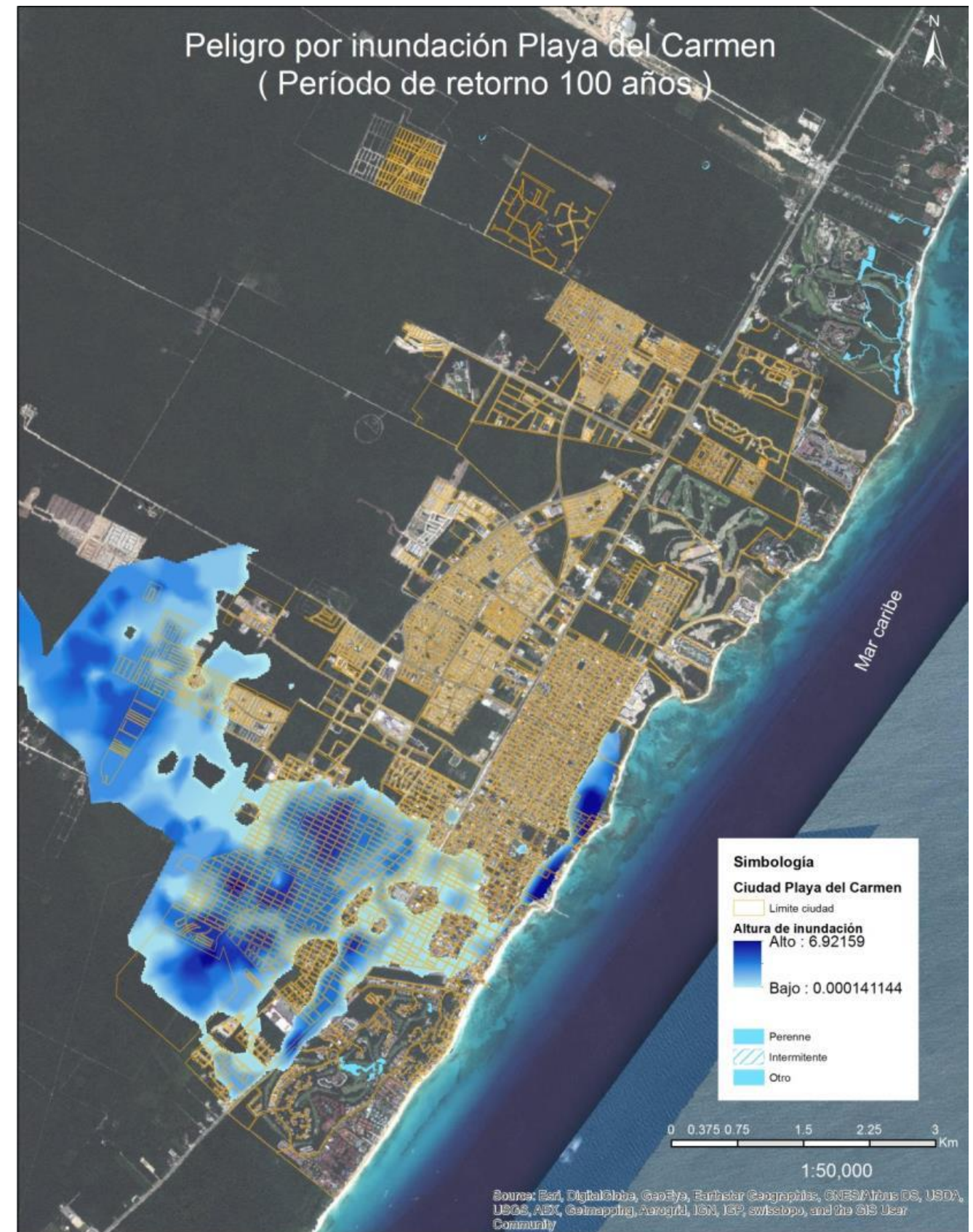


Figura 222.- Peligro por inundación Cd. Playa del Carmen, periodo de retorno 100 años.

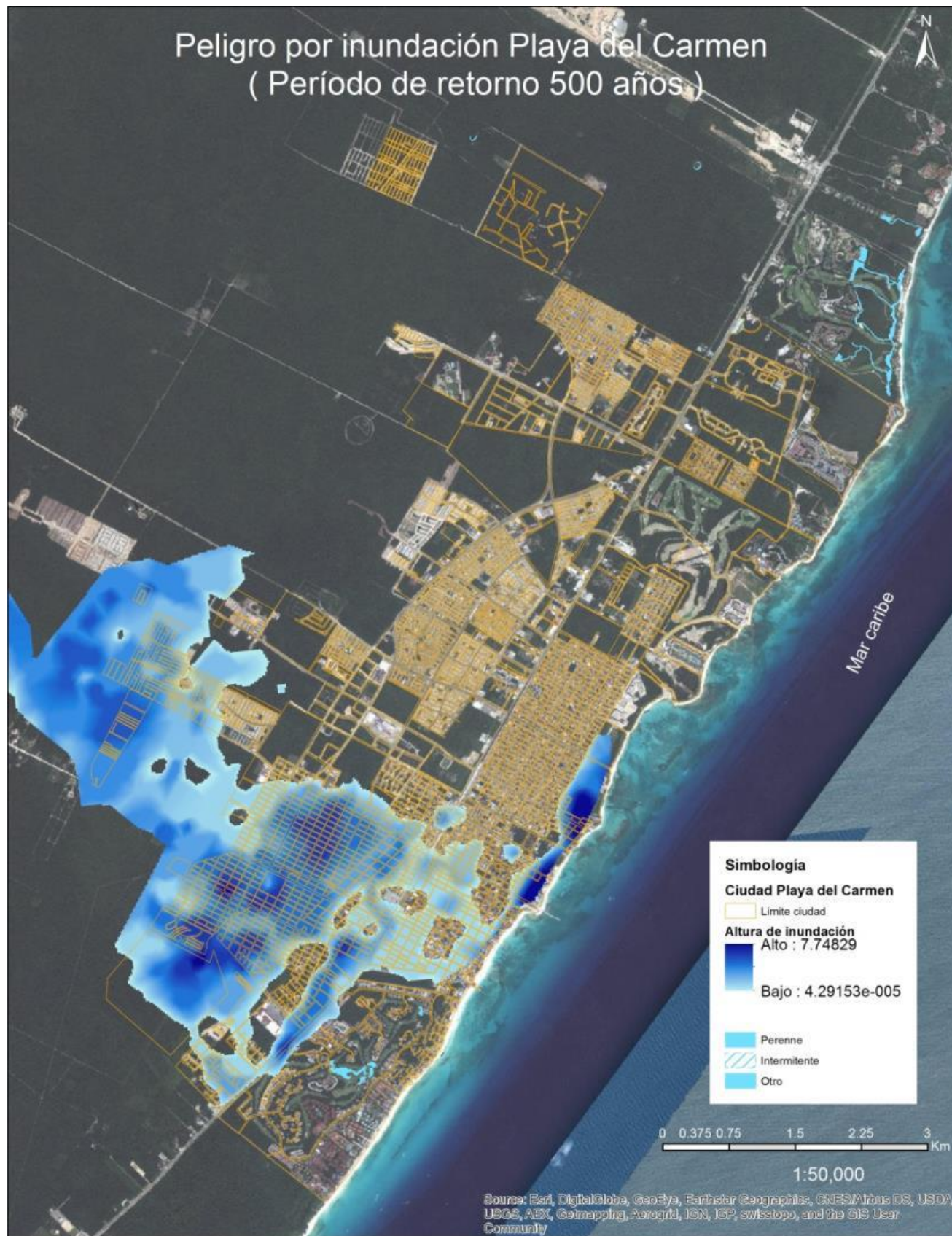


Figura 223.- Peligro por inundación Cd. Playa del Carmen, periodo de retorno 500 años.

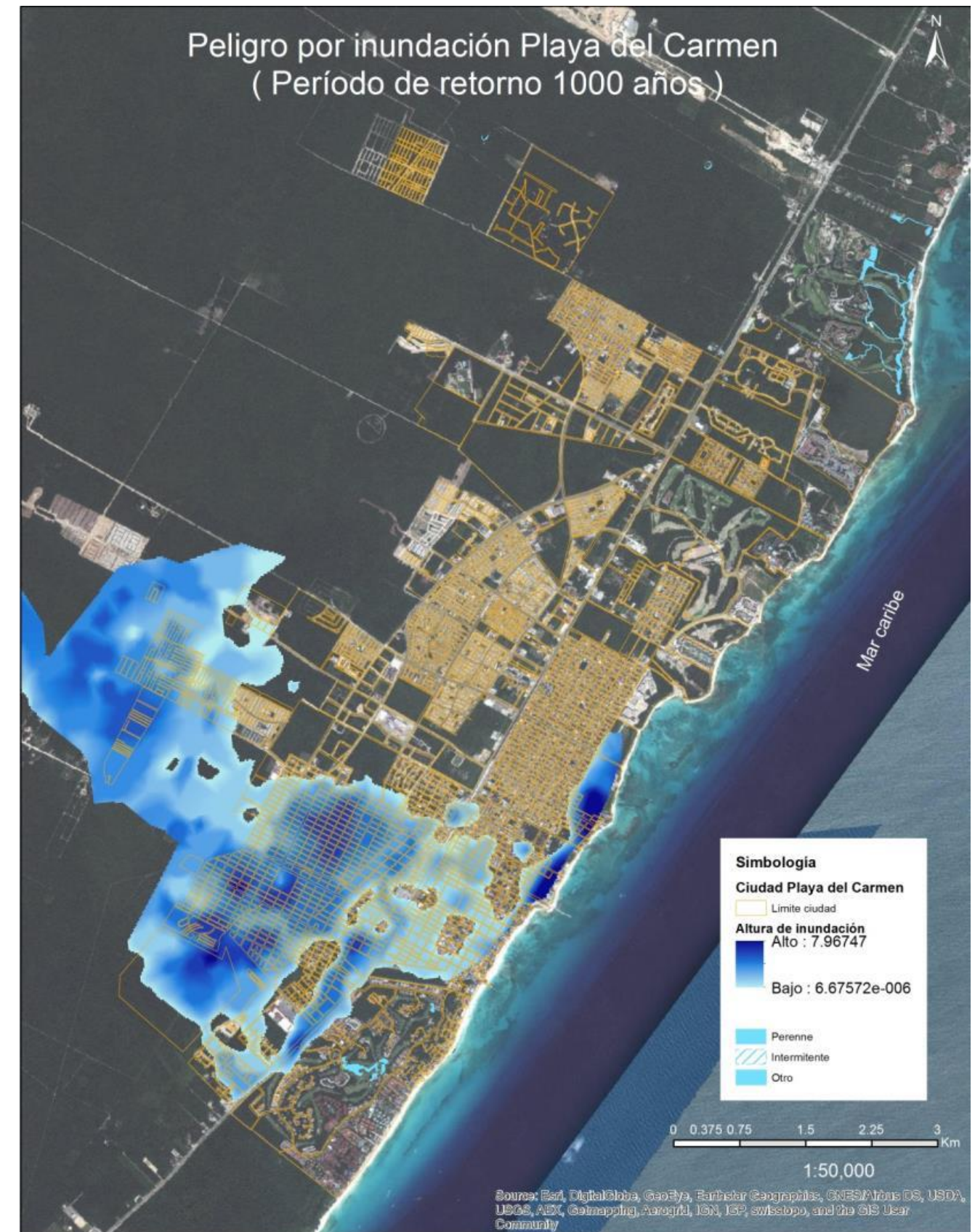


Figura 224.- Peligro por inundación Cd. Playa del Carmen, periodo de retorno 1000 años.

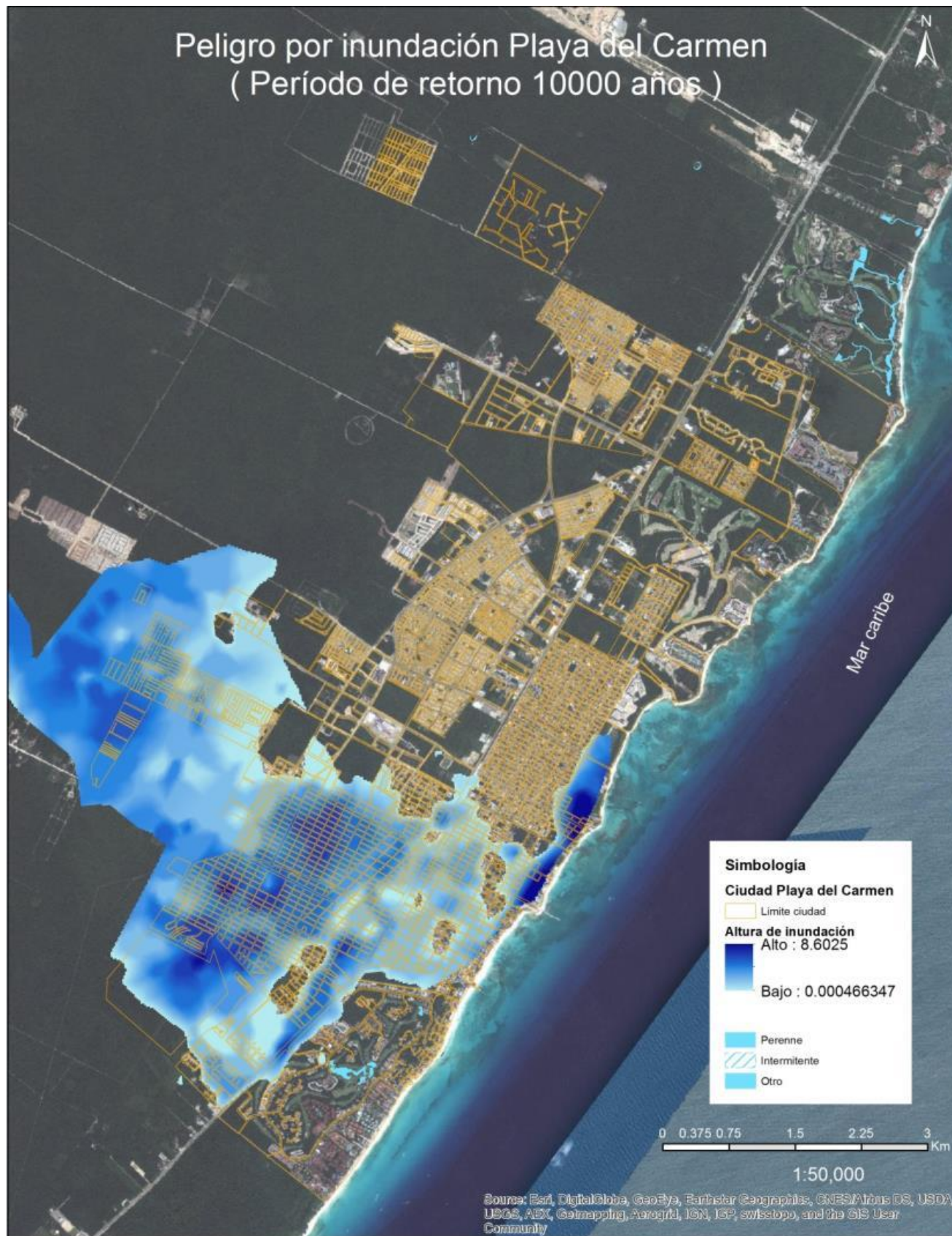


Figura 225.- Peligro por inundación Cd. Playa del Carmen, periodo de retorno 10000 años.

Como se observa en los mapas de inundación de la ciudad de Playa del Carmen, las zonas de inundación se presentan en la sur de la ciudad, entre un tiempo de retorno de 2 años a 10,000 años varía considerablemente independientemente de la altura de inundación, se puede estimar que la inundación afecta un 45% la superficie de la ciudad. Las zonas que se ven afectadas en la ciudad son en las colonias Misión de las Flores, Fundadores, Joya residencial, Ximbalkan, Galicia, y Luis Donaldo Colosio.

Los mapas anteriores son resultado de un análisis hidrológico, en donde se estimaron las zonas de inundación para cada ciudad de interés, en donde conforme el tiempo de retorno es mayor, la zona de inundación igual se ve más extensa, lo que refleja que el comportamiento de modelo es el adecuado.

Los análisis hidrológicos para la ciudad de Isla Mujeres, solo representan interés a partir de una lluvia de retorno de 20 años, con lo que solo una parte de la ciudad presenta una inundación. En la ciudad de Felipe Carrillo Puerto, se puede observar que a partir de una lluvia de retorno de 2 años se inunda la mayor parte de la ciudad, esto se debe a que la ciudad de Felipe Carrillo Puerto se encuentra dentro de una cuenca. Por otra parte, la cartografía de peligro de inundación generada para cada ciudad de interés constituye una importante herramienta de apoyo, que puede ser utilizada para la optimización de los planes de ordenamiento territorial de las ciudades; la optimización de los sistemas de alerta y emergencia; el diseño de obras de protección; y la evaluación del riesgo. Las medidas de prevención tales como manejo de cuencas, reforzamiento bordos, mantenimiento de colectores de aguas lluvias disminuyen las inundaciones. Los reglamentos sobre uso de suelo deben basarse en los mapas de peligro y en caso de construir viviendas en esos sitios de peligro por inundaciones ellas deben ser acondicionarlas para que no presenten daños de consideración.

4.2.2.5 Vulnerabilidad

Para estimar la vulnerabilidad física de la vivienda urbana, se utilizó la información recopilada en campo, misma que, como se explicó en capítulos anteriores, identifica el tipo de vivienda predominante en cada una de las manzanas de las principales ciudades del Estado de Quintana Roo. Con base en las combinaciones de materiales encontradas en las principales ciudades del estado, se clasificó a las viviendas en cinco tipos.

Tabla 94. Combinación de materiales encontrados en el estado de Quintana Roo y tipología asignada.

Combinación	Muros	Techos	Tipología asignada
1	Bahareque	Palma	III
2	Bahareque	Lámina	II

3	Bloque hueco de concreto	Palma	IV
4	Bloque hueco de concreto	Lámina	IV
5	Bloque hueco de concreto	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	V
6	Concreto colado	Lámina	IV
7	Concreto colado	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	V
8	Desecho	Lámina	I
9	Lámina de cartón	Lámina	I
10	Madera	Lámina	II
11	Madera	Palma	III
12	Piedra sobre piedra	Lámina	IV
13	Piedra sobre piedra	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	V
14	Piedra sobre piedra	Palma	IV
15	PVC relleno de concreto	Lámina	IV
16	Simple Piedra sobre piedra	Palma	IV
17	Simple Piedra sobre piedra	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	V

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el análisis realizado a nivel municipal, se asumió que todas las viviendas existentes en las ciudades son de un solo piso, ya que estas predominan en todo el estado. Lo anterior originó modificaciones en las funciones de vulnerabilidad para las viviendas tipo IV y V, puesto que la proporción de daños a menor altura del tirante de agua fue mayor que el establecido en la metodología del CENAPRED, que considera este tipo de viviendas como si fueran de dos niveles.

Así, se utilizaron las mismas funciones de vulnerabilidad que en el análisis realizado a nivel municipal. En donde sí se registró un cambio significativo fue en la valoración de los bienes expuestos, en este caso del menaje de las viviendas. Los montos sugeridos en la Guía del CENAPRED fueron ajustados utilizando la calculadora de inflación del INEGI, para así valorar el contenido promedio de una vivienda a precios del 2015.

Una vez realizado el ejercicio, se obtuvo una inflación acumulada de 38.44% para el periodo mencionado, por lo que los costos aproximados de menaje para cada tipo de vivienda quedaron de la siguiente manera:

Tabla 95. Actualización de costo de menaje con base en la inflación acumulada entre enero de 2007 y julio de 2015.

Tipo	Costo menaje zona urbana (Pesos)
I	17,305
II	69,220
III	69,220
IV	415,320
V	622,980

Fuente: Elaboración propia con información de CENAPRED e INEGI.

En las siguientes tablas se pueden observar las funciones de vulnerabilidad para cada tipo de vivienda, así como el porcentaje de daños estimados en el menaje, según la altura de la inundación.

Tabla 96. Función de vulnerabilidad para vivienda tipo I.

Vivienda Tipo I		
Elevación (metros)	Porcentaje de daños en el menaje	Función
0	0.00	Función de vulnerabilidad vivienda tipo I
0.2	0.04	

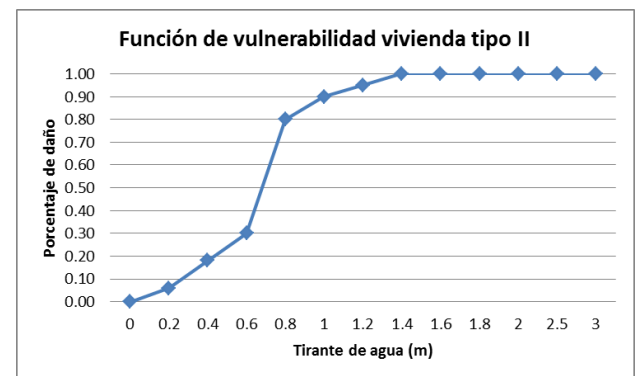
0.4	0.10
0.6	0.45
0.8	0.73
1	0.93
1.2	0.94
1.4	0.95
1.6	0.96
1.8	1.00
2	1.00
2.5	1.00
3	1.00

Fuente: Elaboración propia con información de Cenapred

Gráfica 72. Función de vulnerabilidad para vivienda Tipo I

Tabla 97. Función de vulnerabilidad para vivienda tipo II.

Vivienda Tipo II		
Elevación (metros)	Porcentaje de daños en el menaje	Función
0	0.00	Función de vulnerabilidad vivienda tipo II
0.2	0.06	
0.4	0.18	
0.6	0.30	
0.8	0.80	
1	0.90	
1.2	0.95	
1.4	1.00	
1.6	1.00	
1.8	1.00	
2	1.00	
2.5	1.00	
3	1.00	



Fuente: Elaboración propia con información de Cenapred.

Tabla 98. Función de vulnerabilidad para vivienda tipo III.

Vivienda Tipo III		
Elevación (metros)	Porcentaje de daños en el menaje	Función
0	0.00	Función de vulnerabilidad vivienda tipo III

0.2	0.04
0.4	0.08
0.6	0.30
0.8	0.75
1	0.80
1.2	0.96
1.4	0.97
1.6	0.99
1.8	1.00
2	1.00
2.5	1.00
3	1.00

Gráfica 74. Función de vulnerabilidad para vivienda tipo III

1.2	0.69
1.4	0.85
1.6	0.85
1.8	0.90
2	0.92
2.5	0.95
3	1.00

Gráfica 76. Función de vulnerabilidad para vivienda tipo IV

Fuente: Elaboración propia con información de Cenapred.

De acuerdo con la Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones urbanas del CENAPRED, se utilizó el siguiente código de colores para determinar el nivel de vulnerabilidad de cada manzana según el tipo de vivienda predominante en cada una de ellas.

Tabla 101. Índice de vulnerabilidad según el tipo de vivienda.

Tipo	Índice de vulnerabilidad	Color propuesto
I	Alto	Rojo
II	Medio-alto	Naranja
III	Medio	Amarillo
IV	Medio-bajo	Verde
V	Bajo	Blanco

Fuente: CENAPRED

Tabla 99. Función de vulnerabilidad para vivienda tipo IV.

Vivienda Tipo IV		Función
Elevación (metros)	Porcentaje de daños en el menaje	
0	0.00	
0.2	0.03	
0.4	0.06	
0.6	0.14	
0.8	0.50	
1	0.58	
1.2	0.70	
1.4	0.85	
1.6	0.85	
1.8	0.94	
2	1.00	
2.5	1.00	
3	1.00	

Gráfica 75. Función de vulnerabilidad para vivienda tipo IV

Tabla 100. Función de vulnerabilidad para vivienda tipo V.

Vivienda Tipo V		Función
Elevación (metros)	Porcentaje de daños en el menaje	
0	0.00	
0.2	0.03	
0.4	0.05	
0.6	0.14	
0.8	0.50	
1	0.59	

De acuerdo con los términos de referencia, el presente análisis únicamente se llevó a cabo en las ciudades de Cancún, Isla Mujeres, Playa del Carmen, Cozumel, Felipe Carrillo Puerto, Bacalar y Chetumal. A continuación, se detalla lo observado en cada una de éstas.

Cancún, Benito Juárez

La ciudad de Cancún es la más grande del estado de Quintana Roo, y actualmente el gobierno municipal de Benito Juárez identifica claramente cinco zonas que la conforman. La Zona Hotelera, el Centro, Puerto Juárez, Alfredo V. Bonfil y la Franja Ejidal, en esta última es donde habita la población más pobre, y en donde se encuentra la mayor proporción de asentamientos irregulares⁸⁶. El análisis de vulnerabilidad ante inundaciones se llevó a cabo en 8,731 manzanas, que incluyen las cinco zonas mencionadas anteriormente, únicamente se excluyó a aquellas manzanas en las que se observó infraestructura diferente a vivienda. Una vez explicado lo anterior, y con base en los materiales predominantes en cada una de las manzanas, se observó una vulnerabilidad ante inundaciones muy baja en la mayor parte de la ciudad. Sin embargo, si se analizan las funciones de vulnerabilidad, no existe mucha diferencia entre el porcentaje de daño según la altura del agua entre los diferentes tipos de vivienda. Así, aunque la vulnerabilidad se considere muy baja para la mayoría de las manzanas de acuerdo con la predominancia de los materiales utilizados en la construcción de las viviendas que las integran, aquellas que se encuentran dentro de zonas inundables probablemente tengan niveles de riesgo más altos que incluso las viviendas tipo I, ya que, en este caso particular, lo que incrementa potencialmente el riesgo es la exposición de los bienes expuestos y su valor.

⁸⁶ Para mayor información consultar. <http://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioCancun.pdf>

En términos generales, únicamente en la periferia de la ciudad se observaron niveles de vulnerabilidad elevados, tanto en la denominada franja ejidal, como hacia el Occidente de la ciudad, que es justamente hacia donde se está expandiendo la zona urbana.

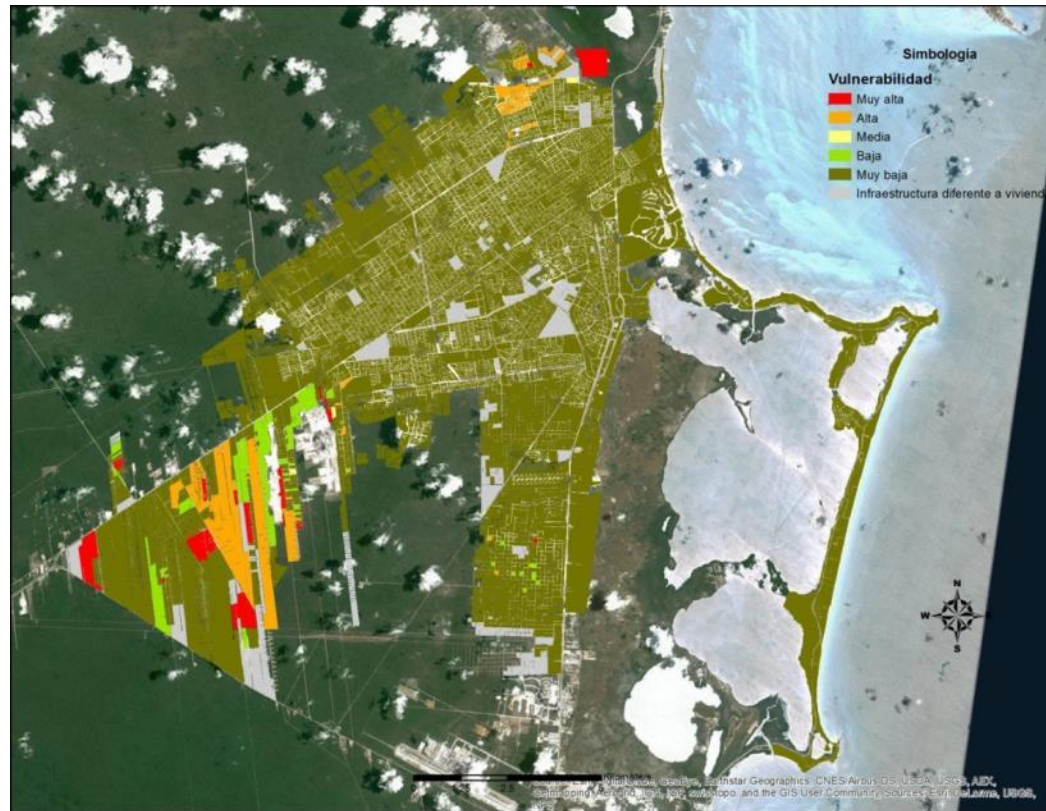


Figura 173. Vulnerabilidad ante inundación de la ciudad de Cancún.

Se estimó que aproximadamente 4,721 viviendas presentan condiciones de vulnerabilidad entre alta y muy alta, en ellas habitan alrededor de 13,636 personas. El valor estimado de los bienes expuestos (menaje de las casas) se estimó en 145,149 millones de pesos. (Ver Tabla 102).

Tabla 102. Identificación y valoración de bienes expuestos según nivel de vulnerabilidad ante inundaciones.

Concepto	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta	Infraestructura diferente a vivienda	Total
Número de manzanas	8,284	41	3	187	31	185	8,731
Número de viviendas	231,837	1,025	47	4,025	696	NA	237,630
Número aproximado de habitantes	623,695	2,867	107	11,661	1,975	NA	640,305
Valor de los bienes expuestos (Menaje de casa). (Millones de pesos)	144,429.8	425.7	3.3	278.6	12.0	NA	145,149.4

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI y Cenapred.

Isla Mujeres

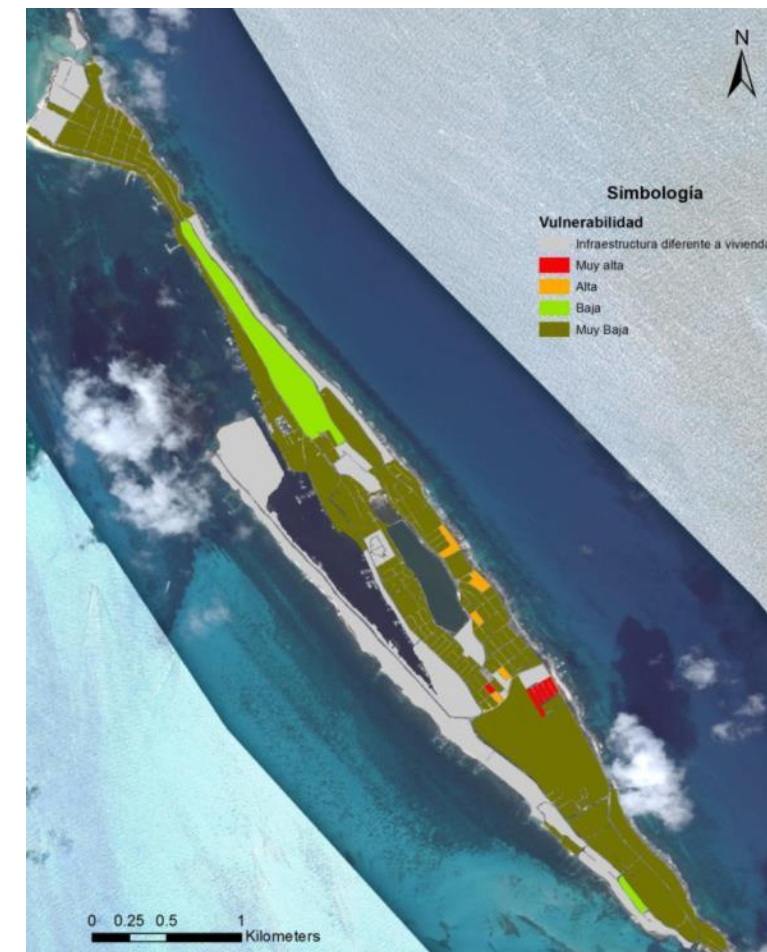


Figura 174. Vulnerabilidad ante inundación de la ciudad de Isla Mujeres.

La ciudad de Isla Mujeres es una de las más expuestas de la entidad, ya que se encuentra en una insula al Norte del Estado, que mide aproximadamente siete kilómetros de largo por uno de ancho y la mayor parte se encuentra urbanizada. El análisis de vulnerabilidad en la ciudad se llevó a cabo en 202 manzanas y en poco más del 80% los niveles observados fueron muy bajos. Al Este del municipio fue en donde se detectaron mayores niveles de vulnerabilidad ante inundación.

En toda la Isla, fueron 351 viviendas las que arrojaron niveles altos o muy altos de vulnerabilidad, en ellas habitan aproximadamente 1,077 personas. El valor estimado de los bienes expuestos (Menaje de casa), fue de 2,212 millones de pesos.

Tabla 103. Identificación y valoración de bienes expuestos según nivel de vulnerabilidad ante inundaciones.

Concepto	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta	Infraestructura diferente a vivienda	Total
Número de manzanas	165	2	0	5	7	23	202

Número de viviendas	3,433	145	0	138	213	NA	3,929
Número aproximado de habitantes	9,975	324	0	426	651	NA	11,376
Valor de los bienes expuestos (Menaje de casa). (Millones de pesos)	2,138.7	60.2	0.0	9.6	3.7	NA	2,212.2

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI y Cenapred.

Playa del Carmen, Solidaridad

De acuerdo con información del Censo de Población y Vivienda 2010, la ciudad de Playa del Carmen es la tercera más poblada del estado, sólo detrás de Cancún y Chetumal. Sin embargo, en los últimos cinco años el crecimiento poblacional de Playa del Carmen ha sido exponencial, ya que se ha convertido en un polo de atracción importante, lo que ha incidido en el asentamiento de población proveniente del interior de la República y de otros países en su territorio, por lo que es muy probable que actualmente sea la segunda ciudad más grande del estado.

El análisis de vulnerabilidad ante inundación en Playa del Carmen se llevó a cabo en un total de 2,235 manzanas. De acuerdo con los materiales predominantes en cada manzana, en la mayoría se detectaron niveles muy bajos. De hecho, en la ciudad únicamente se observaron dos niveles de vulnerabilidad (Muy bajo y alto).

Los niveles más elevados de vulnerabilidad ante inundaciones se localizaron en la periferia de la ciudad, al Norte y al Suroeste en la zona ejidal.



Figura 175. Vulnerabilidad ante inundación de la ciudad de Playa del Carmen.

El número de viviendas consideradas con una vulnerabilidad alta fue de 435, y en ellas habitan aproximadamente 909 personas. El valor de los bienes expuestos (Menaje de casa) se estimó en 38,892 millones de pesos.

Tabla 104. Identificación y valoración de bienes expuestos según nivel de vulnerabilidad ante inundaciones.

Concepto	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta	Infraestructura diferente a vivienda	Total
----------	----------	------	-------	------	----------	--------------------------------------	-------

Número de manzanas	2,145	0	0	31	0	59	2,235
Número de viviendas	62,429	0	0	435	0	NA	62,864
Número aproximado de habitantes	148,194	0	0	909	0	NA	149,103
Valor de los bienes expuestos (Menaje de casa). (Millones de pesos)	38,892.0	0.0	0.0	30.1	0.0	NA	38,922.1

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI y Cenapred.

El riesgo por inundación, además de calcularse en función del peligro y la vulnerabilidad, toma en cuenta los bienes expuestos, por lo que mientras la concentración de estos y su valor sea mayor, el riesgo será más elevado, situación que se observó en la ciudad de Playa del Carmen.

Cozumel

La ciudad de Cozumel también se encuentra ubicada en una ínsula, lo que aumenta su exposición considerablemente ante eventos hidrometeorológicos, particularmente frente a la ocurrencia de ciclones tropicales.

Una de las razones por las cuales la ciudad de Cozumel es la que menores niveles de vulnerabilidad física de la vivienda registra frente a la mayoría de los fenómenos, es la alta incidencia de ciclones tropicales en su territorio.

Lo anterior ha derivado en una concientización de la población que habita en la isla, puesto que emplean materiales resistentes en la edificación de sus viviendas, con el fin de que resistan el embate de fuertes vientos o lluvias intensas, peligros asociados a la ocurrencia de ciclones tropicales. El número de manzanas consideradas en el análisis de vulnerabilidad ante inundaciones fue de 1,082. En más del 90% de las manzanas de Cozumel, los niveles de vulnerabilidad ante inundación, asociados al tipo de vivienda se consideraron muy bajos. Únicamente en las colonias Juan Bautista de la V al Oeste de la ciudad y Colonos Cuzamil al Este se encontró una manzana con niveles altos en cada una.

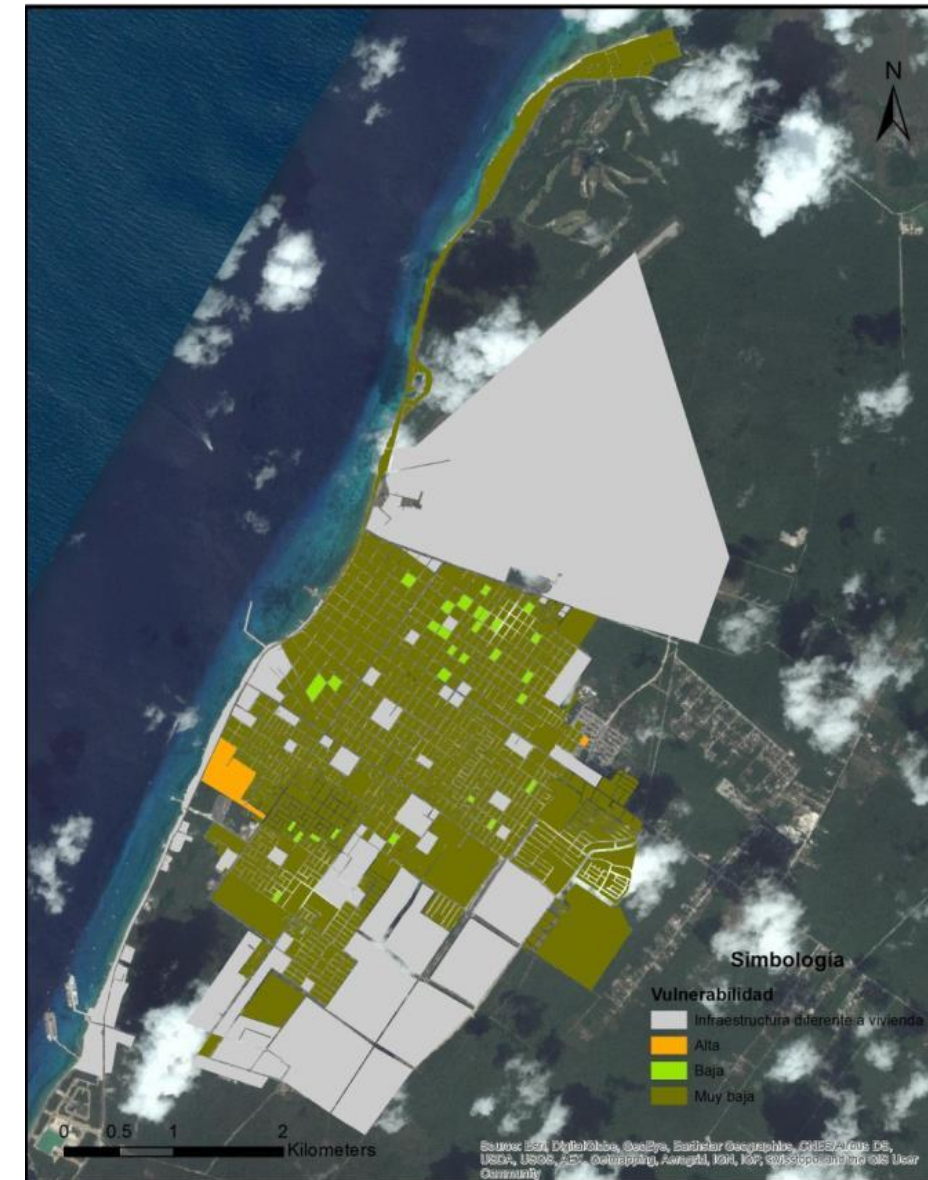


Figura 176. Vulnerabilidad ante inundación de la ciudad de Cozumel.

El número de viviendas que presentaron niveles altos de vulnerabilidad ante inundaciones en la ciudad de Cozumel fue de 73, en las cuales habitan un total de 193 personas que apenas representan en 0.3% del total de la población. Por otro lado, el valor del sistema expuesto (Menaje de casa) se estimó en 14,881 millones de pesos.

Identificación y valoración de bienes expuestos según nivel de vulnerabilidad ante inundaciones.

Concepto	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta	Infraestructura diferente a vivienda	Total
----------	----------	------	-------	------	----------	--------------------------------------	-------

Número de manzanas	985	29	0	2	0	66	1,082
Número de viviendas	23,880	1,164	0	73	0	NA	25,117
Número aproximado de habitantes	72,072	3,750	0	193	0	NA	76,015
Valor de los bienes expuestos (Menaje de casa). (Millones de pesos)	14,876.8	0.0	0.0	5.1	0.0	NA	14,881.8

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI y Cenapred.

Felipe Carrillo Puerto

La cabecera municipal de Felipe Carrillo Puerto se encuentra en el centro del estado, en la denominada zona maya. A pesar de que el uso de materiales de la región es común en la construcción de viviendas, particularmente en las localidades rurales, en la ciudad, la mayor parte de la población asentada habita en casas con una vulnerabilidad muy baja.

El análisis realizado para determinar la vulnerabilidad ante inundaciones se llevó a cabo en 612 manzanas. En la mayoría de ellas, se observaron niveles muy bajos de vulnerabilidad, aunque en las colonias Martínez Ross, Francisco May, Rafael Melgar y Javier Rojo Gómez, se detectaron algunas manzanas con niveles altos y muy altos.

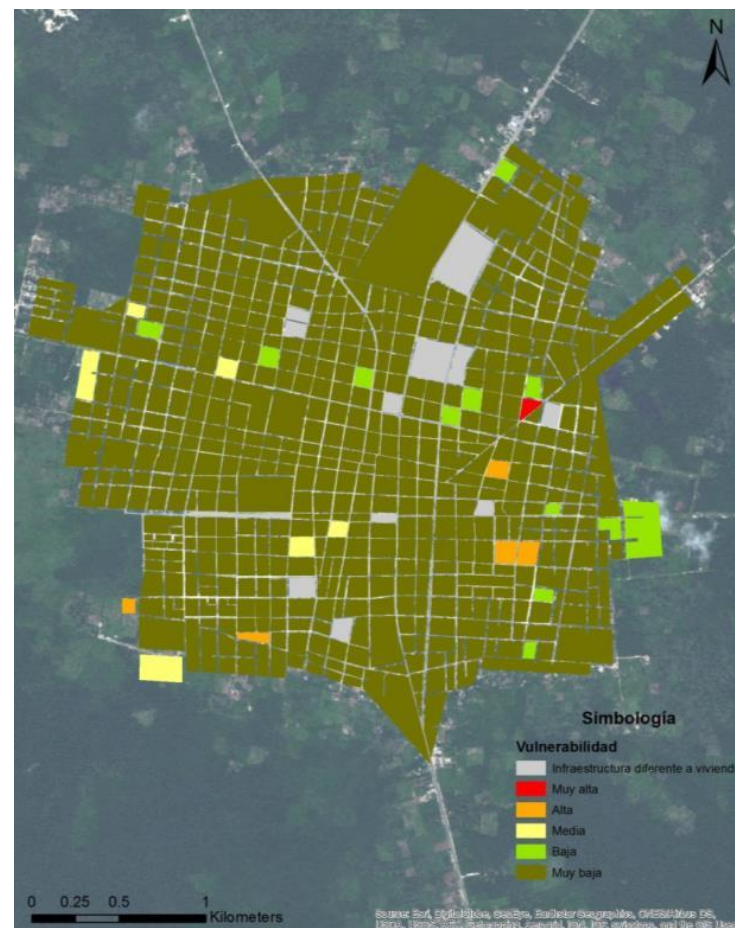


Figura 177. Vulnerabilidad ante inundación de la ciudad de Felipe Carrillo Puerto.

En total fueron 92 las viviendas que presentaron niveles altos y muy altos de vulnerabilidad ante inundaciones, mismas que son habitadas aproximadamente por 371 personas. La valoración de los bienes expuestos relacionados con el menaje de las viviendas y su tipología se estimó en 4,985 millones de pesos.

Tabla 105. Identificación y valoración de bienes expuestos según nivel de vulnerabilidad ante inundaciones

Concepto	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta	Infraestructura diferente a vivienda	Total
Número de manzanas	575	12	6	5	1	13	612
Número de viviendas	7,866	177	81	79	13	NA	8,216
Número aproximado de habitantes	24,549	557	232	308	63	NA	25,709
Valor de los bienes expuestos (Menaje de casa). (Millones de pesos)	4,900.4	73.5	5.6	5.5	0.2	NA	4,985.2

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI y CENAPRED.

A pesar de que el número de manzanas es significativo, el valor de los bienes expuestos no es tan elevado en comparación con otras ciudades, ya que en Felipe Carrillo Puerto, los terrenos en los que están construidas las viviendas suelen tener dimensiones más grandes que en el resto del estado, por lo que la concentración de bienes es menor en cada manzana.

Bacalar

La ciudad de Bacalar se encuentra ubicada al sur del Estado, en la ribera de la laguna del mismo nombre. Es una zona en la cual existe un número significativo de viviendas de descanso, pertenecientes a la población mejor acomodada, principalmente de Chetumal. Derivado de lo anterior, hay una alta predominancia de viviendas construidas con materiales resistentes y que, por ende, registraron niveles de vulnerabilidad ante inundación muy bajos. De las 293 manzanas que conforman la ciudad, cerca del 79% presentaron una vulnerabilidad muy baja, es decir, alrededor de 2,592 viviendas. En las colonias Luis Donaldo Colosio, Felipe Díaz, Serapio Flota Mass y Sor Juana Inés de la Cruz se detectaron algunas manzanas con niveles altos.



Figura 178. Figura 231.- Vulnerabilidad ante inundación de la ciudad de Bacalar.

El número de viviendas con niveles de vulnerabilidad ante inundación altos se estimó en 119, mismas que son habitadas por aproximadamente 459 personas. El valor de los bienes expuestos (menaje de casas) para la ciudad de Bacalar fue de 1,862 millones de pesos.

Tabla 106. Identificación y valoración de bienes expuestos según nivel de vulnerabilidad ante inundaciones.

Concepto	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta	Infraestructura diferente a vivienda	Total
Número de manzanas	231	37	3	8	0	14	293
Número de viviendas	2,592	573	18	119	0	NA	3,302
Número aproximado de habitantes	8,536	1,930	52	459	0	NA	10,977
Valor de los bienes expuestos (Menaje de casa). (Millones de pesos)	1,614.8	238.0	1.2	8.2	0.0	NA	1,862.2

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI y Cenapred.

Chetumal, Othón P. Blanco

Chetumal es la capital del Estado, y la ciudad más importante del sur de la entidad. Se localiza en el extremo sur del Estado, justo en la desembocadura del Río Hondo, hacia la Bahía de Chetumal. Su cercanía con Belice a derivado en cierta influencia en el uso de materiales para a construcción de viviendas, por lo que en la ciudad se pueden observar todavía un

número importante de viviendas estilo caribeño, construidas principalmente de madera.

Al igual que en la mayoría de las zonas urbanas analizadas, la vulnerabilidad ante inundaciones en Chetumal, estimada mediante la tipología de vivienda sugerida por el CENAPRED, arrojó que la mayor proporción presentan una vulnerabilidad muy baja. Sin embargo, se observaron niveles altos y muy altos en varias zonas de la ciudad.

Llama la atención la zona de asentamientos irregulares, ubicada al Noroeste de la ciudad, en la región conocida como La Sabana, ya que la mayoría de las viviendas allí construidas son de material de desecho o lámina, lo que las hace muy vulnerables ante prácticamente cualquier tipo de fenómeno. Otras colonias en las cuales algunas manzanas presentaron niveles altos y muy altos de vulnerabilidad ante inundaciones fueron Payo Obispo, Lagunas, Fraccionamiento Reforma 1977 y Comité Proterritorio.



Figura 179. Vulnerabilidad ante inundación de la ciudad de Chetumal.

El número de viviendas con niveles de vulnerabilidad ante inundación entre altos y muy altos para la ciudad de

Chetumal, se estimó en 2,632, en las cuales habita una población estimada en 8,524 personas. Por otro lado, la cuantificación de los bienes expuestos con base en el menaje promedio de cada tipo de vivienda dio como resultado 29,429 millones de pesos.

Con la información anterior, se crearon los mapas de daños asociados para las siete ciudades, en los cuales se estimó el impacto que tendría un evento para cada uno de los periodos de retorno. Los criterios utilizados para determinar el nivel de daños en cada manzana se observan en la siguiente tabla.

Tabla 107. Identificación y valoración de bienes expuestos según nivel de vulnerabilidad ante inundaciones.

Concepto	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta	Infraestructura diferente a vivienda	Total
Número de manzanas	2,370	11	1	141	8	34	2,565
Número de viviendas	46,750	313	2	2,485	147	NA	49,697
Número aproximado de habitantes	140,206	1,028	5	8,010	514	NA	149,763
Valor de los bienes expuestos (Menaje de casa). (Millones de pesos)	29,124.3	130.0	0.1	172.0	2.5	NA	29,429.0

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI y Cenapred.

4.2.2.6 Riesgo

El riesgo por inundación en las zonas urbanas de Quintana Roo, se estimó mediante el cruce de información sobre el peligro, la vulnerabilidad y el valor del sistema expuesto. Así, se logró valorar los posibles daños asociados a los diferentes periodos de retorno para las ciudades de Bacalar, Cancún, Chetumal, Cozumel, Felipe Carrillo Puerto, Isla Mujeres y Playa del Carmen. El primer paso para estimar el riesgo fue obtener la elevación alcanzada por el agua para la ubicación de cada manzana mediante el mapa de peligro, ya que la metodología del CENAPRED utiliza este parámetro como uno de los componentes principales del riesgo por inundación.

Posteriormente, se utilizaron los mapas de vulnerabilidad y sus correspondientes funciones para estimar la proporción de daños asociados a cada tipo de vivienda, según la altura de la inundación.

El siguiente paso fue estimar el valor del sistema expuesto de cada manzana, de acuerdo con el tipo de vivienda predominante y el número de viviendas existentes. Los valores asignados para cada tipo de vivienda se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 108. Valor asignado para cada tipo de vivienda.

Tipo	Pesos
I	17,305
II	69,220
III	69,220
IV	415,320
V	622,980

Fuente: Elaboración propia con información de CENAPRED e INEGI

Tabla 109. Criterios para determinar los niveles de riesgo.

Nivel de daños	Pesos
Muy alto	Más de 20 millones
Alto	Entre 10.1 y 20 millones
Medio	Entre 5.1 y 10 millones
Bajo	Entre 2.1 y 5 millones
Muy bajo	Menos de 2 millones

Por último, para obtener el riesgo se calculó la probabilidad de ocurrencia de un evento, según su periodo de retorno. Cabe señalar que mientras más amplio sea el periodo de retorno, la probabilidad de ocurrencia disminuye considerablemente, lo que se refleja directamente en el riesgo, como se observará en el análisis de resultados de cada municipio.

La expresión para calcular el riesgo es la siguiente⁸⁷:

$$R(i) = C P(i) V(i)$$

En donde:

R(i) es el Riesgo para el próximo evento con periodo de retorno "i" en pesos.

C es el costo de la vivienda en función de su tipología en pesos.

P(i) es la probabilidad de ocurrencia del evento con periodo de retorno (i), adimensional.

V(i) es la vulnerabilidad de cada vivienda, adimensional.

A continuación, se presenta un breve análisis para cada uno de los municipios. Aunque se elaboraron mapas de daños y riesgo para todos los periodos de retorno mencionados anteriormente, en el presente informe sólo se muestran los de 2 y 100 años para ilustrar la situación de cada municipio, los demás están disponibles en el proyecto.

Bacalar

La ciudad de Bacalar se ubica en el Sur del estado de Quintana Roo, aproximadamente a 39 kilómetros de Chetumal. El cálculo de riesgo por inundación se llevó a cabo en 293 manzanas. El monto de daños asociados va de 139.7 millones de pesos para el periodo de retorno de 2 años a 262.9 millones para el de 10 mil años. Sin embargo el riesgo para el periodo de retorno de 2 años se estimó en 83.8 millones de pesos, y para el de 10 mil años apenas alcanzó los 26,294 pesos (Tabla 109).

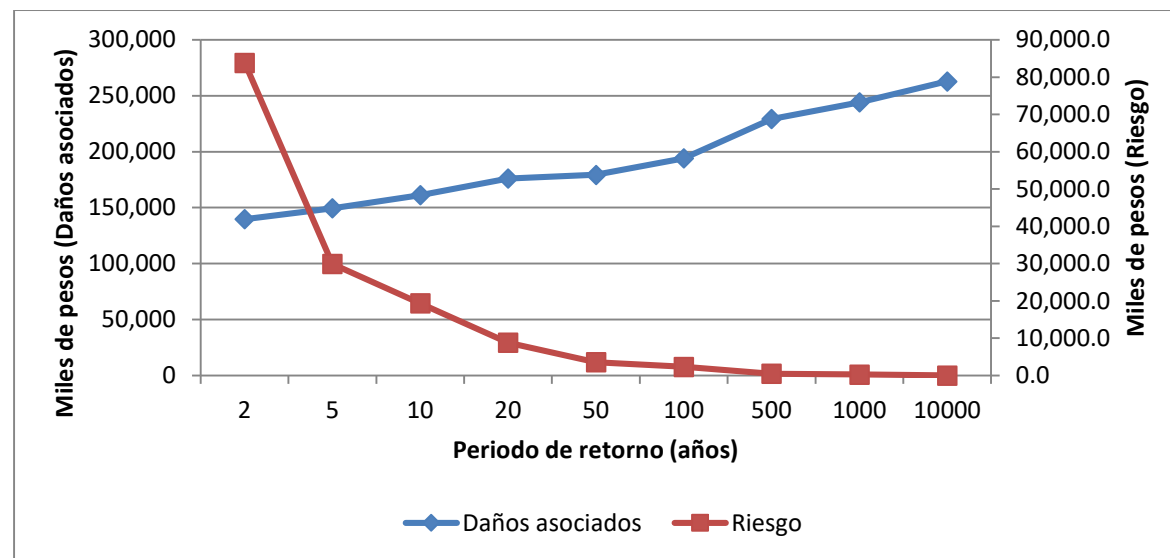
Tabla 110. Resultado del análisis de riesgo en la ciudad de Bacalar para diferentes periodos de retorno.

Periodo de retorno	Intensidad (mm en 24h)	Probabilidad de ocurrencia	Daños asociados (Miles de pesos)	Riesgo (Miles de pesos)
--------------------	------------------------	----------------------------	----------------------------------	-------------------------

2	90	0.6000	139,733	83,839.8
5	123	0.2000	149,524	29,904.8
10	154	0.1200	161,172	19,340.6
20	187	0.0500	176,032	8,801.6
50	225	0.0200	179,305	3,586.1
100	251	0.0120	194,163	2,329.9
500	308	0.0020	229,261	458.5
1000	332	0.0010	244,084	244.1
10000	380	0.0001	262,948	26.3

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, conforme aumenta el periodo de retorno, la intensidad de lluvia es mayor, y por ende el tirante de inundación crece también, por lo que se observa un incremento en los daños. Por otro lado, la probabilidad de ocurrencia decrece conforme aumenta el periodo de retorno, lo que a su vez se ve reflejado en una disminución del riesgo.



Gráfica 77. Variación de los daños y el riesgo en función del periodo de retorno para la ciudad de Bacalar.

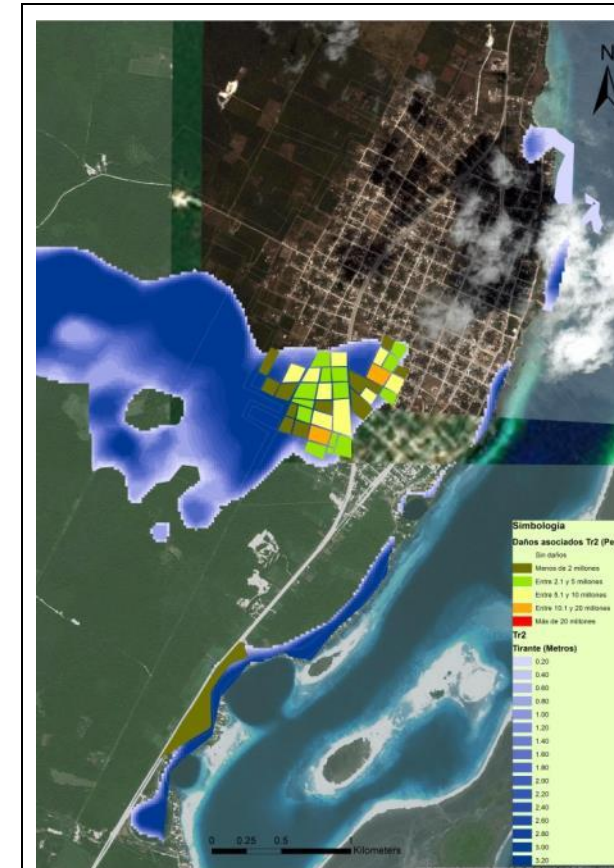


Figura 180. Figura 233.- Daños asociados para un evento con periodo de retorno de 2 años

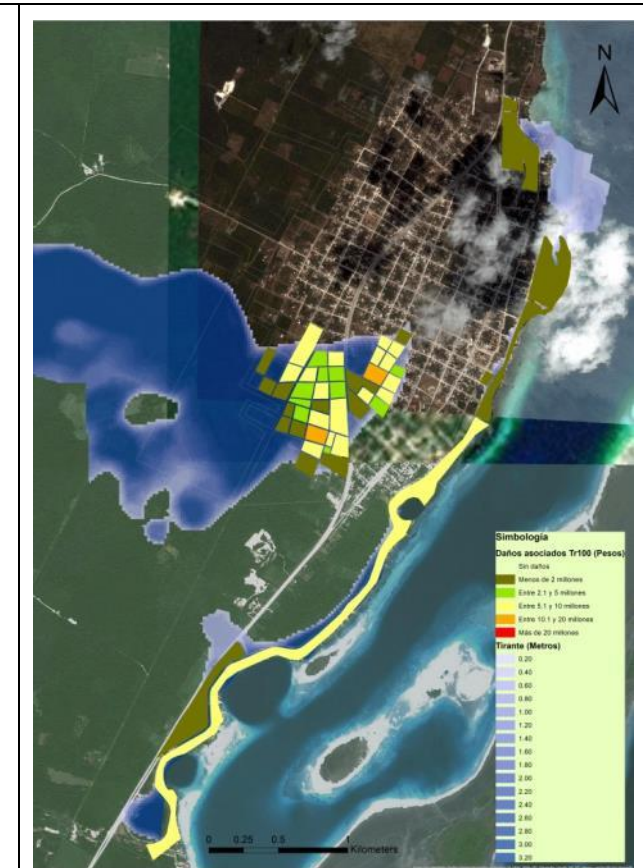


Figura 181. Figura 234.- Daños asociados para un evento con periodo de retorno de 100 años

En cuanto al riesgo, para el periodo de retorno de dos años, se observan daños más significativos que para el de 100. El riesgo per cápita para el primer caso es de 7,589 pesos, y para el segundo de poco más de 210 pesos (**iError! No se encuentra el origen de la referencia.233 y 234**).

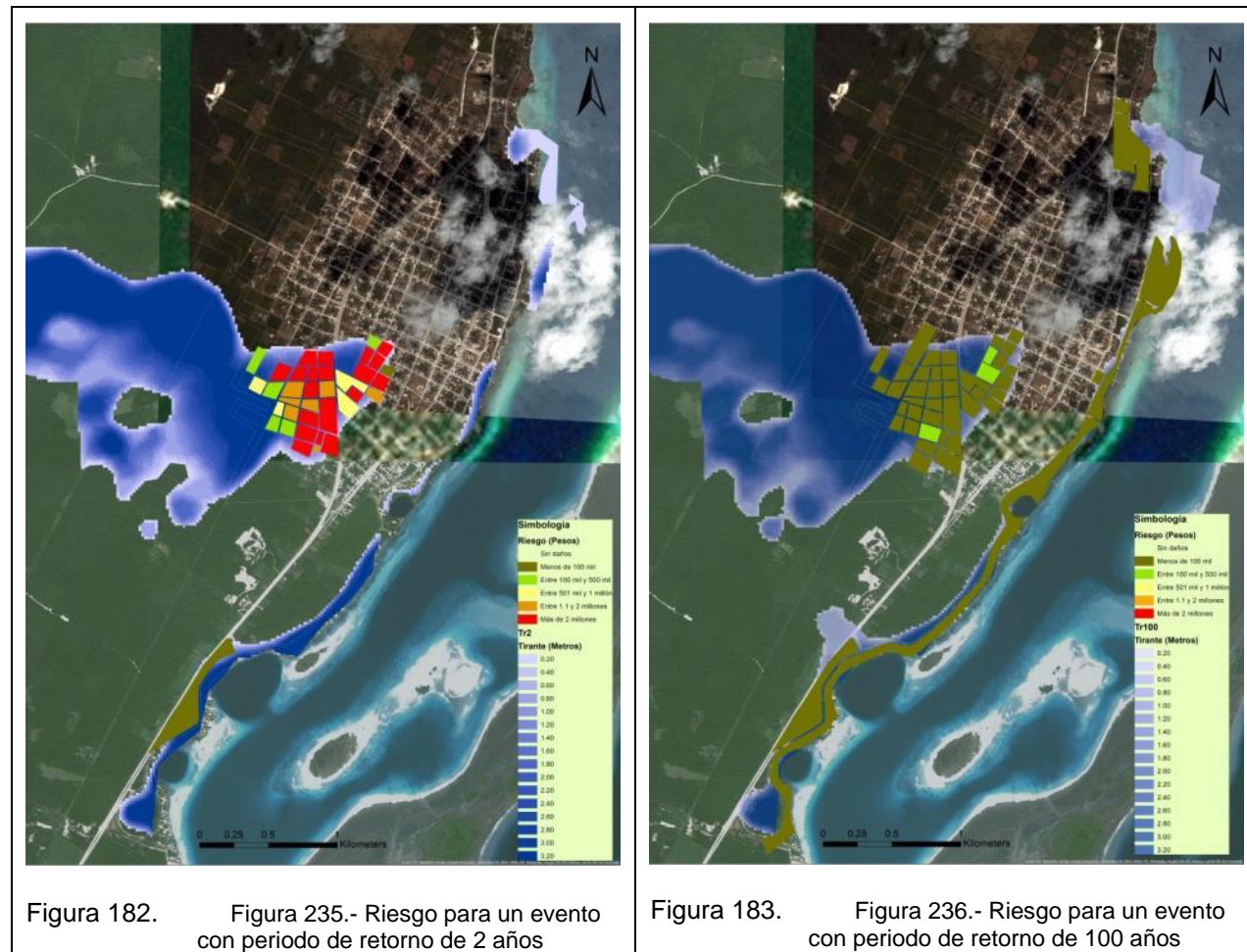


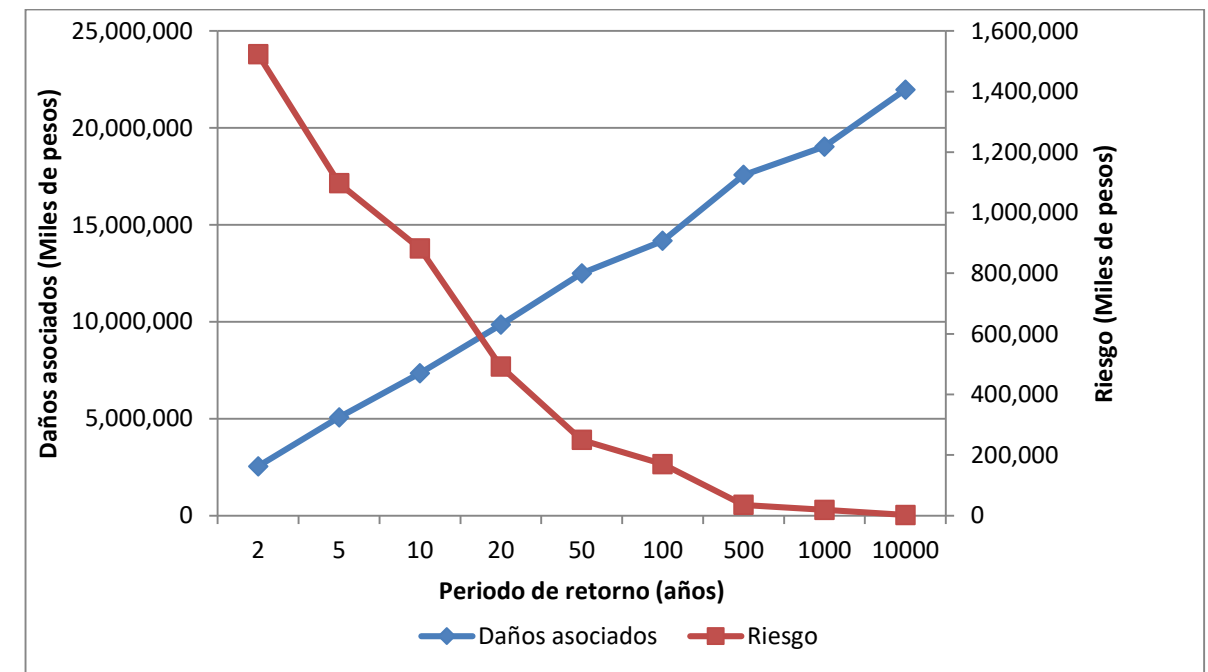
Figura 182. Figura 235.- Riesgo para un evento con periodo de retorno de 2 años

Figura 183. Figura 236.- Riesgo para un evento con periodo de retorno de 100 años

Cancún

La ciudad de Cancún es la más grande del Estado, y se ubica al Norte de la entidad. Cuenta con una población de 643,106 habitantes aproximadamente. De acuerdo con el análisis realizado, los daños asociados a un periodo de retorno de 2 años se estimaron en 2,538.6 millones de pesos, mientras para el de 10 mil años ascendieron a 21,974.1 millones. Contrariamente, el riesgo para el periodo de retorno de 2 años se estimó en 1,523.2 millones y para el de 10 mil en 2.2 millones aproximadamente..

2	91	0.6000	2,538,606	1,523,163
5	127	0.2000	5,062,765	1,097,181
10	162	0.1200	7,345,636	881,476
20	201	0.0500	9,845,349	492,267
50	243	0.0200	12,496,035	249,921
100	272	0.0120	14,174,298	170,092
500	336	0.0020	17,573,746	35,147
1000	363	0.0010	19,035,535	19,036
10000	424	0.0001	21,974,162	2,197

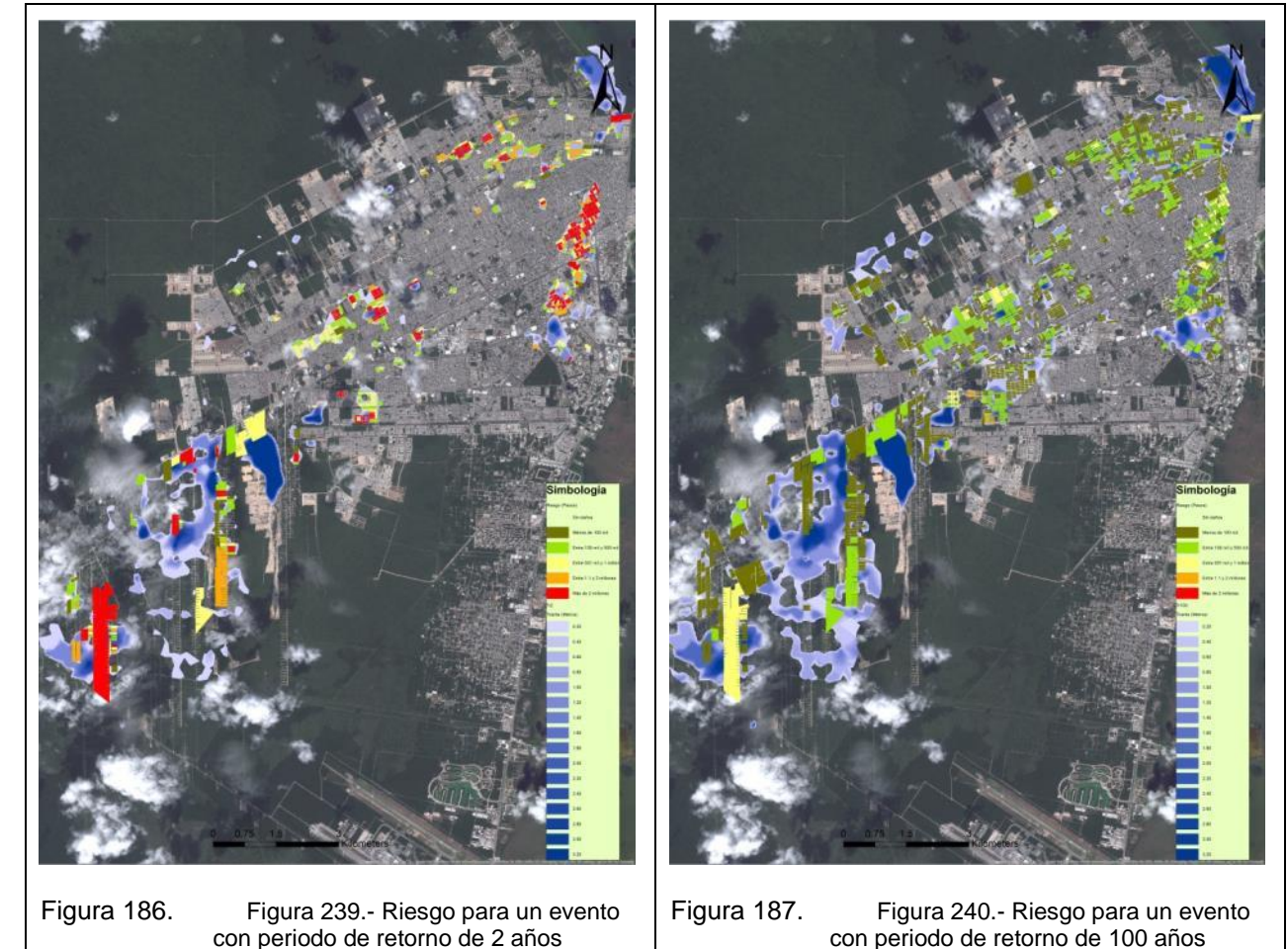
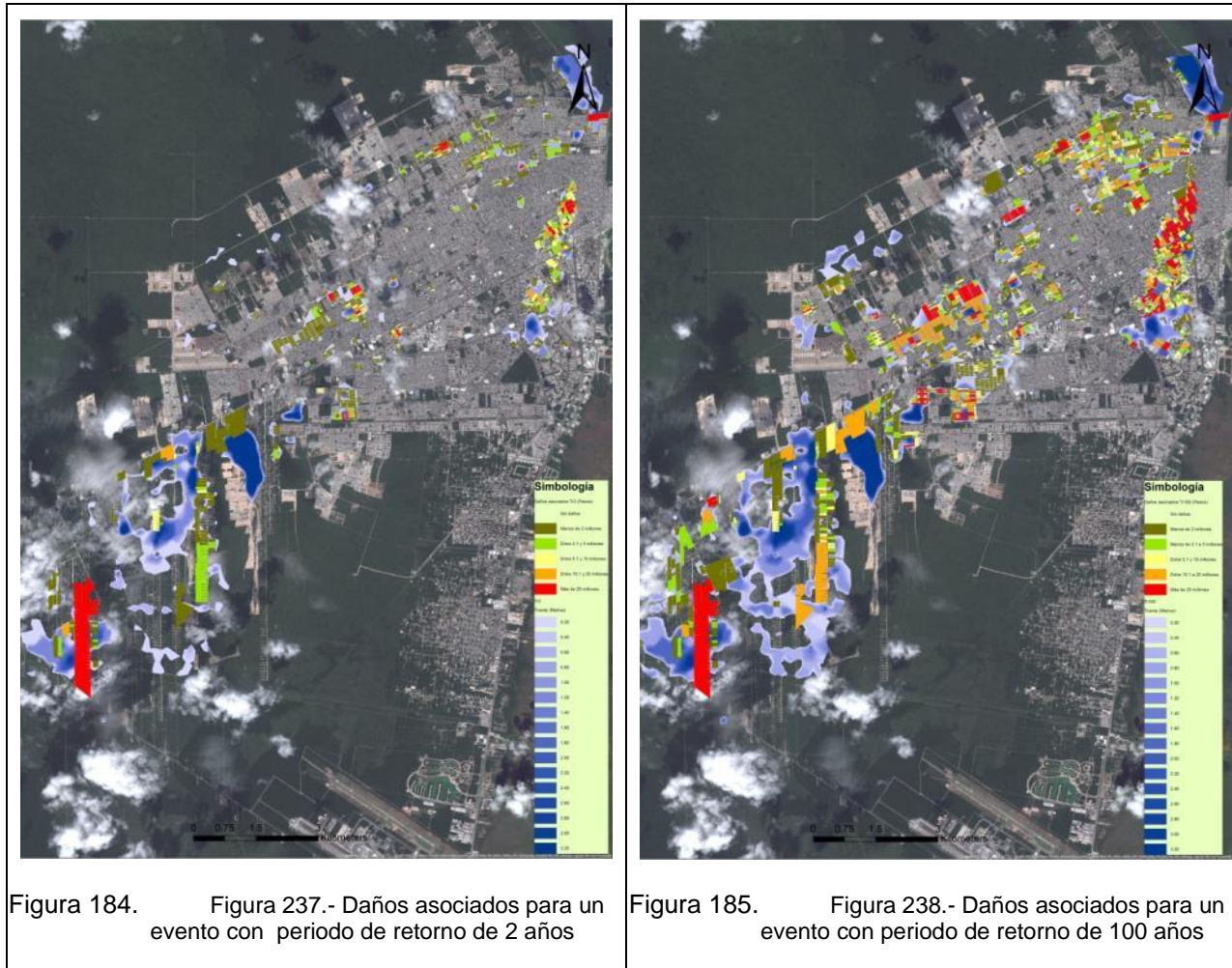


Gráfica 78. Variación de los daños y el riesgo en función del periodo de retorno para la ciudad de Cancún.

Los mapas de daños asociados para periodos de retorno de 2 y 100 años, muestran claramente el incremento de los mismos. Mientras que en el primero se observan pocas manzanas en color rojo, en el segundo aumenta el área de inundación, el tirante de la misma, y por ende los daños (figuras 237 y 238).

Tabla 111. Resultado del análisis de riesgo en la ciudad de Cancún para diferentes periodos de retorno.

Periodo de retorno	Intensidad (mm en 24h)	Probabilidad de ocurrencia	Daños asociados (Miles de pesos)	Riesgo (Miles de pesos)
--------------------	------------------------	----------------------------	----------------------------------	-------------------------



Chetumal

La ciudad de Chetumal, además de ser la capital del Estado, es la más grande del Sur de la entidad. En 2010 era habitada por 151,243 habitantes de acuerdo con datos del INEGI. Los daños asociados para un evento con periodo de retorno de 2 años se estimaron en 1,987.4 millones de pesos, mientras que para el de 100 años ascienden a 5,671 millones. Los datos sobre riesgo arrojaron una cifra de 1,195.5 millones de pesos para el periodo de retorno de dos años y 567 mil para el de 10 mil años (Tabla 111 y **iError! No se encuentra el origen de la referencia.**).

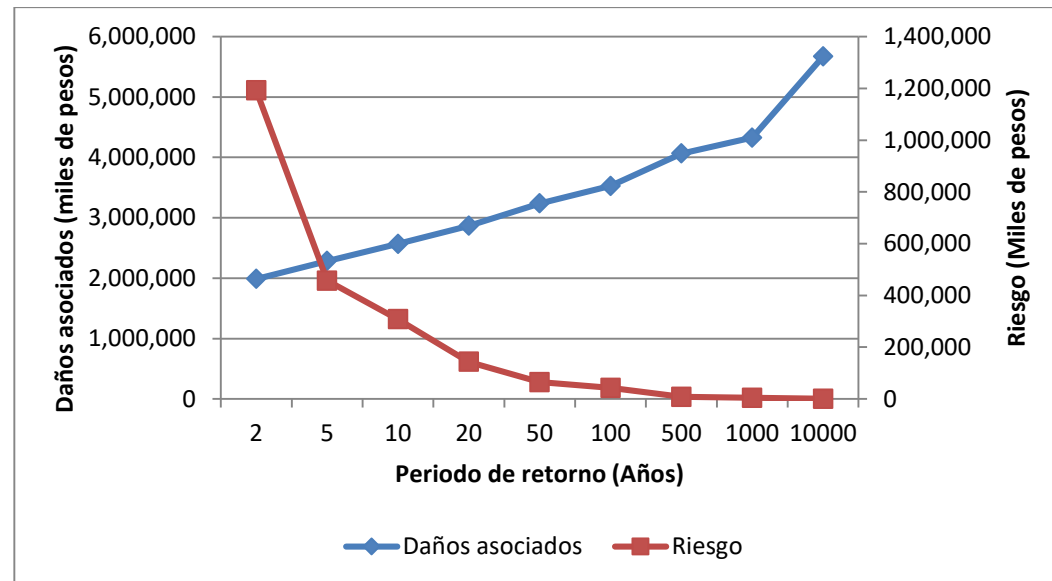
En relación con el riesgo, para el periodo de retorno de dos años, se observaron los mayores niveles en las Supermanzanas 75, 66, 65, 63 y 26, así como en la región 75 y 518. En esta última, en la colonia Vista Hermosa, se ubicó la manzana que registró el riesgo más alto estimado en poco más de 5.3 millones de pesos.

Para el periodo de retorno de 100 años, el riesgo disminuye considerablemente, ya que la probabilidad de ocurrencia de un evento de este tipo es apenas de 0.012, y aunque aumenta considerablemente el área afectada, únicamente tres manzanas rebasan el millón de pesos. La manzana con niveles más altos de riesgo suma 1.6 millones de pesos, ésta se ubica en la región 520 en el fraccionamiento Villas del Caribe (figuras 238 y 240), el riesgo per cápita para los periodos de retorno de 2 y 100 años se estimó en 2,368 y 264.

Tabla 111.- Resultado del análisis de riesgo en la ciudad de Chetumal para diferentes periodos de retorno.

Periodo de retorno	Intensidad (mm en 24h)	Probabilidad de ocurrencia	Daños asociados (Miles de pesos)	Riesgo (Miles de pesos)
2	119	0.6000	1,987,427	1,192,456
5	163	0.2000	2,284,132	456,826
10	204	0.1200	2,566,980	308,038
20	298	0.0500	2,866,253	143,313
50	332	0.0200	3,236,721	64,734
100	365	0.0120	3,525,614	42,307
500	408	0.0020	4,064,421	8,129
1000	440	0.0010	4,325,590	4,326
10000	541	0.0001	5,671,622	567

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 79. Variación de los daños y el riesgo en función del periodo de retorno para la ciudad de Chetumal.

Al observar los mapas de daños asociados, se identifican áreas extensas de la ciudad con problemas de inundaciones desde eventos con periodo de retorno de dos años. Para los de periodo de retorno de 100 años el impacto económico se incrementa, ya que a pesar de que el área afectada no se extiende mucho, las profundidades sí aumentan, lo que se refleja en el incremento de los daños (Figuras 241 y 242).

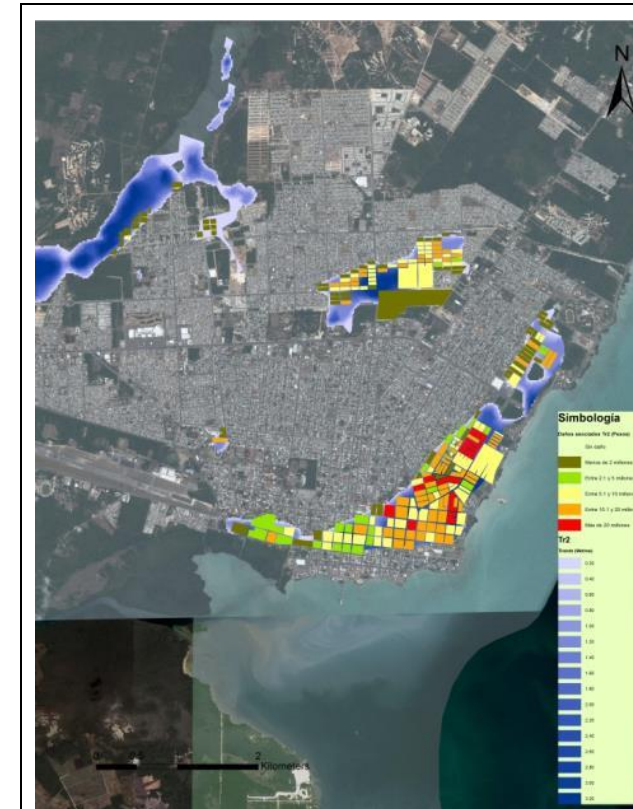


Figura 188. Daños asociados para un evento con periodo de retorno de 2 años

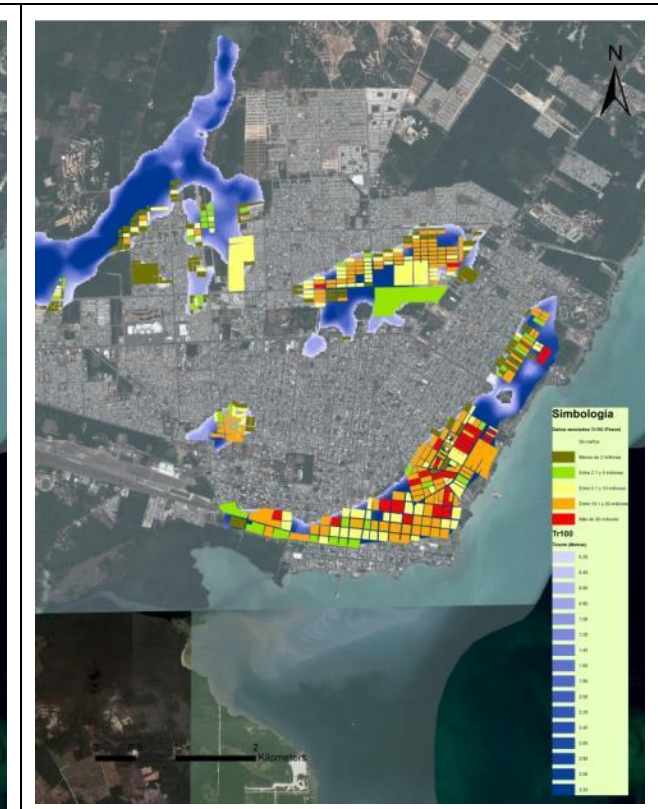


Figura 189. Daños asociados para un evento con periodo de retorno de 100 años

En cuanto al riesgo, para el periodo de retorno de dos años se calculó en 1,192.5 millones de pesos. Para el de 100, éste disminuyó a tan sólo 42.3 millones, es decir que el riesgo per cápita se calculó en 7,884 y 279 pesos respectivamente.

Las colonias Plutarco Elías Calles, Barrio Bravo, Primera Legislatura, y Comité Proterritorio son las que registraron los niveles de riesgo más elevados. La mayoría de éstas se encuentran cercanas a la línea de costa, por lo que en un escenario de huracán, en los cuales los niveles de precipitación sobrepasen los 365 mm en 24 horas, las afectaciones podrían ser severas, ya que aunado a los daños que se registren por las inundaciones, habría que sumar los de la marea de tormenta y los fuertes vientos (Figuras 243 y 244iError! No se encuentra el origen de la referencia.).

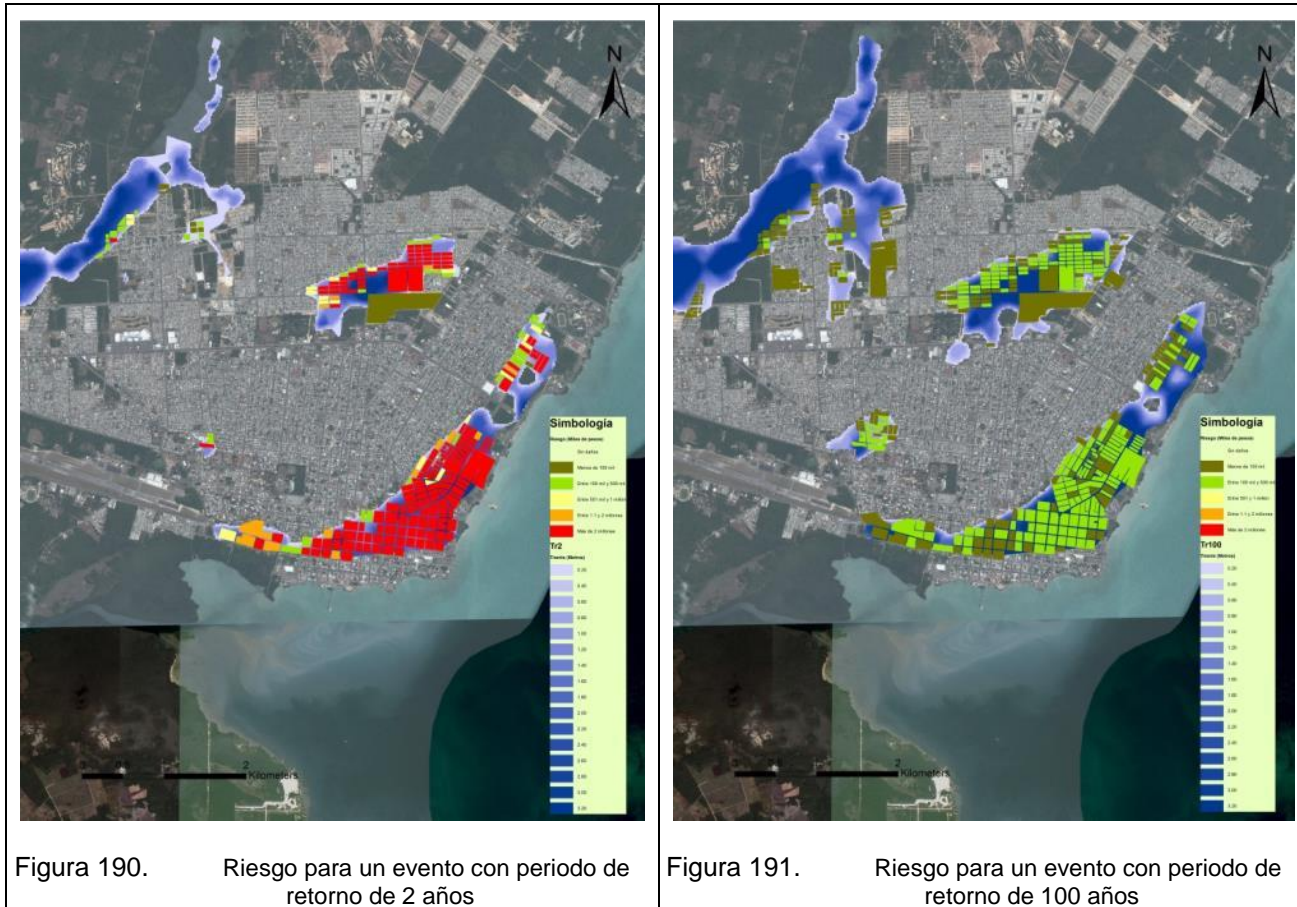
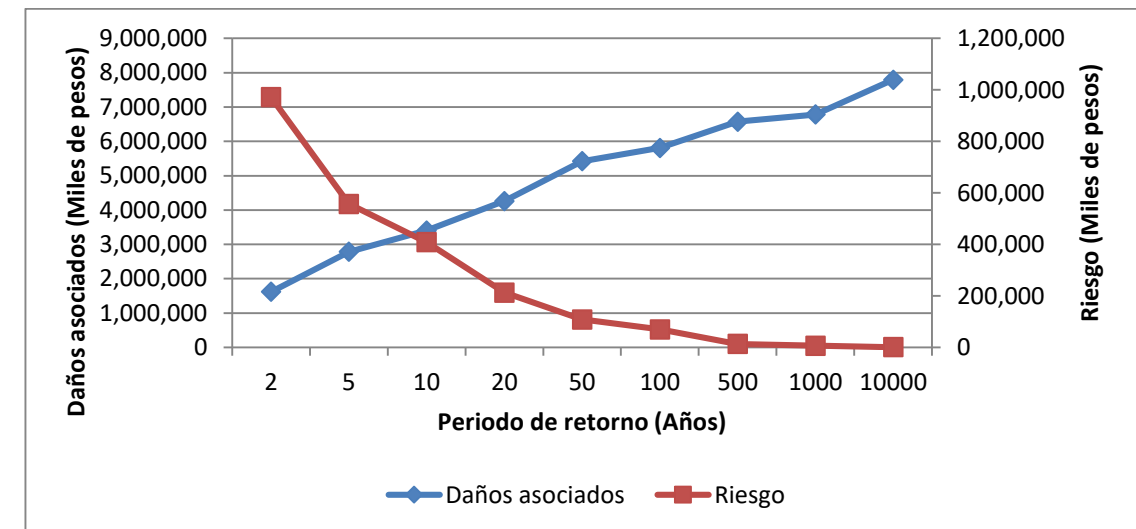


Figura 190. Riesgo para un evento con periodo de retorno de 2 años

Figura 191. Riesgo para un evento con periodo de retorno de 100 años

5	116	0.2000	2,784,351	556,870
10	144	0.1200	3,404,590	408,551
20	182	0.0500	4,260,905	213,045
50	230	0.0200	5,420,597	108,412
100	261	0.0120	5,807,417	69,689
500	329	0.0020	6,571,733	13,143
1000	358	0.0010	6,785,884	6,786
10000	453	0.0001	7,796,954	780



Gráfica 80. Variación de los daños y el riesgo en función del periodo de retorno para la ciudad de Cozumel

Cozumel

De acuerdo con el INEGI, en 2010 la ciudad de Cozumel era habitada por 77,236 personas. En el análisis elaborado se estimaron daños que van desde 1,619.7 millones de pesos para eventos con periodo de retorno de dos años, hasta 7,797.0 millones para los de 10 mil años. El riesgo decrece mientras más amplio es el periodo de retorno, este va de 971.8 millones a 780 mil pesos, para 2 y 10 mil años respectivamente (tabla 112).

Los mayores daños asociados a un periodo de retorno de dos años se concentraron al Oriente de la ciudad, sin embargo una parte importante de la ciudad resulta afectada. Para el periodo de retorno de 100 años, el incremento tanto de las zonas de inundación como de los daños es notable. El Fraccionamiento Emiliano Zapata, es en donde se ubicaron las manzanas con más daños asociados (Figuras 245 y 246).

Tabla 112. Resultado del análisis de riesgo en la ciudad de Cozumel para diferentes periodos de retorno.

Periodo de retorno	Intensidad (mm en 24h)	Probabilidad de ocurrencia	Daños asociados (Miles de pesos)	Riesgo (Miles de pesos)
2	86	0.6000	1,619,659	971,795

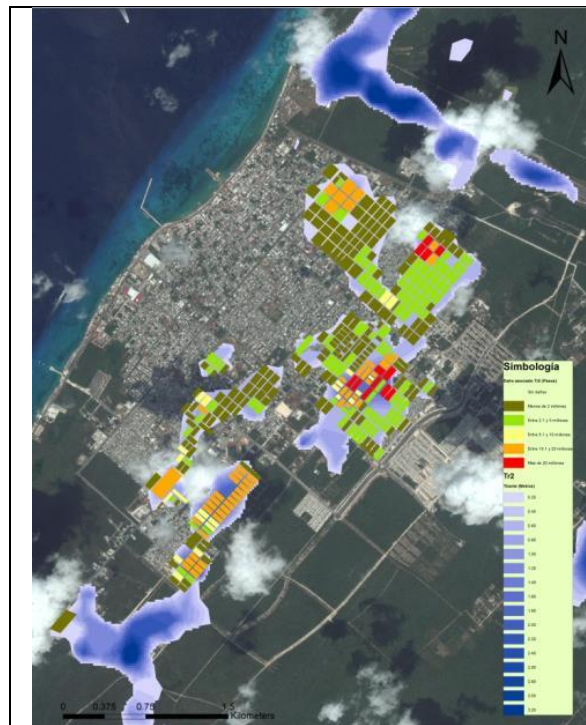


Figura 192. Daños asociados para un evento con periodo de retorno de 2 años

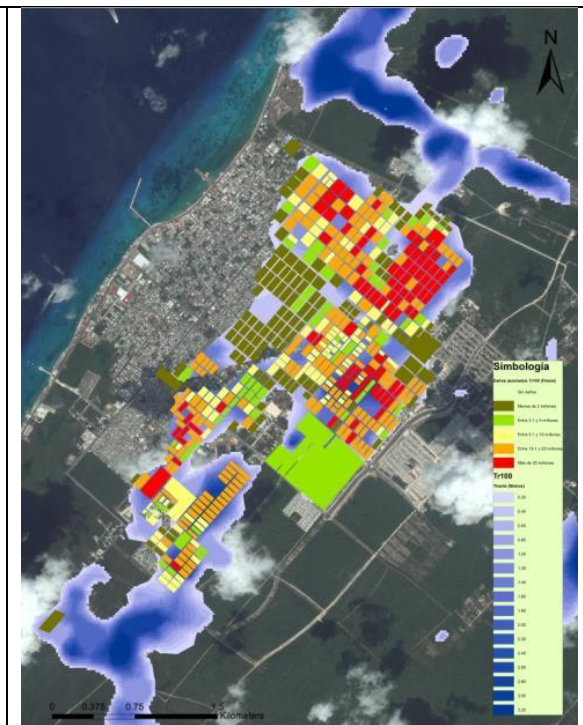


Figura 193. Daños asociados para un evento con periodo de retorno de 100 años

retorno de 100 años	retorno de 100 años

El riesgo para el periodo de retorno de 2 años es alto, ya que en 132 manzanas superó los 2 millones de pesos. Para el periodo de retorno de 100 años el riesgo no supera los 500 mil pesos en ninguna manzana. El riesgo per cápita se calculó en 12,582 pesos para un periodo de retorno de 2 años y en 902 pesos para el de 100. (Figuras 247 y 248).

Felipe Carrillo Puerto

La ciudad de Felipe Carrillo Puerto es habitada por 25,744 personas, de acuerdo con cifras del INEGI, y es una de las que presenta problemas más graves de inundación. Se calcularon daños que van desde 2,206.2 millones de pesos para el periodo de retorno de dos años, hasta 4,778.3 para el de 10 mil. El riesgo decrece de 1,323.7 millones para para el primer caso a 478 mil pesos para el segundo (**iError! No se encuentra el origen de la referencia. y iError! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Tabla 113. Resultado del análisis de riesgo en la ciudad de Felipe Carrillo Puerto para diferentes periodos de retorno.

Periodo de retorno	Intensidad (mm en 24h)	Probabilidad de ocurrencia	Daños asociados (Miles de pesos)	Riesgo (Miles de pesos)
2	87	0.6000	2,206,215	1,323,729
5	119	0.2000	2,824,619	564,924
10	149	0.1200	3,240,778	388,893
20	181	0.0500	3,604,746	180,237
50	217	0.0200	4,026,856	80,537
100	242	0.0120	4,169,922	50,039
500	297	0.0020	4,439,373	8,879
1000	320	0.0010	4,537,499	4,537
10000	414	0.0001	4,778,349	478

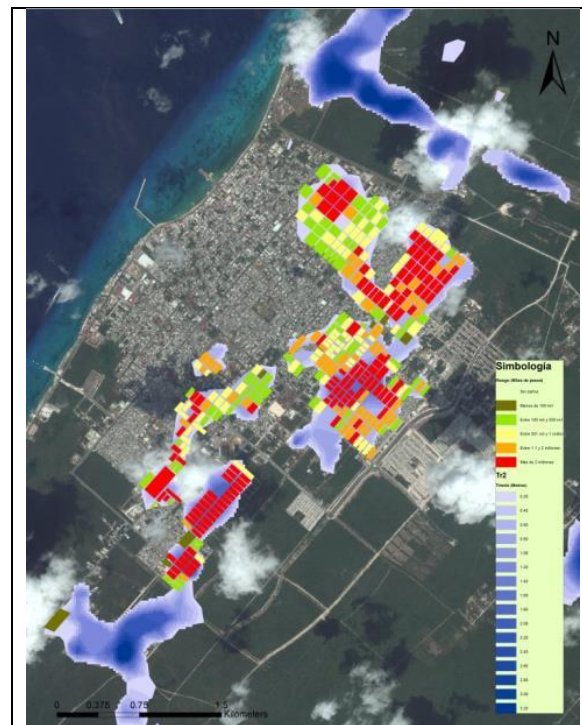


Figura 194. Riesgo para un evento con periodo de

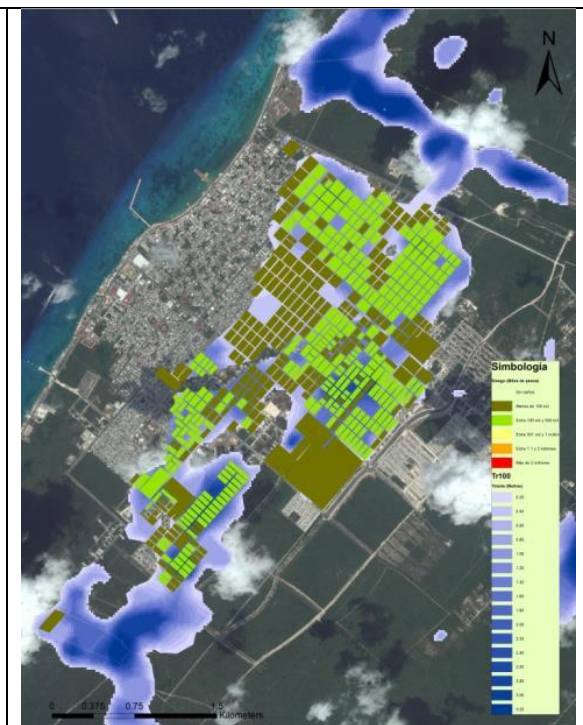
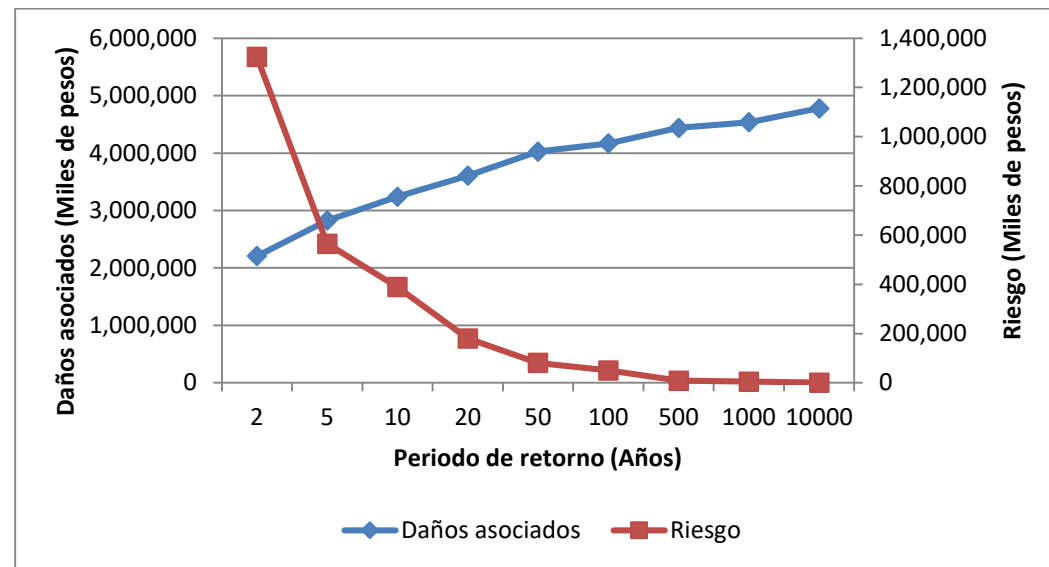


Figura 195. Riesgo para un evento con periodo de



Gráfica 81. Variación de los daños y el riesgo en función del periodo de retorno para la ciudad de Felipe Carrillo Puerto

Como se mencionó anteriormente, la ciudad de Felipe Carrillo Puerto podría ser severamente afectada por inundaciones. Para el periodo de retorno de dos años, ya se observa una proporción importante de la ciudad con posibles daños, pero para el periodo de retorno de 100 años, prácticamente la totalidad de la zona urbana registra daños, que para algunas manzanas el tirante del agua supera los 3 m (Figuras 249 y 250).

presente es elevada. Para el periodo de retorno de 100 años, a pesar de que prácticamente toda la ciudad se inunda con tirantes que van desde los 20 centímetros hasta más de 3 metros, los niveles de riesgo disminuyen considerablemente. El riesgo per cápita se estimó en 51,419 pesos para el periodo de retorno de dos años y en 1,944 para el de 100 años (Figuras 251 y 252).

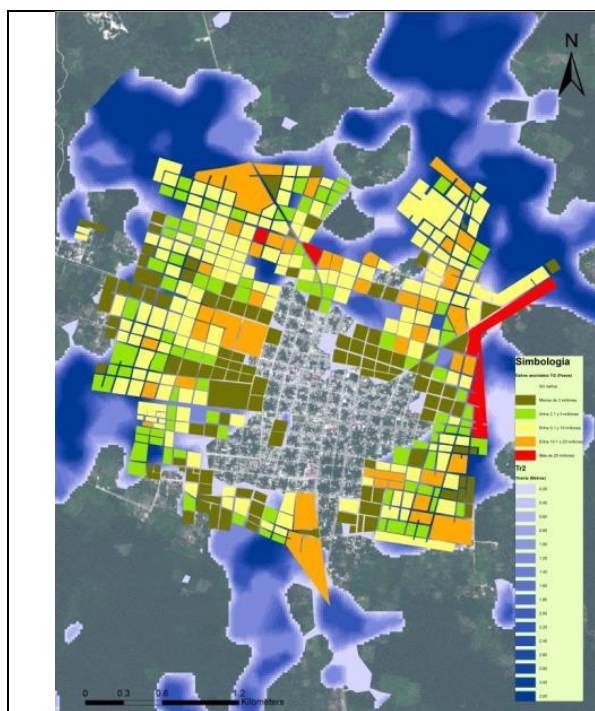


Figura 196. Daños asociados para un evento con periodo de retorno de 2 años

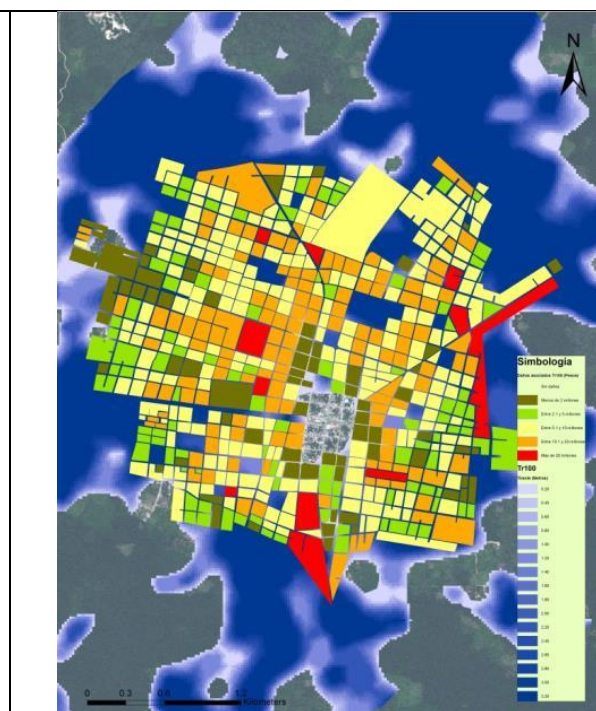


Figura 197. Daños asociados para un evento con periodo de retorno de 100 años

En cuanto al riesgo, una proporción muy alta de las manzanas de la ciudad registró niveles muy altos para el periodo de retorno de dos años. Lo anterior es importante, porque la probabilidad de que un evento con estas características se

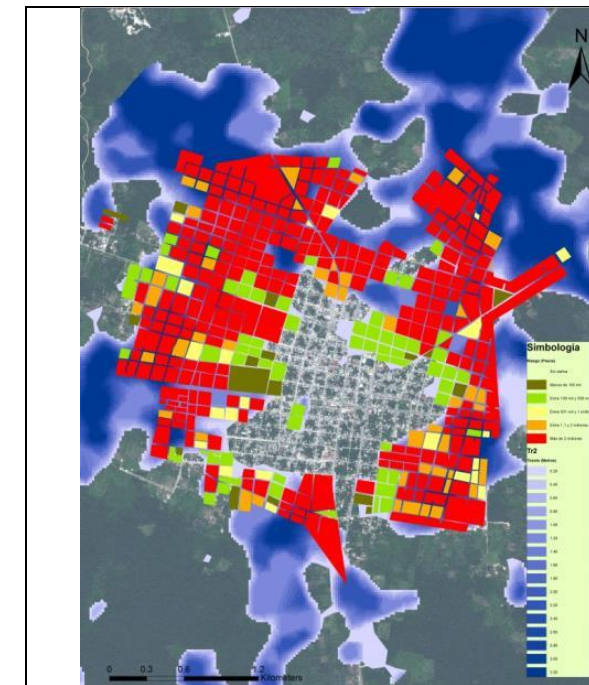


Figura 198. Riesgo para un evento con periodo de retorno de 2 años

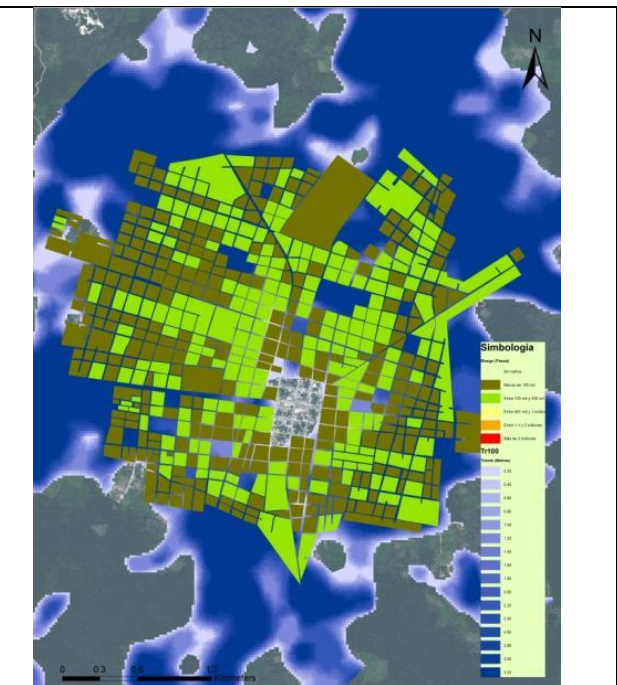


Figura 199. Riesgo para un evento con periodo de retorno de 100 años

Isla Mujeres

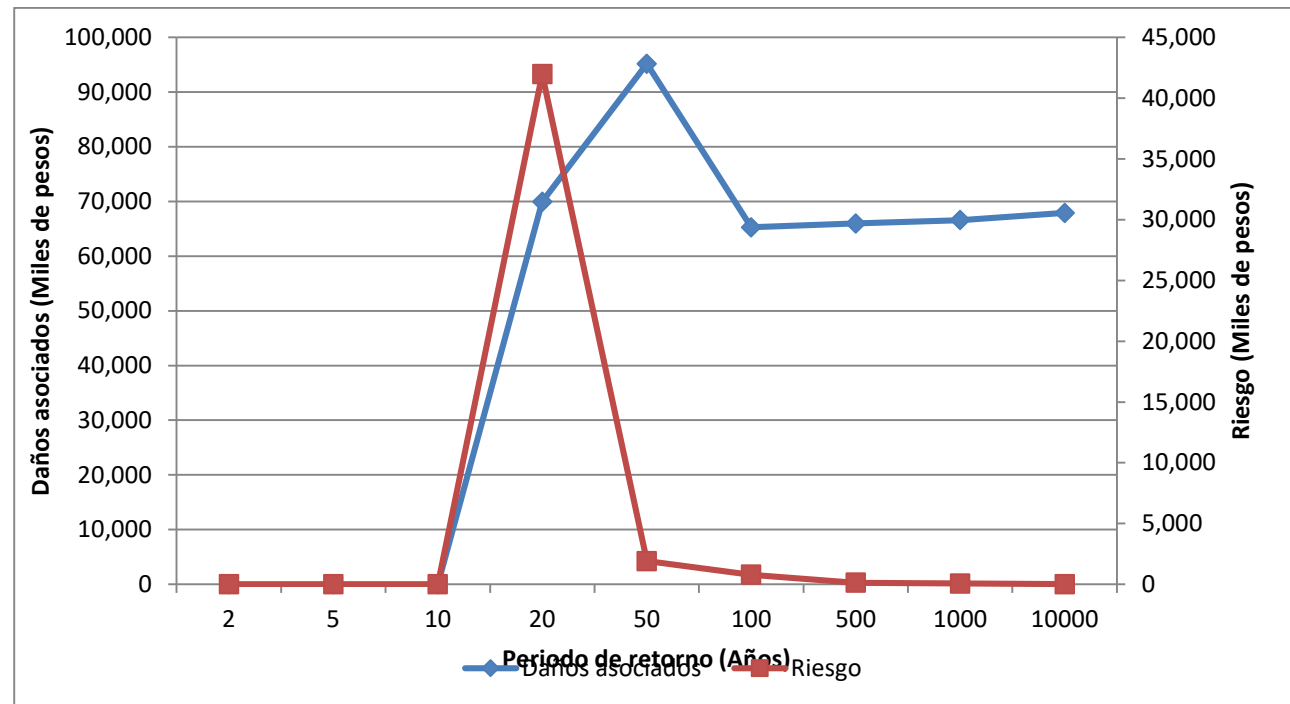
La ciudad de Isla Mujeres es la que presentó menores niveles tanto de daños asociados a los diferentes niveles periodos de retorno como de riesgo. De hecho, eventos con periodo de retorno de 2, 5 y 10 años, no representan ningún riesgo para la isla.

A partir del periodo de retorno de 20 años se observaron daños asociados por 69.9 millones de pesos y aunque estos debieran ser mayores el análisis arrojó daños de 66.6 millones para el periodo de retorno de 10 mil años (Tabla 114 y **iError! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Tabla 114. Resultado del análisis de riesgo en la ciudad de Isla Mujeres para diferentes periodos de retorno.

Periodo de retorno	Intensidad (mm en 24h)	Probabilidad de ocurrencia	Daños asociados (Miles de pesos)	Riesgo (Miles de pesos)
2	91	0.6000	0	0
5	127	0.2000	0	0
10	162	0.1200	0	0
20	201	0.0500	69,942	41,965

50	243	0.0200	95,173	1,903
100	272	0.0120	65,270	783
500	336	0.0020	65,980	132
1000	363	0.0010	66,584	67
10000	424	0.0001	67,892	7



Gráfica 82. Variación de los daños y el riesgo en función del periodo de retorno para la ciudad de Isla Mujeres.

Los mapas de daños no muestran muchas variaciones entre los diferentes periodos de retorno, de hecho, la única zona que registra afectaciones se localiza en el centro de la ínsula, cargado ligeramente hacia el Oriente. Incluso el tirante estimado apenas supera 1.20 m (Figuras 253 y 254).

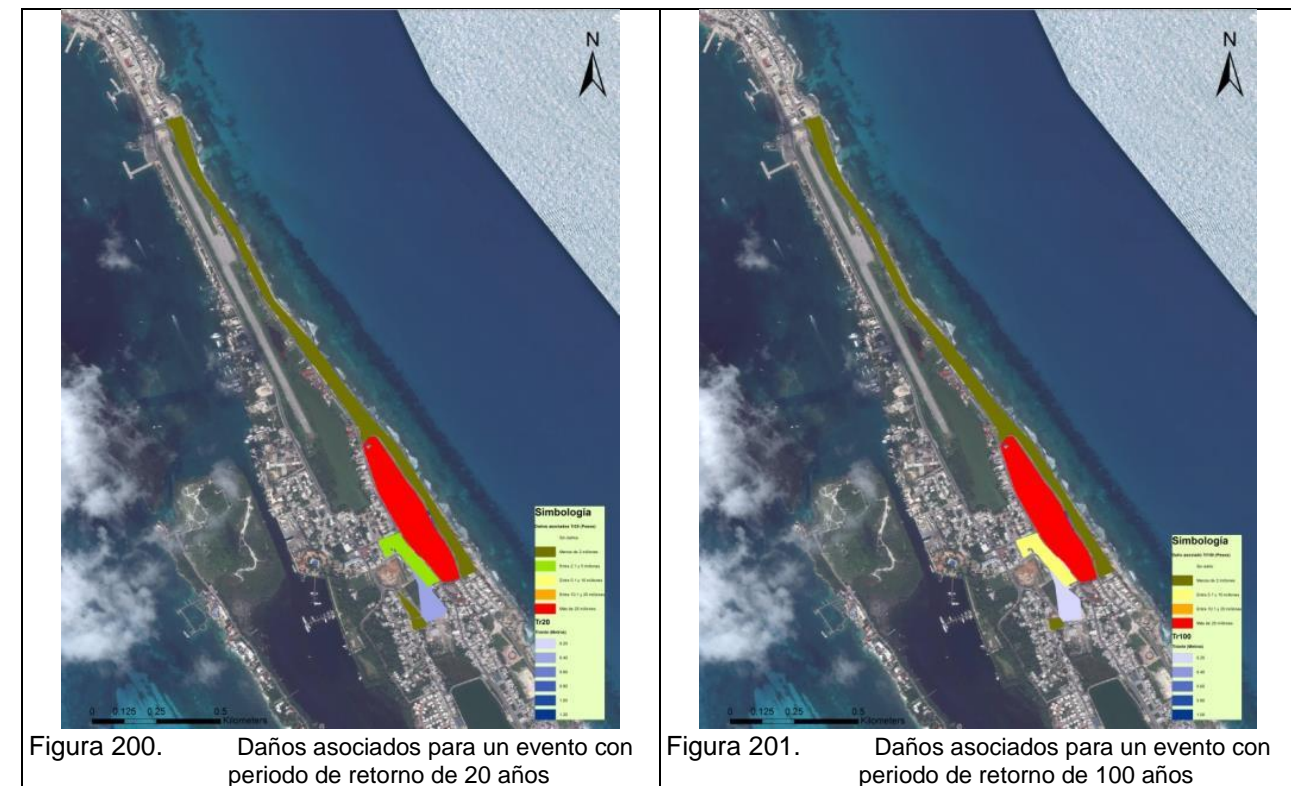


Figura 200. Daños asociados para un evento con periodo de retorno de 20 años

Figura 201. Daños asociados para un evento con periodo de retorno de 100 años

El riesgo también se consideró en niveles bajos para ambos periodos de retorno, ya que la zona en la que se concentra la inundación hay muy pocas viviendas. Es decir, se combinan diversos factores, hay poco sistema expuesto en áreas inundables, el tirante del agua no alcanza tirantes muy altos y no se registran afectaciones en periodos de retorno cortos (figuras 255 y 256).

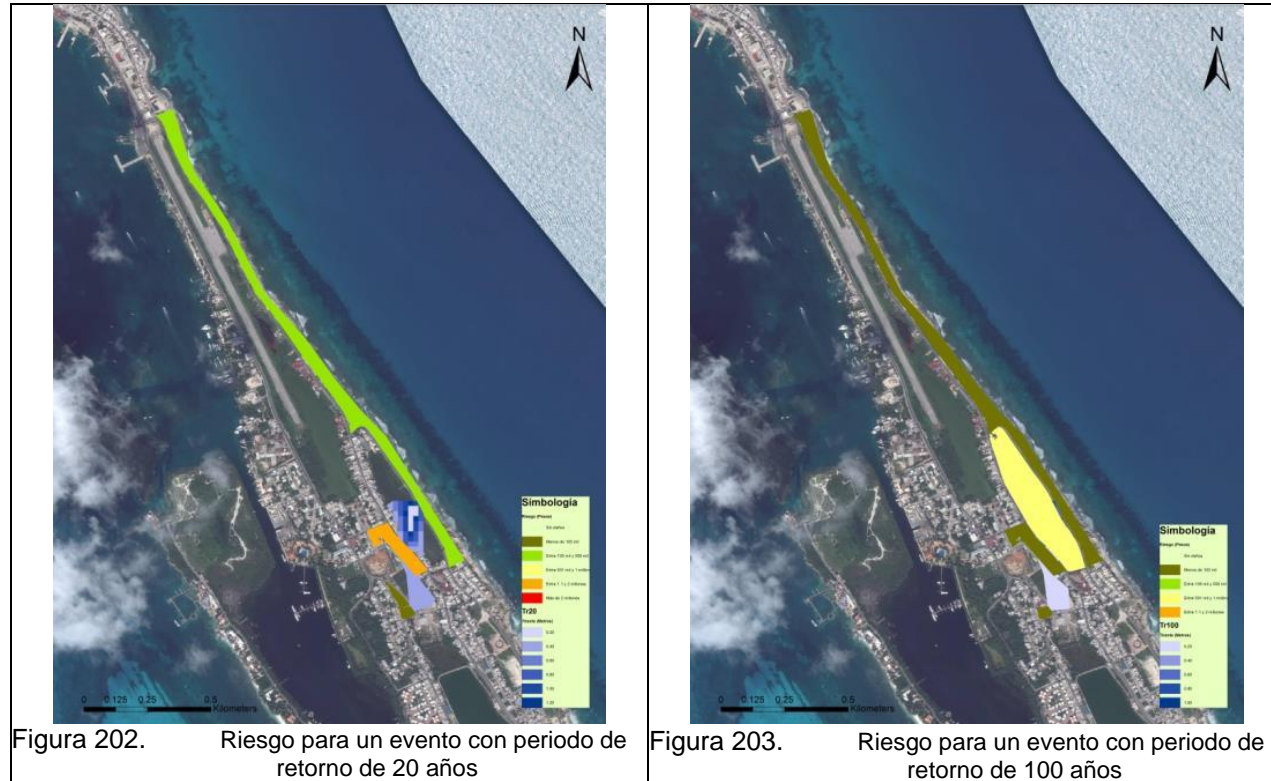


Figura 202. Riesgo para un evento con periodo de retorno de 20 años

Figura 203. Riesgo para un evento con periodo de retorno de 100 años

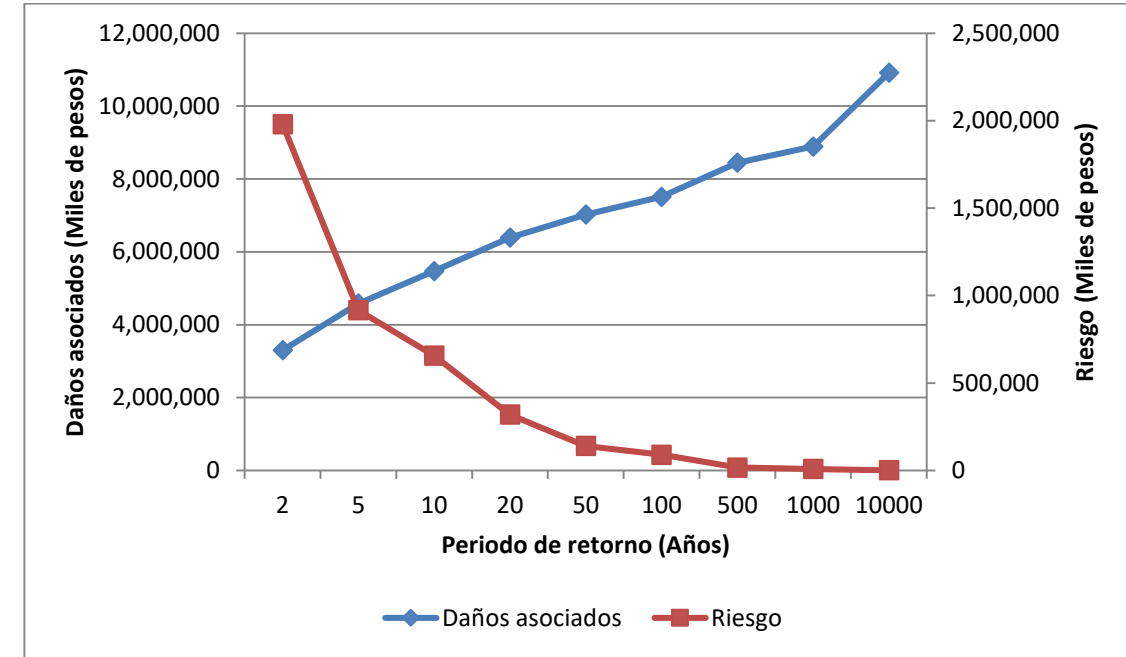
Playa del Carmen

Playa del Carmen es una de las ciudades con mayor crecimiento en el estado, en el análisis realizado, se observó que una parte de la mancha urbana está creciendo justo en dirección a zonas en las que se observaron problemas de inundación.

Los daños asociados para los diferentes periodos de retorno fueron desde 3,300.6 millones para el de dos años hasta 10,913.1 millones para el de 10 mil. (Tabla 115 y **iError! No se encuentra el origen de la referencia.**).

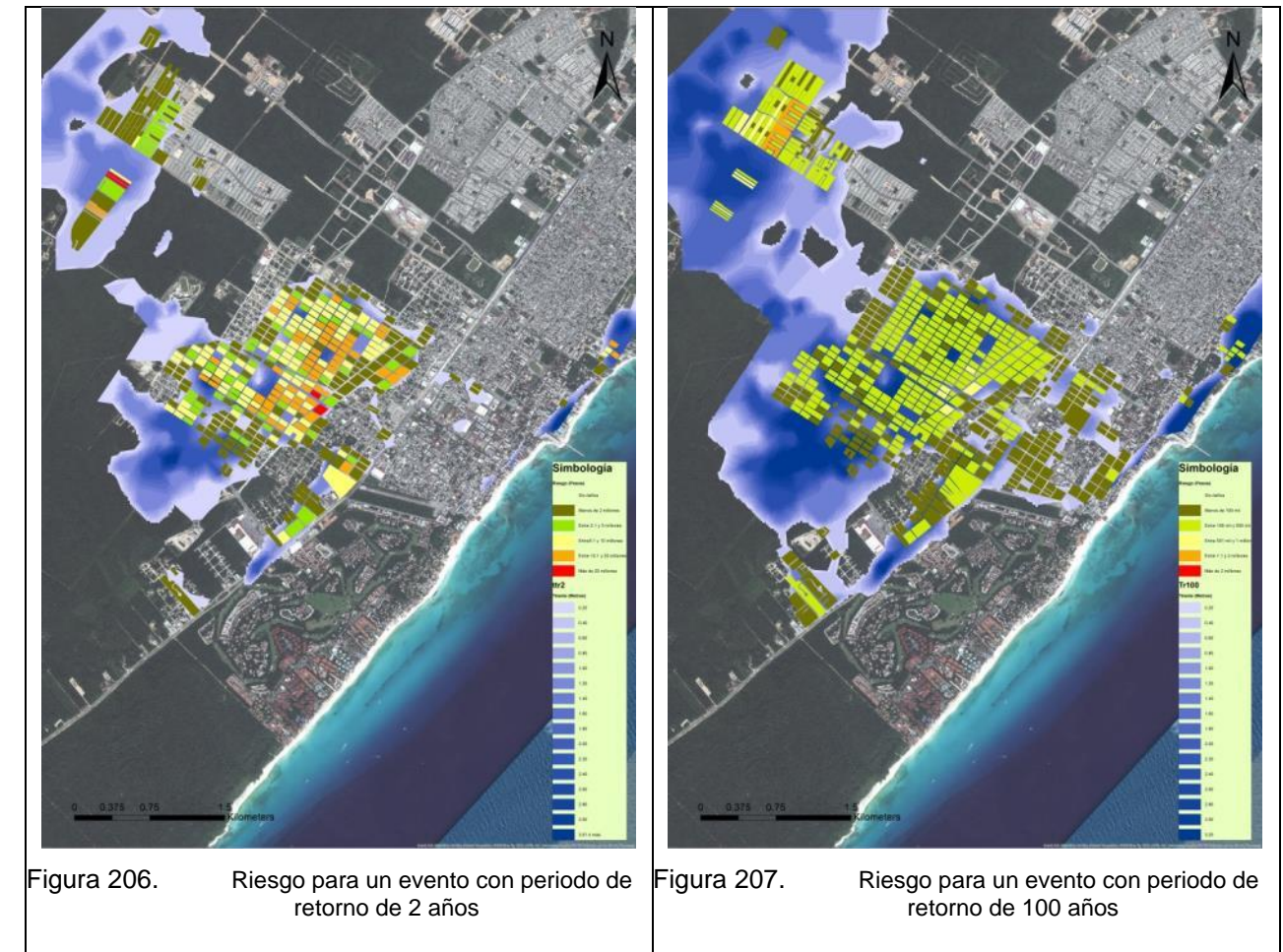
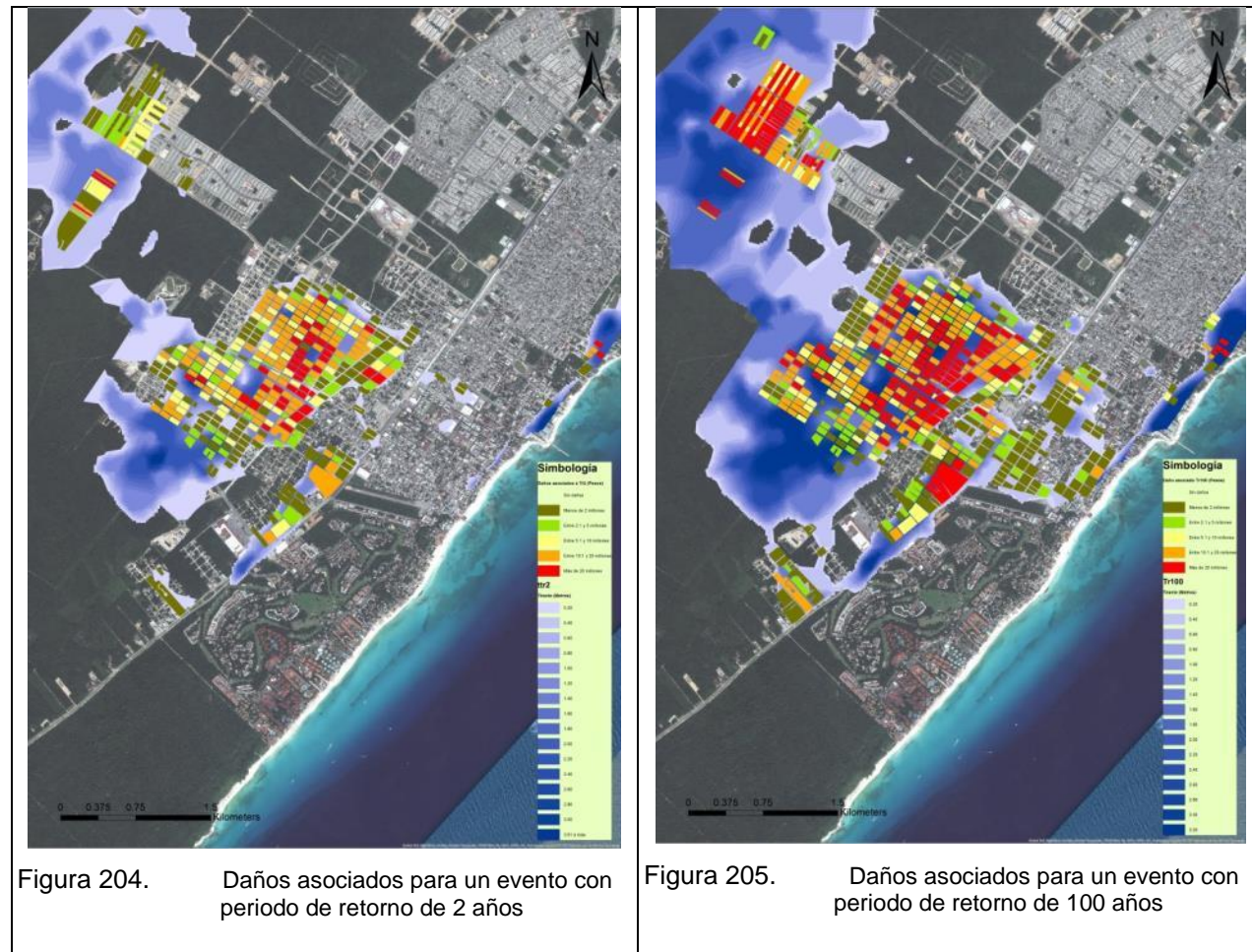
Tabla 115. Resultado del análisis de riesgo en la ciudad de Playa del Carmen para diferentes periodos de retorno

Periodo de retorno	Intensidad (mm en 24h)	Probabilidad de ocurrencia	Daños asociados (Miles de pesos)	Riesgo (Miles de pesos)
2	91	0.6000	3,300,579	1,980,348
5	125	0.2000	4,582,815	916,563
10	158	0.1200	5,473,073	656,769
20	193	0.0500	6,389,114	319,456
50	232	0.0200	7,023,122	140,462
100	260	0.0120	7,512,242	90,147
500	319	0.0020	8,446,703	16,893
1000	345	0.0010	8,890,739	8,891
10000	452	0.0001	10,913,104	1,091



Gráfica 83. Variación de los daños y el riesgo en función del periodo de retorno para la ciudad de Playa del Carmen

Como se puede observar en los siguientes mapas, los daños aumentan considerablemente entre los periodos de retorno de 2 y 100 años. Mientras que en el primer caso, éstos se concentran al Suroeste de la ciudad; para el segundo caso se expanden a otras zonas; y en donde ya se registraban afectaciones, estas incrementan al elevarse el nivel del agua. (Figuras 257 y 258).



El riesgo, como en todos los casos anteriores disminuye según el periodo de retorno. La colonia Ejidal es la que registró los mayores niveles. Para el periodo de retorno de 2 años, el riesgo per cápita se estimó en 13,209 pesos, mientras que para el de 100, este decrece a 601 pesos.

Se observó también, que una parte importante de la ciudad, en la que se ubica una gran cantidad de negocios relacionados con la fuerte actividad turística de Playa del Carmen, los tirantes de agua podrían alcanzar niveles de hasta 3 metros, lo que probablemente se vería reflejado en un impacto económico severo. Derivado de que el análisis de vulnerabilidad únicamente se realizó para vivienda, no se pudo estimar el riesgo para otro tipo de infraestructura, sin embargo es probable que los niveles de riesgo de esas zonas sean altos.

4.2.2.7 Referencias bibliográficas

- (SEDESOL), S. d. (2004). *Guía Metodológica para la Elaboración de Atlas de Peligros Naturales a Nivel Ciudad (Identificación y Zonificación)*. Pachuca, Hidalgo, México.
- (SEDESOL), S. d. (2004). *Guía para la Identificación Rápida de Peligros Naturales (en zonas urbanas)*. Pachuca, Hidalgo, México.
- (SGM), S.-G.-M. (2013). *Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales del Estado de Yucatán*. México: Gobierno del Estado de Yucatán 2012-2018.
- A., P.-B. (2001). Investigación y Exploración de Acuíferos Kársticos. *Boletín Geológico y Minero*, 112(Especial), 65-76.
- Aguayo C. J. E., B. R. (1980). Estudio Sedimentológico en el Area Tulúm-Cancún-Isla Mujeres, Estado de Quintana Roo, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, XLI(1 y 2), 15-32.
- Aguilar-Duarte Y., B. F. (2013). Vulnerabilidad y Riesgo de Contaminación de Acuíferos Kársticos. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*(16), 243-263.
- Aguilera-Martínez M. A., C.-L. V. (2006). Carta Geológico-Minera Cancún F16-8, Escala 1: 250 000. Yucatán y Quintana Roo, México: Servicio Geológico Mexicano.
- Aparicio, J. (2011). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Mexico: Limusa.

- Bauer-Gottwein P., G. B.-V.-A. (July de 2011). Review: The Yucatán Península Karts Aquifer, México. *Hydrogeology Journal*, 1-18.
- Bautista F., P.-A. G. (2011). Spatial Distribution and Development of Soils in Tropical Karst Areas from The Peninsula of Yucatán. *Geomorphology*(135), 308-321.
- C., R.-S. (s.f.). El Inframundo Maya y los Sistemas Kársticos. *Ciencia y Cultura: Arqueología Subacuática*, 38-41.
- CENAPRED. (2001). *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México* (Primera Edición ed.). (O. Z. Martínez, Ed.) Distrito Federal, México.
- CENAPRED. (2004). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos*. Distrito Federal, México.
- CENAPRED, . (2013). Guía del contenido mínimo para la elaboración del atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. México, D.F.
- CN. (20 de Junio de 2013). Derriban condominio "Sol Maya". Playa del Carmen, Quintana Roo, México.
- CONACYT, C. (2007). *Atlas de Riesgo Oceanográfico*. Chetumal.
- Cozumel, G. M. (2011). *Atlas de Riesgos del Municipio de Cozumel*. Cozumel.
- Del Campo Noticias. (05 de Mayo de 2015). Hundimientos representan la mayor problemática para Chetumal. Chetumal, Quintana Roo, México.
- Desastres), C. (. (2001). *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México* (Primera Edición ed.). (O. Z. Martínez, Ed.) Distrito Federal, México.
- Desastres), C. (. (2004). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos*. Distrito Federal, México.
- E., C. C. (27 de Agosto de 2007). Contaminación de Mantos Freáticos en Cancún. *La Jornada Ecológica*. (L. Angulo, Ed.) México. Obtenido de www.jornada.unam.mx/2007/08/27/eco-c.html: www.jornada.unam.mx/2007/08/27/eco-c.html
- E., L. R. (1973). *Estudio Geológico de la Península de Yucatán*.
- E., W. K. (1995). Geologic Atlas of Fillmore County, Minnesota: Sinkholes and Sinkhole probability. *County Atlas Series Atlas C-8 Part B*. (T. M. Fund, Ed.) State Minnesota, E.U.A.
- Escolero-Fuentes O. A., M.-S. L.-V.-R. (2005). *Programa de Monitoreo de Aguas Subterráneas de la Caleta Xel-Ha y sus alrededores*. Informe Técnico para Grupo Xcaret, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Eslava H., Jiménez M., Salas M. A., García F. (2006). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligro y riesgo, Fenómenos Hidrometeorológicos*. Mexico: Secretaria de Gobernacion.
- Espinasa-Pereña R., y. N.-T. (2013). *Mapa de Susceptibilidad a Fenómenos Kársticos*. Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- F., D.-D. O.-A. (2003). Karst Tropical de Colinas, Tipología y Evolución en el Plio-Cuaternario en República Dominicana. *XI Reunión Nacional de Cuaternario*, (págs. 123-128). Oviedo (Asturias).
- F., P. J. (1984). *Guidebook to Studies of Land Subsidence Due to ground-Water Withdrawal*. UNESCO.
- F., W. W. (November-December de 1992). Hydrogeologic Factors Affecting New Sinkhole Development in the Orlando Area, Florida. *Groundwater*, 30(6), 918-930.
- Festa V., F. A. (August de 2012). Sinkhole Evolution in The Apulian Karst of Southern Italy: A Case Study, with some Considerations on Sinkhole Hazards. *Journal of Cave and Karst Studies*, 74(2), 137-147.
- Fragoso-Servón P., B. F. (2014). Caracterización de las Depresiones Kársticas (Forma, Tamano y Densidad) a escala 1: 50,000 y sus Tipos de Inundación en el Estado de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 31(1), 127-137.
- Frances Garcia, Félix y otros. (200). *Un ejemplo de análisis regional del riesgo de inundación en el marco de planificación territorial*. España: Serie Grafica.
- Fraustro-Martínez O., I. T. (2010). Vulnerabilidad a la Inundación en Las Formas Exokársticas del Noreste de la Península de Yucatán. *VI Seminario Ibero-Americano de Geografía Física: Universidad de Coimbra*, (págs. 1-16). Portugal.
- G., P. E.-O. (s.f.). Hydrogeology of the Yucatán Península.
- Gaona-Vizcayno S., G.-D. A.-P. (1980). Cenotes, Karst Característico: Mecanismo de Formación. *Revista del Instituto de Geología*, 4(1), 32-36.
- Gil, G. (xxx). Geología.
- Gobernación, S. d. (2015). *CENAPRED MEXICO*. Recuperado el Julio de 2015, de <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/index.php/riesgos-geologicos/hundimientos-regionales-y-locales-agrietamientos>
- Gutiérrez F., C. A. (2008). Identification, Prediction and Mitigation of Sinkhole Hazards in Evaporite Karst Areas. *Geology*, 36, 1007-1022.
- Gutiérrez F., P. M. (s.f.). A Review on Natural and Human-Induced Geohazards and Impacts in Karst. *Earth-Science Reviews*(138), 61-68.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (s.f.). Recuperado el 13 de 06 de 2015, de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoelevaciones.aspx>
- K., B. D. (2014). *Geology and Sinkhole Development of the Hagerstown Valley: Phase Summary Report*. Research Report, State Highway Administration, Maryland Department of Natural Resources, Resources Assesment Service and Maryland Geological Survey.
- L., B. G. (1984). Fracture Mapping and Ground Subsidence Susceptibility Modeling in Covered Karst Terrain: The Example of Dougherty County, Georgia. (C. a. Johnson, Ed.) 595-606.

- L., F. (August de 2005). Using State-Wide GIS Data to Identify the Coincidence Between Sinkhole and Geologic Setting Structure. *Journal of Cave and karst Studies*, 67(2), 120-124.
- Laboratory, N.-J. P. (2003). Anaglyph Yucatán Península México. *Imagen*.
- Lemus-Bustos O., M.-F. J. (2006). Carta Geológico-Minera Cozumel F16-11 Escala 1: 250 000. Quintana Roo y Yucatán, México: Servicio Geológico Mexicano.
- Leonardo s. Nania, Emilio Morelo. (2007). *Manual Basico Hec-Ras 3.1.3 y HecGeo-Ras 3.1.1*. Granada: Leonardo S. Nania Escobar.
- Loeza-García J. P., J.-H. A.-L.-A.-C.-H. (2006). Carta Geológico-Minera Felipe Carrillo Puerto E16-1 Escala 1: 250 000. Campeche, Yucatán y Quintana Roo, México: Servicio Geológico Mexicano.
- Lugo-Hubp, J. A.-Q.-P. (1992). Rasgos Geomorfológicos Mayores de la Península de Yucatan. (UNAM, Ed.) *Revista del Instituto de Geología*, 10(2), 143-150.
- M., D.-R. M. (2002). Karst Subsidence in South-Central Apulia, Southern Italy. *International Journal Espeleology*(31), 181-199.
- M., O.-C. I.-R. (2010). Formas Kársticas Comunes de los Cenotes del Estado de Quintana Roo. *Revista Electronica de Medioambiente UCM*, 1-20.
- M., R.-V. (2009). Aspectos Geológicos de la Cuenca del Caribe. (I. G.-A. Espinoza-Avalos J., Ed.) *El Sistema Ecológico de la Bahía de Chetumal/Corozal: Costa Occidental del Mar Caribe*, 5-11.
- Marco Antonio Salas, Héctor Eslava. (2001). Diagnostico de peligro e identificacion de riesgos de desastre en Mexico. En *Diagnostico de peligro e identificacion de riesgos de desastre en Mexico* (págs. 104,105,105,139). Mexico: Secretaria de Gobernacion.
- Marín-Stillman L. E., P.-A. G.-R. (2005). Hidrogeología de la Península de Yucatán. En J. B. L., *El Agua en México Vista desde La Academia, Academia Mexicana de Ciencias* (pág. 411).
- Mejía-Ortíz L. M., Y. G.-M.-G. (2007). Cenotes (Anchialine) On Cozumel Island, Quintana Roo, México. *Journal of cave and Karst Studies*, 69(2), 250-255.
- Mexicanos, P. (2013). *Provincia Petrolera Plataforma de Yucatán*. Técnico, Petróleos Mexicanos, Subdirección de Exploración y Producción.
- NoticiasCaribe. (12 de Enero de 2005). Reportan hundimiento tras sismo: Se resblandece calle de adocreto en zona turística de Playa, a 2 cuadras de edificio colapsado en 2005. Playa del Carmen, Quintana Roo, México.
- Novedades Quintana Roo. (24 de Febrero de 2015). Denuncian más de 100 puntos con hundimientos en la ciudad. Chetumal, Quintana Roo, México.
- P., F. D. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley Editorial.
- Periodistas Quintana Roo. (18 de Enero de 2015). Hartos de los baches. Chetumal, Quintana Roo, México.
- Periodistas Quintana Roo. (11 de Mayo de xx). Surgen más hundimientos en Chetumal. Chetumal, Quintana Roo, México.
- Polémica. (21 de enero de 2015). Mujer cae en un pozo dentro de su casa. Cancún, Quintana Roo, México.
- Por Esto! Quintana Roo. (21 de Diciembre de xxx). Fue hundimiento, no explosión. Tulum, Quintana Roo, México. Obtenido de http://www.poresto.net/ver_nota.php?zona=qroo&idSeccion=6&idTitulo=61552
- Pueyo-Anchuela O., A.-L. D.-J.-S.-L.-A. (2012). Consideraciones Sobre la Construcción en Zonas Kársticas Activas. Caso de la Avenida de Las Estrellas de Zaragoza. *Geogaceta*(51), 63-66.
- Quintana Roo Al Día. (09 de Enero de 2012). Rebasó expectativas problemas de baches en Chetumal. Chetumal, Quintana Roo, México.
- Quintanarroense PQPalco. (03 de Febrero de 2015). Desfondes de calles en Chetumal “tragarán” más presupuesto. Chetumal, Quintana Roo, México.
- R., E.-P. (12 al 15 de Mayo 2015). Riesgos Kársticos: El Origen de Cavernas y Cenotes. Playa del Carmen.
- R., E.-P. (Octubre-Noviembre de 1994). Origen y Distribución de las Cavernas de México. *Ciencias*(36), 45-49.
- R., G. (2008). Compilation and Production of a Karst Map of México (abstract). (A. G. Union, Ed.)
- Rodríguez-Velázquez, R.-C. R. (2006). Consecuencias Sociales de un Desastre Inducido, Subsistencia. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(2), 265-269.
- Salina, M. A. (2011). *Metodología para la elaboracion de mapas de riesgo de inundacion en zonas urbanas*. Mexico: Secretaria de Gobernacion.
- Sánchez-Rojas L. E., B.-N. L.-M. (2007). Carta Geológico-Minera Estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán. *Primera Edición*. (S. G. Mexicano, Ed.) Pachuca, Hidalgo, México.
- Sartain N., M. J. (2011). Case Study on The Assessment of Sinkhole Risk for the Development of Infraestructure Over Karstic Ground. (S. S. Vogt, Ed.) *Bundesanstalt fur Wasserbau*.
- Schmitter-Soto J. J., C. F.-B.-S.-M.-E.-A. (2002). Hidrogeochemical and Biological Characetristics of Cenotes in The Yucatán Península (SE México). (A. J. S., Ed.) *Hydrobiología*(467), 215-228.
- SEDATU. (2014). “Bases para la Estandarización en la Elaboración de Atlas de Riesgos y Catálogo de Datos Geográficos para Representar el Riesgo 2014”. México.
- SEDATU. (2016). *Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Tulum Quintana Roo*. Tulum: SEDATU.
- Serrano, M. E. (2003). *Identificación de peligros por almacenamiento de sustancias químicas en industrias de alto riesgo en México*. Mexico: Secretaria de Gobernación.
- SGM. (2013). “*Atlas de Peligros por Fenómenos Naturales del Estado de Yucatán*”. Yucatán: xxx.
- SIATL *simulador de flujos de agua de cuancas hidrograficas*. (s.f.). Recuperado el 15 de 09 de 2015, de SIATL simulador de flujos de agua de cuancas hidrograficas: http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/#

Simón J. L., S. M.-A. (2009). Riesgo de Subsistencia Kárstica en Areas Urbanas: El Caso de Zaragoza. *Enseñanza de Las Ciencias de la Tierra*, 17(3), 303-315.

Simón-Gómez J. L., S.-J. M.-C. (Octubre de 1998). Estudio de Riesgos de Hundimientos Kársticos en el Corredor de la Carretera de Logrono. (D. d. Zaragoza, Ed.) *Memoria Informativa*.

Tamaulipas, G. d. (2012). *Atlas de Riesgo del Municipio de Nuevo Laredo*. Nuevo Laredo, Tamaulipas.

Tamulipas, G. d. (2009). *Atlas de Riesgos Municipio de Tampico, Madero y Altamira*. Servicio Geológico Mexicano.

Tulum, G. M. (2015). *Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Tulum, Quintana Roo*.

UQROO. (2011). *Atlas de Riesgo de la ciudad de Chetumal, Municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo 2011*. Chetumal.

Z., W. (May de 1997). The Formation of Sinkhole in Karst Mining Areas in China and Some Methods of Prevention. *Environmental Geology*(31).

Zarate-Barradas R. G., M.-H. A.-B.-F.-P. (2006). Carta Geológico-Minera Mérida F16-10 Escala 1: 250 000. Campeche, Yucatán y Quintana Roo, México: Servicio Geológico Mexicano.

Zarate-López J., A.-L. F.-P. (2005). Carta Geológica-Minera Chetumal E16-4-7 Escala 1:250 000. *Primera Edición*. (S. G. Mexicano, Ed.) Quintana Roo, Campeche, México: Servicio Geológico Mexicano.

Zarate-López J., L.-G. J.-G.-H. (2006). Carta Geológico-Minera Bahía Ascención E16-2-5, Escala 1: 250 000. Quintana Roo, México: Servicio Geológico Mexicano.

4.2.3 Inundación de Río Hondo

4.2.3.1 Introducción.

Una inundación consiste en la invasión o cubrimiento de agua en áreas que en condiciones normales se mantienen secas⁸⁸. Las inundaciones son uno de los fenómenos naturales más comunes en nuestro país, prácticamente todos los años se producen por le desbordamientos de los ríos, inundación conocida como fluvial, o técnicamente avenida extraordinaria. (IMTA-SEMARNAT, 2012). Debido al exceso de lluvia se pueden causar daños severos. Este fenómeno se convierten en peligros cuando los espacios ocupados por las poblaciones abarcan las llanuras de inundación naturales de un río y, por consecuencia, son afectadas por la acumulación de agua. Referente al río Hondo, existen algunos cuantos asentamientos de localidades que sufren afectación por inundaciones, debido a esto, es importante identificar el peligro al cual están expuestas las comunidades ribereñas.

En Quintana Roo se localiza el río Hondo, entre las coordenadas 18°45' y 17°43' de latitud norte y 88°35' y 89°15' de longitud oeste, tiene una longitud aproximada de mas de 310 kilómetros y su dirección predominante es hacia el noreste,

desembocando en la bahía de Chetumal, la mayor parte de su curso (140 Km) marca la frontera entre Belice y México⁸⁹. El río Hondo tiene su origen a una altura cercana a los 300 m en el norte de El Petén y el sureste de México; las corrientes tributarias en Belice son el río Bravo, el río Booths y el Blue Creek. El cauce principal del río Hondo comienza cerca de la confluencia del río Booths y el arroyo Azul, después de la cual atraviesa la planicie baja del norte de Belice, hasta desembocar en la bahía de Chetumal.

Desde la confluencia del Arroyo Azul y Río Bravo, y en su recorrido hacia la Bahía de Chetumal, el Río Hondo recibe las aportaciones de otros tributarios tanto del territorio mexicano como del territorio beliceño. Del lado mexicano destaca: el arroyo Agua Dulce, río Escondido, y arroyo Huay Pix (IMTA-SEMARNAT, 2012). Pertenece a la red hidrográfica 33, la cual corresponde a la región de Yucatán este, en la cual se encuentra la cuenca denominada Bahía de Chetumal y otras (Cuenca 33A). Así mismo, lo largo del cauce del río Hondo está dividido en tres subcuentas, las cuales son la subcuenca de la bahía de Chetumal (subcuenca 33Ac), subcuenca Río Hondo (subcuenca 33Ad) y subcuenca río Escondido (subcuenca 33Ae) y se tomó esta clasificación para seccionar el río en la misma proporción y área y poder obtener resultados similares a los de CONAGUA e IMTA.

Históricamente el río ha tenido inundaciones de gran importancia. El día 26 de octubre de 2008, una inundación afectó las localidades de la Unión y Revolución, donde la altura alcanzo 8.15 mts. El 29 de septiembre de 2010, la inundación alcanzó una altura de entre 3 a 6 mts. El 19 de septiembre de 2013, se presentó una inundación que alcanzó una altura de 6.41 mts, esto asociado a lluvias intensas⁹⁰. Esto se explica por que donde nace el río como se mencionó esta a una altura no mayor de 70 metros pero en su recorrido se producen elevaciones mayores, superando incluso los 120 msnm hasta llegar y desembocar en la Bahía de Chetumal, este accidente orográfico ayuda a las inundaciones que son causadas por el empuje del agua de mar desde la Bahía corriente arriba y sobresaturando las partes más bajas que conforman la rivera del río Hondo.

Por otro lado, algunos sistemas tributarios como, Laguna Milagros, Puente Agua Dulce, zonas lagunares de Morocoy, Huay Pix, Ucum y Subteniente López, están muy estrechamente interconectados y son sensibles al aumento en el nivel del mar de la Bahía de Chetumal. Los mapas de peligro por inundación de avenidas extraordinarias del río Hondo, que se obtuvieron para diferentes tiempos de retornos, van como mínimo 2 años y máximo 10,000 años. Los mapas se obtuvieron por medio de un análisis hidrológico con el programa SIALT y un análisis numérico con el software Hec-Ras⁹¹, así como el uso de un sistema de información geográfica(ArcGis10.2), estos mapas sirven para conocer las zonas propensas a inundación de igual forma estimar la afectación que este tipo de inundación puede presentar.

4.2.3.2 Metodología.

La metodología que se aplicó para determinar el peligro por la inundación del río Hondo en diferente tiempo de retornos es la propuesta por CENAPRED, que es la **“Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas”**, para lo cual se identificó la cuenca principal del río, así como sus subcuentas, relacionadas con el transecto del mismo.

Para poder desarrollar y aplicar la metodología de una manera efectiva se considera necesario que se cumplan unas

⁸⁸ CENAPRED 2013

⁸⁹ Sistema nacional de Información Estadística y Geográfica. (Vertiente y principales ríos - longitud - periodo de observación - 2004 – nacional)

⁹⁰ Estudio Hidrológico del Estado de Quintana Roo

⁹¹ Hec-Ras(*Hydrologic Engineering Centers River Analisis System*), es un programa que permite modelar flujos permanentes y flujos variables de agua.

series de requerimientos, como son:

Insumos digitales obtenidos de fuentes oficiales, en este caso de INEGI, como el Modelo Digital de Elevación (MDE) continuo de elevaciones mexicano a 15 metros.

Manejo de software como VELL⁹², Hec-Ras y ArcGis⁹³.

Manejo de software en línea como el SIATL⁹⁴, el cual contiene información importante para realizar el análisis hidrológico, la información que se puede encontrar en el SIATL es:

1. Coeficiente de escurrimiento.
2. Tiempo de concentración.
3. Pendiente media.
4. Longitud del cauce.
5. Área drenada.
6. Intensidad de la lluvia.
7. Caudal pico.

Otra metodología que se aplicó es la de "Elaboración de mapas de peligro de inundación por percepción", la cual consiste en la aplicación de una encuesta mismas que está aprobada por CENAPRED.

En esta primera parte, se detallan los procesos que se realizaron para obtener los mapas de peligro por inundación, en diferentes zonas y asociadas con diferentes tiempos de retorno.

Para lograr lo anterior, se realizaron las siguientes etapas:

1. Identificación de la zona de estudio. Se refiere a la parte donde se obtienen los datos para la red de drenaje, a partir de la cual se realizaran simulaciones.
2. Tratamiento del MDE. Es el proceso mediante el cual se obtiene curvas de nivel.
3. Obtención de caudales de diseño. Corresponde al uso de software VELL que nos ayudaran a obtener las lluvias de diseños, para diferentes tiempos de retorno y distintas duraciones.
4. Simulación del fenómeno y generación de escenarios de peligro. En esta parte se ligan en ArcGis y Hec-Ras, las características hidrológicas de las subcuencas estudiadas y las localidades de interés.

c) Identificación de la zona de estudio.

Con la ayuda del programa SIATL, buscamos en el apartado "Búsquedas"/"Rasgos Hidrográficos", ponemos el nombre del río Hondo, el cual es de nuestro interés, y seleccionamos el que se ajusta a nuestra búsqueda tanto en Rasgo, Estado y municipio. Una vez identificada la unidad hidrográfica (RH33-Region: Yucatán Este) se procedió a descargarla, la cual

está a una escala de 1:50,000, y contiene todo la red hídrica, así como cuencas y subcuencas de interés.

Hay que recordar que el cauce del río Hondo está delimitado por tres subcuencas las cuales son la subcuenca de la bahía de Chetumal (subcuenca 33Ac), subcuenca Río Hondo (subcuenca 33Ad) y subcuenca río Escondido (subcuenca 33Ae), las tres pertenecientes a la cuenca de la "Bahía de Chetumal y otras" de la Región Hidrológica (RH33A).

d) Características fisiográficas, hidrológicas del cauce principal en la subcuenca de interés.

Una vez que cada subcuenca de nuestro interés ha sido identificada, se procede a analizar sus características fisiográficas, hidrológicas, y los indicadores del cauce principal, mediante el programa SIATL. Previamente seleccionada nuestra subcuenca, nos dirigimos a "Funciones de Redes" y seguidamente a "Análisis Morfométricos y Estimación de Caudal", donde obtenemos los siguientes resultados para cada indicador de cauce principal y subcuenca.

Tabla 116. Características de cauce principal en la subcuenca 33Ac (Fuente SIATL).

Indicadores fisiográficos, hidrológicas de cauce principal en la Subcuenca 33Ac.	
Elevación máxima	10 m
Elevación media	5 m
Elevación mínima	0 m
Longitud del cauce	86,884 m
Pendiente media	0.0115%
Tiempo de concentración	4,035.15 (minutos)
Área drenada	669.44 km ²
Coeficiente de escurrimiento	0.05%

Tabla 117. Características de cauce principal en la subcuenca 33Ad (Fuente SIATL).

Indicadores fisiográficos, hidrológicas de cauce principal en la Subcuenca 33Ad.	
Elevación máxima	140 m
Elevación media	34 m
Elevación mínima	10 m
Longitud del cauce	52,937 m
Pendiente media	0.1523%
Tiempo de concentración	1,993.83 (minutos)
Área drenada	1,002.59 km ²
Coeficiente de escurrimiento	0.05%

Tabla 118. Características de cauce principal en la subcuenca 33Ae (Fuente SIATL).

Indicadores fisiográficos, hidrológicas de cauce principal en la Subcuenca 33Ae.	
Elevación máxima	280 m
Elevación media	45 m
Elevación mínima	10 m
Longitud del cauce	177,228 m
Pendiente media	0.1523%

⁹² Visualizador de escenarios de lluvia (VELL), sirve para obtener la lluvia de diseños para cada Tr.

⁹³ ArcGis, es un software de información geográfica, que ayuda al geoprocésamiento espacial.

⁹⁴ SIATL (Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrológicas), sirve para realizar análisis hidrológicos.

Tiempo de concentración	2,601.74 (minutos)
Área drenada	1,424.35 km ²
Coefficiente de escurrimiento	0.05%

Los datos obtenidos serán de interés para calcular el Caudal (Q), de cada cauce de interés a diferentes tiempos de retornos.

e) Obtención de los caudales de diseño.

Para estimar los caudales de diseño de cualquier cuenca, se requiere la siguiente información:

1. Tiempo de concentración.
2. Lluvia de diseño.
3. Estudio fisiográficos e hidrológico de la zona de interés.
4. El desarrollo descrito continuación es válido para calcular los cuales picos de nuestra área de estudio.

Tiempo de concentración.

El tiempo de concentración de una cuenca se obtiene mediante la fórmula de Kirpich.

$$tc = 0.000325 \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \right)^{95}$$

Dónde:

L= Longitud del cauce principal en metros.

S= Pendiente del cauce principal adimensional.

En el inciso 3.2, se obtuvieron ambos datos fisiográficos, así como el tiempo de concentración de la sección del cauce principal en su respectiva subcuenca (tc).

Lluvia de diseño

Para obtener este valor, es necesario contar con el software Visualizador de Escenarios de Lluvia (VELL), el cual se obtuvo de la página de CENAPRED⁹⁶.

El Visualizador de Escenarios de Lluvia, presenta los resultados de análisis de precipitaciones para diferentes duraciones y periodos de retorno, que funciona a través de la elección de la combinación entre los organismos de cuenca y las duraciones en un punto geográfico, que arrojará los resultados de las precipitaciones para los diferentes periodos de retorno, en la zona seleccionada, el análisis con VELL está aprobado por CENAPRED, para la obtención de la lluvia de diseño.

La obtención de la lluvia de diseño para las zonas de interés que se obtuvieron del software, son con un día de duración para un tiempo de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000 años, pero para generar nuestros mapas de peligro por inundación, requerimos un lluvia de diseños de 10,000.

Por lo anterior, usando el SIATL en la opción administrador de capas/Datos climáticos e hidrográficos, se activó la capa, estaciones climatológicas (SMN⁹⁷), y se seleccionó la estación meteorológica más cercana a nuestra área de estudio, donde se obtuvieron datos para lluvia de diseño de 10,000 años.

Cálculo de lluvia de diseño para nuestras zonas de interés.

Lluvia de diseño para el cauce del río Hondo ubicado en la subcuenca 33Ac.

Tabla 119. Lluvia de diseño cauce subcuenca 33Ac (Fuente VELL y SIATL).

Lluvia de Diseño (VELL)		Lluvia SIALT	
Tr (años)	Lluvia (mm)		Tr (años)
Lluvia (mm)			
2	120.9		2
103.922			
5	165.6		5
139.717356			
10	207.3		10
173.203333			
20	251.8		20
218.2362			
50	301.6		50
274.815956			
100	336.6		100
312.920689			
200	370.2		200
347.561356			
500	413.3		500
393.748911			
1,000	445.6		1,000
428.389578			
2,000	477.9		2,000
461.875556			
			5,000
506.908422			
			10,000
541.549089			

Tabla 120. Lluvia de diseño cauce subcuenca 33Ad (Fuente VELL y SIATL).-

Tr (años)	Lluvia (mm)	Tr (años)	Lluvia (mm)
2	100	2	87.408621
5	136.5	5	117.516034
10	170.9	10	145.681034
20	207.5	20	183.558103
50	248.5	50	231.147241
100	277.4	100	263.197069
200	305.1	200	292.333276
500	340.6	500	331.181552
1,000	367.3	1,000	360.317759
2,000	393.9	2,000	388.482759
		5,000	426.359828

⁹⁵ Formula expuesta en el libro "Introducción a la Hidrología Superficial"

⁹⁶ <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/index.php/biblioteca>

⁹⁷ Servicio Meteorológico Nacional.

			10,000	455.496034
--	--	--	--------	------------

Tabla 121. Lluvia de diseño cauce subcuena 33Ae. (Fuente VELL y SIATL).

Lluvia de Diseño (VELL)		Lluvia SIATL	
Tr (años)	Lluvia (mm)	Tr (años)	Lluvia (mm)
2	86.3	2	67.4775
5	118.4	5	90.71975
10	148.4	10	112.4625
20	180.4	20	141.70275
50	216.4	50	178.4405
100	241.6	100	203.18225
200	265.8	200	225.67475
500	296.9	500	255.66475
1,000	320.1	1,000	278.15725
2,000	343.4	2,000	299.9
		5,000	329.14025
		10,000	351.63275

El resultado de la frecuencia de la lluvia de diseño es un parámetro importante, que se empleará para la determinación de los caudales.

Coeficiente de escurrimiento

Es la relación del caudal que fluye sobre el terreno, al caudal llovido, este parámetro no debe confundirse con el coeficiente de infiltración, el cual no es empleado en nuestro estudio.

Estos valores se obtuvieron anteriormente, el coeficiente de escurrimiento se obtiene de acuerdo con los tipos de suelos, uso de suelos y pendientes, cuando el área drenada presenta diferentes tipos de suelos, vegetación y pendiente media, el coeficiente de escurrimiento se obtendrá, para cada área parcial y posteriormente se calculara el promedio ponderado.

Determinación del área drenada

El área drenada se obtiene mediante el SIATL, seleccionando el cauce principal y posteriormente "Análisis Morfométricos y Estimación de Caudal", estos valores se obtuvieron con anterioridad.

Una cuenca hidrográfica es el área drenada por un río y sus afluentes (Red Hídrica), en donde pueden existir subcuencas o microcuencas, que son áreas drenadas dentro de la cuenca por segmentos de la red hídrica, igual conocidos como "parteaguas".⁹⁸

Calculo del gasto / caudal

El gasto/caudal, es la cantidad de agua que pasa por un canal en determinado tiempo. Para determinar este gasto, se usa el SIATL, por lo que es importante tener a mano los datos de:

1. Tiempo de concentración.

2. Precipitación e intensidad de la lluvia de diseño.
3. Coeficiente de escurrimientos.
4. Determinación del área drenada.

El SIATL, calcula el gasto de caudal por medio del método racional.

$$Q = \frac{CIA_{99}}{360}$$

Dónde:

Q= Es el caudal en metros cúbicos por segundo.

I= Es la intensidad de la lluvia en milímetros por hora.

A= Es la superficie de la cuenca.

C= Es un coeficiente de escurrimiento, sin dimensiones.

Los datos se ingresaron en la ventana principal del SIATL, los datos que varían son la precipitación e intensidad de lluvia de diseño, para cada tiempo de retorno de lluvia, ingresado se obtiene un tiempo de retorno en el cálculo del gasto/caudal.

Cálculo de tiempo de retorno del caudal pico para cada zona de interés.

Tabla 122. Gasto/caudal, río Hondo, subcuena 33Ac.

Tr (años)	Q(m3/s)
2	30.86
5	42.02
10	52.43
20	64.89
50	79.58
100	89.44
500	111.38
1,000	120.49
10,000	149.5

Tabla 123. Gasto/caudal, río Hondo, subcuena 33Ad.

Tr (años)	Q(m3/s)
2	32.86

⁹⁸ Segovia 205

⁹⁹ Formula expuesta en el documento "Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía", autor N.W. Hudson Silsoe Associates

5	45.15
10	59.48
20	69.72
50	87.15
100	95.48
500	119.51
1,000	132.5
10,000	157.15

Tabla 124. Gasto/caudal, río Hondo, subcuenca 33Ae.

Tr (años)	Q(m3/s)
2	35.59
5	48.64
10	60.94
20	75.48
50	90.58
100	104.18
500	129.53
1,000	140.34
10,000	164.76

f) Preparación de archivos en ArcGis.

Para poder realizar la modelación, se requiere una serie de procesos para poder obtener las áreas propensas a presentar inundación, estos procesos se realizaron mediante el uso de ArcGis10.2

g) Tratamiento del Modelo Digital de Elevación (MDE)

Para poder simular y crear nuestros mapas de inundación es importante, definir nuestro MDE, para lo cual, con la ayuda de software ArcGis, y partiendo del MDE, creamos un TIN (*Triangulated Irregular Network*) lo más detallado posible.

h) Creación de la estructura del río.

Con el TIN resultante, se procede a identificar el cauce principal del río y sus bordes; y con la extensión Hec-GeoRas¹⁰⁰, se digitalizan, para lo cual se crean ficheros vacíos desde el menú "Ras Geometry / create Ras Layers". La digitalización se realizó de aguas arriba a aguas abajo.

La información mínima que se digitalizó para usar en Hec-Ras, es la siguiente:

5. Stream Centerline, que es el cauce del río.
6. Bank Lines, que son los bordes del río.
7. Flow Path Centerlines, es la combinación del cauce y los bordes del río.
8. XS Cut Lines, son las distancias a las cuales se estima la inundación.

Una vez que se generaron las capas, se procede a rellenarlas con datos de alturas, por lo cual se procede a usar el TIN generado. Una vez obtenidas las alturas para cada capa, se crean en automático dos capas más, las cuales son River 3D y XS Cut Lines, que son las capas que tienen los datos de las alturas.

Con la obtención de los vectores anteriores, se procedió a crear el fichero de importación para HEC-RAS, en la barra de inicio "Ras Geometry / Extract GI data", este fichero de texto se guarda con formato .sdf.

Cabe recordar que el procedimiento se hizo para cada uno de los tres transecto del río, recordando que cada uno pertenece a una subcuenca diferente.

i) Creación de proyecto en Hec-Ras

La simulación de inundación por el desbordamiento del río Hondo, y la exportación de resultados hacia ArcGis, se levo acabo en cinco etapas.

9. Importación de datos geométricos en Hec-Ras.
10. Complementación de la información geométrica.
11. Información de los caudales que serán simulados.
12. Condiciones de frontera en el río.
13. Ejecución del programa, verificación y exportación de los resultados.

j) Importación de datos.

En esta etapa se lee el archivo que contiene la información geométrica del proyecto creado en ArcGis, pero antes de importarlo se debe generar un nuevo proyecto vacío y guardarlo, una vez que se generó el nuevo proyecto se procede a importar la geometría.

Una vez que se terminó de importar la geometría del río, este se verifica en "River Reach Stream Lines", después de confirmar que toda la información que se importó es correcta, se procede a ingresar los valores necesarios para efectuar la simulación. Es importante constatar que la geometría desplegada en Hec-Ras, sea igual a la creada en ArcGs. El proceso de importación se realizó para cada transecto del río Hondo.

Estructura perteneciente al cauce ubicado en la subcuenca 33Ac.

¹⁰⁰ Es una extensión para ArcGis 10.2, desarrollada conjuntamente por el *Hydrologic Engineering Center*, con los que se crean archivos de inportacion para Hec-Ras

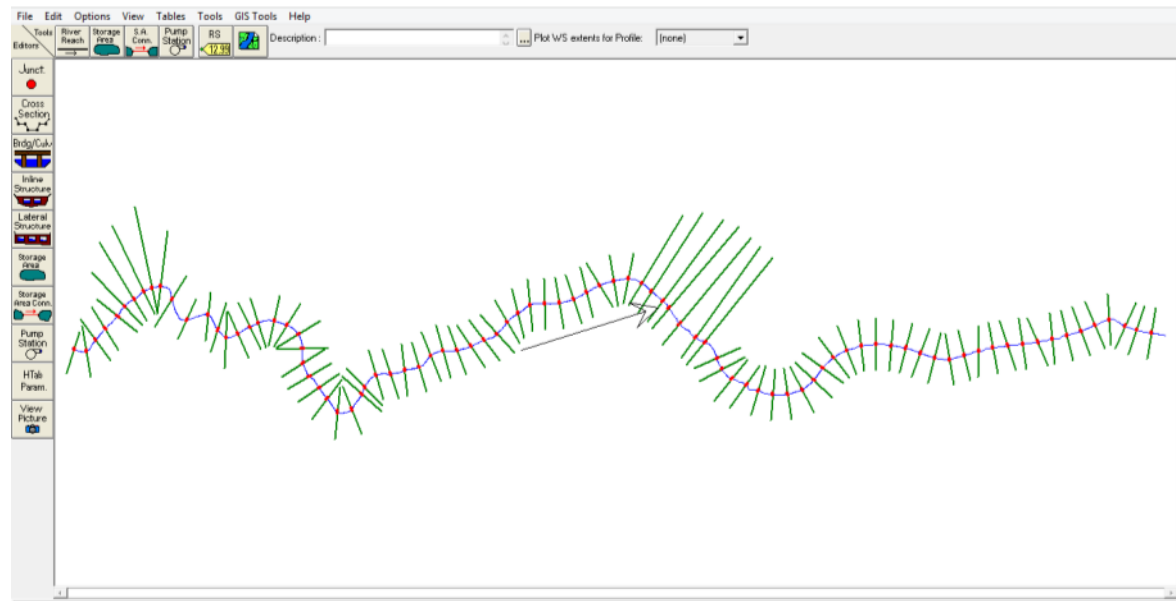


Figura 208. Captura en pantalla de la Estructura cauce, subcuena 33Ac.

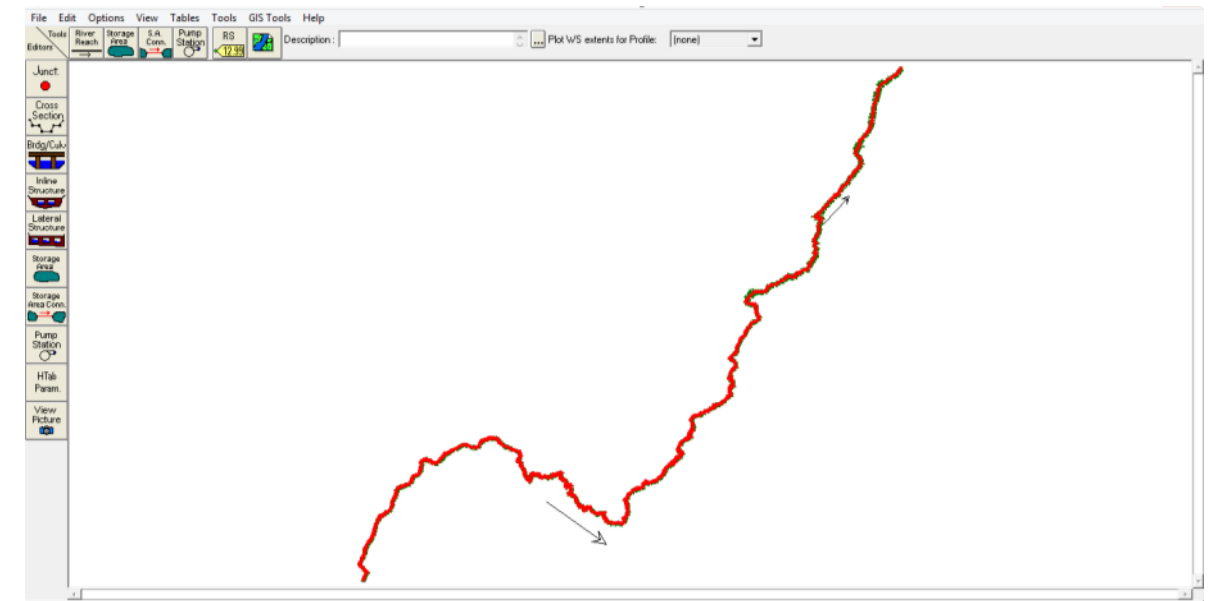


Figura 210. Estructura cauce, subcuena 33Ae.

El cauce de la subcuena 33Ad se aprecia con más detalle, debido a la distancia que este presenta con respecto a los otros dos, es importante que la dirección de la flecha que aparece este en dirección de aguas arriba a aguas abajo, ya que la flecha indica la dirección del flujo, si algunas de las tres flechas mostrara una dirección contraria, se tendría que realizar otra vez la estructura en ArcGis, pues los tres transecto pertenecen a un mismo río, y por consiguiente deben tener una misma dirección.

Estructura perteneciente al cauce ubicado en la subcuena 33Ad.

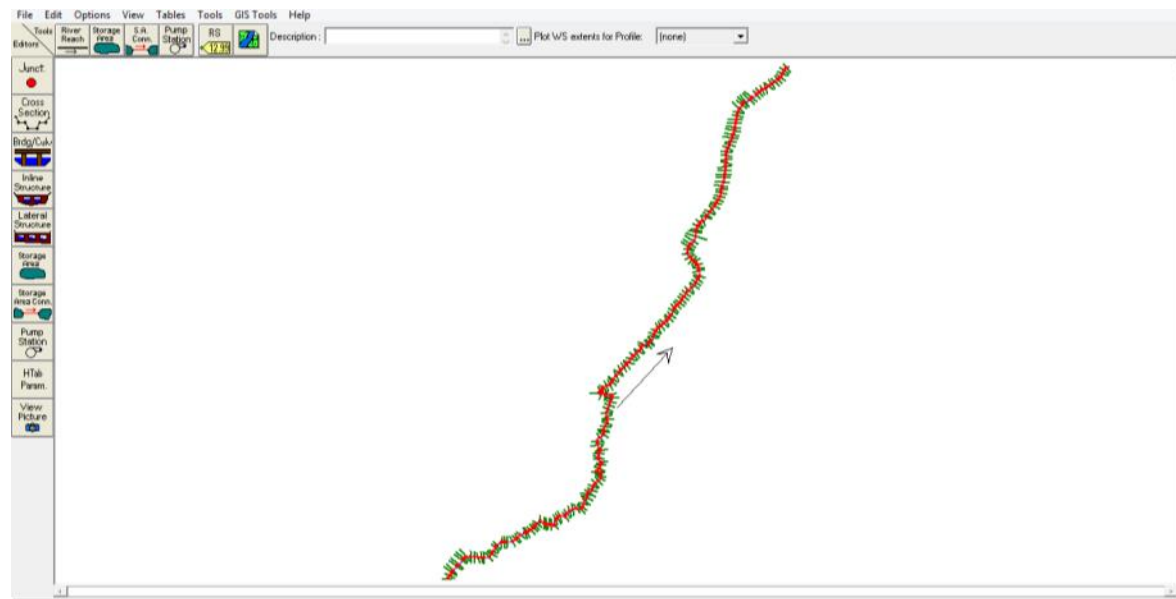


Figura 209. Estructura cauce, subcuena 33Ad.

Estructura perteneciente al cauce ubicado en la subcuena 33Ae.

k) Complementación de la información.

En este paso, se ingresaron los datos mínimos requeridos, pero de suma importancia para realizar la simulación. En la ventana de la estructura geométrica, se procedió a definir el coeficiente "n" de Manning, para cada sección, para definir el coeficiente de rugosidad, se seleccionó n#1, n#2 y n#3, seguido de "set values..", en la ventana que emerge se ingresa como coeficiente de rugosidad "0.0035", seguido del botón "ok", con este proceso se completa las zonas del cauce con el coeficiente de rugosidad.

Tabla 125. Coeficientes de Manning, fuente www.fao.org

Canales sin vegetación	Rugosidad de Manning
Secciones transversales, alineación regular si guijarros ni vegetación, en suelos sedimentarios finos.	0.016
Secciones transversales uniformes, alineación regular, sin guijarros ni vegetación, con suelo de arcillas duros u horizontales endurecidos	0.018
Secciones transversales uniformes, alineación regular, con pocos guijarros, escasa vegetación, en tierra franca arcillosa.	0.020
Pequeñas variaciones en las secciones transversales, alineación bastante regular, pocas piedras, hierbas finas en las orillas, en suelos arenosos o arcillosos, y también en canales limpios y rastrillados	0.0225
Alineación irregular, con ondulaciones en el fondo, en suelo grava o esquistos arcillosos, con orillas irregulares o vegetación	0.025
Sección transversal y alineación irregular, rocas dispersas y grava suelta en el fondo, o con considerable vegetación en los márgenes inclinados.	0.030
Canales irregulares erosionados, o canales abiertos en la roca.	0.030
Canales con vegetación	
Gramineas cortas (50-150mm)	0.030-0.060
Gramineas medias (150-250mm)	0.030-0.085

Gramineas largas (250-600m)	0.040-0.150
Canales corriente natural	
Limpios y rectos	0.025-0.030
Con muchas hierbas altas, sinuosos	0.033-0.040

Introducción de Gastos/Caudal.

Previamente a este paso, ya se había realizó el cálculo de los gastos/caudal para cada sección del río Hondo, esto, asociados con diferentes periodos de retorno (índice 3.4.3 Calculo del gasto / caudal).

La información referente a caudales se ingresó a través del menú "Steady Flow Data", el número de caudales ingresados corresponden al número de perfiles que se simularan, para el presente trabajo se obtuvieron 9 valores, correspondientes a 9 periodos de retorno, para cada una de las tres secciones del río Hondo.

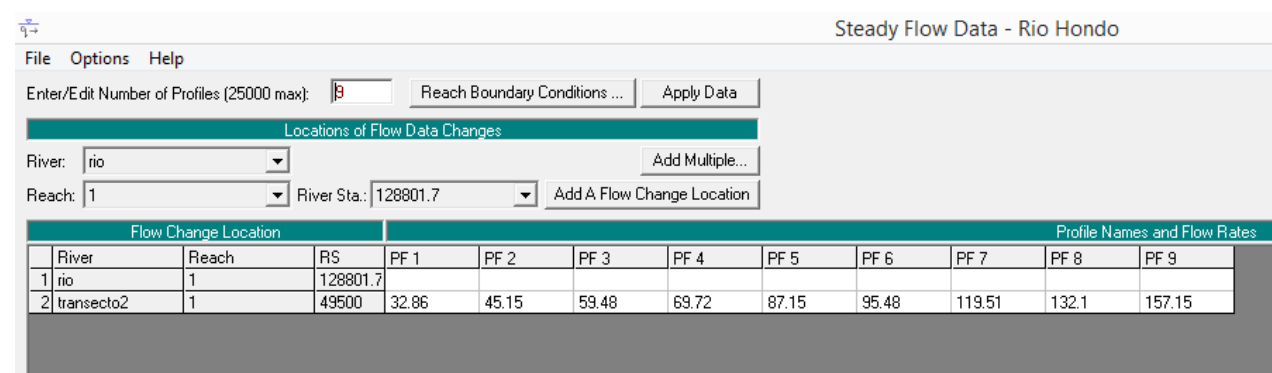


Figura 211. Ventana donde se ingresan los gastos, calculados.

En la misma ventana donde se ingresaron los caudales, se ingresa de igual forma las condiciones de frontera, para lo cual se selecciona el botón "Reach Boundry Conditions". Las condiciones de frontera permiten definir el comportamiento de un modelo en sus límites, para ambos caso se seleccionó la opción "Critical Depth".

Simulación de inundación e importación de los resultados

Una vez que se completaron los datos que el programa requiere para simular, se procede a ejecutar la simulación.

Este es el paso más importante, ya que en caso de que los datos sean erróneos, la simulación no se procesará y se tendría que ajustar los errores que indique el programa.

Una vez obtenidos los datos de la simulación, se proceden a exportar al ArcGis para la generación de zonas de inundación, los resultados de la simulación se exportan de tal manera que se seleccionen el total de caudales ingresados.

Generación de zonas de inundación

Para generar las zonas de inundación se usó ArcGis, y la extensión Hec-GeoRas.

Primeramente, se convirtió el formato exportado de Hec-Ras, a formato compatible con Arcgis, seguidamente se usó la barra de herramienta "RAS Mapping", donde se seleccionó la opción "Layer Setup", donde ingresamos datos de entrada como son:

1. El nombre con el cual se guardara el proyecto.

2. El archivo exportado de Hec-Ras, previamente convertido.
3. Se ingresa la ubicación del TIN, usado anteriormente.
4. Finalmente se ingresa la ubicación en donde se guardara los resultados.

Después de ingresar los datos seleccionamos, se generó un nuevo proyecto en Arcgis, en donde aparece el TIN que se usó para dar valores a las secciones del río, seguidamente seleccionamos "RAS Mapping/Import Ras Data", el cual nos genera polígonos, que limitarán la zona de inundación.

Posteriormente, para visualizar las zonas inundables para cada tiempo de retorno, lo primero es generar un TIN que contiene las alturas de inundación, se generan 9 TIN correspondientes a cada tiempo de retorno.

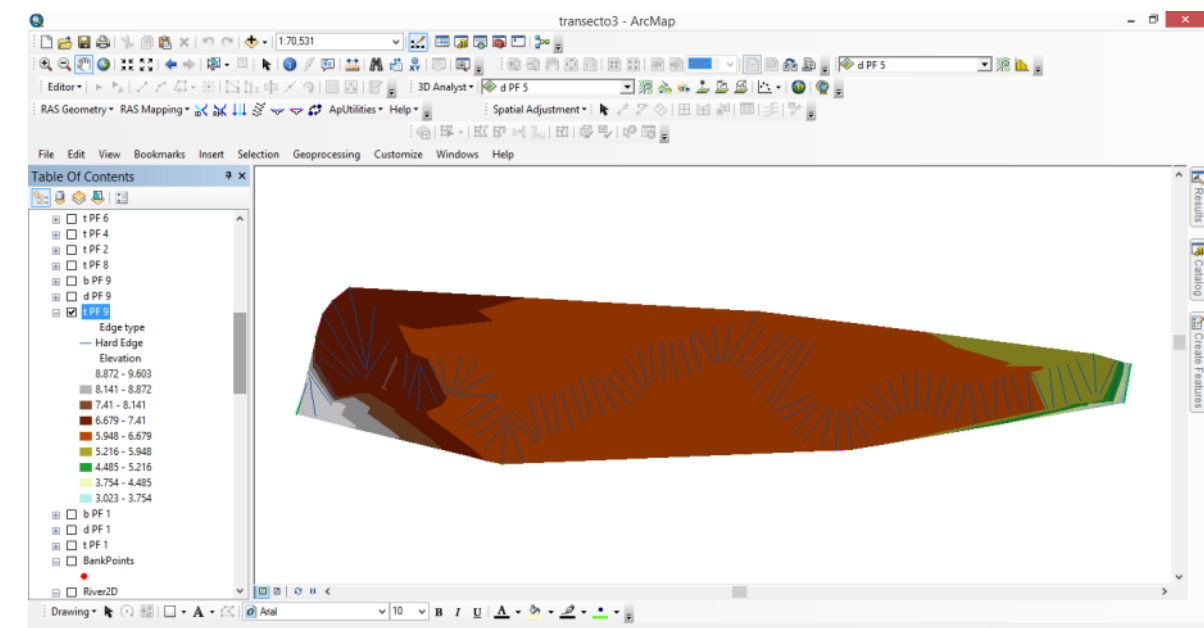


Figura 212. Generación de un TIN, para un Tr de 10,000 años.

Una vez que se obtuvieron los TIN, se procedió a generar las zonas de inundación, con la opción "RAS Mapping/ Inundation Mapping/ Floodplain Delineation Using Rasters", con los resultados de este análisis procedemos a generar nuestros mapas de inundación, ya que se generan polígonos de inundación y Raster que contienen la altura estimada de la inundación.

4.2.3.3 Peligro

Como se mencionó en el apartado de las metodologías, la metodología "Elaboración de mapas de inundación por percepción", permitió la verificación de las zonas de inundación.

La metodología consiste en la aplicación de una encuesta, la cual está aprobada por CENAPRED. En este caso, cobraron particular relevancia las encuestas aplicadas, ya que sirven de calibrador para el modelo de inundacion realizado con Hec-Ras. Las encuestas se realizaron en las localidades que se encuentran a una distancia de 1500mts respecto al río Hondo.

CENAPRED establece, que las encuestas se deben realizar casa por casa, sin embargo se modificó para el número de encuestados, aunque para efectos del trabajo, la encuesta se utilizó para valorar y comprobar la veracidad de las zonas

máximas de inundación que arroja el análisis, por lo cual las encuestas se realizaron a las viviendas más cercanas al río.

No obstante, las encuestas tienen un inconveniente: la veracidad de las personas y la percepción que ellos tienen del problema. Esto debido a que es muy frecuente este tipo de eventos, y para ellos ya es algo normal.

Cabe mencionar que la encuesta es tipo Likert, cuenta con un total de 11 reactivos de los que se dividen de la siguiente forma: de la pregunta 4 a 5 es para saber si ha existido antecedentes de inundación, y en caso afirmativo se sigue con la pregunta 6, en caso contrario se salta a la pregunta 10; las preguntas 6 a 9 es para estimar el peligro; las preguntas de la 10 a 11 estima la vulnerabilidad física; y de la pregunta 13 a 14 para vulnerabilidad biopsicosocial, las localidades encuestadas son las siguientes.

Tabla 126. Localidades encuestadas.

Localidad	Total encuestados
La unión	60
Francisco Botes	33
Cocoyol	43
Allende	32
Ramonal	31
Palmar	32
Sac-xan	34
Juan Sarabia	33
Subteniente López	26
total	326

Para estimar el peligro asociado a la inundación, se toman en cuenta las preguntas de la 6 a la 9, las cuales son las siguientes:

6.- ¿Qué tan frecuente se ha visto afectada su vivienda?

a) Un vez (1)	b) Pocas veces(2)
c) Una vez por año(3)	d) Mas de una vez por año(4)

7- ¿Hasta que nivel subió el agua?

a) Al tobillo(1)	b) A las rodillas(2)
c) A la cintura(3)	d) Cubrió el cuerpo(4)

8.- ¿Cuánto tiempo duro el agua estancada?

a) Menos de 1 hora(1)	b) 2hrs a un
-----------------------	--------------

dia(3)	
c) 2 días a una semana(3)	d) Mas de una semana(4)

9.- ¿El agua que inundó su vivienda tenía sedimentos?

a) Casi no(1)	b) Muy poco(2)	c) Regular(3)	d) Mucho(4)
---------------	----------------	---------------	-------------

El número que se presenta a un lado de la respuesta es el valor que tiene esa respuesta la cual se usa para sacar la percepción de peligro mediante la siguiente formula:

$$\text{Peligro} = P6(1.2) + P7(1.5) + P8(1.1) + P9(1.2)$$

Dependiendo del puntaje obtenido, será la percepción de peligro.

Tabla 127. Ponderación del riesgo.

Puntaje y percepción del peligro por inundación	
Puntaje	Percepción del peligro por inundación
5 – 8	Muy bajo
8.1 – 11	Bajo
11.1 – 14	Medio
14.1 – 17	Alto
17.1 -20	Muy Alto

La identificación por inundación, como parte de la estimación del peligro en las colindancias del río Hondo, se realizó para los tiempo de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1000 y 10, 000 años, esto por medio de la simulación hidrológica, la modelación y análisis hidrológico se hizo para cada uno de los 3 transecto del río Hondo, ya que cada uno pertenece a una subcuena diferente.

Las zonas/áreas de inundación se consideran mediante la lectura de la tonalidad de los colores del Raster, resultante, en los mapas se puede interpretar que mientras más oscuro se al el tono del color, mayor profundidad existe.

l) Resultados transecto río Hondo, subcuena 33Ac

A lo largo del transecto, se encuentran 2 localidades de interés, que son Juan Sarabia y Subteniente López, las cuales se encuentran a una distancia máxima de 1,500 m, respecto al cauce del río Hondo.

Para cada tiempo de retorno, se presentó un área de inundación diferente, tanto en profundidad, como en planicie.

La siguiente tabla muestra las profundidades mínimas y máximas a lo largo del transecto.

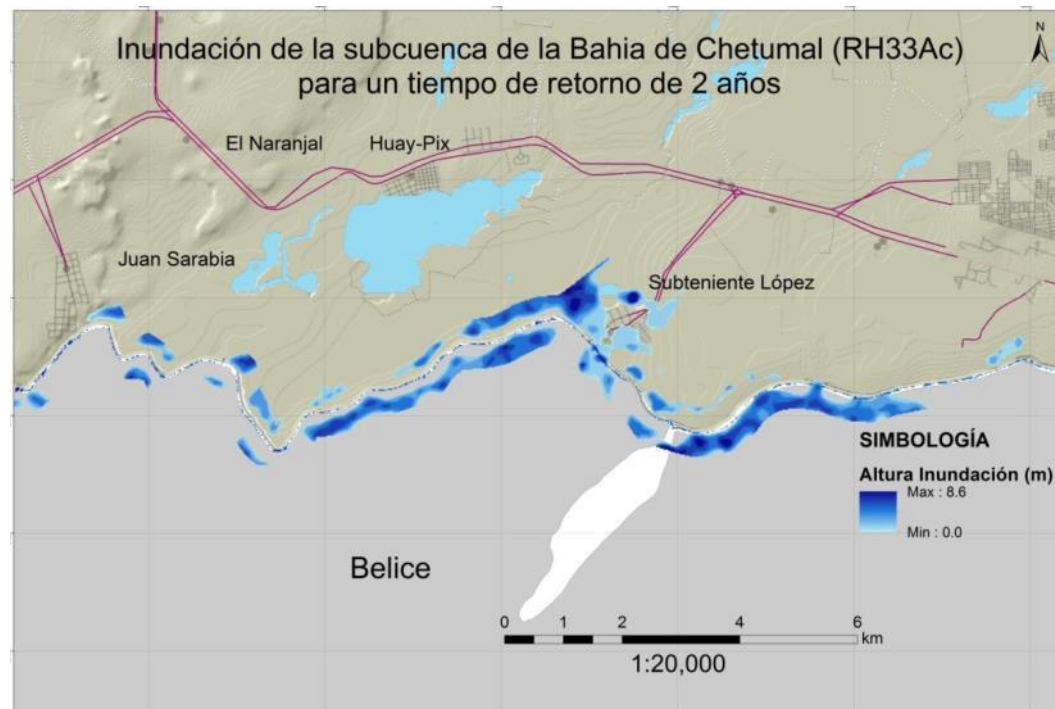


Figura 213. Inundación Río Hondo subcuenca 33Ac, tiempo de retorno de 2 años.

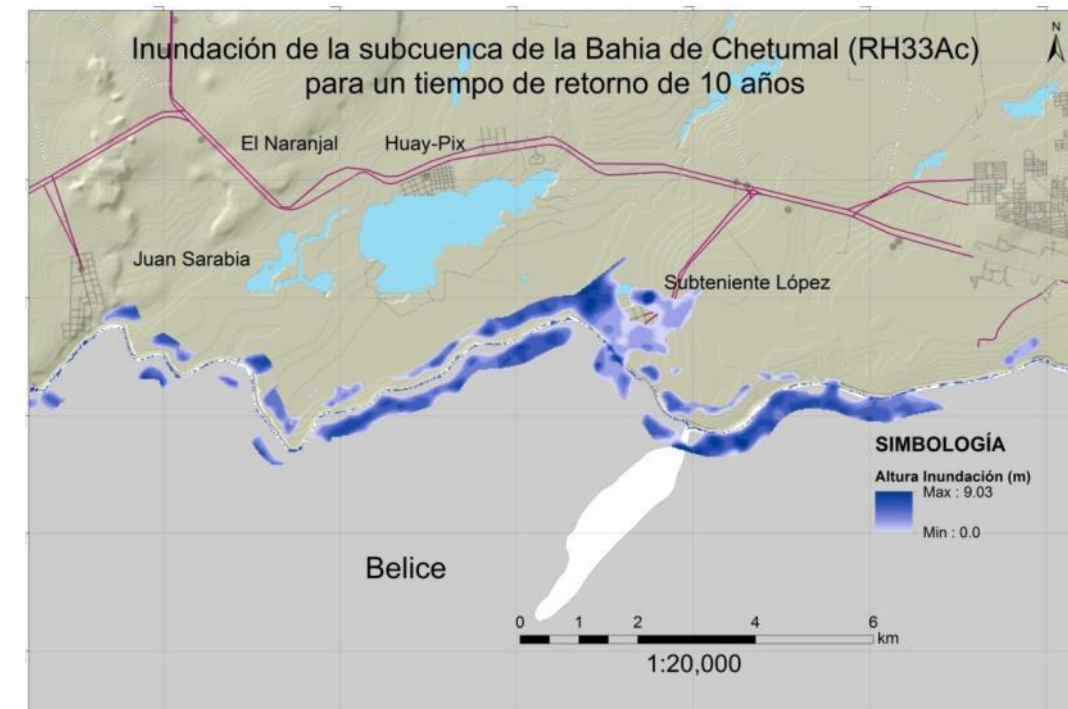


Figura 215. Inundación Río Hondo subcuenca 33Ac, tiempo de retorno de 10 años.

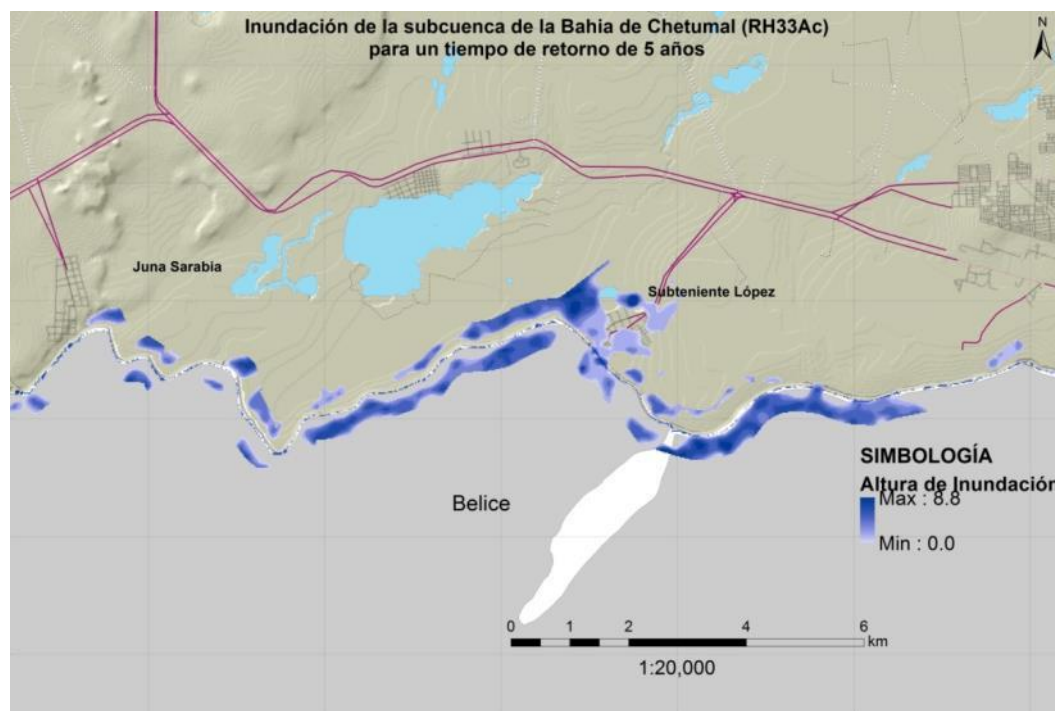


Figura 214. Inundación Río Hondo subcuenca 33Ac, tiempo de retorno de 5 años.

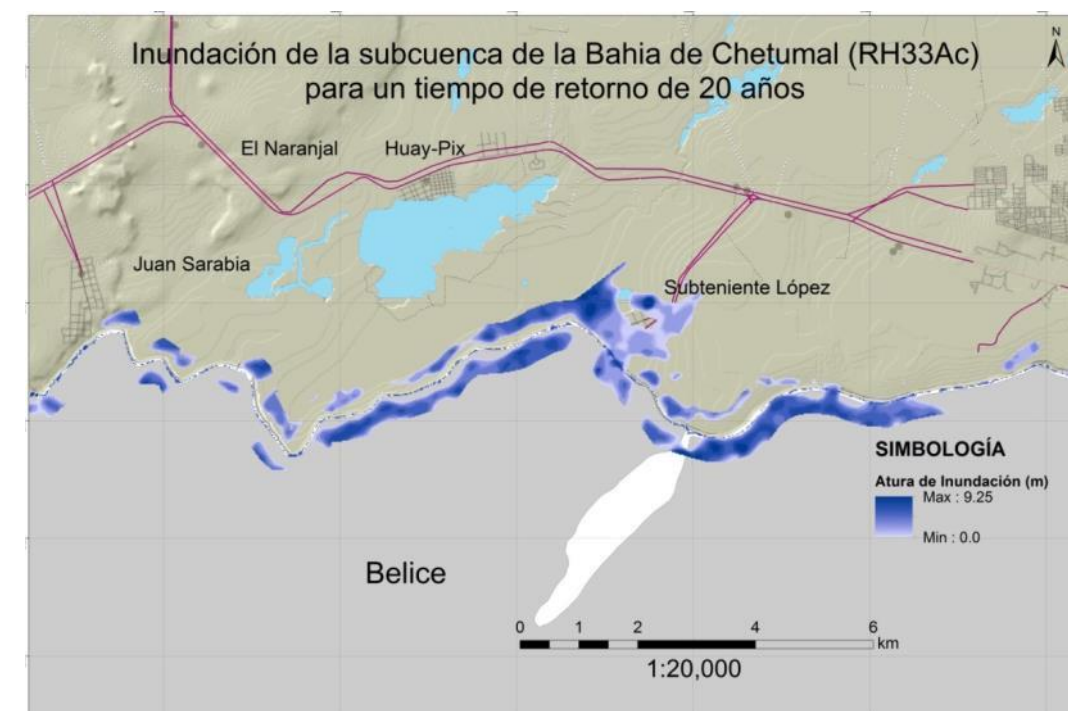


Figura 216. Inundación Río Hondo subcuenca 33Ac, tiempo de retorno de 20 años.

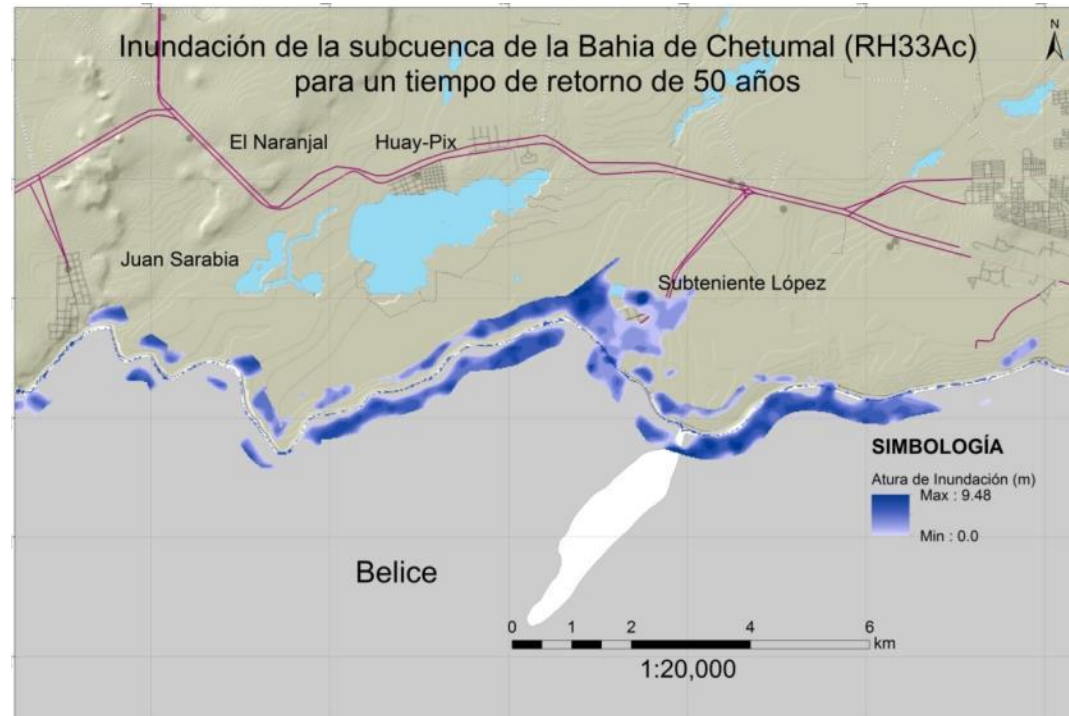


Figura 217. Inundación Río Hondo subcuenca 33Ac, tiempo de retorno de 50 años.

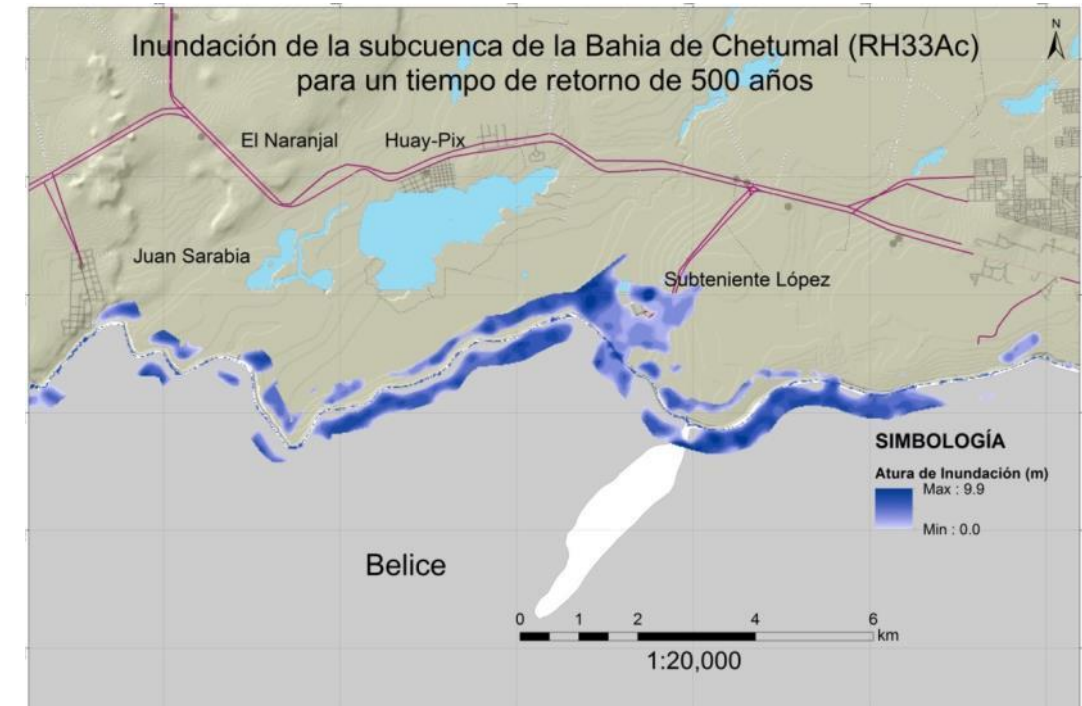


Figura 219. Inundación Río Hondo subcuenca 33Ac, tiempo de retorno de 500 años.

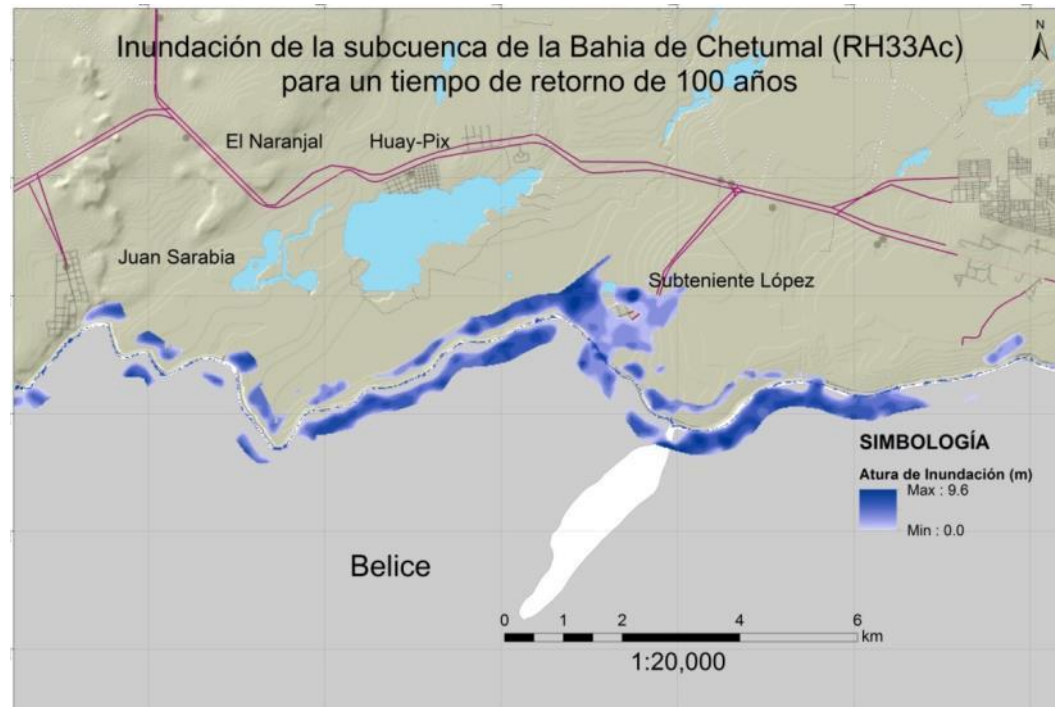


Figura 218. Inundación Río Hondo subcuenca 33Ac, tiempo de retorno de 100 años.

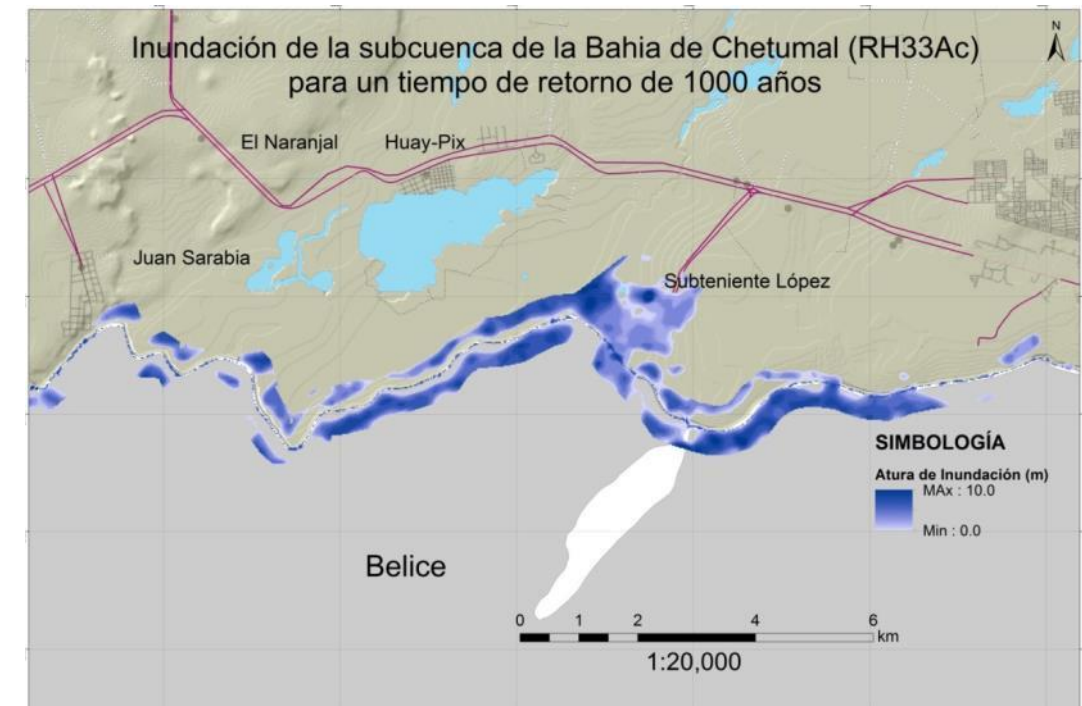
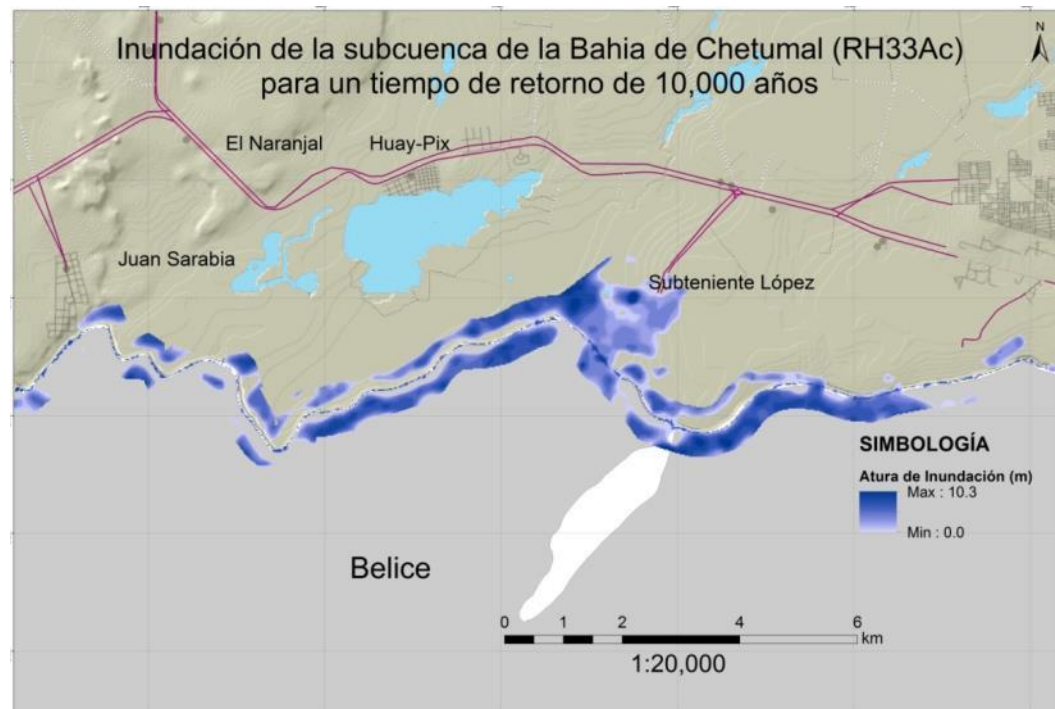


Figura 220. Inundación Río Hondo subcuenca 33Ac, tiempo de retorno de 1000 años.



Inundación Rio Hondo subcuenca 33Ac, tiempo de retorno de 10,000 años.

En la Tabla siguiente podemos observar que conforme el tiempo de retorno es mayor, las alturas de inundación máximas igual son mayores. Sin embargo, en la altura mínima vemos que se comporta diferente, aunque esto se debe a que a mayor tiempo de retorno, mayor será el área de inundación y el límite de esas áreas son las alturas mínimas.

Tabla 128. Alturas de inundación transecto en la subcuenca 33Ac.

Tiempo de Retorno	Alturas de Inundación (m)	
	Máxima	Mínima
2 años	8.61	0.0
5 años	8.83	0.0
10 años	9.03	0.0
20 años	9.25	0.0
50 años	9.48	0.0
100 años	9.63	0.0
500 años	9.92	0.0
1,000 años	10.04	0.0
10,000 años	10.34	0.0

Los resultados obtenidos en las localidades de interés mediante la modelación de inundación son los siguientes:

Juan Sarabia.

Para la localidad de Juan Sarabia, se puede observar que desde un tiempo de retorno de 2 años y hasta un tiempo de retorno de 10,000 años, no existe afectación, por inundación del río Hondo. Esto debido a la distancia y la altura a la que se encuentra la localidad de Juan Sarabia, con respecto al río Hondo.

Subteniente López.

En la localidad de Subteniente López, en el modelo de Hec-Ras, muestra áreas de inundación, las cuales son debidos igual a la lluvia y que se encuentra la laguna encantada, así como la laguna negra. Estos factores muestran un área de inundación muy extensa para la localidad de subteniente López.

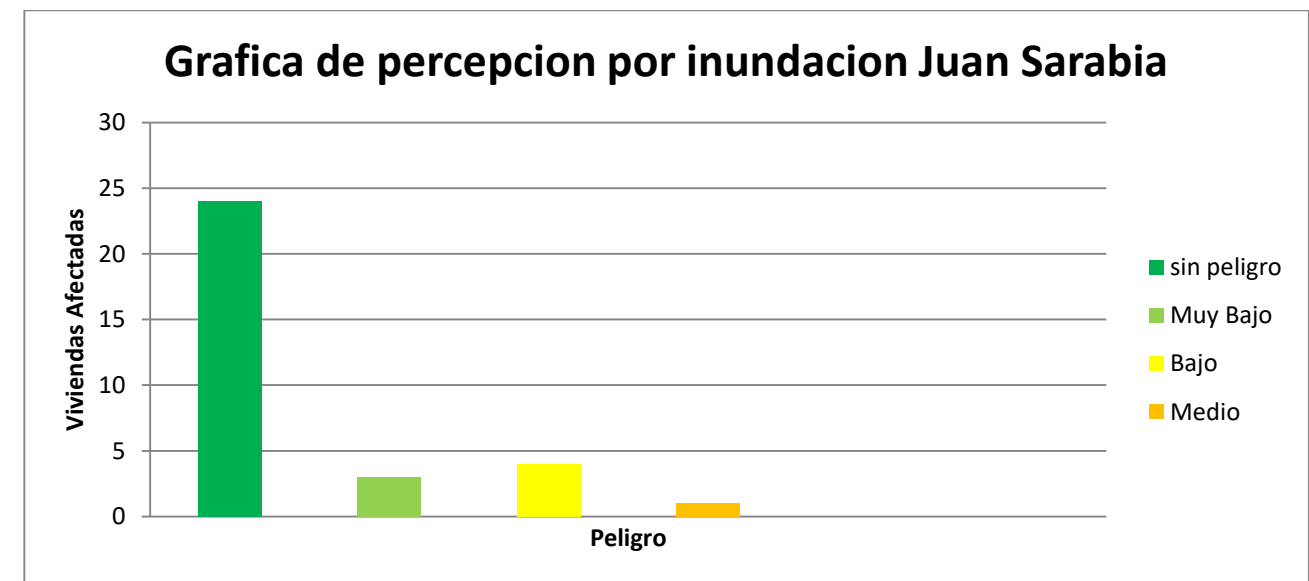
Tabla 129. Alturas y área de inundación, localidad Subteniente López.

Tiempo de Retorno	Localidad Subteniente López (1'509,915.91 m ²)		
	Altura de Inundación Máxima	Área de Inundación (m ²)	Porcentaje de área afectada
2 años	6.62	636723.14	42.17 %
5 años	6.84	686780.43	45.48 %
10 años	7.04	914325.25	60.55 %
20 años	7.26	949026.98	62.85 %
50 años	7.49	980819.56	64.96 %
100 años	7.64	998884.00	66.15 %
500 años	7.93	1044500.07	69.18 %
1,000 años	8.05	1195828.04	79.20 %
10,000 años	8.35	1228721.91	81.38 %

Comparando los modelos de hec-ras con las respuestas asociadas a las encuestas aplicadas, podemos observar lo siguiente.

Juan Sarabia

De las 32 encuestas realizadas en Juan Sarabia, 24 casas no presentaron afectación, 3 casas una afectación de tipo muy bajo, 4 casa afectación de peligro bajo y 1 casa de peligro medio.

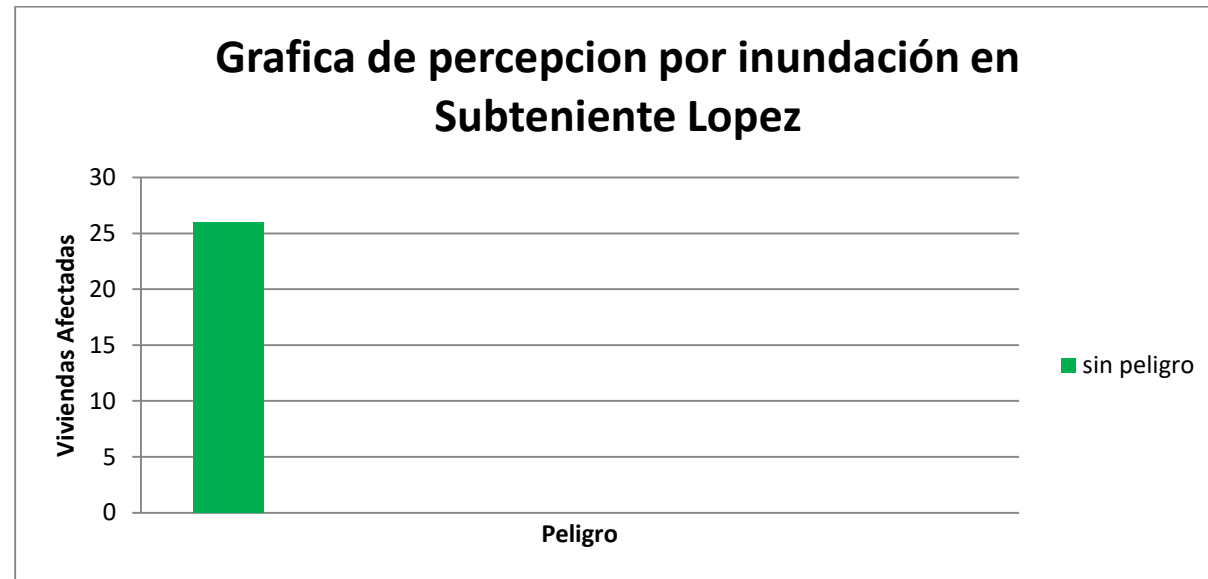


Gráfica 84. Percepción de la inundación Juan Sarabia.

La grafica nos indica que en la localidad de Sac-xan, sí existe inundación por crecida del río Hondo, el análisis en Hec-Ras, muestra que no existe inundación.

Subteniente López

De las 26 encuestas realizadas en Subteniente López, 26 casas no presentaron afectación.



Gráfica 85. Percepción por inundación en Subteniente Lopez.

La gráfica nos indica que en la localidad de Subteniente López, no existe inundación por crecida del río Hondo, y aunque el análisis en Hec-Ras muestra que si existe inundación, dicha inundación es por efecto de lluvia.

Resultados transecto río Hondo, subcuenca 33Ad.

A lo largo del transecto, se encuentran 5 localidades de interés, que son Cacao, Allende, Ramonal, El Palmar y Sacxan. Las cuales se encuentran a una distancia máxima de 1,500 m respecto al cauce del río Hondo.

Para cada tiempo de retorno se presentó un área de inundación diferente, tanto en profundidad, como en planicie, la siguiente tabla muestra las profundidades mínimas y máximas a lo largo del transecto del río Hondo.



Figura 221. Inundación Río Hondo subcuenca 33Ad, tiempo de retorno de 2 años.

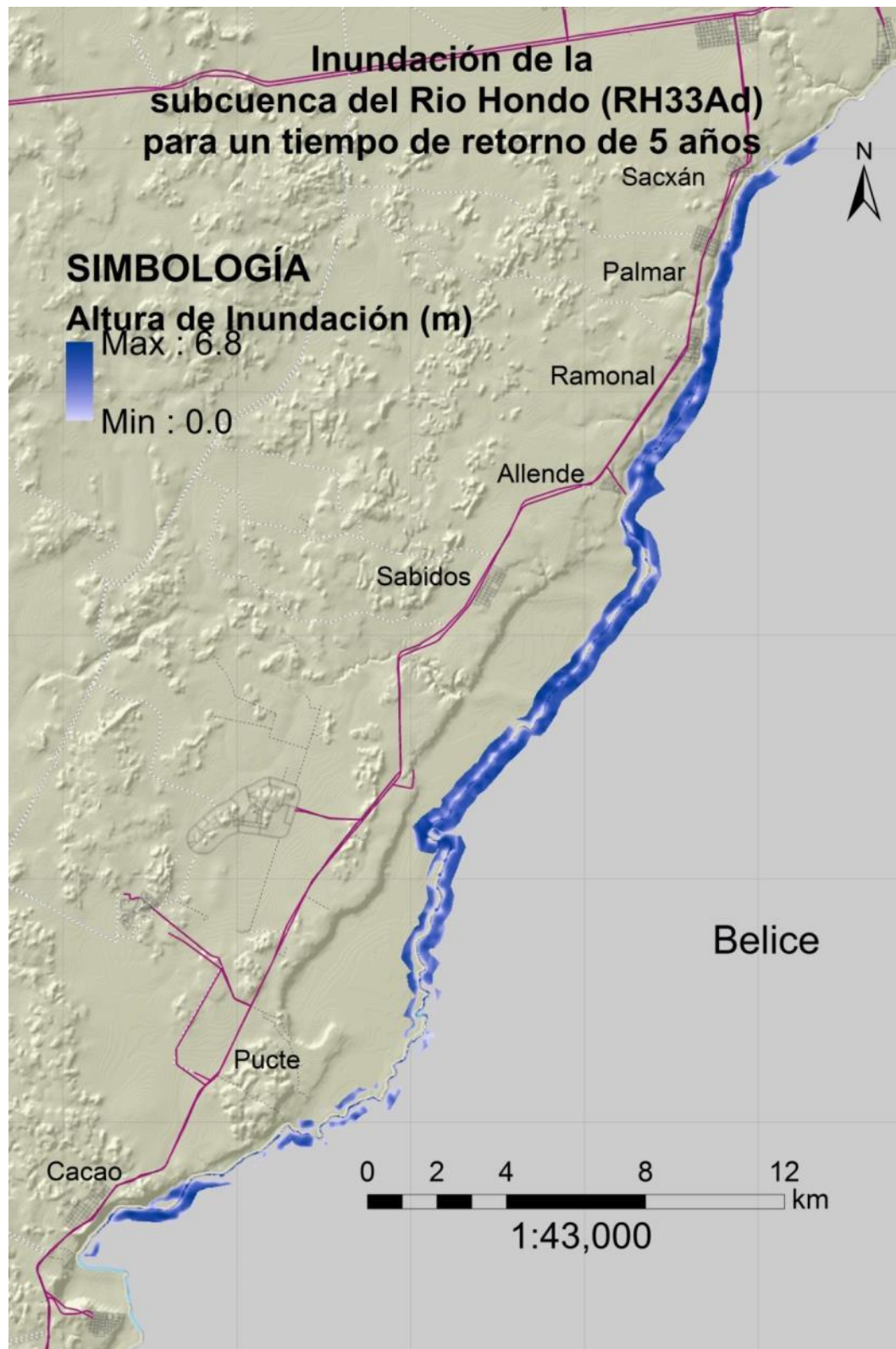


Figura 222. Inundación Rio Hondo subcuenca 33Ad, tiempo de retorno de 5 años.

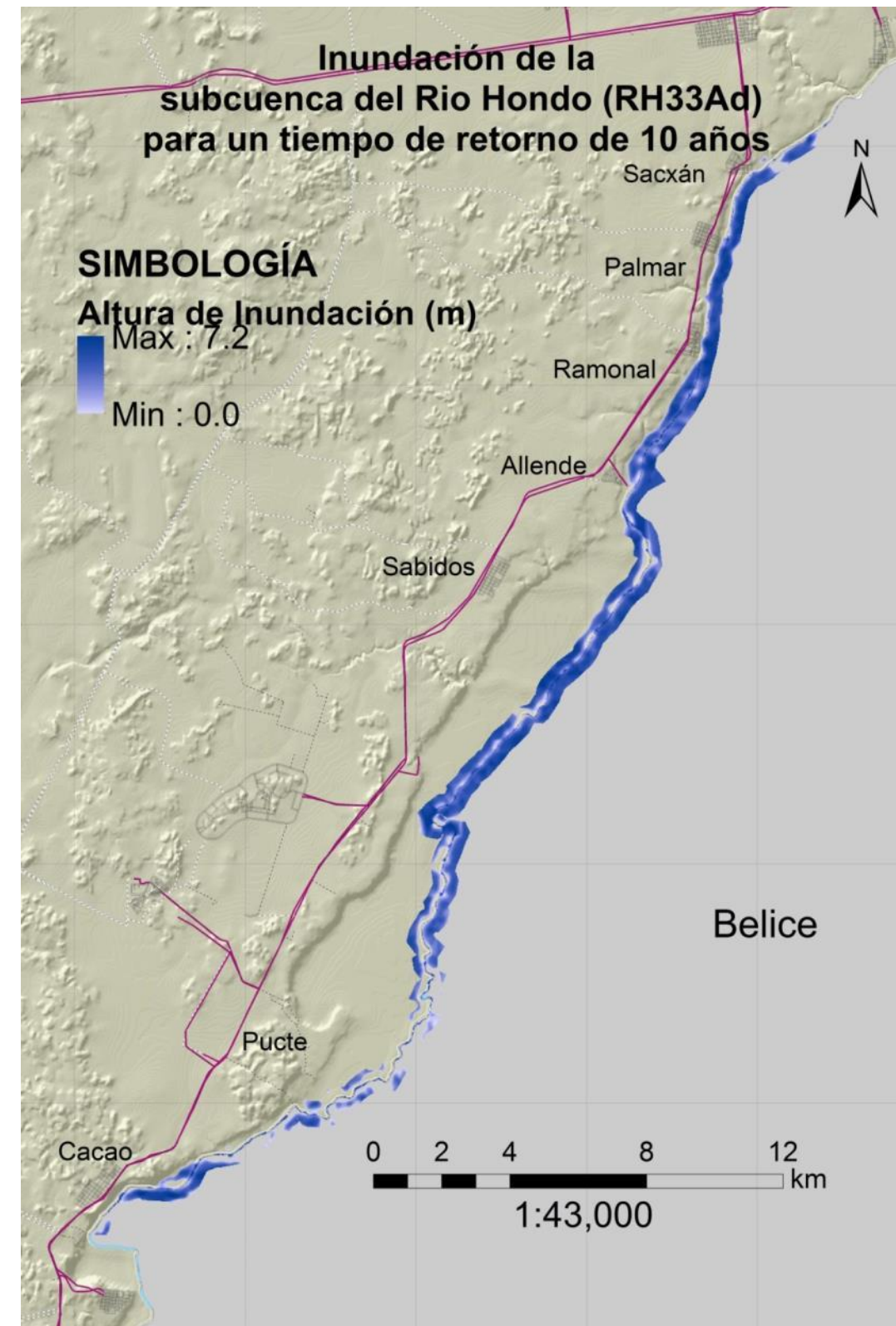


Figura 223. Inundación Rio Hondo subcuenca 33Ad, tiempo de retorno de 10 años.

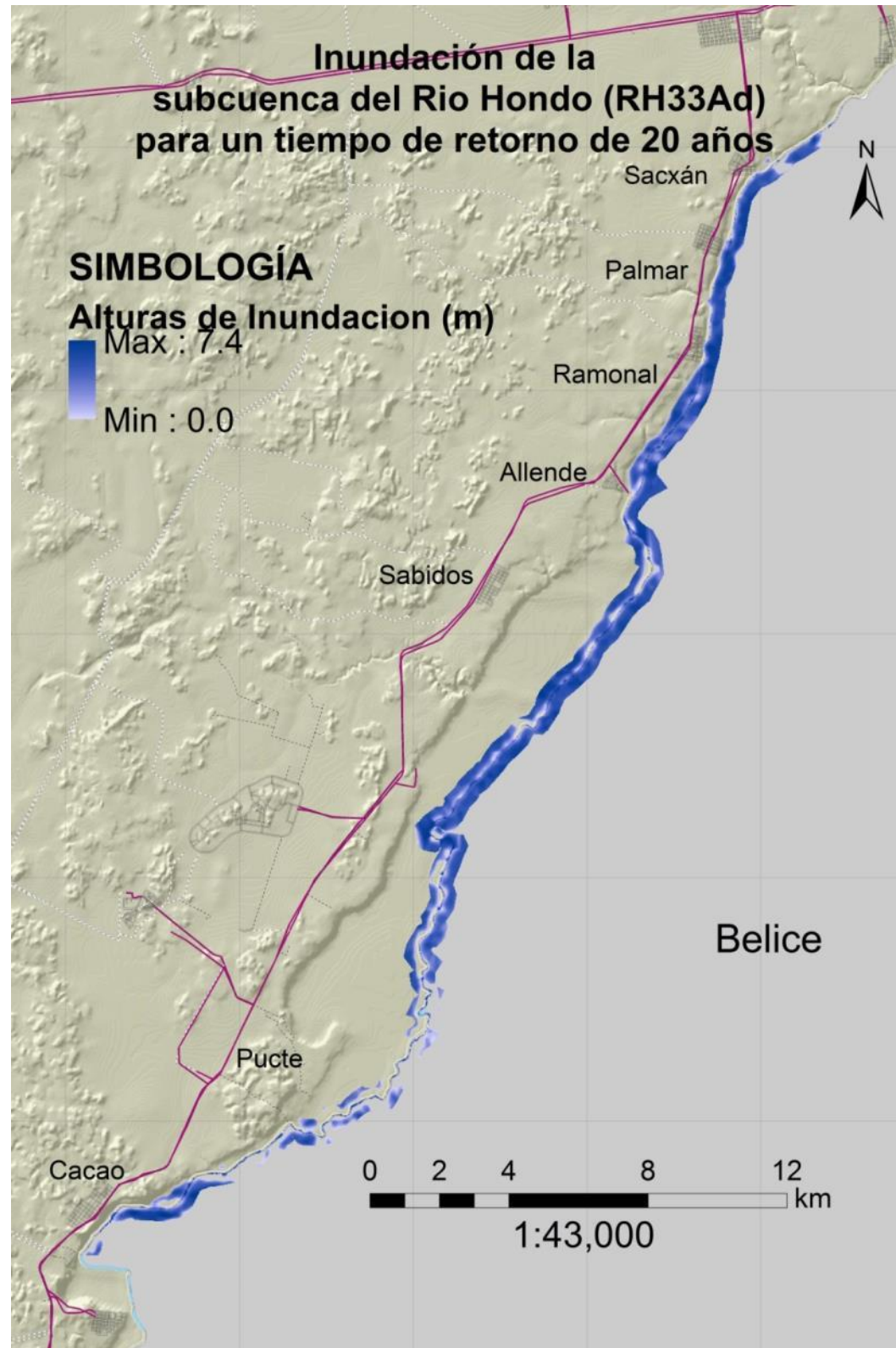


Figura 224. Inundación Rio Hondo subcuenca 33Ad, tiempo de retorno de 20 años.

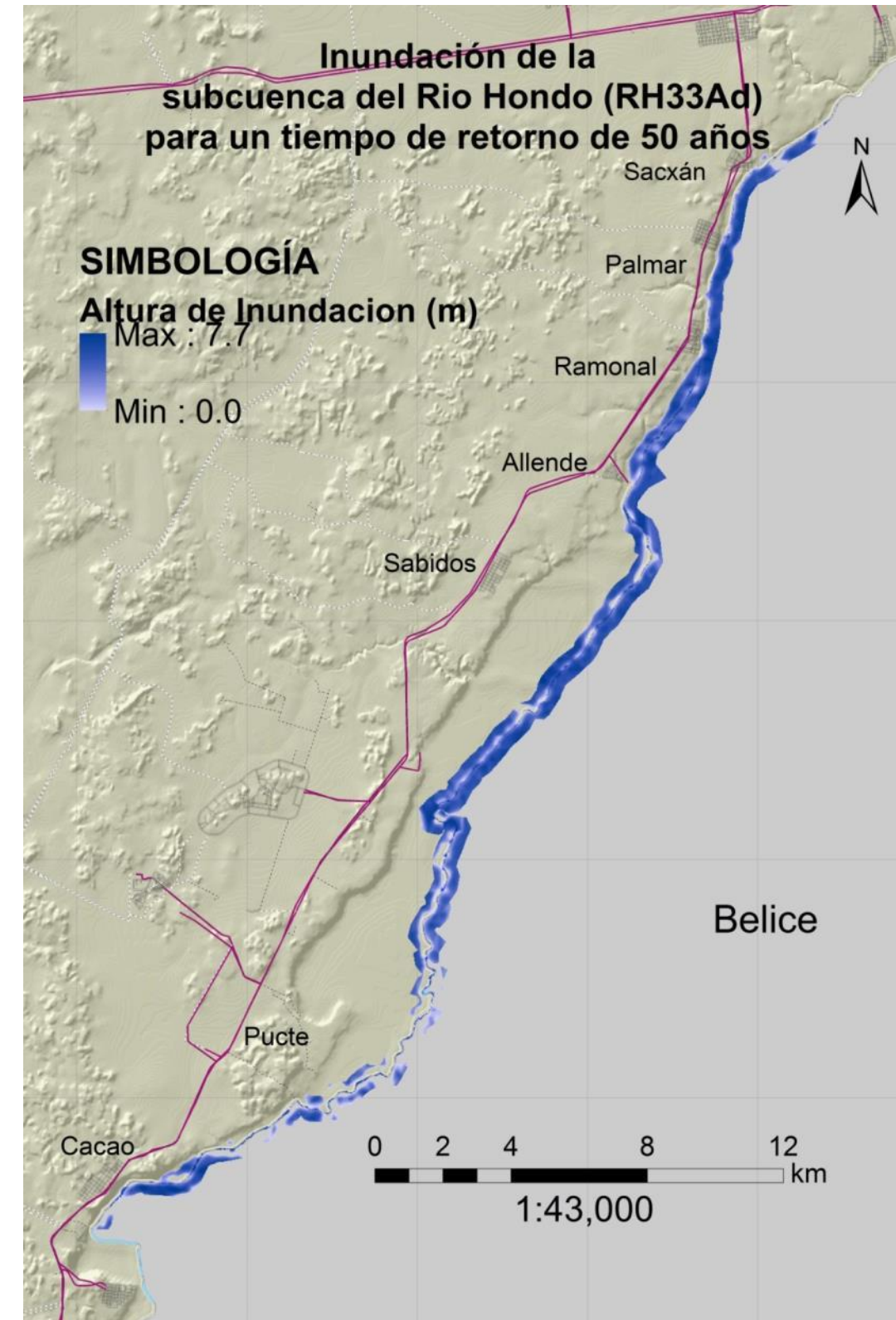


Figura 225. Inundación Rio Hondo subcuenca 33Ad, tiempo de retorno de 50 años.

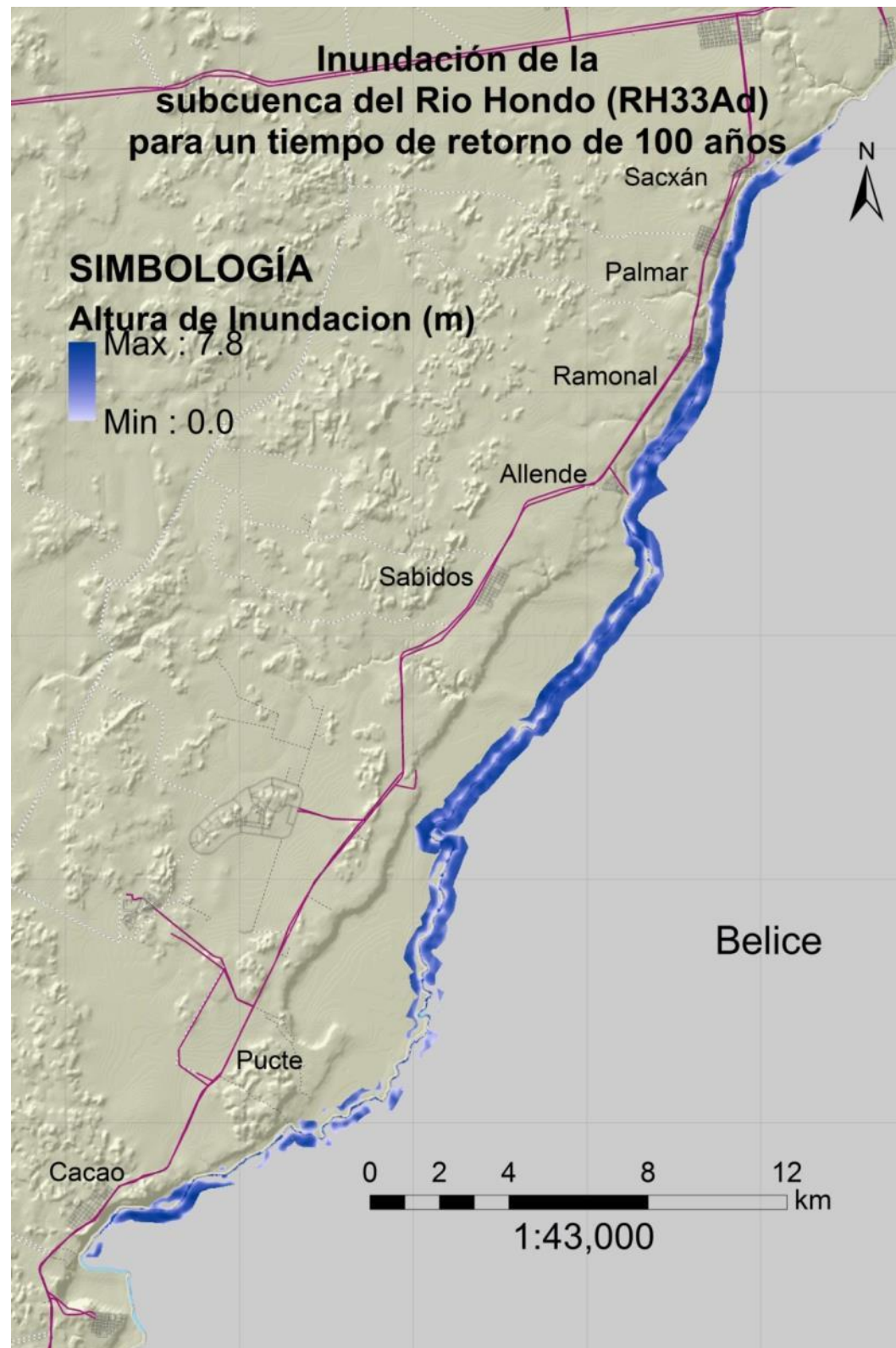


Figura 226. Inundación Rio Hondo subcuenca 33Ad, tiempo de retorno de 100 años.

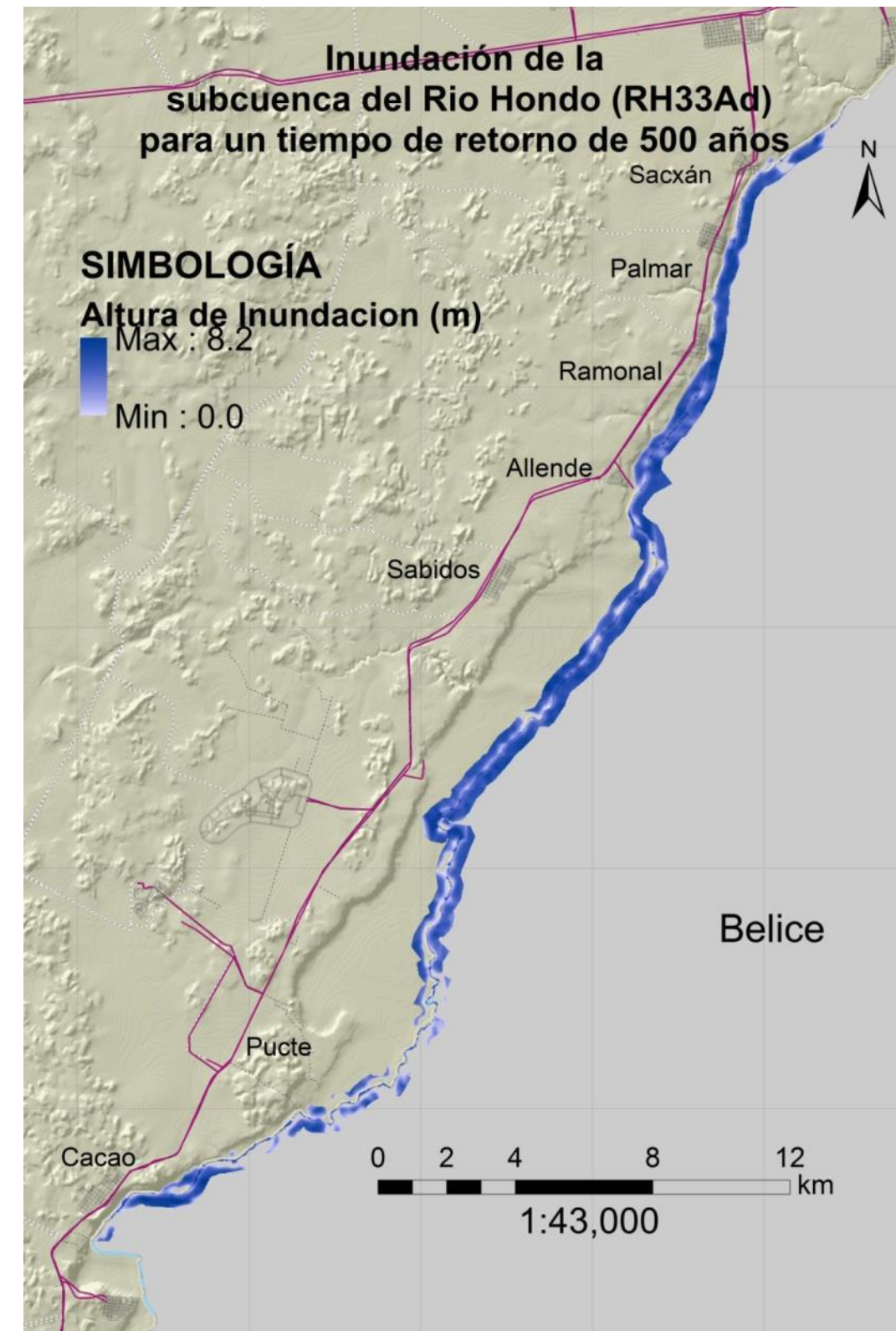


Figura 227. Inundación Rio Hondo subcuenca 33Ad, tiempo de retorno de 500 años.

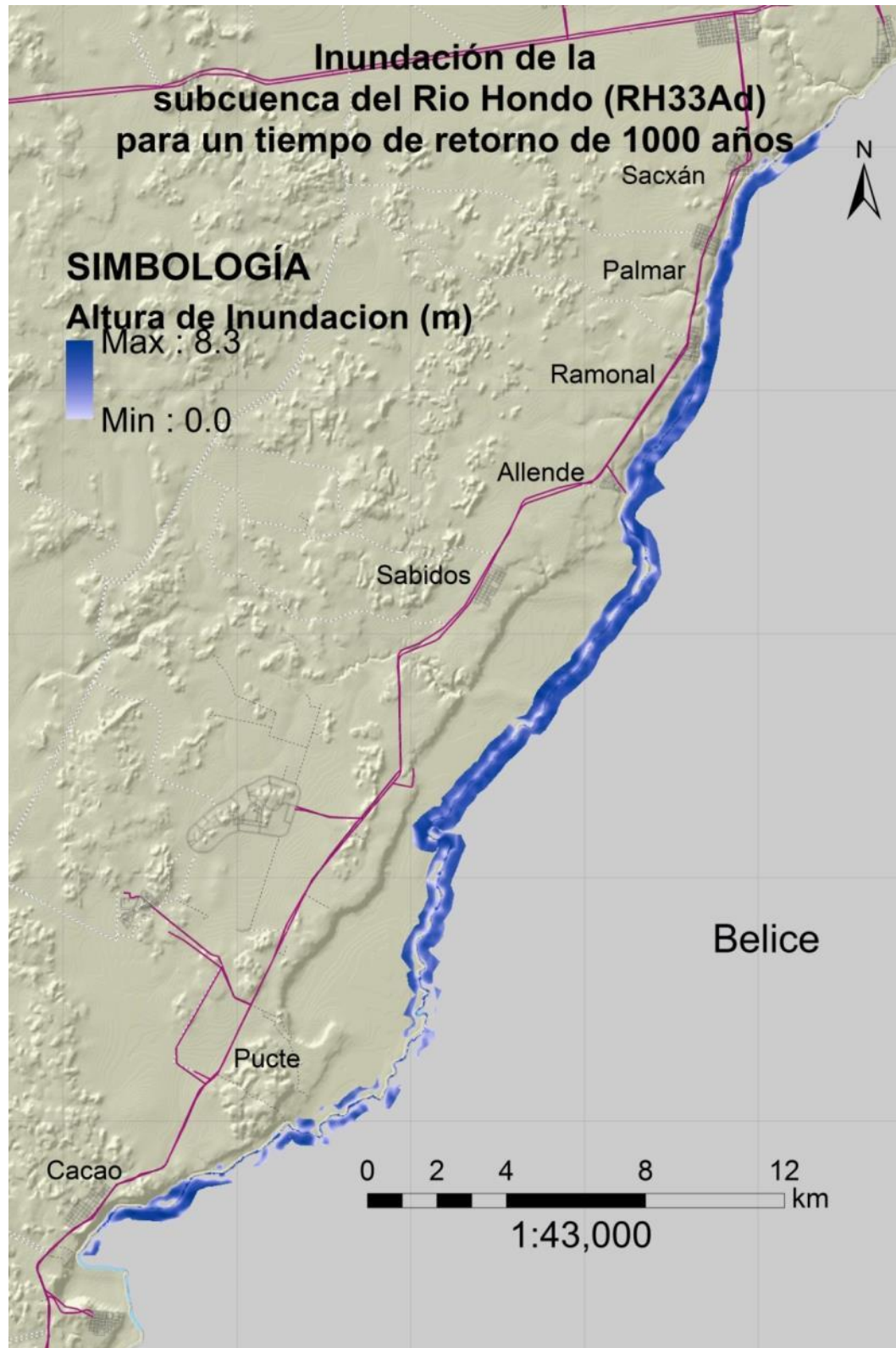


Figura 228. Inundación Rio Hondo subcuenca 33Ad, tiempo de retorno de 1,000 años.

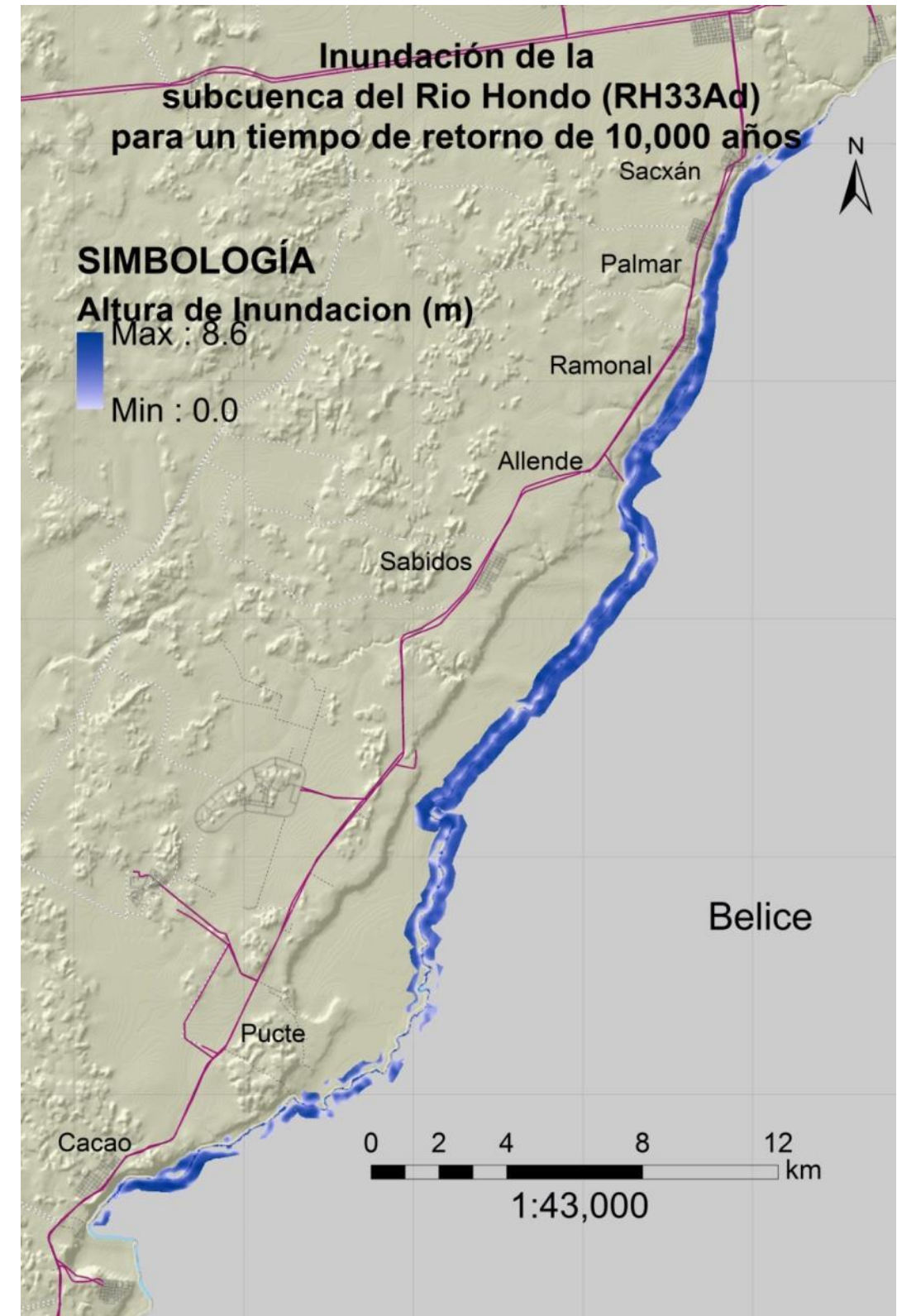


Figura 229. Inundación Rio Hondo subcuenca 33Ad, tiempo de retorno de 10,000 años.

Tabla 130. Alturas de inundación transecto en la subcuenca 33Ad.

Tiempo de Retorno	Alturas de Inundación (m)	
	Mínima	Máxima
2 años	0.00031	6.42
5 años	0.00014	6.88
10 años	0.00014	7.26
20 años	0.00016	7.44
50 años	0.00044	7.73
100 años	0.00063	7.86
500 años	0.00068	8.22
1,000 años	0.00013	8.38
10,000 años	0.000066	8.68

Cacao.

Para la localidad de Cacao, para un tiempo de retorno de 2 años y hasta un tiempo de retorno de 10,000 años, no existe afectación, por inundación del río Hondo. Esto debido a la distancia y la altura a la que se encuentra la localidad de Cacao, con respecto al río Hondo.

En la siguiente imagen, podemos apreciar la pendiente que existe entre la localidad y el río Hondo, y ver de igual forma que la distancia es considerable.



Fotografía 10. Vista del río Hondo desde la Loc. Cacao

Allende, Ramonal y el Palmar

En las localidades de Allende, Ramonal y el Palmar, tampoco existe afectación por inundación del Río Hondo, debido a las características del terreno, ya que cuando hay crecidas del río Hondo, la pendiente ayuda a que el agua no llegue a las localidades antes mencionadas.

Sac-xan.

La localidad presenta una afectación por inundación en la zona baja de la comunidad, la cual se encuentra a escasos

metros del cauce del río Hondo, para los tiempos de retorno de 50 a 10,000 años, se cubre una parte significativa de la localidad.

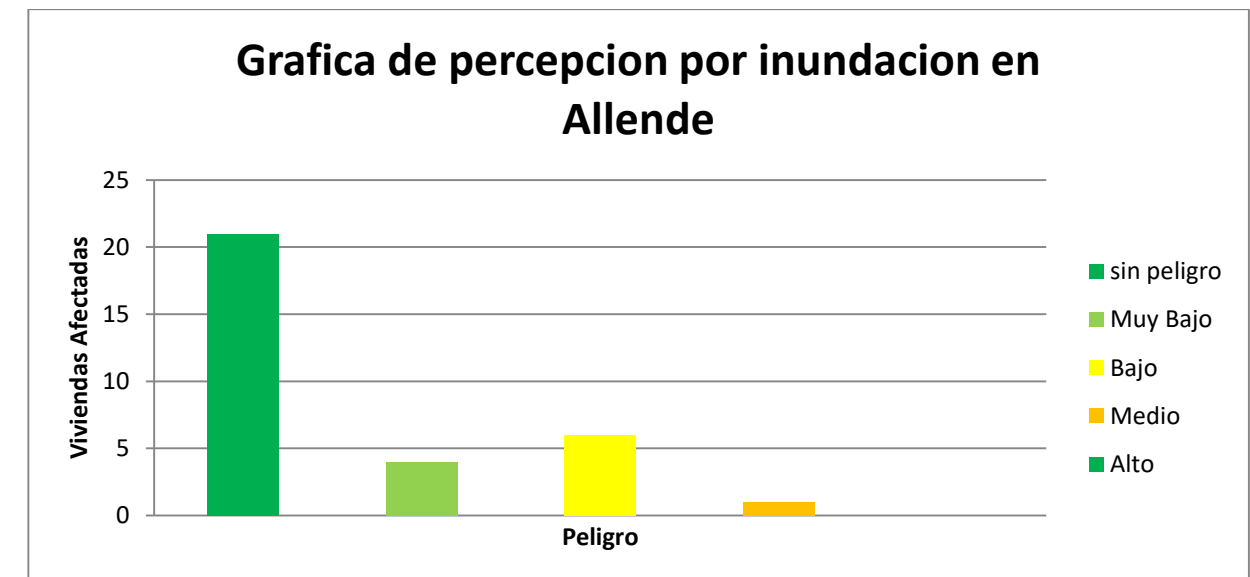
Tabla 131. Alturas y área de inundación, localidad Sacxan.

Localidad Sacxan (492,143.13 m ²)			
Tiempo de Retorno	Altura de Inundación	Área de Inundación (m ²)	Porcentaje de área afectada
	Máxima		
2 años	0.070	27.61	0.00561 %
5 años	0.68	1008.18	0.20486 %
10 años	0.945	2112.31	0.42921 %
20 años	1.038	2530.01	0.51408 %
50 años	1.16	2530.01	0.51408 %
100 años	1.20	3473.86	0.70586 %
500 años	1.47	6003.88	1.21995 %
1,000 años	1.55	6803.88	1.38250 %
10,000 años	1.73	7586.17	1.54146 %

Comparando los modelos de hec-ras con las respuestas asociadas a las encuestas aplicadas, podemos observar lo siguiente.

Allende

De las 32 encuestas realizadas en Allende, 21 casas no presentaron afectación, 4 casas una afectación de tipo muy bajo, 6 casa afectación de peligro bajo y 1 casa de peligro medio.



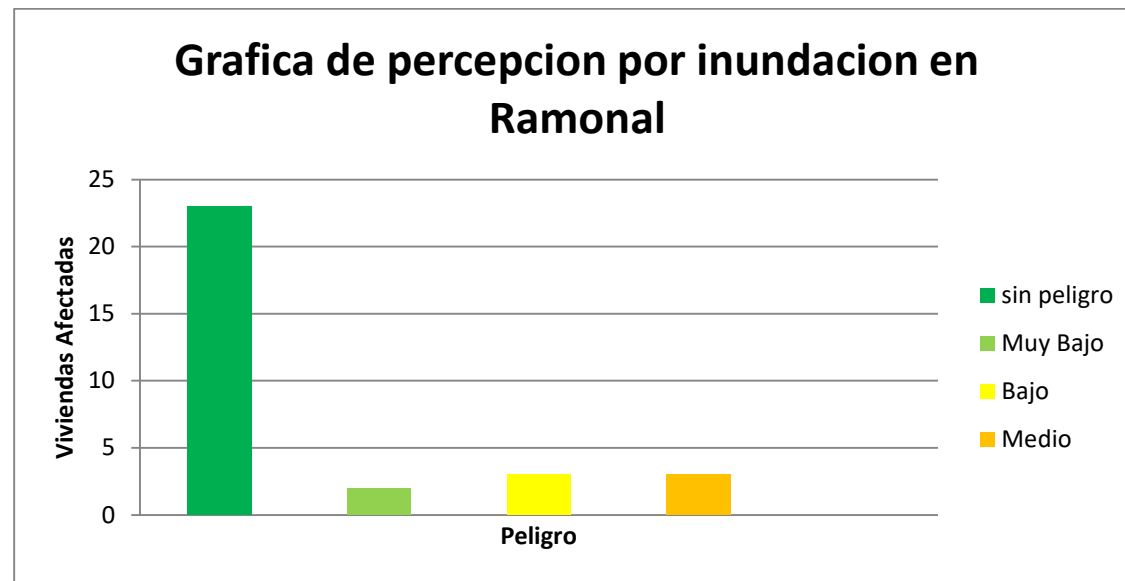
Gráfica 86. Percepción por inundación en Allende.

La inundación por afectación en Allende predomina con una afectación de peligro bajo, pero en el análisis matemático con Hec-Ras, no marca afectación de ningún tipo, con la comparación de los resultados podemos decir que la afectación que hay en la localidad de Allende no es por crecida del río Hondo, puede ser afectación por escorrentías de lluvia hacia el río Hondo.

Ramonal.

De las 31 encuestas realizadas en Ramonal, 23 casas no presentaron afectación, 2 casas una afectación de tipo muy

bajo, 3 casa afectación de peligro bajo y 3 casa de peligro medio.

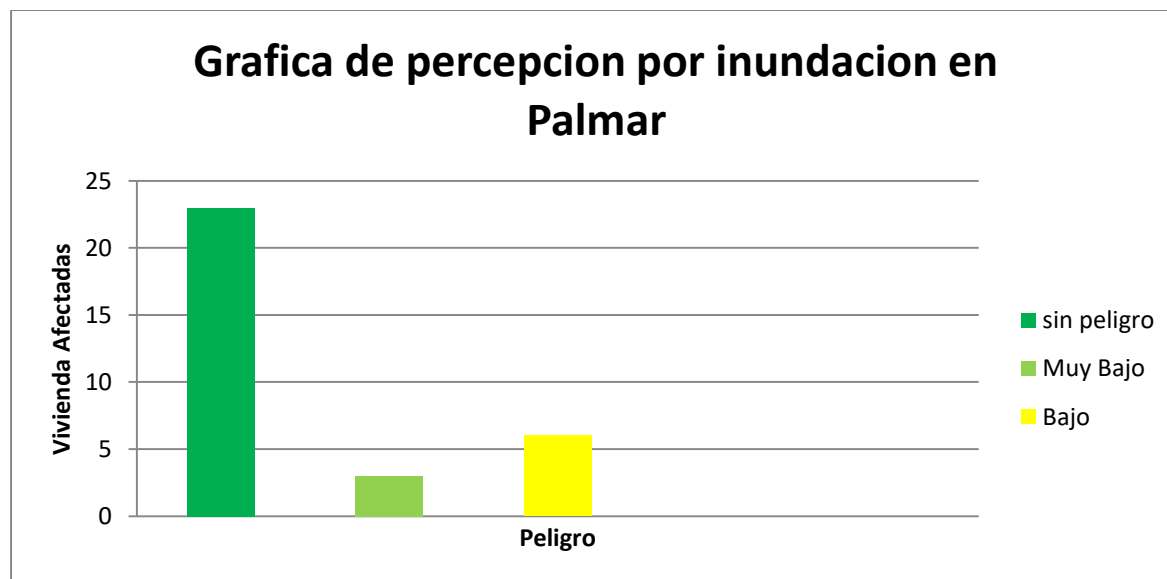


Gráfica 87. Percepción por inundación en Ramonal.

Los resultados de las encuestas muestran que la localidad Ramonal si presentan inundación, pero en los resultados de Hec-Ras nos muestra afectación por inundación, la afectación debe ser por escorrentías.

Palmar

De las 32 encuestas realizadas en Palmar, 23 casas no presentaron afectación, 3 casas una afectación de tipo muy bajo y 6 casa afectación de peligro bajo.

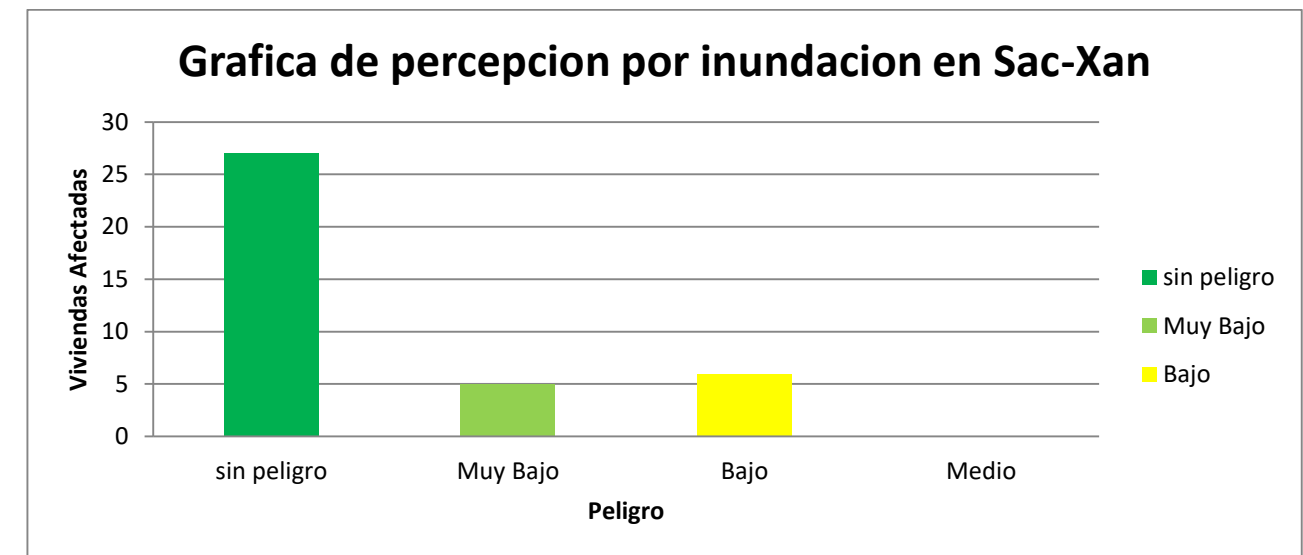


Gráfica 88. Percepción por inundación en Palmar.

Los resultados de las encuestas muestran que la localidad de Palmar si presentan inundación, pero en los resultados de Hec-Ras no muestra afectación por inundación, la afectación debe ser por escorrentías.

Sac-Xan

De las 34 encuestas realizadas en Sac-xan, 27 casas no presentaron afectación, 5 casas una afectación de tipo muy bajo y 2 casa afectación de peligro bajo.



Gráfica 89. Percepción por inundación en Sac-Xan.

La gráfica nos indica que en la localidad de Sac-xan, si existe inundación por crecida del río Hondo, no es muy alta, pero concuerda con el análisis matemático realizado con Hec-Ras.

Resultados transecto río Hondo, subcuenca 33Ae

A lo largo del transecto 1, se encuentran 4 localidades de interés, que son La unión, José Rovirosa, San Francisco Botes y Cocoyol, las cuales se encuentran a una distancia máxima de 1,500 m, respecto al río Hondo.

Para cada tiempo de retorno se presentó un área de inundación diferente, tanto en profundidad, como en planicie. La siguiente tabla muestra las profundidades mínimas y máximas a lo largo del transecto 1 del río Hondo.



Figura 230. Inundación Río Escondido subcuena 33Ae, tiempo de retorno de 2 años.

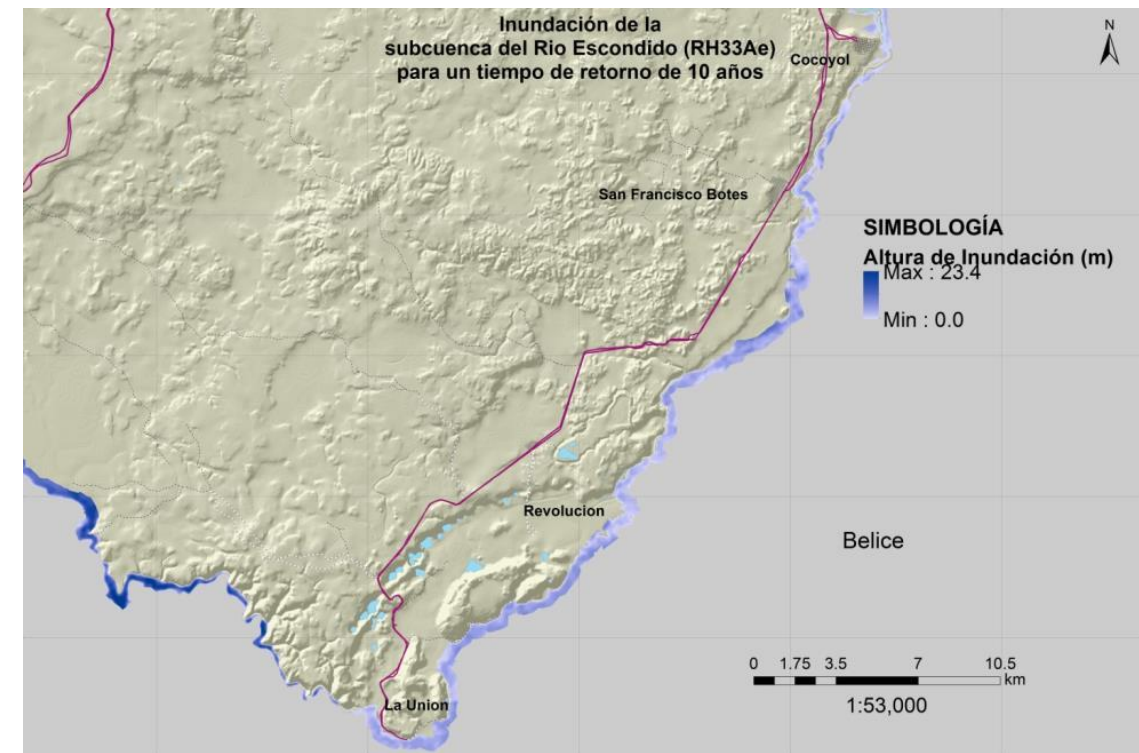


Figura 232. Inundación Río Escondido subcuena 33Ae, tiempo de retorno de 10 años.

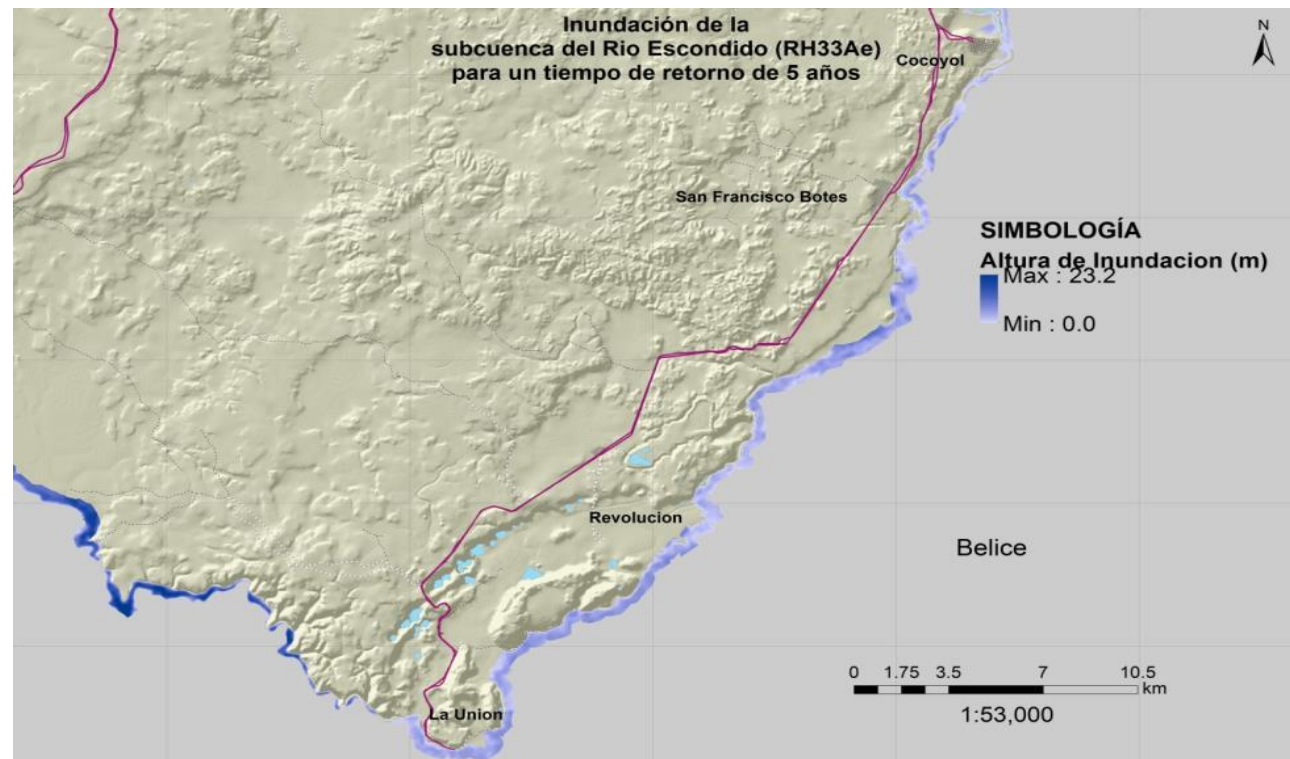


Figura 231. Inundación Río Escondido 33Ae, tiempo de retorno de 5 años.

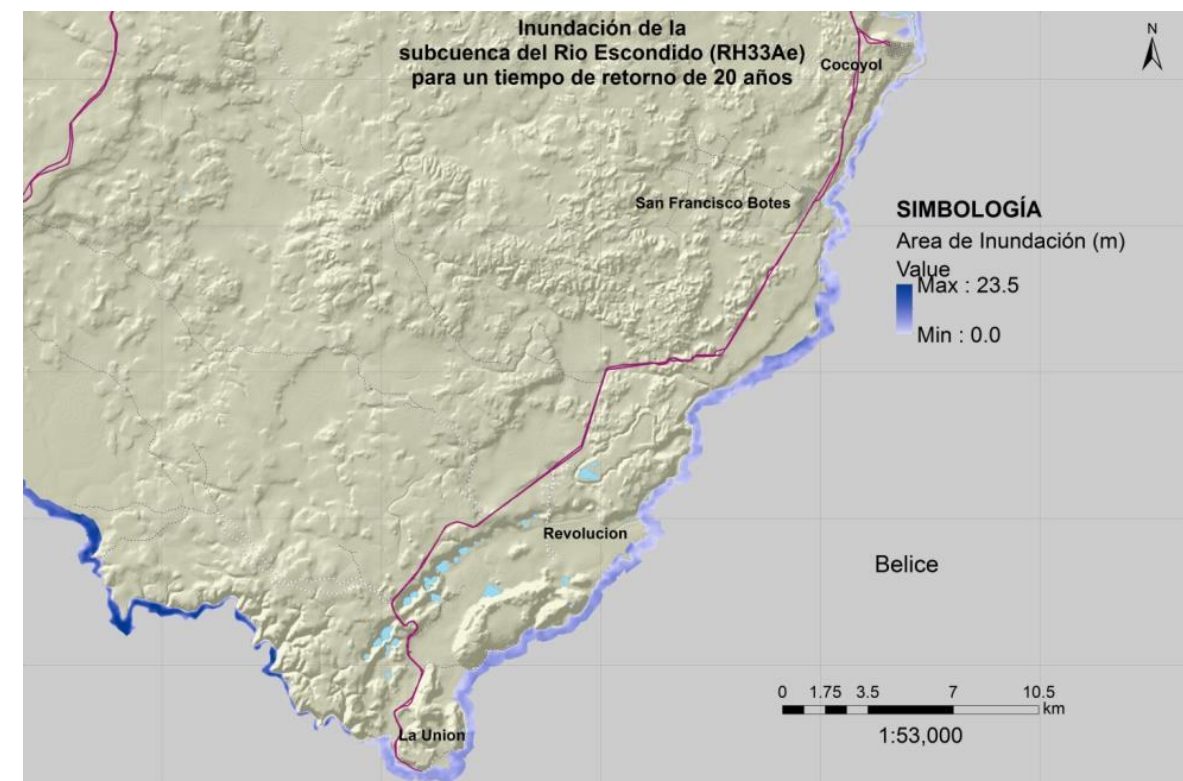


Figura 233. Inundación Río Escondido subcuena 33Ae, tiempo de retorno de 20 años.

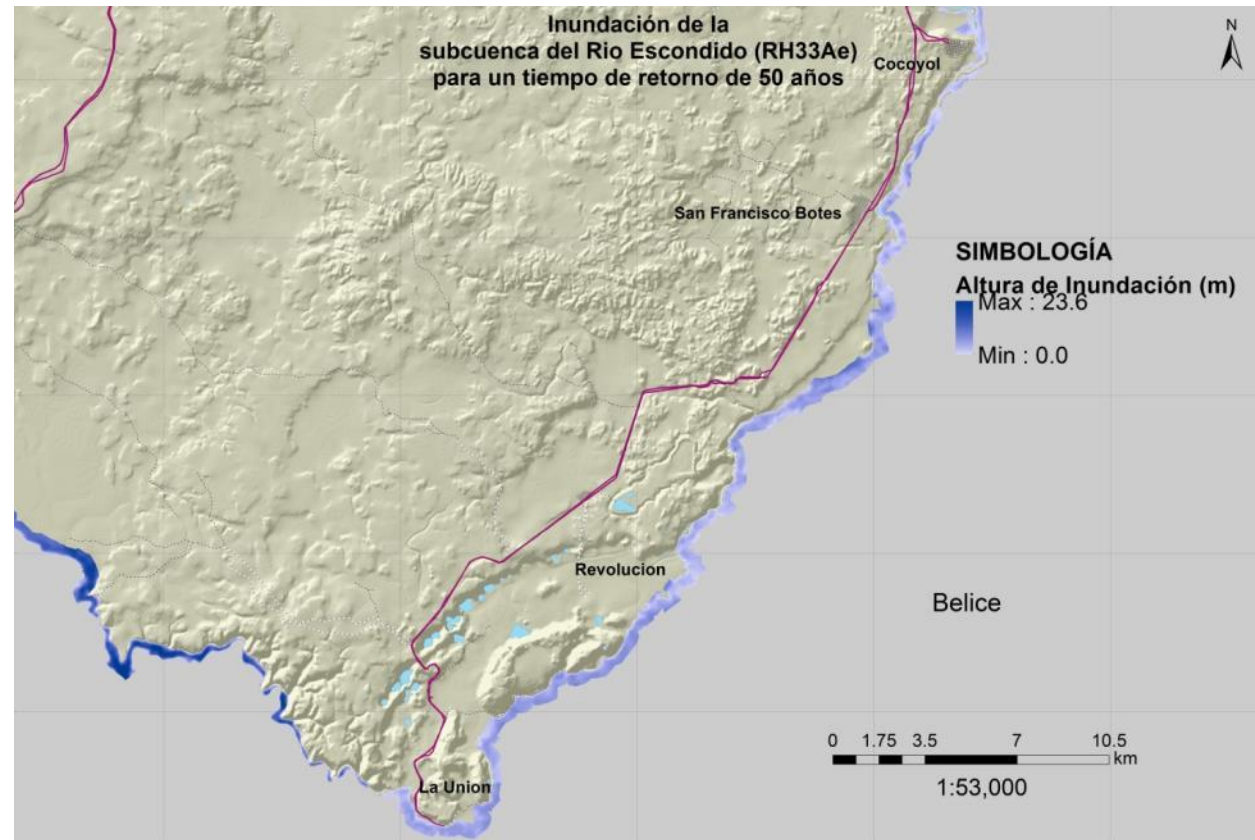


Figura 234. Inundación Rio Escondido subcuenca 33Ae, tiempo de retorno de 50 años.



Figura 236. Inundación Rio Escondido subcuenca 33Ae, tiempo de retorno de 500 años.

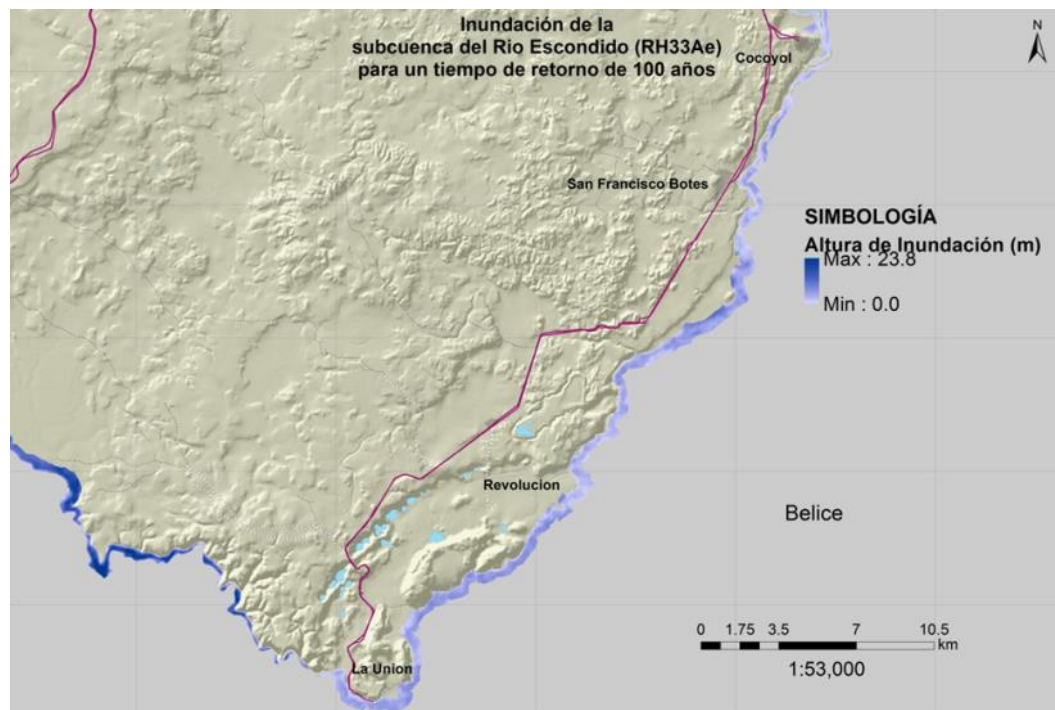


Figura 235. Inundación Rio Escondido subcuenca 33Ae, tiempo de retorno de 100 años.

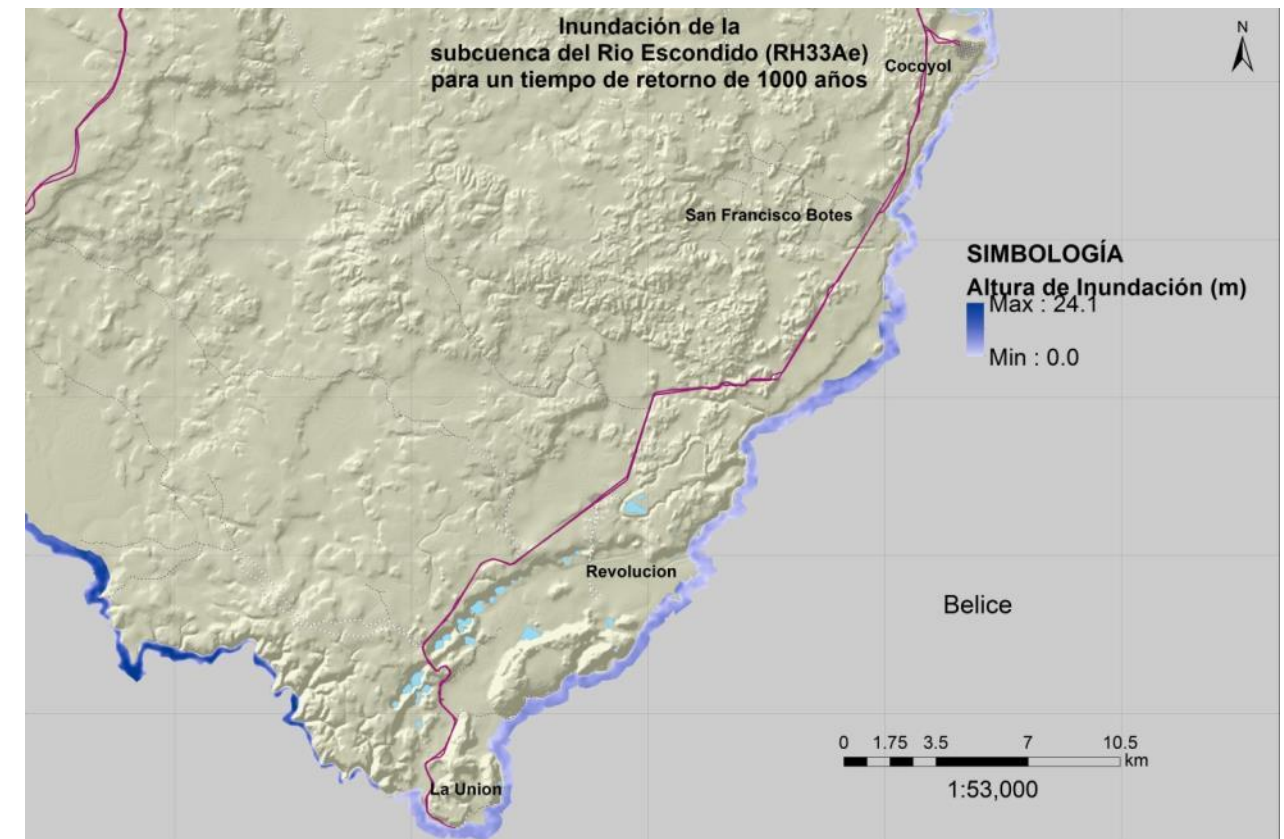


Figura 237. Inundación Rio Escondido subcuenca 33Ae, tiempo de retorno de 1000 años.



Figura 238. Inundación Río Escondido subcuenca 33Ae, tiempo de retorno de 10,000 años.

Tabla 132. Alturas de inundación transecto en la subcuenca 33Ae.

Tiempo de Retorno	Alturas de Inundación (m)	
	Mínima	Máxima
2 años	0.00012	23.09
5 años	0.000076	23.26
10 años	0.000068	23.40
20 años	0.000026	23.55
50 años	0.000030	23.69
100 años	0.000068	23.82
500 años	0.00022	24.03
1,000 años	0.00023	24.12
10,000 años	0.00045	24.30

La Unión.

Para la localidad de la unión tenemos los siguientes resultados en los que se puede apreciar que desde un tiempo de retorno de 2 años, ya hay una afectación mayor al 50% en la localidad que se encuentra a escasos metros del cauce del río Hondo, en donde no existe ningún tipo de construcción que evite la inundación en caso de desbordamiento.

Tabla 133. Alturas y área de inundación, localidad la Unión.

Tiempo de Retorno	Localidad la Unión (451465.93 mts ²)			
	Altura de Inundación		Área de Inundación (mts ²)	Porcentaje de área afectada
	Mínima	Máxima		
2 años	0.0019	5.1	310705.39	68.82 %

5 años	0.0027	5.19	313491.29	69.44 %
10 años	0.00094	5.28	318877.25	70.63 %
20 años	0.0017	5.38	323191.95	71.59 %
50 años	0.016	5.48	326466.97	72.31 %
100 años	0.0079	5.55	328823.22	72.83 %
500 años	0.015	5.69	332796.99	73.71 %
1,000 años	0.0088	5.74	334340.49	74.06 %
10,000 años	0.053	5.86	337264.38	74.70 %

En la siguiente imagen se puede apreciar la baliza, localizada en el poblado de la Unión, donde se aprecia que la máxima altura que han registrado es de 4 metros.



Fotografía 11. Altura de máxima inundación en la Unión.

José Rovirosa y Francisco Botes.

En la localidad de José Rovirosa no se presentaron inundaciones por efecto del río Hondo, a pesar de que se encuentra a una distancia de 1500mts del río, existe un cerro por el cual cuando hay crecidas del río este no afecta a la comunidad de José Rovirosa.

En la localidad de Francisco Botes, la afectación es mínima, y solo se presenta en la parte baja, y como se muestra en la tabla, solo para un tiempo de retorno de 20 a 10,000 años es cuando se ve afectada un área considerable.

Tabla 134. Alturas y área de inundación, localidad de San Francisco Botes.

Tiempo de Retorno	Localidad Francisco Botes (712465.86 mts ²)		
	Altura de Inundación		Área de Inundación (mts ²)
	Mínima	Máxima	
2 años	0.37	0.44	16.25
5 años	0.44	0.44	16.25

10 años	0.51	16.25	0.0023 %
20 años	0.58	163.55	0.0230 %
50 años	0.64	163.55	0.0230 %
100 años	0.70	163.55	0.0230 %
500 años	0.79	164.34	0.0231 %
1,000 años	0.83	165.32	0.0232 %
10,000 años	0.91	298.86	0.0419 %

En la siguiente imagen se aprecia que para llegar a la orilla del río Hondo, en la comunidad de Francisco Botes, hay que bajar una pendiente y caminar aproximadamente 220 mts, por las mismas condiciones del terreno es por lo que la inundación del río Hondo únicamente afecta la parte baja del poblado, que se encuentra al norte de a localidad.



Fotografía 12. Francisco Botes.

Cocoyol.

La localidad de cocoyol presentó inundación en la zona baja, ya que igual que la localidad de Francisco Botes, el terreno tiene cerros, por lo cual al haber crecida del río Hondo este directamente a la localidad (No se entiende la idea anterior), los tiempos de retorno donde hay una inundación significativa es para los tiempos de retorno de 100 a 10,000 años.

Tabla 135. Alturas y área de inundación, localidad Cocoyol.

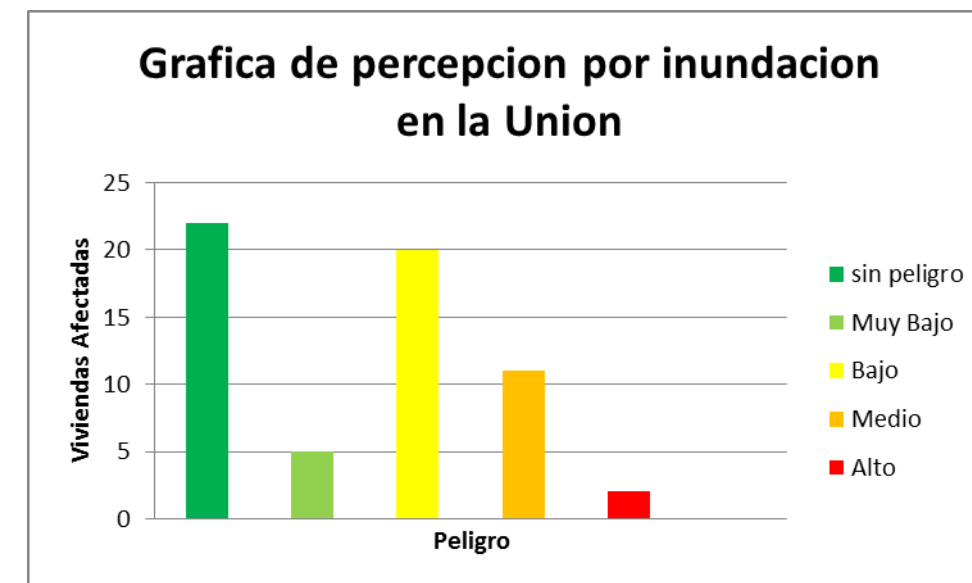
Localidad Cocoyol (468051.31mts²)			
Tiempo de Retorno	Altura de Inundación	Área de Inundación (mts²)	Porcentaje de área afectada
	Máxima		
2 años	0.0	386.58	0.0826 %
5 años	0.33	392.87	0.0839 %
10 años	0.44	861.11	0.1840 %
20 años	0.57	861.14	0.1840 %
50 años	0.69	863.21	0.1844 %
100 años	0.79	1312.10	0.2803 %

500 años	0.95	1317.31	0.2814 %
1,000 años	1.02	1317.39	0.2815 %
10,000 años	1.14	1342.51	0.2868 %

Comparando los modelos de hec-ras con las respuestas asociadas a las encuestas aplicadas, se observa lo siguiente.

Localidad de la Unión

De las 60 encuestas realizadas en la Unión, 22 casas no presentaron afectación, 5 casas una afectación de tipo muy bajo, 20 casa afectación de peligro bajo, 11 casa de peligro medio y 2 casas de peligro alto.

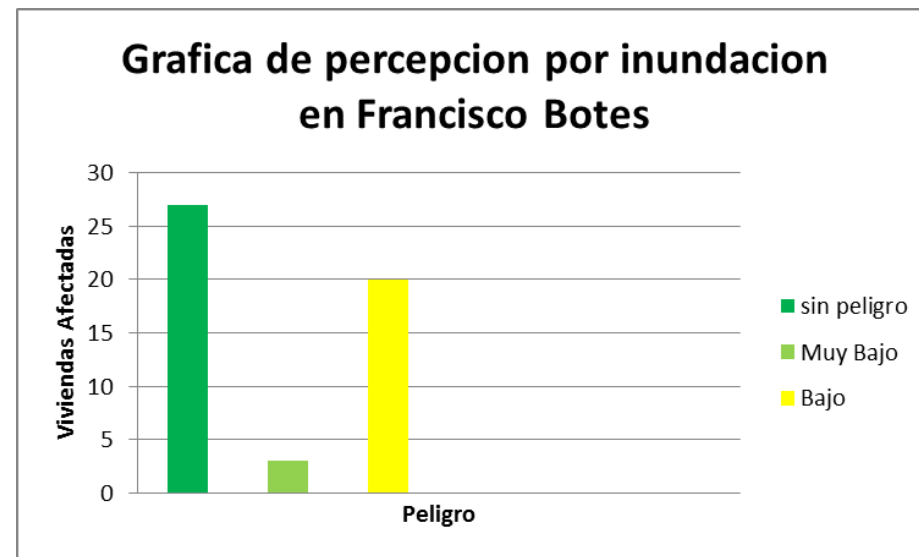


Gráfica 90. Percepción por inundación en La Unión.

Los resultados obtenidos indican que en la Unión sí existe inundación por la crecida del río Hondo, y la afectación incluye peligro alto, comparándolo con el modelo matemático de Hec-ras, ha este tipo de peligro se encuentra la localidad de la unión, aunque la muestra no es representativa, hay que considerar que la encuesta se realizó en percepción de la población.

Localidad San Francisco Botes.

De las 33 encuestas realizadas en Francisco Botes, 27 casas no presentaron afectación, 3 casas una afectación de tipo muy bajo y 2 casas afectación de peligro bajo.

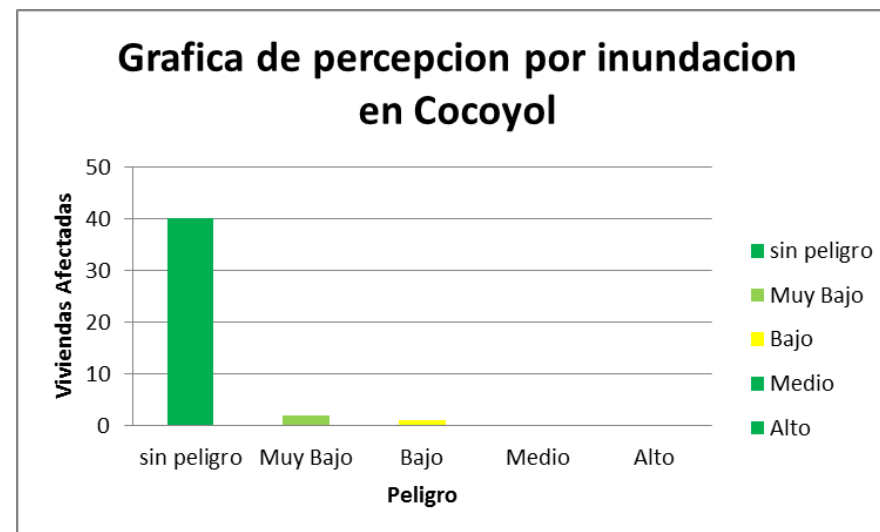


Gráfica 91. Percepción por inundación en Francisco Botes.

Cabe destacar que la localidad sí presenta inundación por crecida del río Hondo, aunque la afectación es mínima, se estima que es en la parte baja tal y como lo indica el resultado del análisis con Hec-Ras.

Cocoyol.

De las 43 encuestas realizadas en Cocoyol, 40 casas no presentaron afectación, 2 casas una afectación de tipo muy bajo y 1 casa afectación de peligro bajo.



Gráfica 92. Percepción por inundación en Cocoyol.

La inundación por afectación en Cocoyol es muy baja, como indica el resultado del análisis con Hec-Ras.

De las localidades que se encuentran en el transecto del río hondo, la que más es afecta directamente por la crecida este es la localidad de la Unión.

La localidad de Subteniente López muestra un área grande de inundación, sin embargo no es por efecto del río hondo, sino por las lluvias.

El modelo de inundación realizado con Hec-Ras se validó con las encuestas de percepción de inundación, lo que permitió ver la exactitud de este, y se puede afirmar que el modelo es funcional y parcialmente puede usarse para prevenir la inundación.

A partir de la elaboración de los mapas de peligro se proponen recomendaciones dirigidas fundamentalmente hacia las actividades de prevención y mitigación, por lo que se recomiendan las siguientes medidas:

- La zona que mayor inundación presenta es en la localidad de la Unión, pero que se podría corregir mediante la realización de pequeñas obras de drenaje y zonas de protección en la parte baja del río.
- En todo el transecto del río hondo que presenta inundación se recomienda evitar cualquier tipo de asentamiento humano.
- Revisar y estar en constante actualización el documento elaborado con el fin de tener estudios concretos.
- Educar a la población que vive cerca del río hondo, sobre la prevención de peligros por inundación y hacerle ver que está expuesta a una inundación.

4.2.3.4 Vulnerabilidad

Con el fin de analizar el riesgo a consecuencia de inundaciones en las comunidades cercanas al Río Hondo, se identificaron, con base en los mapas de peligro para los diferentes periodos de retorno, las localidades rurales que serían afectadas.

En general se observó que son pocas las que se encuentran asentadas en las cercanías del Río Hondo, de hecho la mayoría son ranchos. Sin embargo, sí se identificaron cinco localidades cuyas dimensiones y número de habitantes requirieron de un análisis detallado de riesgo, éstas fueron: La Unión, Ing. José Narciso Roviroza, Cocoyol, Saxcán y Subteniente López, todas ubicadas en el municipio de Othón P. Blanco.

Para calcular la vulnerabilidad, se empleó la misma metodología, basada en la del CENAPRED, que requiere la clasificación de las viviendas de cada una de las manzanas que conforman las localidades con base en la tipología explicada en apartados anteriores.

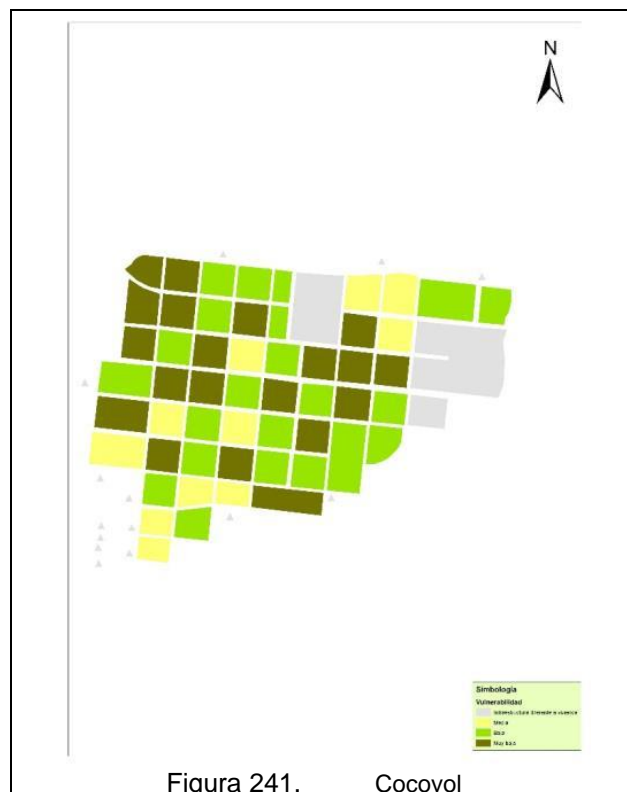
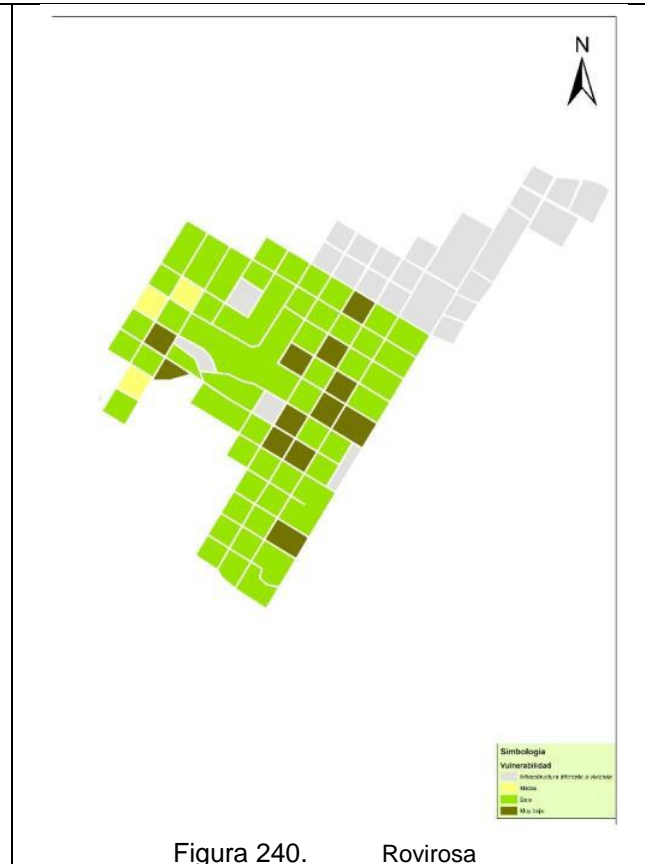
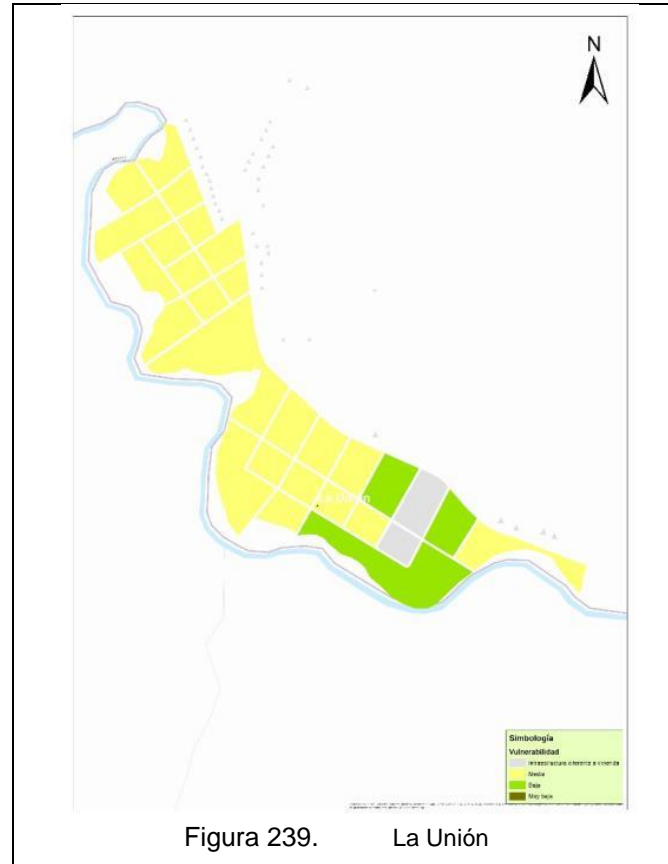
De igual forma, se contó el número de viviendas por manzana, asignándole un nivel de vulnerabilidad relacionado con el tipo predominante. Cabe mencionar que sólo se encontraron tres combinaciones de materiales, lo que arrojó el mismo número de niveles de vulnerabilidad.

Tabla 136. Tipología de vivienda y nivel de vulnerabilidad

Nivel de vulnerabilidad	Material en techos	Materiales en Muros	Color asignado para elaboración de cartografía/Tipología
Medio	Lámina o guano	Madera	Amarillo / III
Bajo	Lámina	Bloque hueco de concreto	Verde claro / IV
Muy Bajo	Losa colada o vigueta y bovedilla	Bloque hueco de concreto	Verde oscuro / V

Fuente: Elaboración propia con información de Cenapred

Una vez clasificadas las manzanas de las localidades se elaboró un mapa para cada una de ellas, mismos que se muestran a continuación.



4.2.3.5 Riesgo

Una vez completados los mapas de vulnerabilidad y peligro, se extrajeron las manzanas que resultarían afectadas. Con el nivel que el agua alcanzaría según los diferentes periodos de retorno, se pudo estimar el porcentaje de daños en cada manzana con base en su correspondiente función de vulnerabilidad.

Una vez identificadas las manzanas que presentarían inundaciones en cada localidad, se estimó el valor del sistema mediante el número de viviendas y el costo aproximado del menaje para cada tipo de vivienda. Con dicha información se obtuvieron los mapas de daños asociados para cada periodo de retorno.

Por último, se multiplicó el daño asociado por la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno con determinado periodo de retorno (2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1000 y 10000 años) con lo que se obtuvo el riesgo. Para la representación cartográfica de los mapas se utilizaron los criterios que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 137. Criterios para determinar los niveles de daños y riesgo

Nivel	Daños asociados (Pesos)	Riesgo (Pesos)
-------	-------------------------	----------------

Muy bajo	Menos de 1 millón	Menos de 100 mil
Bajo	Entre 1 y 2 millones	Entre 100 mil y 200 mil
Medio	Entre 2 y 3 millones	Entre 200 mil y 500 mil
Alto	Entre 3 y 4 millones	Entre 500 mil y 1 millones
Muy alto	Más de 4 millones	Más de 2 millones

La expresión utilizada para calcular el riesgo fue la siguiente¹⁰¹:

$$R(i) = C P(i) V(i)$$

En donde:

R(i) es el Riesgo para el próximo evento con periodo de retorno "i" en pesos.

C es el costo de la vivienda en función de su tipología en pesos.

P(i) es la probabilidad de ocurrencia del evento con periodo de retorno (i), adimensional.

V(i) es la vulnerabilidad de cada vivienda, adimensional.

A continuación se muestran los mapas obtenidos para los periodos de retorno de 2 y 100 años, sin embargo en el sistema se incluirán los nueve periodos calculados.

V. Fenómenos químico-tecnológicos

5.1 Almacenamiento de sustancias peligrosas

5.1.1 Introducción

Los fenómenos de origen químico que se analizan en el presente apartado se relacionan con el almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas. Si bien éstas siempre han existido (ya sea en estado líquido, sólido o gaseoso), el desarrollo tecnológico de la humanidad ha derivado en un uso intensivo de las mismas, así como en su modificación.

Actualmente el uso y consumo de sustancias químicas peligrosas es común en la vida diaria de la mayoría de las personas. Se conocen más de 100 millones de sustancias en un lapso de medio siglo de investigaciones sobre la orgánico e inorgánico¹⁰², de este número 856,300 contienen al cobre como elemento de referencia. De igual forma, las actividades productivas, principalmente en la industria, implican un aumento en el manejo, transporte y almacenamiento de éstas.

A lo largo de la historia y del desarrollo tecnológico de la humanidad, han estado presentes las sustancias químicas en su estado líquido, gaseoso y sólido, las cuales han sido manipuladas, de una u otra forma, provocando, en algunas ocasiones y por descuido humano principalmente, explosiones, incendios o intoxicación a las personas. Esta situación prevaleció hasta que se logró conocer sus propiedades físicas y químicas.

En la actualidad aún se registran accidentes con sustancias químicas, tanto en su manejo, como en el almacenamiento y transporte de las mismas. Las principales manifestaciones de estos accidentes son las explosiones, los derrames y los incendios, y sus consecuencias van desde la intoxicación de personas o afectación de la infraestructura, hasta la

muerte.

Algunos de los criterios que se utilizan comúnmente para clasificar el tamaño de los accidentes, es el número de personas muertas o afectadas, la frecuencia con la que se presenta el incidente y el área de afectación. En la Tabla 138, se mencionan los principales desastres de origen químico ocurridos en el mundo, pudiéndose nombrar algunos accidentes junto con la afectación que provocaron.

Tabla 138. Principales desastres de origen químico ocurridos en el mundo.

Año	Lugar	Tipo de incidente	Sustancia química responsable	Victimas mortales	Heridos	Evacuados
1974	Flixborough, Reino Unido	Fábrica de productos químicos (explosión)	Ciclohexano	28	104	3000
1976	Seveso, Italia	Fábrica de productos químicos (explosión)	Dioxina		193	226,000
1979	Novosibirsk, Federación Rusia	Fábrica de productos químicos (explosión)	No caracterizada	300		
1981	Madrid, España	Contaminación de alimentos (aceite)	No caracterizada	430	20,000	220,000
1982	Tacoa, Venezuela (Republica Boliviarana de)	Depósito (explosión)	Combustible	153	20,000	40,000
1984	San Juanico, México	Depósito (explosión)	Gas Licuado de Petróleo (GLP)	452	4,248	200,000
1984	Bhopal, India	Fábrica de productos químicos (fuga)	Metilisocianato	2,800	50,000	200,000
1992	Kwangju, República Popular Democrática de Corea	Almacén de gas (explosión)	GLP		163	20,000
1993	Bangkok, Tailandia	Fábrica de juguetes (incendio)	Plásticos	240	457	

¹⁰¹ CENAPRED. Guía p.29

¹⁰² (<http://www.cas.org/news/media-releases/100-millionth-substance>, 2015)

1993	Remeios, Colombia	Vertido	Petróleo	430		
1996	Haití	Medicamento envenenado	Dietilenglicol	>60		
1998	Yaundé, Camerún	Accidente de transporte	Productos de petróleo	220	130	
2000	Kinshasa, República Democrática del Congo	Depósito de municiones (explosión)	Municiones	109	216	
2000	Enschede, Países Bajos	Fabrica (explosión)	Productos pirotécnicos	20	950	
2001	Toulouse, Francia	Fabrica (explosión)	Nitrato de amonio	30	>2,500	
2002	Lagos, Nigeria	Depósito de municiones (explosión)	Municiones	1,000		
2003	Gaoqiao, China	Pozo de gas (escape)	Sulfuro de hidrógeno	240	9,000	64,000
2005	Huaian, China	Camión (escape)	Cloro	27	300	10,000
2005	Graniteville, Norteamérica	Tren cisterna (escape)	Cloro	9	250	5,400
2006	Abidjan, Cote d'Ivoire	Residuos tóxicos	Sulfuro de hidrógeno, mercaptanos, hidróxido sódico	10	>100,000	

Tabla 139. Eventos de naturaleza Química que se han registrado en Quintana Roo.

Año	Municipios afectados	Descripción
2002	Benito Juárez	En el municipio de Benito Juárez se registro una explosión de un contenedor de químicos de la empresa "Mardup". Como medidas preventivas fue acordonado el lugar en un radio de 100 m. Debido a la explosión se registro un derrame de 25,000 l de acido clorhídrico.
2007	Chetumal	Caída de un frasco que contenía 1/2 kilogramo de carburo de calcio. Fueron evacuadas 300 personas como medida preventiva. 2 personas ligeramente intoxicadas.
2010	Solidaridad	Ocurrido a las 10:30 horas, del 14 de Noviembre. Con 18 lesionados (Son 8 Canadienses, 2 Estadunidenses y 8 Mexicanos). En el peritaje realizado en la zona afectada, se informa de una explosión de gas natural del subsuelo, afectando a una superficie de 120 metros cuadrados. De los 6 fallecidos, 4 son canadienses, los otros 2 mexicanos (trabajadores del hotel).

2012	Benito Juárez	Explosión por acumulación de gas lp, en el hotel "Secret", que se encontraba en construcción, en Boulevard Kukulcan km. 14.5, al abrir una llave de paso a una caldera, resultando 11 personas lesionadas (7 fueron trasladadas para su atención)
------	---------------	---

Fuente: CENAPRED

Como se puede observar los accidentes químicos no están ligados a una sola sustancia, y sus consecuencias afectan tanto al ser humano como al medio ambiente. Los accidentes químicos igual pueden ocurrir como resultado de diferentes causas, como son fenómenos naturales (sismos, huracanes, inundaciones, etc), fallas operativas en los procesos industriales, errores humanos y causas premeditadas.

Es este apartado se estudian los peligros químicos, particularmente lo relacionado con su almacenamiento y transporte, en el Estado de Quintana Roo.

Las sustancias químicas en estado líquido y gaseoso, así como los productos derivados del petróleo se almacenan en tanques o depósitos atmosféricos y a presión, los cuales pueden estar en la superficie o enterrados; su tamaño, diseño, materiales, forma e instrumentación dependen de la cantidad y del producto que almacenan.

De acuerdo con la NOM-003-SEDG-2004, se establece que las distancias que deben guardar los tanques de almacenamiento respecto de escuelas, iglesias, cines, teatros, salones de eventos, etc. a una distancia mínima de 30 metros, sin embargo, en las visitas que se realizaron a diferentes establecimientos de venta de gasolina y gas Lp, se pudo constatar que varios de estos no cumplen con la distancia mínima, lo que sugiere que en caso de explosión, derrame o fuga la población estaría expuesta secundariamente a la afectación.

De igual forma, en el presente apartado se abordan los temas de almacenamiento de sustancias químicas como cloro, ácido sulfúrico, amoniaco, hidróxido de sodio, hipoclorito de sodio, ácido clorhídrico y dióxido de carbono. En estos casos, la afectación de las personas se mide con base en la reacción dosis-respuesta, es decir, cómo a diferentes niveles de exposición cambian los efectos en la salud (estos pueden ir de irritabilidad hasta la muerte).

Por lo anterior, y con el fin de minimizar la posibilidad de que ocurran accidentes relacionados con el uso de las sustancias químicas, se realizó un análisis de peligros con la ayuda del programa SCRI Fuego, el cual sirve para estimar posibles radios de afectación.

Una vez obtenidas las posibles áreas de afectación, se pueden llevar a cabo acciones encaminadas a prevenir la ocurrencia de accidentes y a mitigar los posibles daños y pérdidas en caso de que sucedan.

Con los resultados obtenidos del SCRI Fuego, y con el uso de un Sistema de Información Geográfico, se ubicaron las gasolineras y gaseras que operan en el Estado, y se elaboró un análisis para conocer las áreas de mayor amenaza que pudieran tener efectos sobre la población expuesta y sus bienes, así como para delimitar las zonas de amortiguamiento.

Tomando en cuenta que tanto el transporte de sustancias peligrosas, como su almacenaje y uso que afecta a las ciudades de nuestro Estado, y considerando que hasta hace un par de años no se desarrollaba la gestión integral de riesgos de manera implícita en la planificación de las ciudades, se ha observado que la incorporación de este tipo de análisis es primordial para tomar las medidas necesarias encaminadas a reducir y mitigar los riesgos y evitar daños materiales, así como pérdidas económicas y humanas.

El aumento demográfico trae consigo el incremento de las actividades industriales, comerciales y de servicio que involucran la producción, almacenamiento y transporte de sustancias químicas, por lo que existe el peligro potencial de que ocurra algún accidente en una de estas etapas; y como consecuencia, una liberación no controlada o la presencia de un incendio y/o explosión que pueda dañar a la población, al ambiente o a los patrimonios. Cancún, capital del municipio de Benito Juárez es el mejor ejemplo donde el número de habitantes es el 50% de la población del estado, esto es favorecido por que Quintana Roo tiene la segunda tasa neta migratoria nacional con un 8.7%. Más población es sinónimo de más riesgo, principalmente urbano.

Los eventos químicos pueden ser detonados de múltiples formas, entre las más importantes, CENAPRED (2004), señala las siguientes: fenómenos naturales, fallas operativas en los procesos industriales, fallas mecánicas, errores humanos y causas premeditadas. Cabe señalar que estos eventos no son excluyentes entre sí, pues un suceso químico puede encadenarse a otros fenómenos químicos y/o naturales, y combinarse entre sí provocando un efecto dominó con la multiplicación y amplificación de los efectos o consecuencias.

Por lo cual, es indispensable que estas actividades se realicen de manera segura, siendo importante conocer las propiedades y características de las sustancias y materiales con los que se trabaja, con el fin de prevenir y en su caso, mitigar el impacto de cualquier accidente.

La magnitud y severidad de los eventos químicos dependen del tipo y de la cantidad de material peligroso involucrado, así como también de la localización del suceso, particularmente la localización la define la población y los recursos expuestos, así como las condiciones ambientales y atmosféricas que permitirán el desplazamiento del contaminante en el ambiente.

Por medio del análisis de los escenarios de peligro en las diferentes gasolineras, gaseras y almacenes de sustancias explosivas, se pueden plantear, de manera general, instrumentos para gestionar el riesgo en sus diferentes etapas (prevención, mitigación y respuesta a emergencias), así como determinar la vulnerabilidad de los principales bienes expuestos; por lo anterior, es importante que los resultados de este trabajo se difundan entre todas aquellas instancias y dependencias involucradas en la atención de emergencias ambientales con el fin de que dispongan de más y mejor información respecto de la identificación de las principales fuentes de peligros asociados a las sustancias químicas, para así planear e implementar acciones preventivas y correctivas oportunamente.

Los objetivos particulares del trabajo son:

1. Generar información actualizada sobre la ubicación de los sitios de almacenamiento de sustancias químicas en las principales ciudades del Estado.
2. Analizar y modelar las áreas de afectación por derrame para gasolineras y por fuga para gaseras, partiendo del peor escenario que sería la de explosión.
3. Identificar los establecimientos que manejan sustancias químicas como cloro, ácido sulfúrico, amoníaco, hidróxido de sodio, hipoclorito de sodio, ácido clorhídrico.
- 4.-Generar un mapa de peligro para derrames y un mapa de peligro por fugas en almacenamiento de sustancias químicas para las ciudades de Chetumal, Bacalar, Felipe Carrillo Puerto, Tulum, Cozumel, Cancún e Isla Mujeres.
- 5.-Generar un mapa de peligro para derrames y un mapa de peligro para fugas en el transporte de sustancias químicas en las carreteras federales y estatales del Estado.

6.- Generar mapas de vulnerabilidad para las ciudades de Chetumal, Bacalar, Felipe Carrillo Puerto, Tulum, Cozumel, Cancún e Isla Mujeres, con base en los tipos de materiales constructivos de las estructuras aledañas.

7. Crear una herramienta que ayude a minimizar e identificar los peligros por sustancias químicas.

CARACTERÍSTICAS DE LAS SUSTANCIAS QUÍMICAS

Es importante conocer las características de cada sustancia química de interés para el trabajo, de este modo, se puede conocer si hay o no información acerca de la exposición a la sustancia o a sus efectos, daños hacia la salud, las medidas de control, las mediciones que hayan podido realizarse con anterioridad u otros aspectos relativos a las condiciones de almacenamiento y/o transporte.

Características físicas

Son las características propias de una sustancia que se observan en ausencia de cualquier cambio de composición tal y como lo define el CENAPRED (2004), como lo son:

Densidad (ρ): Es la relación de masa por unidad de volumen de una sustancia determinada.

Estado físico: Es el estado en que se presenta en la naturaleza una sustancia; dicho estado puede ser sólido, líquido o gaseoso.

Límite superior de inflamabilidad: Es la concentración máxima de cualquier vapor o gas (% por volumen de aire), que se inflama o explota si hay una fuente de ignición presente en la temperatura ambiental.

Límite inferior de inflamabilidad: Es la concentración mínima de cualquier vapor o gas (% por volumen de aire), que se inflama o explota si hay una fuente de ignición presente a la temperatura ambiente.

Peso molecular (PM): Es la masa de una sustancia expresada en gramo sobre mol.

Temperatura de auto ignición: Es la temperatura mínima a la que una sustancia química entra en combustión en ausencia de chispa o llama.

Temperatura de ebullición: Es la temperatura a la que la presión de vapor de un líquido es igual a la presión atmosférica, cuando esto ocurre el líquido pasa a la fase de vapor.

Temperatura de inflamación: Es la temperatura mínima a la cual los materiales combustibles o inflamables desprenden una cantidad suficiente de vapores para formar una mezcla inflamable, la cual se enciende aplicando una fuente de ignición, pero que no es suficiente para sostener una combustión.

Son estas características que hacen peligrosa a una sustancia química, el nivel de peligro se evalúa con base en su CRET, CENAPRED (2004), mismas que se describen de la siguiente manera:

Corrosividad (C): Las sustancias químicas corrosivas pueden quemar, irritar o destruir los tejidos vivos y material inorgánico. Cuando se inhala o ingiere una sustancia corrosiva, se ven afectados los tejidos del pulmón y estómago.

- Gases corrosivos: Causan daño en el cuerpo debido al contacto con la piel y por inhalación.
- Líquidos corrosivos: Se utilizan frecuentemente en el laboratorio y son, en gran medida, causa de lesiones corporales externas.
- Sólidos corrosivos: Producen lesiones retardadas. Debido a que los sólidos se disuelven fácilmente en la humedad de la piel y del aparato respiratorio, los efectos de los sólidos corrosivos dependen en gran medida de la duración del contacto.

Reactividad (R): Es la capacidad de las sustancias para, por sí mismas, detonar, tener una descomposición explosiva o producir un rápido y violento cambio químico.

Explosividad (E): Capacidad de las sustancias químicas que provocan una liberación instantánea de presión, gas y calor, ocasionado por un choque repentino, presión o alta temperatura.

Toxicidad (T): La toxicidad se define como la capacidad de una sustancia para producir daños en los tejidos vivos, lesiones, enfermedad grave o en casos extremos la muerte, cuando se ingiere, inhala o se absorbe a través de la piel.

Inflamabilidad (I): Es la medida de la facilidad que presenta un gas, líquido o sólido para encenderse y de la rapidez con que, una vez encendido, se diseminan sus llamas. Cuanto más rápida sea la ignición, más inflamable será el material. Los líquidos inflamables no lo son por sí mismos, sino que lo son debido a que su vapor es combustible. Hay dos propiedades físicas de los materiales que indican su inflamabilidad: el punto de inflamación y la volatilidad.

Clasificación de las sustancias químicas para su almacenamiento

El almacenamiento de una sustancia química peligrosa consiste en el conjunto de recintos y recipientes usados para contener productos químicos. Es importante saber que su clasificación permite conocer la compatibilidad entre ellas, los envases originales se deben mantener con etiquetas legibles y en buenas condiciones, el almacenamiento debe realizarse de tal manera que se minimicen los riesgos a la salud y al ambiente.

En el país existen las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que regulan el almacenamiento de sustancias peligrosas, tal es el caso de la NOM-052-SEMARNAT-2005 que establece las "características, y procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos" o la NOM-026-STPS-2008 que regula los "colores y señales de seguridad e higiene, e identificación de riesgos por fluidos conducidos en tuberías."

Para efectos del presente documento, se consideró la clasificación para el almacenamiento de sustancias químicas recomendada por la Organización de las Naciones Unidas y utilizado en el ERG 2012 ¹⁰³, misma que se explica a continuación:

Clase 1- Explosivos. Son sustancias sólidas o líquidas, o mezclas de ellas, que por sí mismas son capaces de reaccionar químicamente produciendo gases a tales temperaturas, presiones y velocidades que pueden ocasionar daños graves en los alrededores. Se consideran 6 subclases de acuerdo con la forma como una sustancia puede explotar.

Subclase 1.1: Corresponde a sustancias o artículos que ofrecen peligro de explosión en masa. Es decir, que afecta toda la carga en forma instantánea.

Subclase 1.2: Sustancias o artículos que ofrecen peligro de proyección, mas no explosión en masa.

Subclase 1.3: Sustancias o artículos que ofrecen peligro de fuego y en menor grado proyección de partículas, o ambos, mas no peligro de explosión en masa.

Subclase 1.4: Sustancias o artículos que no representan peligro significativo. Pueden entrar en ignición eventualmente.

Subclase 1.5: Sustancias o artículos muy insensibles que ofrecen en condiciones especiales, peligro de explosión en masa.

Subclase 1.6: Sustancias o artículos extremadamente insensibles que no tienen peligro de explosión en masa.

Clase 2- Gases. Son sustancias que se encuentran totalmente en estado gaseoso a 20°C y una presión estándar de 101.3 Kpa. Existen gases: Comprimidos, que se encuentran totalmente en estado gaseoso al ser empacados o envasados para el transporte, a 20°C. Licuados, que se encuentran parcialmente en estado líquido al ser empacados o envasados para el transporte a 20°C. En solución, que se encuentran totalmente disueltos en un líquido al ser empacados o envasados para el transporte.

Los gases se clasifican en dos subdivisiones:

Subclase 2.1: Gases Inflamables, pueden incendiarse fácilmente en el aire cuando se mezclan en proporciones inferiores o iguales al 13% en volumen.

Subclase 2.2: Gases No-inflamables, no tóxicos; Pueden ser asfixiantes simples u oxidantes.

Subclase 2.3: Gases Tóxicos; ocasionan peligros para la salud, son tóxicos o corrosivos.

Clase 3. Líquidos inflamables. Son líquidos o mezclas de ellos, que pueden contener sólidos en suspensión o solución, y que liberan vapores inflamables por debajo de 35°C (punto de inflamación). Por lo general son sustancias que se transportan a temperaturas superiores a su punto de inflamación, o que siendo explosivas se estabilizan diluyéndolas o suspendiéndolas en agua o en otro líquido. Ej. Gasolina, benceno y nitroglicerina en alcohol.

Clase 4. Sólidos con peligro de incendio. Constituyen las siguientes subdivisiones:

Subclase 4.1: Sólidos Inflamables. Son aquellos que bajo condiciones de transporte son combustibles o pueden contribuir al fuego por fricción.

Subclase 4.2: Sólidos espontáneamente combustibles. Son aquellos que se calientan espontáneamente al contacto con el aire bajo condiciones normales.

Subclase 4.3: Sólidos que emiten gases inflamables al contacto con el agua. Son aquellos que reaccionan violentamente con el agua o que emiten gases que se pueden inflamar en cantidades peligrosas cuando entran en contacto con ella.

Clase 5. Oxidantes y peróxidos orgánicos.

Subclase 5.1: Sustancias oxidantes: generalmente contienen oxígeno y causan la combustión o contribuyen a ella.

Subclase 5.2: Peróxidos orgánicos. Sustancias de naturaleza orgánica que contienen estructuras bivalentes -O-O-, que generalmente son inestables y pueden favorecer una descomposición explosiva, quemarse rápidamente, ser sensibles al impacto o la fricción o ser altamente reactivas con otras sustancias.

Clase 6. Sustancias tóxicas e infecciosas. El término tóxico puede relacionarse con "venenoso" y la clasificación para estas sustancias está dada de acuerdo con la Dosis Letal 50 (DL50) oral, inhalatoria y dérmica. Existen dos subdivisiones:

Subclase 6.1: Sustancias Tóxicas. Son líquidos o sólidos que pueden ocasionar daños graves a la salud o la muerte al ser ingeridos, inhalados o entrar en contacto con la piel.

¹⁰³ (<http://phmsa.dot.gov/hazmat/library/erg>)

Subclase 6.2: Materiales infecciosos. Son aquellos microorganismos que se reconocen como patógenos (bacterias, hongos, parásitos, virus e incluso híbridos o mutantes) que pueden ocasionar una enfermedad por infección a los animales o a las personas.

Clase 7. Materiales fisionables. Son el Uranio 233, Uranio 235, Plutonio 239, Plutonio 241 o cualquier combinación de estos radionucleidos.

Clase 8. Sustancias corrosivas. Son materiales que no se encuentran incluidos en las clases anteriormente mencionadas y por tanto pueden ser transportados en condiciones que deben ser estudiadas de manera particular.

Clase 9. Sustancias y artículos peligrosos misceláneos. Son materiales que no se encuentran incluidos en las clases anteriormente mencionadas y por tanto pueden ser transportados en condiciones que deben ser estudiadas de manera particular.

Esta clasificación permite realizar una matriz de compatibilidad para poder almacenar y/o transportar sustancias químicas y sustancias peligrosas, misma que se observa en la siguiente figura.

Basada en la clase de riesgo que poseen los residuos o desechos peligrosos

Clase de Riesgo ONU	1	2.1	2.2	2.3	3.	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	6	7	8	9
1. Explosivo	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
2.1. Gas inflamable	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
2.2. Gas Comprimido no inflamable, no venenoso	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
2.3. Gas venenoso por la inhalación	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
3. Líquidos inflamables y Líquidos combustibles	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
4.1 Sólido inflamable	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
4.2 Sustancia espontáneamente combustible	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
4.3 Sustancia peligrosa cuando esta mojada	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
5.1 Oxidante	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
5.2 Peróxido Orgánico	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
6 Sustancias Tóxicas	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
7 Sustancias Radiactivas	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
8 Sustancias Corrosivas	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
9 Sustancias Peligrosas Varias	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
	Pueden almacenarse juntos													
	Precaución. Revisar incompatibilidades individuales													
	Pueden requerirse almacenes separados. Son incompatibles.													

Figura 244. Matriz de compatibilidad para almacenar sustancias químicas.

De igual forma, existe otro tipo de señalización para el almacenamiento de sustancias químicas, la cual es usada y aplicada por la NOM-018-STPS-2000, "Sistema para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo". En ella se establece la identificación de riesgos mediante una etiqueta que consta del nombre del material y cuatro secciones con un color asignado en cada caso. Asimismo, cada una de las secciones contiene el grado de peligrosidad, mismo que va de cero a cuatro. (0 el menos peligroso, aumentando la peligrosidad hasta llegar a 4, nivel más alto).

- 4. Extremadamente inflamable - Debajo de los 25° C
- 3. Ignición a temperaturas normales - Debajo de los 37° C
- 2. Ignición al calentarse normalmente - Debajo de los 93° C
- 1. Debe precalentarse e para arder - Sobre los 93° C
- 0. No arde

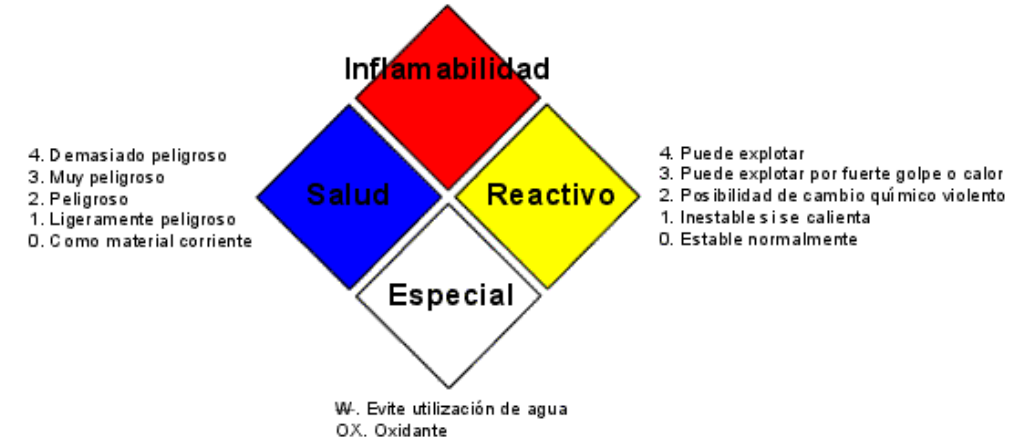


Figura 245. Ejemplo de "Sistema para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo".

Identificación de peligros

Para identificar los peligros asociados al transporte y almacenamiento de sustancias químicas se requiere: conocer los escenarios indeseables e identificar el material, sistema, proceso o actividad que pueda provocar afectaciones. (Actividades altamente riesgosas 1er y 2do listado).

Las consecuencias indeseables asociadas a las sustancias peligrosas se pueden agrupar en tres categorías generales:

Impactos a personas

Impactos al ambiente

Impactos económicos.

A su vez, estas categorías pueden subdividirse de acuerdo al tipo de resultado (ejemplo: exposición a material tóxico, exposición a calor o energía, sobrepresión, etc.).

La identificación de los peligros químicos puede realizarse por medio de la determinación de las propiedades del material y de las condiciones del recipiente que las contiene. A partir de las propiedades del material pueden determinarse las consecuencias de interés (explosión, incendio, etc.). Las condiciones en que se encuentra el material (por ejemplo: presión, temperatura) y su interacción con el ambiente pueden ayudar a establecer el peligro.

En el caso de Quintana Roo se ha identificado a las gasolineras y gaseras como la principal fuente de peligro debido a la cantidad de sistemas expuestos (personas, bienes e infraestructura), que se encuentran ubicados en sus alrededores, y que en caso de una explosión, fuga o derrame, se verían afectados directa o indirectamente.

Lo anterior es producto de la distribución regional, el acelerado crecimiento demográfico observado en los últimos años en el Estado, así como la escasa planeación y ordenamiento territorial.

Con base en la investigación realizada, se observó que los combustibles que mayormente se almacenan en Quintana

Roo son: Gasolina, Diésel, Turbosina más Combustóleo y Gas Lp.

Otras sustancias químicas que se manejan en el Estado de Quintana Roo, pero en menor medida, son amoniaco 2%, Ácido Sulfúrico 7%, Hidróxido de Sodio 22%, Explosivos 32%, Dióxido de Carbono 37%. (Serrano, 2003)

5.1.2 Metodología

Con base en la metodología del CENAPRED (2014), se comenzó por identificar los sitios que manejan sustancias químicas, poniendo especial énfasis en las de mayor presencia en el Estado (diesel, gasolina, gas L.P., turbosina y combustóleo).

Con la información obtenida, se procedió a realizar los modelos de explosión con el Software SCRI Fuego 1.3 (información del producto), este programa permite efectuar simulaciones una vez que se alimenta de los siguientes datos: tipo de sustancia química, características fisicoquímicas de la sustancia, volumen almacenado o transportado, etc.

Los tipos de eventos que determina el Software SCRI Fuego 1.3 pueden ser:

Explosión por expansión de líquido en ebullición

El acrónimo BLEVE se utiliza para designar una explosión mecánica en la que interviene un líquido en ebullición que se incorpora rápidamente al vapor en expansión. La traducción literal es "expansión explosiva del vapor de un líquido en ebullición" correspondiente a *Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*. La BLEVE es un caso especial de estallido catastrófico de un recipiente a presión en el que ocurre un escape súbito a la atmósfera de una gran masa de líquido o gas licuado a presión sobrecalentados.

Incendios de charco

Como consecuencia de un derrame de líquidos inflamables, se forma un charco de líquido cuya extensión dependerá de la geometría y naturaleza del suelo. Por evaporación se generan gases inflamables, si la temperatura del líquido está por encima de la temperatura de ignición de la sustancia, puede conducir a un incendio del propio charco. Al incendiarse, se producen llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión. El incendio también puede tener lugar en el interior de un tanque de almacenamiento de líquidos inflamables. Los efectos peligrosos de estos accidentes son fundamentalmente de dos tipos:

- La radiación térmica generada por los incendios
- Los efectos de los posibles gases tóxicos generados en la combustión

Dardo de fuego

Tanto en las tuberías como en los depósitos con gas a presión, la aparición de una pequeña fisura en las paredes trae como consecuencia la descarga del gas contenido, formando un chorro de gas a presión. Si la fuga entra en contacto con una fuente de ignición, el resultado será la formación de un incendio en forma de chorro o, como normalmente se le llama, dardo de fuego o *jet fire*. Los efectos de este tipo de accidentes son fundamentalmente los causados en el entorno por el calor generado e irradiado desde el dardo.

Bola de fuego

El resultado de la mezcla de vapor y aire ocasiona la formación de una bola de fuego o *fireball*, la cual sucede cuando a la nube de vapor la alcanza una fuente de ignición. Las bolas de fuego pueden llegar a afectar áreas importantes

por los efectos de radiación térmica emitida. La parte interna de la nube está constituida totalmente por combustible, mientras que la capa externa, (donde la ignición ocurre) está formada por una mezcla aire-combustible. Como la capacidad de flotación se incrementa por el calor en el gas, la nube incendiada tiende a elevarse, extenderse y tomar una forma esférica.

A consecuencia de las explosiones, las personas pueden sufrir de forma directa diversos daños, que van desde la ruptura de tímpano por la intensidad del ruido, hasta la muerte por hemorragia pulmonar o por proyección del cuerpo. Los daños indirectos incluyen heridas por fragmentos de cristal y proyectiles, así como muerte provocada por colapso de edificios y estructuras. También incluye una ponderación de los daños que personas y estructuras podrían presentar dependiendo de la magnitud de la radiación térmica.

Para ello, se parte de la identificación de los sitios que manejan sustancias peligrosas, se realiza la investigación del tipo de sustancia y los volúmenes que manejan. Con esa información, se procede a modelar el peligro de interés para así obtener los radios con posible afectación.

Identificación de los sitios que almacenan sustancias químicas

El primer paso para identificar los sitios que almacenan sustancias peligrosas fue utilizar el Directorio Estadístico de Unidades Económicas (DENUE) elaborado por INEGI. En él se pueden encontrar los datos de las principales actividades económicas que se llevan a cabo en el país, así como la ubicación, giro y tamaño de las empresas.

Con base en la guía metodológica del CENAPRED (2004), se identificaron aquellos giros que manejan algún tipo de sustancia peligrosa, mismos que se enlistan a continuación:

- Refinerías
- Instalaciones industriales
- Gaseras
- Terminales de autotransporte de carga
- Plantas potabilizadoras de agua
- Plantas de tratamiento de aguas residuales
- Plantas de refrigeración
- Terminales de ferrocarriles: patios de maniobras, áreas de almacenamiento, etc.
- Plantas para tratamiento y/o disposición de residuos
- Terminales marítimas
- Aeropuertos
- Comercios
- Gasolineras
- Tintorerías
- Restaurantes
- Tlapalerías

- Tortillerías
- Mercados
- Estaciones de carburación
- Almacén de materiales pirotécnicos
- Hospitales que manejan materiales radioactivos

Una vez obtenidas las coordenadas de las instalaciones que manejan algún tipo de sustancia peligrosa, se ingresaron a un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) con el fin de realizar una verificación en campo de los mencionados sitios.

Durante la visita de campo se recabó la información de mayor importancia como son el tipo de sustancia química que manejan, volumen, el tipo de tanque de almacenamiento (elevado o enterrado) y la cercanía con otros sistemas expuestos como son viviendas, escuelas, templos, oficinas, comercios etc.. Cabe mencionar que en las visitas de campo se obtuvieron más almacenes de sustancias químicas que los que se identificaron mediante el DENU. Las visitas de campo se realizaron para cada municipio del estado de Quintana Roo, así como en cada cabecera municipal.



Fotografía 13. Gasolinera.y Gasera.

En la investigación e identificación de estos sitios se pudo constatar que hay lugares donde se vende de manera clandestina gasolina y/o diésel, ya que estas sustancias son de fácil almacenamiento y existe una alta demanda de las mismas. Ninguno de estos sitios de venta clandestina, en su mayoría casas, tiene señalamientos y evidentemente no cumplen con las medidas de seguridad para el manejo de estas sustancias, lo que implica un peligro potencial. (Fotografía 14)



Fotografía 14. Venta clandestina de gasolina y diésel.

También se identificaron sitios que manejan otras sustancias químicas como amoniaco, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, cloro, hipoclorito de sodio y dióxido de carbono. Estas sustancias pueden afectar a las personas a consecuencia de su toxicidad. Los efectos se miden en dosis-respuesta, es decir, que los daños que provocan, principalmente en la salud de las personas, se dan en función del tiempo de exposición con la sustancia.

Para estas sustancias sólo se identificó la ubicación de los puntos en donde se venden o manejan este tipo de sustancias, ya que no fue posible recabar la información referente a los volúmenes y características de almacenamiento, puesto que, al ser empresas privadas, no brindaron esa información.

Otro aspecto que se verificó durante las visitas a los sitios de interés fue la señalización con base en la utilizada por la *National Fire Protection Association* (NFPA) de los Estados Unidos. Lo anterior permite identificar rápidamente el tipo de sustancia, su compatibilidad de almacenamiento con otras sustancias, su reactividad y los efectos que presenta hacia a la salud. La señalización es de suma importancia, puesto que permite a los encargados de manejar la sustancia, así como a los involucrados en controlar algún incidente, actuar correctamente con base en la identificación apropiada de la misma.

Análisis de escenarios

Para el análisis de los peligros químicos, se utilizó un modelo matemático a partir del programa SCRI Fuego, en el cual se modeló el escenario más catastrófico que en este caso sería una explosión. Así, se pudieron determinar los posibles radios de afectación y definir la exposición, la cual se puede expresar en términos de concentración de la sustancia que se fugó o derramó. Para el caso de un incendio o explosión se considera la cantidad de calor expresada en las unidades correspondientes, así como la fuerza necesaria para desplazar a un individuo a una cierta distancia sin causarle un daño al organismo. Con base en estos datos, se definieron los criterios para determinar las zonas de afectación y amortiguamiento, dentro de las cuales se recomienda evitar los asentamientos humanos, escuelas, hospitales, infraestructura estratégica, o cualquier inmueble en el que haya concentraciones de población.

Tabla 140. Los principales criterios que se utilizaron para la modelación de fugas o derrames son los siguientes:

Datos adicionales

Temperatura ambiente	27 °C
Humedad relativa	79%
Velocidad media del viento	2 m/s
Duración del fuego	500 segundos

Para el análisis de gasolina, diésel, gas L.P., turbosina y combustóleo se usó la capacidad de almacenamiento y transporte de los tanques, asumiendo que estos se encuentran llenos. Para el caso específico del gas L.P. los litros se convirtieron a kilogramos, ya que el software requiere los datos de esta sustancia en dicha unidad.

El programa, una vez alimentado con los datos mencionados, arroja como resultado tres radios de afectación dependiendo del efecto de la exposición, que se mide con base en la radiación térmica, y se jerarquizan en alto (31.50 kW/m²), medio (12.60 kW/m²) y bajo (5.05 kW/m²).

Los efectos de las explosiones en las personas pueden ir desde la ruptura de tímpanos por ondas sonoras hasta la muerte por diversos factores (hemorragia pulmonar o proyección del cuerpo, entre otras). En la Tabla 157 se mencionan los daños que pueden registrar los seres vivos y la infraestructura a causa de la radiación térmica.

Tabla 141. Efectos de las explosiones en las personas.

Radiación térmica (kW/m ²)	Efecto
1.4	Se considera inofensivo para personas sin protección especial.
1.7	Mínimo necesario para causar dolor.
2.1	Mínimo necesario para causar dolor después de 60 segundos.
4.0	Suficiente para causar dolor con una exposición de 20 segundos (quemaduras de primer grado).
4.7	Causa dolor en 15 - 20 seg y heridas después de 30 segundos.
11.7	El acero delgado (parcialmente aislado) puede perder su integridad mecánica.
12.6	La madera puede alcanzar el punto de ignición después de una larga exposición; 100% de letalidad.
25.0	El acero delgado (aislado) puede perder su integridad mecánica.

37.5

Suficiente para causar daños a equipos de proceso y colapso de estructuras.

Es importante señalar que los modelos de simulación de explosión sólo se aplicaron para gasolina, diésel, gas Lp, turbosina, combustóleo y dinamita. Los radios de afectación varían de acuerdo a la cantidad de sustancia que se almacenan y la sustancia involucrada. Cabe mencionar que todos los modelos y metodologías para estimar el peligro químico tienen sus limitaciones, y la interpretación de los resultados requiere de personal capacitado y con gran habilidad, ya que los antecedentes sugieren que no existen dos accidentes químicos iguales.

Estos modelos no abarcan las combinaciones sucesivas (efecto dominó) y paralelas de eventos ocasionados por dos o más sustancias, ni las reacciones combinadas de los diversos materiales dentro de una o varias afectaciones.

Para las sustancias adicionales la afectación se determina por medio de dosis-respuesta. Para el caso de derrame o fuga de algún producto químico, existe la "Guía de Respuesta en Caso de Emergencias 2012", en la cual se incluyen los posibles radios de afectación y los diferentes efectos que puede producir cada sustancia a la salud. En el mismo documento se incluyen las principales características de cada sustancia.

Tabla 142. Ácido clorhídrico.

Número ONU	1789
Numero de guía	157
Peso Molecular	36.46 g
Estado físico	Gas incoloro o ligeramente amarillo, olor irritante y picante. Generalmente se emplea en solución acuosa que es incolora o amarilla clara.
Presión de vapor	4.0 atm a 17.8 °C
Solubilidad en agua	Soluble Grado de riesgo: Salud 3, Inflamabilidad 0, Reactividad 0
IPVS	100 ppm
Límite máximo permisible de exposición	7.5 mg/m ³ (CEILING)
Efectos a la Salud	Toxico; la inhalación, ingestión o contacto con vapores (pie ojos), polvos o sustancias pueden causar lesiones severas, quemaduras o la muerte.
Observaciones adicionales	La reacción con el agua el aire húmedo podría producir gases toxico, corrosivos o inflamables.

	El fuego produciría gases irritantes.
Incendio o Explosión	Las sustancia no es combustible por sí misma, pero puede descomponerse al calentarse y producir vapores corrosivos y/o tóxicos.
Evacuación	75 metros

Tabla 143. Ácido sulfúrico.	
Número ONU	1830
Numero de guía	137
Peso Molecular	98.08 g
Estado físico	Fluido aceitoso incoloro e inodoro
Presión de vapor	0.001 mm Hg a 20°C
Solubilidad en agua	Soluble
IPVS	15 mg/m3
Límite máximo permisible de exposición	3 mg/m3 (STEL)
Efectos a la Salud	Corrosivo y/o Tóxico; la inhalación, ingestión o contacto (piel y ojos) con vapores, polvo o sustancia puede causar daño severo, quemaduras, o la muerte.
Observaciones adicionales	La mezcla con fuego produce gases irritantes, corrosivos y/o tóxicos. Las fugas resultantes del control del incendio o la disolución con agua, puede causar contaminación.
Incendio o Explosión	Puede arder pero no incendiarse inmediatamente. La sustancia reacciona violentamente con el agua.
Evacuación	50 metros

Tabla 144. Amoniaco Anhidro.	
Número ONU	1005
Numero de guía	125
Peso Molecular	17.03 g
Estado físico	Gas
Presión de vapor	7510 mm Hg a 25°C
Solubilidad en agua	Soluble
IPVS	300 ppm
Límite máximo permisible de exposición	24 mg/m3 (STEL)
Efectos a la Salud	Tóxico; puede ser fatal si se inhala, ingiere o se absorbe por la piel. Los vapores son extremadamente irritantes y corrosivos, las fugas resultantes del control del incendio pueden causar contaminación..
Observaciones adicionales	Salud 3, Inflamabilidad 1, Reactividad 0.
Incendio o Explosión	Puede arder pero no incendiarse inmediatamente. Los cilindros expuestos al fuego pueden ventearse y liberar gases tóxicos y/o corrosivos a través de los tapones fundidos y/o pueden explotar.
Evacuación	300 metros

Tabla 145. Cloro.	
ONU	1017
Número de Guía	124
Peso molecular	70.9 g

Estado físico	Gas de color amarillo-verdoso, con olor sofocante e irritante
Presión de vapor	N/A
Solubilidad en agua	Muy poco soluble (0.7 %)
Grado de riesgo	Salud 3, Inflamabilidad 0, Reactividad 0
IPVS	10 ppm
Efectos a la Salud	Toxico; puede ser fatal si se inhala, ingiere o se absorbe por la piel. Los vapores son extremadamente irritantes y corrosivos.
Incendio o Explosión	La sustancia no arde, pero proporciona combustión.
Evacuación	1000 metros

	tóxicos.
Evacuación	75 metros

Tabla 146. Hipoclorito de Sodio.	
ONU	1791
Número de Guía	154
Peso Molecular	164.53 g
Estado físico	Es un sólido cristalino blanco muy inestable, por lo que es más utilizado en disoluciones acuosas, las cuales poseen olor a cloro
Presión de vapor	s/d
Solubilidad en agua	Soluble
IPVS	s/d
Límite máximo permisible de exposición	s/d
Efectos a la Salud	Toxico; la inhalación, ingestión o contacto con vapores (pie ojos)
Incendio o Explosión	Las sustancia no es combustible por sí misma, pero puede descomponerse al calentarse y producir vapores corrosivos y/o

Tabla 147. Dióxido de carbono.	
ONU	1845
Número de Guía	120
Peso Molecular	44.011 g
Estado físico	Es un sólido cristalino blanco muy inestable, por lo que es más utilizado en disoluciones acuosas, las cuales poseen olor a cloro
Presión de vapor	s/d
Solubilidad en agua	Soluble
Grado de riesgo	Salud 1, Inflamabilidad 0, Reactividad 0
IPVS	40,000 ppm
Límite máximo permisible de exposición	27,000 mg/m3 (STEL)
Efectos a la Salud	es un gas asfixiante.
Incendio o Explosión	Las sustancia no es combustible por sí misma.
Evacuación	100 metros

Sin embargo aun teniendo los datos y características de estas sustancias y un radio de evacuación, es importante tomar en cuenta factores muy importantes que determinara la efectividad de la evacuación, los cuales pueden ser:

- La amenaza a la población tomando en consideración la extensión de la zona
- Número de personas afectadas o expuestas
- Tiempo de evacuación
- Presencias de escuelas, hospitales, cárceles, etc.
- Condiciones climáticas y geográficas
- Presencia de lluvia
- Existencia de neblina

Pronósticos de cambios climáticos

Velocidad del viento

5.1.3 Desarrollo

Como resultado de las investigaciones en campo para el almacenamiento de sustancias químicas peligrosas, se conformó una base de datos con la ubicación de gasolineras, gaseras (gas LP), y con la de los sitios que manejan las sustancias químicas adicionales antes mencionadas. Este análisis se realizó para las principales ciudades del Estado (Chetumal, Bacalar, Felipe Carrillo Puerto, Playa del Carmen, Cozumel, Isla Mujeres y Cancún).



Figura 246. Almacen de sustancias peligrosas en Chetumal.

Almacenamiento de sustancias peligrosas en Chetumal, posteriormente con la ayuda del Software SCRI Fuego, se realizaron los modelos de explosión, con los que se obtuvieron los radios de afectación para cada gasera (gas Lp) y gasolinera.

Estos se clasificaron de la siguiente manera:

Radio de Peligro Alto, con radiación térmica de 31.5 kW/m² es suficiente para causar daños a equipos de proceso y colapso de estructuras, fatalidad para seres vivos que estén dentro de este radio de afectación.

Radio de Peligro Medio, con radiación térmica de 12.60 kW/m², la madera puede alcanzar el punto de ignición, el acero delgado puede perder su integridad mecánica, y los seres vivos que estén en este radio tienen posibilidades de perder la vida.

Radio de Peligro Bajo, con radiación de 5.05 kW/m², en el que los seres vivos pueden presentar quemaduras de diversos grados, por una exposición de 20 segundos.

Una vez procesada la información de los radios de afectación en el SIG, en conjunto con la ubicación de cada gasolinera y gasera (gas Lp), se obtuvieron los mapas de peligro por explosión para cada ciudad (0).

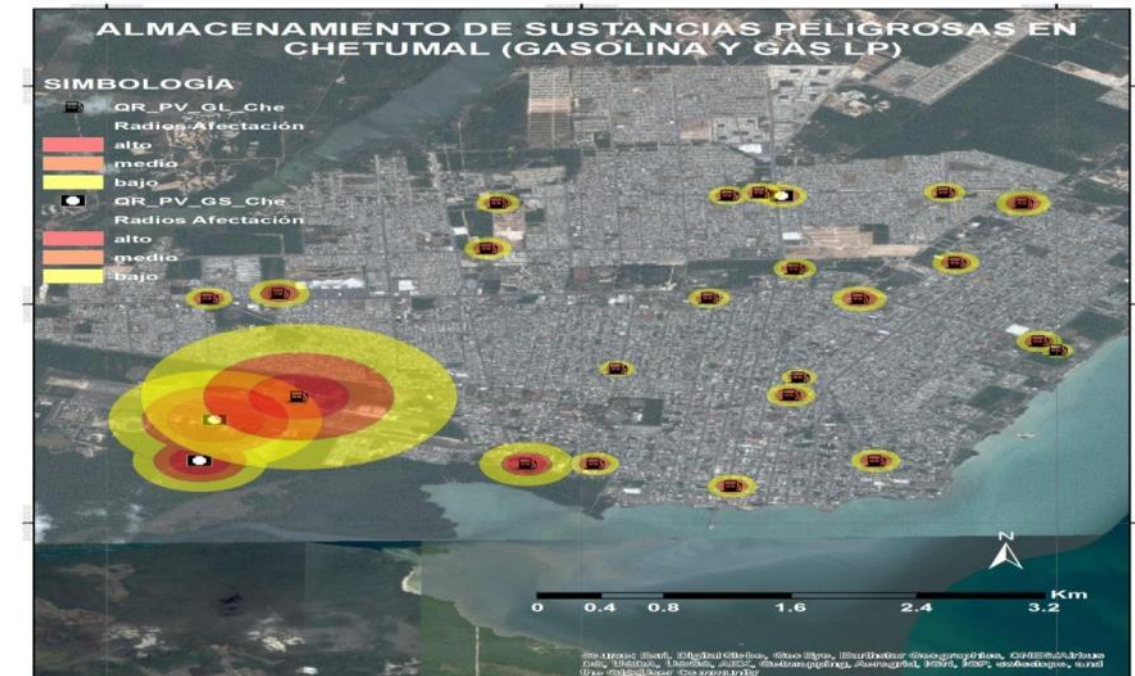


Figura 247. Mapa de peligro por explosiones en la Cd. De Chetumal.

5.1.4 Vulnerabilidad Física

Con base en el análisis de peligro explicado en el apartado anterior, (Figura 301), que muestra el mapa de peligro por explosiones en la Cd. De Chetumal, se decidió aprovechar la información recopilada en campo sobre las características constructivas de la vivienda para estimar su vulnerabilidad ante explosiones o incendios derivados del almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas.

Si bien en algunos países existe mayor avance en el estudio de la resistencia de los materiales constructivos ante este tipo de eventos, en México no se logró encontrar información que permitiera asociar el nivel de resistencia de los mismos ante la radiación calorífica para así estimar la vulnerabilidad de las viviendas.

Por tal motivo se consultaron diversas fuentes bibliográficas para clasificar el nivel de resistencia de los materiales encontrados en el Estado de Quintana Roo. Una de las principales fuentes consultadas fue el "Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y componentes de la Construcción del Ministerio de Vivienda y Urbanismo"¹⁰⁴ de

¹⁰⁴ MINVU-DITEC. "Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y componentes de la Construcción del Ministerio de Vivienda y Urbanismo". Edición 14.1. Marzo de 2014

Chile.

Con base en lo anterior, se asignó un grado de vulnerabilidad a cada tipo de vivienda según la combinación de materiales que predominaron en cada localidad rural o en cada manzana, en el caso de las ciudades.

Si bien la vulnerabilidad asociada puede considerarse subjetiva, al no haberse realizado pruebas de los materiales en laboratorio, se discutió cada una de las combinaciones de materiales con especialistas en construcción, y se tomó como base las referencias de resistencia a la radiación de los materiales contenida en la "NTP 326: Radiación térmica en incendios de líquidos y gases"¹⁰⁵ de España. A continuación se muestran los materiales incluidos en la fuente citada y su resistencia a la radiación calorífica:

Materiales:

Pared de ladrillos 400 kW/m²

Hormigón armado 200 kW/m²

Cemento 60 kW/m²

Acero 40 kW/m²

Madera 10 kW/m²

De los materiales incluidos en la NTP 326, en Quintana Roo únicamente hay presencia de hormigón armado, cemento y madera en lo referente a la construcción de viviendas. El bahareque, la palma y la lámina son materiales para los cuales no se encontró información, sin embargo, se determinó que son justamente estos los que ofrecen menor resistencia al fuego.

Una vez explicado lo anterior, en la siguiente tabla se puede observar la vulnerabilidad asignada a cada combinación.

5	Bloque hueco de concreto	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	Muy baja
6	Concreto colado	Lámina	Baja
7	Concreto colado	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	Muy baja
8	Desecho	Lámina	Muy alta
9	Lámina de cartón	Lámina	Muy alta
10	Madera	Lámina	Alta
11	Madera	Palma	Muy alta
12	Piedra sobre piedra	Lámina	Baja
13	Piedra sobre piedra	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	Muy baja
14	Piedra sobre piedra	Palma	Media
15	PVC relleno de concreto	Lámina	Media
16	Simple Piedra sobre piedra	Palma	Media
17	Simple Piedra sobre piedra	Losa de concreto o vigueta y bovedilla	Muy baja

Fuente: Elaboración propia.

Con la vulnerabilidad asociada a cada tipo de vivienda, se obtuvieron mapas para las 10 cabeceras municipales así como para las localidades rurales de cada municipio con base en el tipo de vivienda predominante en cada manzana o en la localidad, según sea el caso.

Si bien las áreas de afectación estimadas en los mapas de peligro únicamente impactan zonas puntuales en las ciudades o en las cercanías de las principales vías de comunicación, el análisis de vulnerabilidad física se realizó para toda la ciudad y todas las localidades, lo que podría aprovecharse para planear mejor futuros establecimientos dedicados al almacenamiento de sustancias peligrosas, así como mejorar las rutas para su transportación.

A continuación se presenta un breve análisis de cada municipio.

Bacalar

En la ciudad de Bacalar se observó una vulnerabilidad ante explosiones o incendios muy baja en la mayoría de las manzanas, ya que predominó el uso de bloque hueco de concreto en muros, y vigueta y bovedilla en techos, materiales que de acuerdo con la clasificación realizada son los más resistentes ante este tipo de eventos.

Se pueden observar los radios de afectación de los cuatro establecimientos que almacenan cantidades importantes de sustancias peligrosas dentro de la ciudad, así como uno más al Norte de la misma. De igual forma, una de las principales rutas entre el sur y el norte de la entidad atraviesa la ciudad, por lo que en caso de algún derrame o fuga se verían afectadas las manzanas colindantes. (Figura 248)

Tabla 148. Combinación de materiales encontrados en el estado de Quintana Roo y vulnerabilidad asociada ante incendios y explosiones

Combinación	Muros	Techos	Vulnerabilidad asociada
1	Bahareque	Palma	Muy alta
2	Bahareque	Lámina	Alta
3	Bloque hueco de concreto	Palma	Media
4	Bloque hueco de concreto	Lámina	Baja

¹⁰⁵ Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España. Instituto de Seguridad e Higiene en el Trabajo. "NTP 326: Radiación térmica en incendios de líquidos y gases". NIPO: 211-94-008-1.

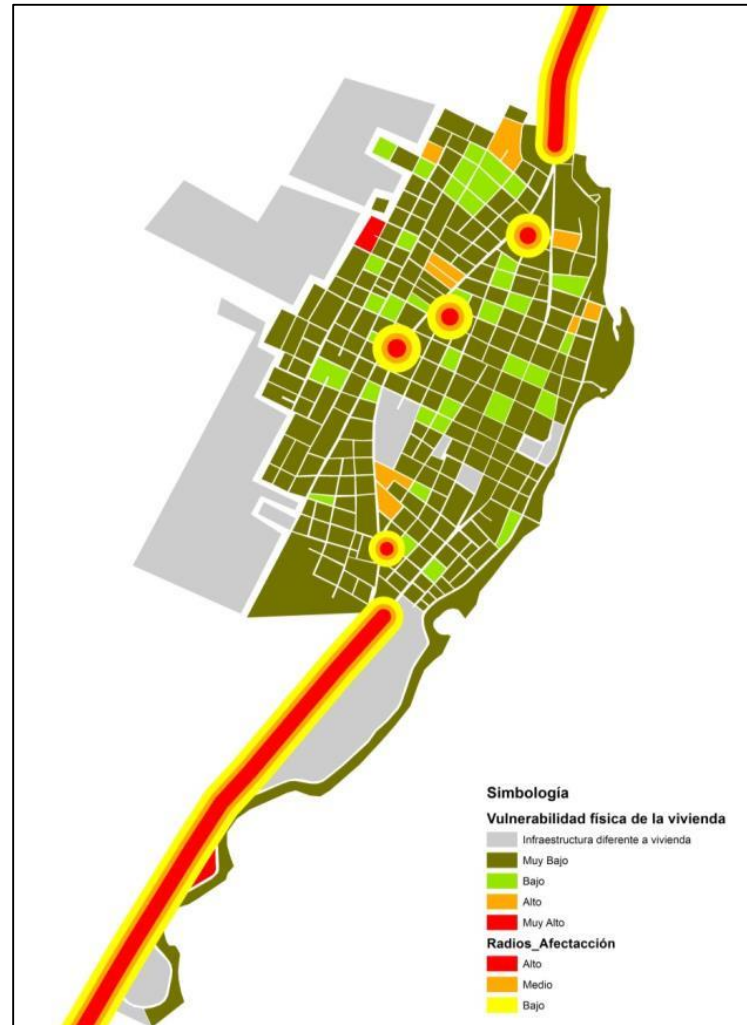


Figura 248. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas en la ciudad de Bacalar

De las 74 localidades analizadas para el municipio de Bacalar, el 26% registró condiciones de vulnerabilidad muy altas, 15% altas, 9% medias, 19% bajas y 31% muy bajas. En total se identificaron 34 localidades ubicadas a pie de carreteras por las cuales se transportan materiales peligrosos. (Figura 249)

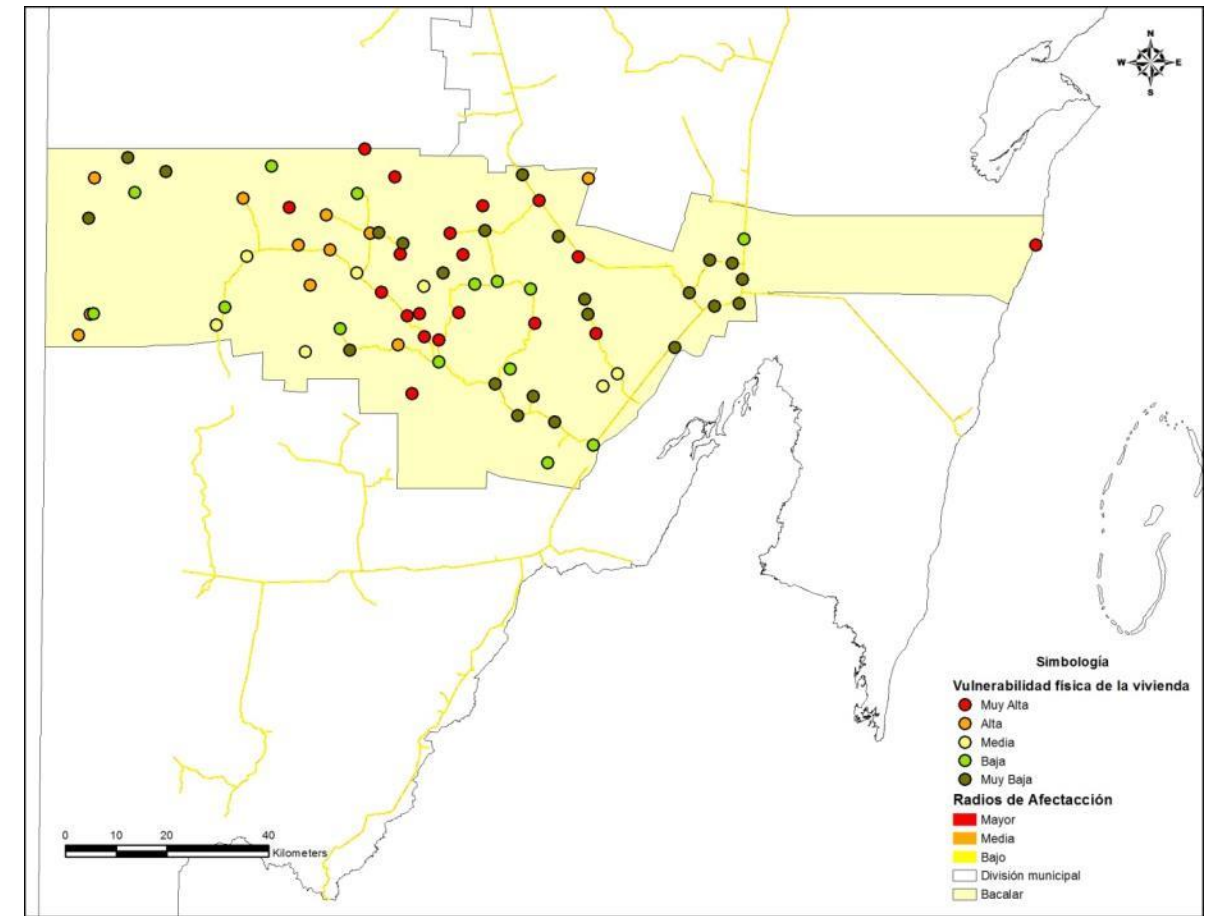


Figura 249. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del transporte de sustancias peligrosas en localidades rurales de Bacalar.

Benito Juárez

En la ciudad de Cancún, cabecera municipal de Benito Juárez, se detectaron más de cuarenta establecimientos en los cuales se almacenan sustancias peligrosas, particularmente gasolina, diésel y gas licuado de petróleo. En cuanto a la vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones, en la mayoría de la ciudad predominaron las viviendas de bloque hueco de concreto en muros y losa de concreto o vigueta y bovedilla en techos, por lo que en general sus niveles de vulnerabilidad son muy bajos.

La gran concentración de sistemas expuestos aumenta potencialmente el riesgo ante incendios o explosiones asociados al transporte y almacenamiento de sustancias peligrosas. De igual forma, la avenida López Portillo, que es la continuación de la carretera federal 180 Mérida-Cancún, así como de la autopista entre ambas ciudades, es una vía de comunicación importante por la que diariamente se transportan sustancias peligrosas, y en la que se ubican un gran número de negocios y viviendas. Se observó una mayor vulnerabilidad física de la vivienda ante este tipo de eventos al Poniente de la ciudad, así como al Norte de la misma. (Figura 250)

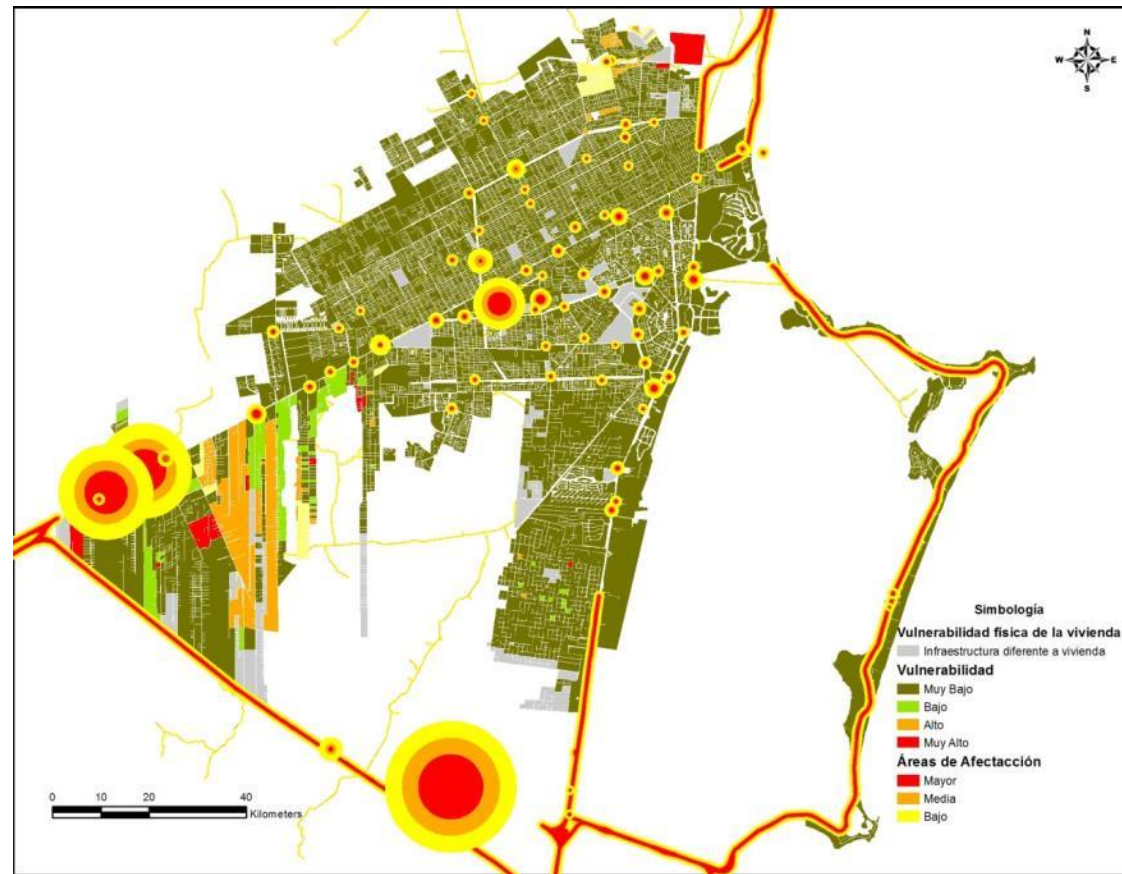


Figura 250. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas en la ciudad de Cancún

A nivel rural se analizaron 20 localidades del municipio de Benito Juárez, de las cuales 25% registraron una condición de vulnerabilidad física muy alta, 15% alta y 60% muy baja. Las localidades que se encuentran a pie de carretera y que en caso de algún evento podrían resultar afectadas son 10, de las cuales dos registran vulnerabilidad alta y 8 muy baja. (Figura 251)

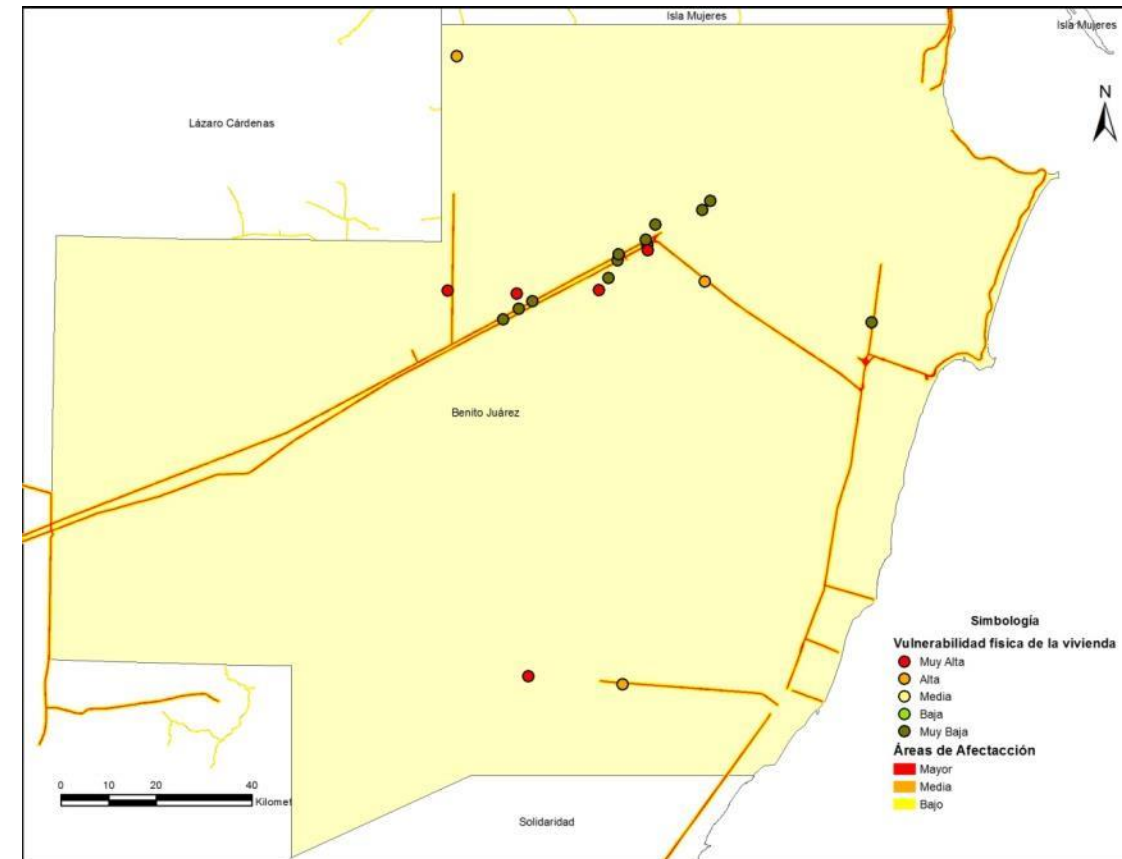


Figura 251. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del transporte de sustancias peligrosas en localidades rurales de Benito Juárez.

Cozumel

La ciudad de Cozumel registró nueve establecimientos que almacenan cantidades significativas de sustancias peligrosas. Sin embargo, la mayoría de estos se encuentran ubicados al Sur de la ciudad, en zonas en las que la concentración de viviendas es muy baja o inexistente. Únicamente cinco estaciones de servicio podrían ocasionar algún tipo de afectación a zonas habitacionales.

Con base en los tipos de materiales utilizados tanto en muros como en techos, se observó una vulnerabilidad baja y muy baja prácticamente en toda la ciudad, solamente dos manzanas arrojaron niveles altos. (Figura 252)

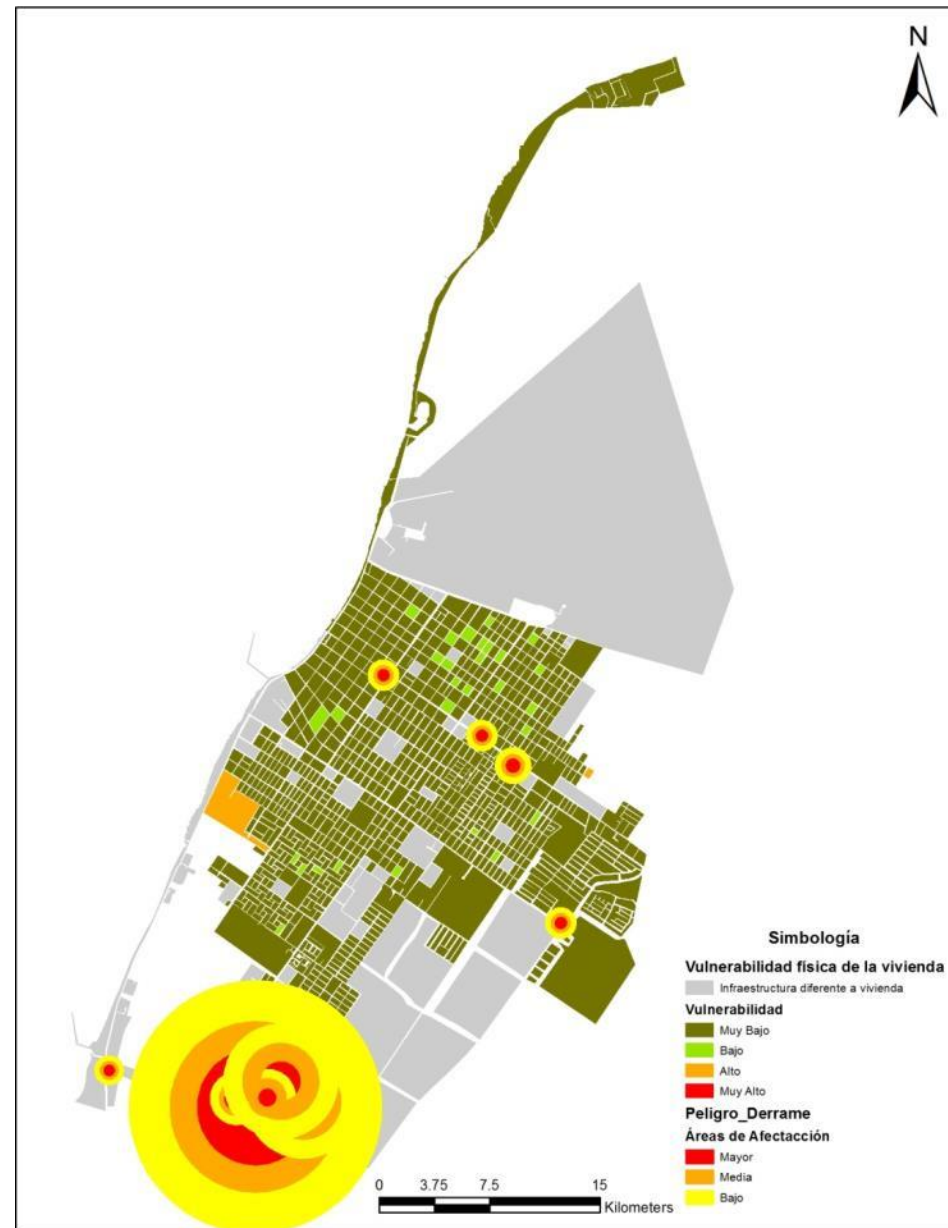


Figura 252. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas en la ciudad de Cozumel

En cuanto a las localidades rurales, la tendencia fue muy similar, ya que el 78.3% registró niveles muy bajos de vulnerabilidad ante incendios o explosiones 4.3% bajos, 4.3% medios y 13% altos. En cuanto al transporte de sustancias peligrosas dentro de la isla, se tienen claramente definidas las rutas desde la zona industrial, hacia el aeropuerto principalmente, con el fin de evitar zonas habitadas. De igual forma, al ser una insula, el flujo de sustancias peligrosas vía marítima también es significativo. (Figura 253)

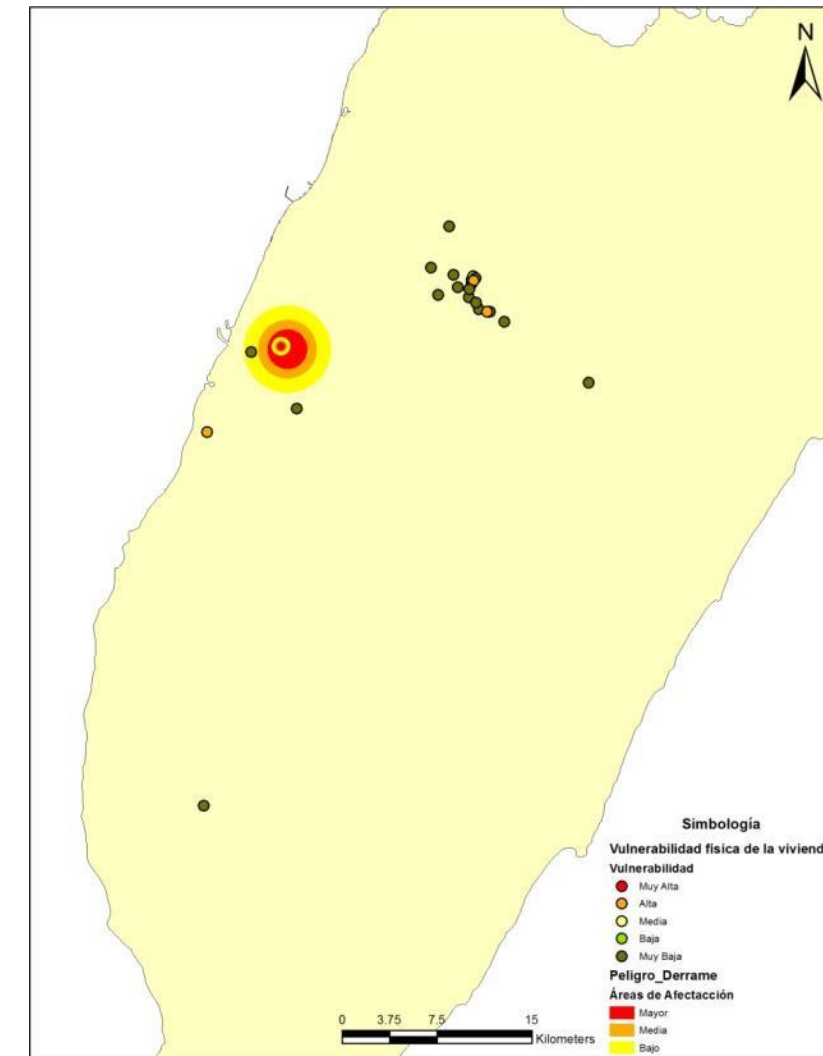


Figura 253. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del transporte de sustancias peligrosas en localidades rurales de Cozumel.

Felipe Carrillo Puerto

La cabecera municipal de Felipe Carrillo Puerto presentó una tendencia similar con las demás ciudades del Estado, ya que los niveles de vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivadas del almacenamiento o transporte de sustancias peligrosas fueron muy bajos en su mayoría.

En total se ubicaron seis establecimientos en los cuales se almacenan sustancias peligrosas, básicamente gasolineras y gaseras. Cabe señalar que varias zonas habitadas se encuentran dentro de los radios de afectación modelados, por lo que en caso de algún evento y aunque la vulnerabilidad de las viviendas sea muy baja, es probable que se registren daños y pérdidas importantes. (Figura 254)

De igual forma, en la ciudad convergen varias carreteras federales (La 307, 295 y 184), puesto que la cabecera municipal es prácticamente el punto medio entre el Norte y el Sur del Estado. Varias de estas rutas atraviesan la ciudad, por lo que el flujo de transporte con materiales peligrosos es frecuente. Cabe señalar que actualmente se está construyendo un libramiento que evitará que un número importante de estos transportes crucen por zonas habitacionales.

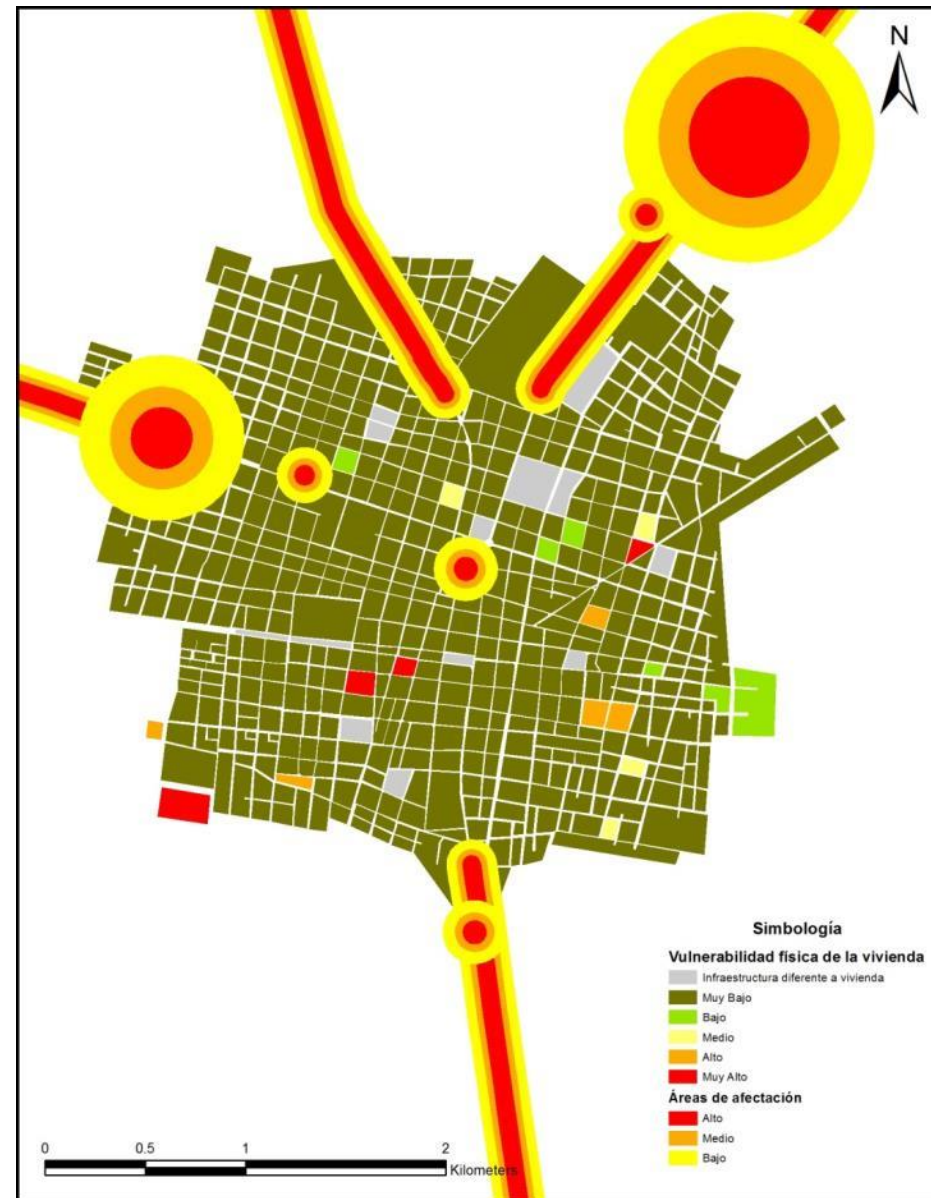


Figura 254. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas en la ciudad de Felipe Carrillo Puerto.

A nivel rural se analizaron 104 localidades, y a diferencia de lo observado a nivel urbano, el 45.2% registró niveles muy altos de vulnerabilidad física ante incendios o explosiones derivadas del transporte de sustancias peligrosas. Lo anterior se debe, principalmente al uso de materiales altamente combustibles en la edificación de viviendas, tales como el bahareque, la palma y la madera.

En un total de 40 localidades, que se ubican a pie de carretera, circulan con cierta frecuencia transportes con este tipo de sustancias, por lo que en caso de algún evento la cercanía de las mismas a estas rutas podría derivar en impactos a la población y sus viviendas. (Figura 255)

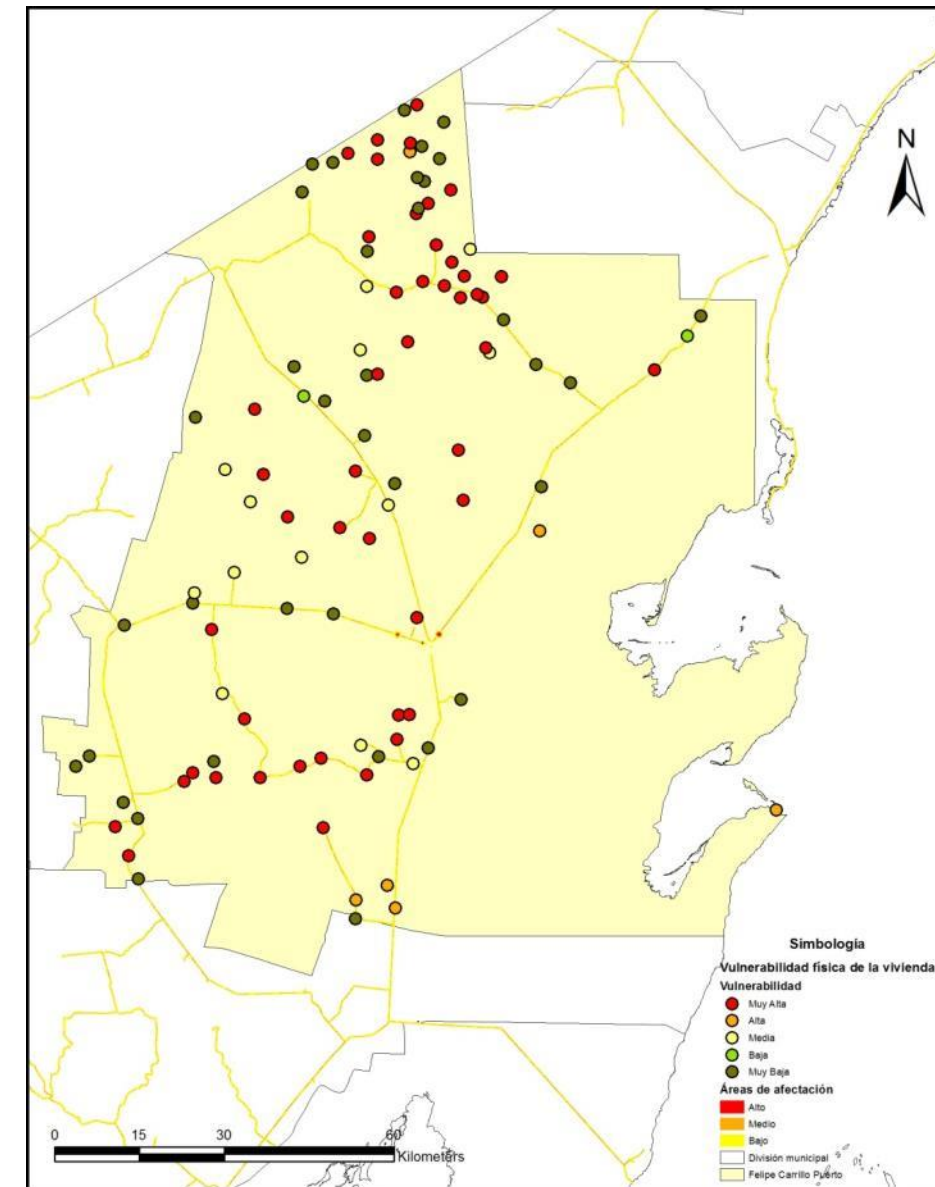


Figura 255. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del transporte de sustancias peligrosas en localidades rurales de Felipe Carrillo Puerto.

Isla Mujeres

En la cabecera municipal de Isla Mujeres únicamente se detectaron dos establecimientos que almacenan cantidades importantes de sustancias peligrosas, particularmente gasolina, diésel o gas licuado de petróleo. La vulnerabilidad de las viviendas ante explosiones o incendios fue en su mayoría muy bajo, únicamente se observan algunas manzanas al Oriente de la isla con niveles muy altos. (Figura 256)

Al igual que Cozumel, en Isla Mujeres se registra diariamente un flujo importante de sustancias peligrosas que se transportan a través de rutas marítimas, ya sea desde Punta Sam o desde Puerto Juárez.

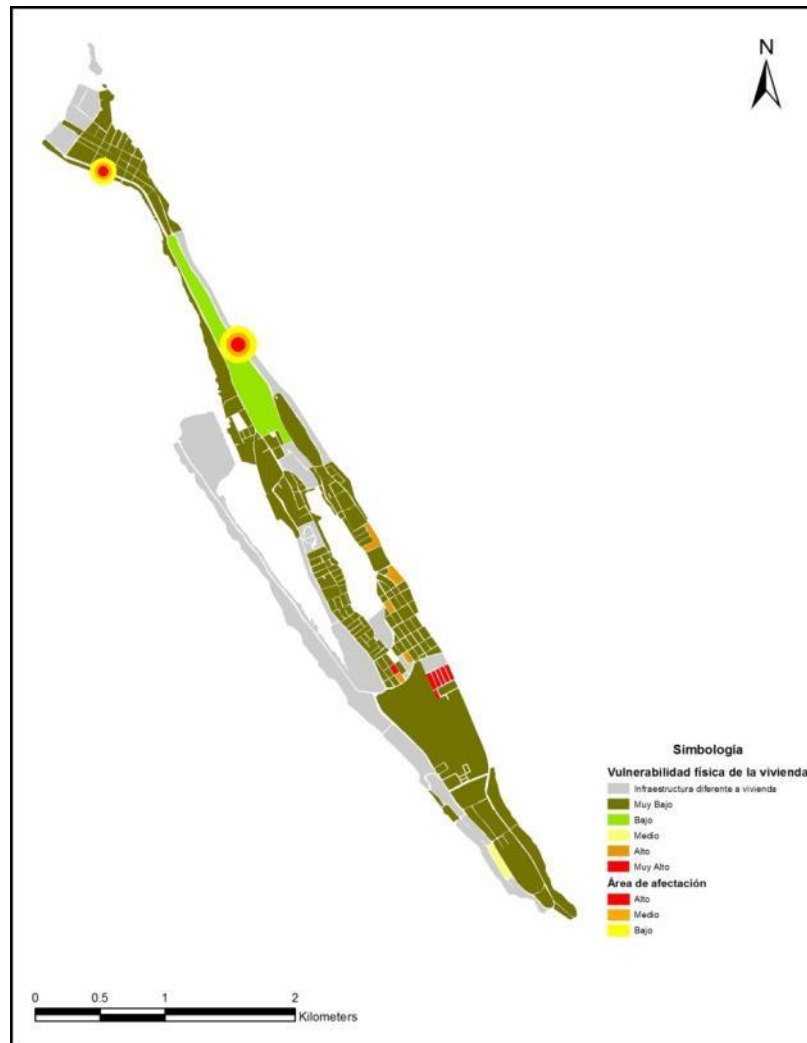


Figura 256. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas en la ciudad de Isla Mujeres.

En relación con las localidades rurales, únicamente el 26.7% se consideraron con vulnerabilidad muy alta, 6.7% baja y 66.7% muy baja. Cabe señalar que aquellas localidades con niveles muy altos se encuentran alejadas de establecimientos que almacenan sustancias peligrosas, así como de las rutas de transportación de las mismas. (Figura 257)

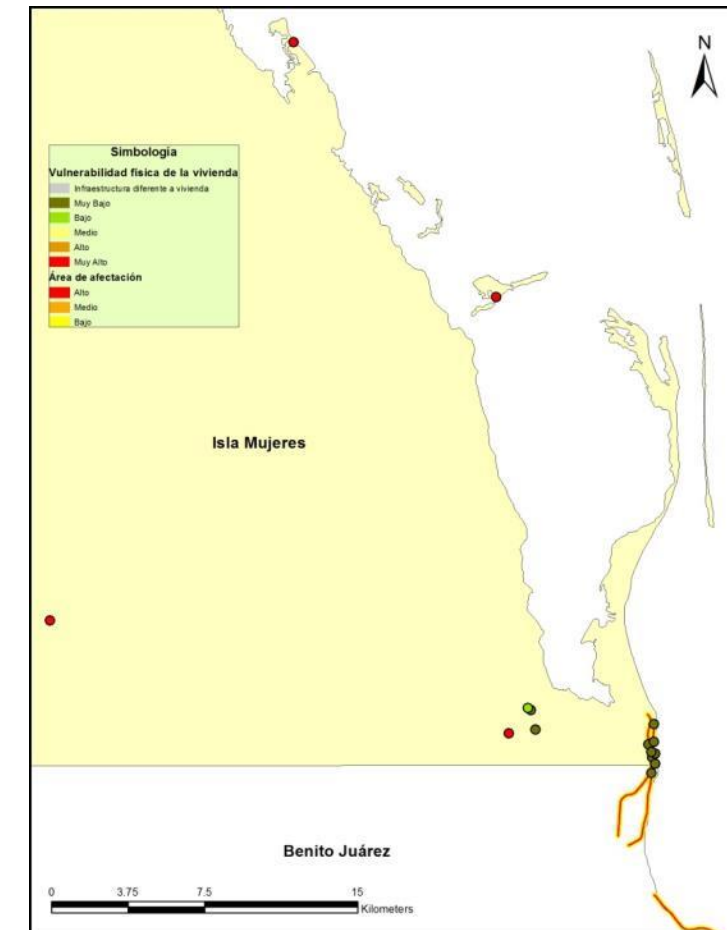


Figura 257. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del transporte de sustancias peligrosas en localidades rurales de Isla Mujeres.

José María Morelos

A diferencia de otras ciudades, en José María Morelos se registró una alta presencia de materiales combustibles en la construcción de viviendas, tal es el caso de bahareque, techos de palma o guano y madera. Lo anterior se vio reflejado en los niveles de vulnerabilidad ante incendios o explosiones asociadas con el almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas.

En total se ubicaron tres establecimientos que almacenan cantidades significativas de gasolina, diésel o gas licuado de petróleo, mismos que en caso de algún evento podrían ocasionar daños y pérdidas importantes en sus alrededores. De igual forma, la carretera federal 184 atraviesa la ciudad, por lo que el flujo de materiales peligrosos es frecuente. (Figura 258)

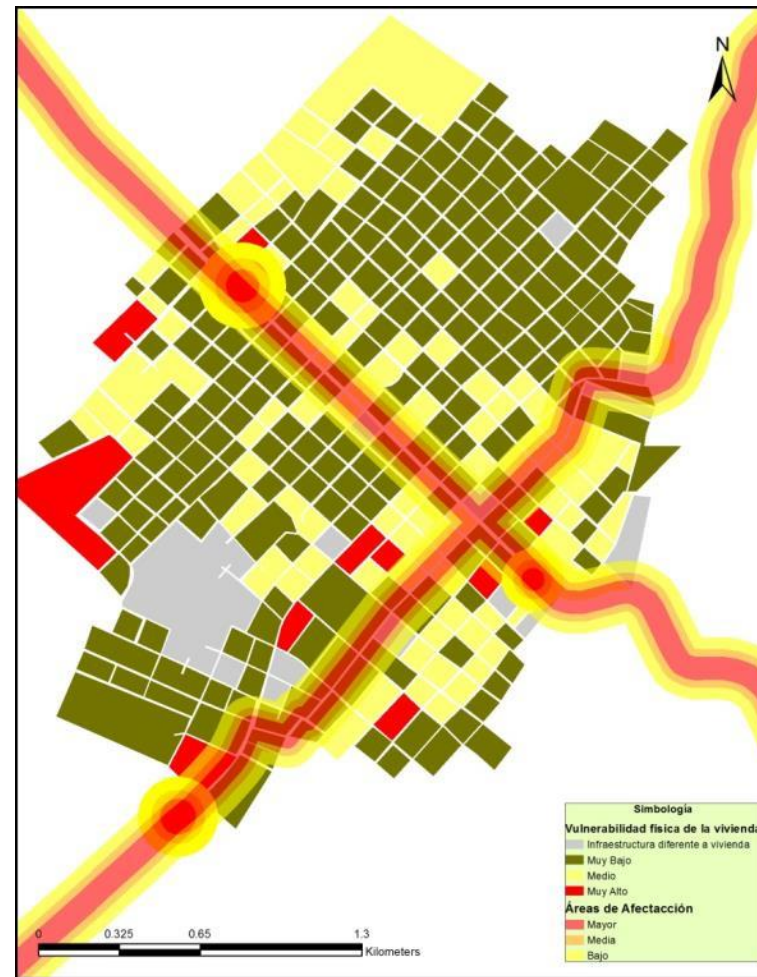


Figura 258. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas en la ciudad de José María Morelos.

A nivel rural, se analizaron 83 localidades, de las cuales 31.3% registraron niveles de vulnerabilidad física muy altos, 1.2% altos, 4.8% medios, 8.4% bajos y 54.2% muy bajos. Las áreas de afectación estimadas para los caminos alcanzan a 29 localidades. (Figura 259)

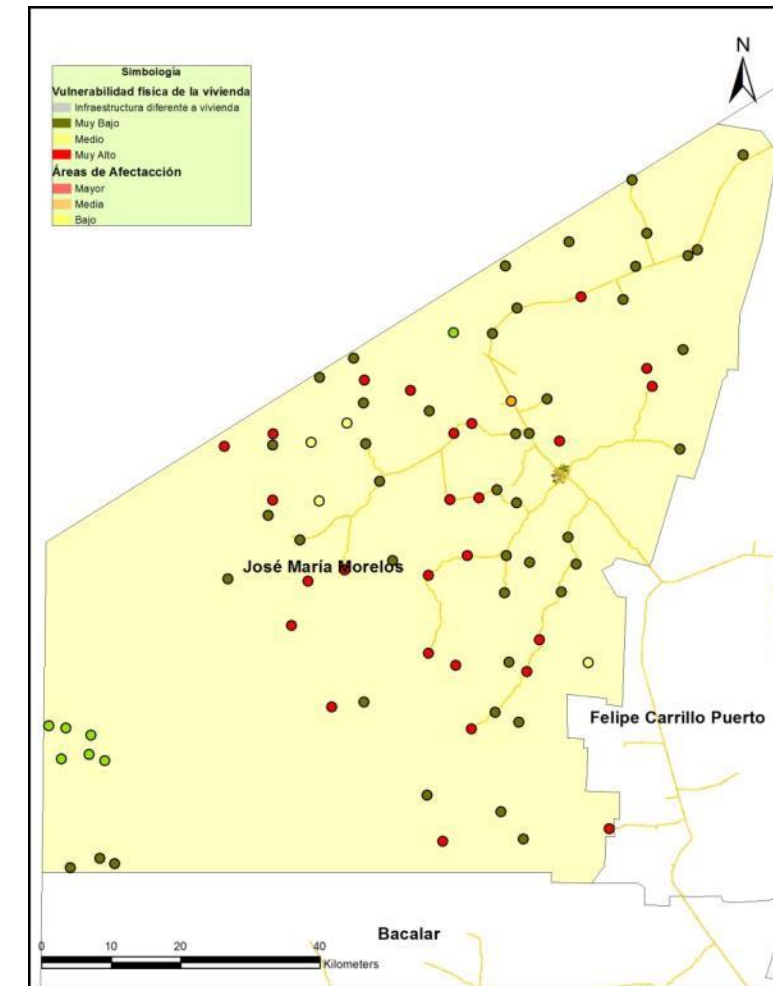


Figura 259. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del transporte de sustancias peligrosas en localidades rurales de José María Morelos.

Lázaro Cárdenas

En la ciudad de Kantunilkin, cabecera municipal de Lázaro Cárdenas, únicamente se ubicó un establecimiento que almacena una cantidad significativa de sustancias peligrosas, este correspondió a una gasolinera justo en la entrada sur de la ciudad. En relación con la vulnerabilidad de la vivienda ante incendios o explosiones asociados al almacenamiento o transporte de sustancias peligrosas, la mayoría de las manzanas analizadas registró niveles muy bajos, sin embargo se observaron algunas con niveles medios y muy altos. (Figura 260)

Cabe señalar que además de la gasolinera, la ciudad es atravesada de sur a norte por la carretera federal número 5, por la que existe flujo de transportes con sustancias peligrosas, principalmente combustibles. Además, dicha carretera ha aumentado su flujo vehicular en los últimos años, ya que llega a la localidad de Chiquilá, punto de embarque para llegar a Holbox, uno de los destinos turísticos que más se está desarrollando a nivel estatal.

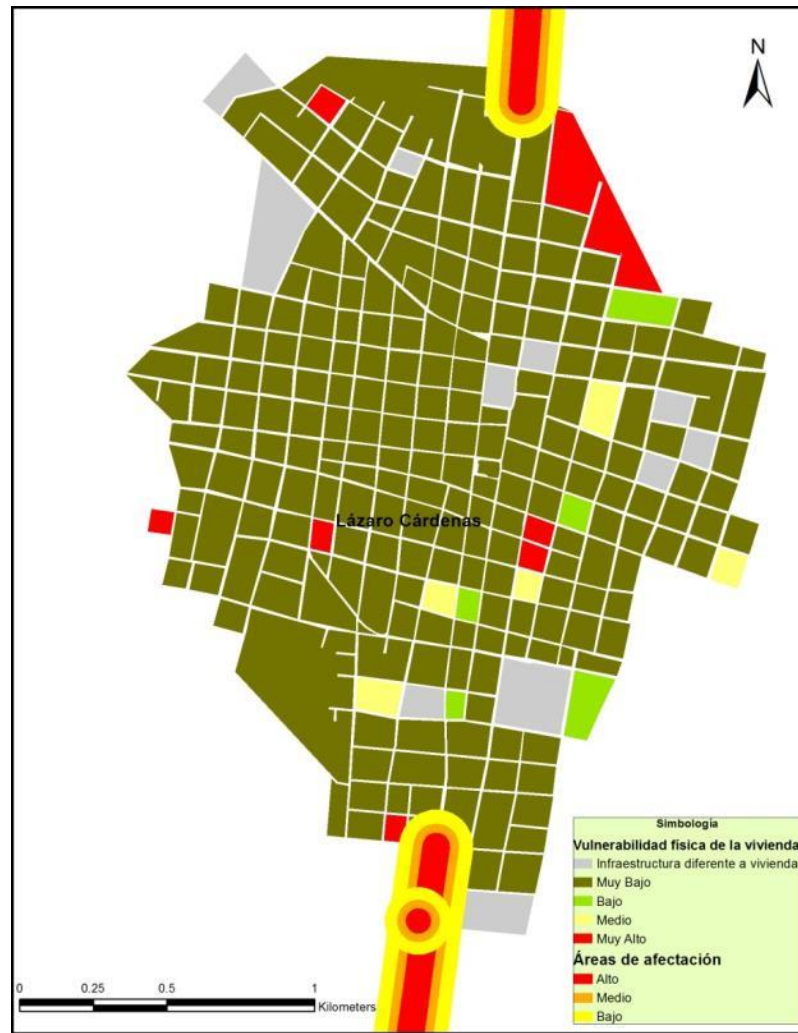


Figura 260. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas en la ciudad de Kantuniikín.

A nivel rural se analizaron 42 localidades, de las cuales 40.5% registraron niveles muy altos de vulnerabilidad, 2.4% altos, 2.4% bajos y 54.8% muy bajos. Cabe destacar que en 21 localidades las áreas de afectación modeladas podrían ocasionar algún tipo de daño por su cercanía con las principales carreteras que atraviesan el municipio. (0)

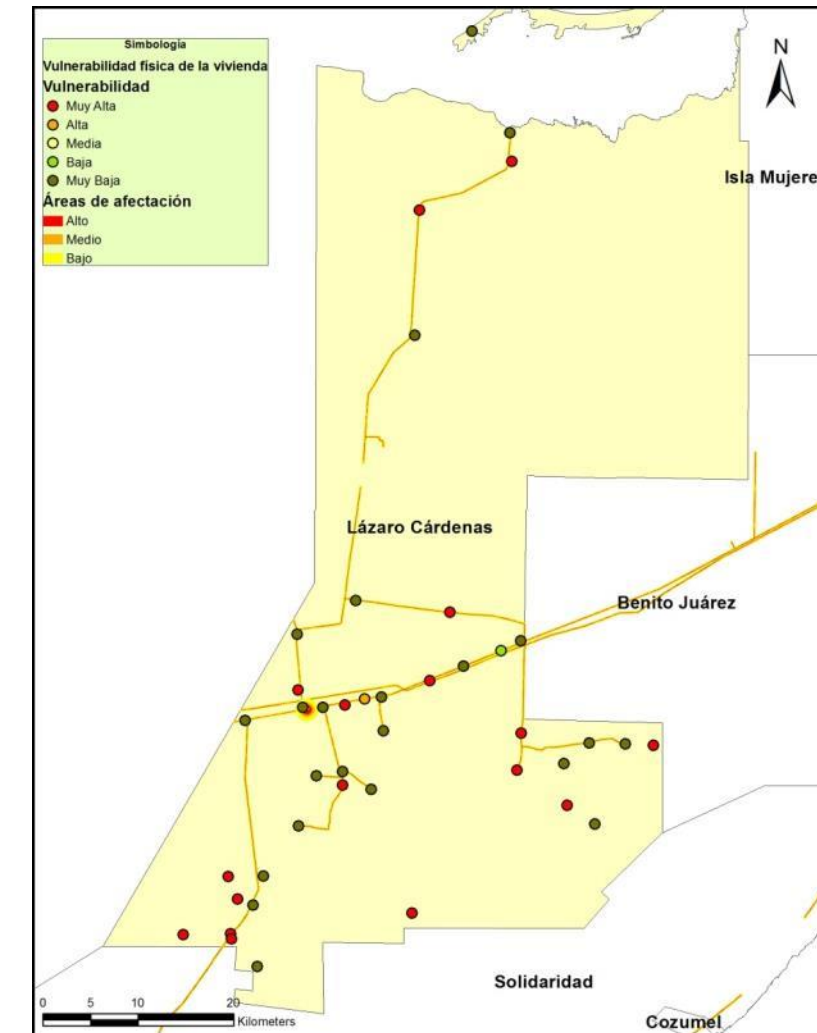


Figura 315. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del transporte de sustancias peligrosas en localidades rurales de Lázaro Cárdenas.

Othón P. Blanco

La cabecera municipal de Othón P. Blanco y capital del estado, Chetumal, registró en la mayor parte de la ciudad una vulnerabilidad muy baja ante incendios y explosiones derivadas del almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas. En total se ubicaron 32 establecimientos que almacenan una cantidad significativa de gasolina, diésel o gas licuado de petróleo. Únicamente en la periferia se detectaron algunas manzanas en donde predominó el uso de materiales como bahareque, lámina o palma.

La carretera federal número 186 es por la que circula la mayor cantidad de transportes con sustancias peligrosas y por la cual entran a la ciudad de Chetumal. Las áreas de afectación en caso de derrame afectarían algunas zonas del aeropuerto y las manzanas colindantes. (Figura 261)



Figura 261. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas en la ciudad de Chetumal.

A nivel rural, se estimó la vulnerabilidad física de 75 localidades, de las cuales 8% registraron niveles muy altos, 21.3% altos, 8% medios, 18.7% bajos y 44% muy bajos. Se identificaron 31 localidades que se encuentran a pie de carreteras en las cuales existe flujo frecuente de transportes con materiales peligrosos. (Figura 262)

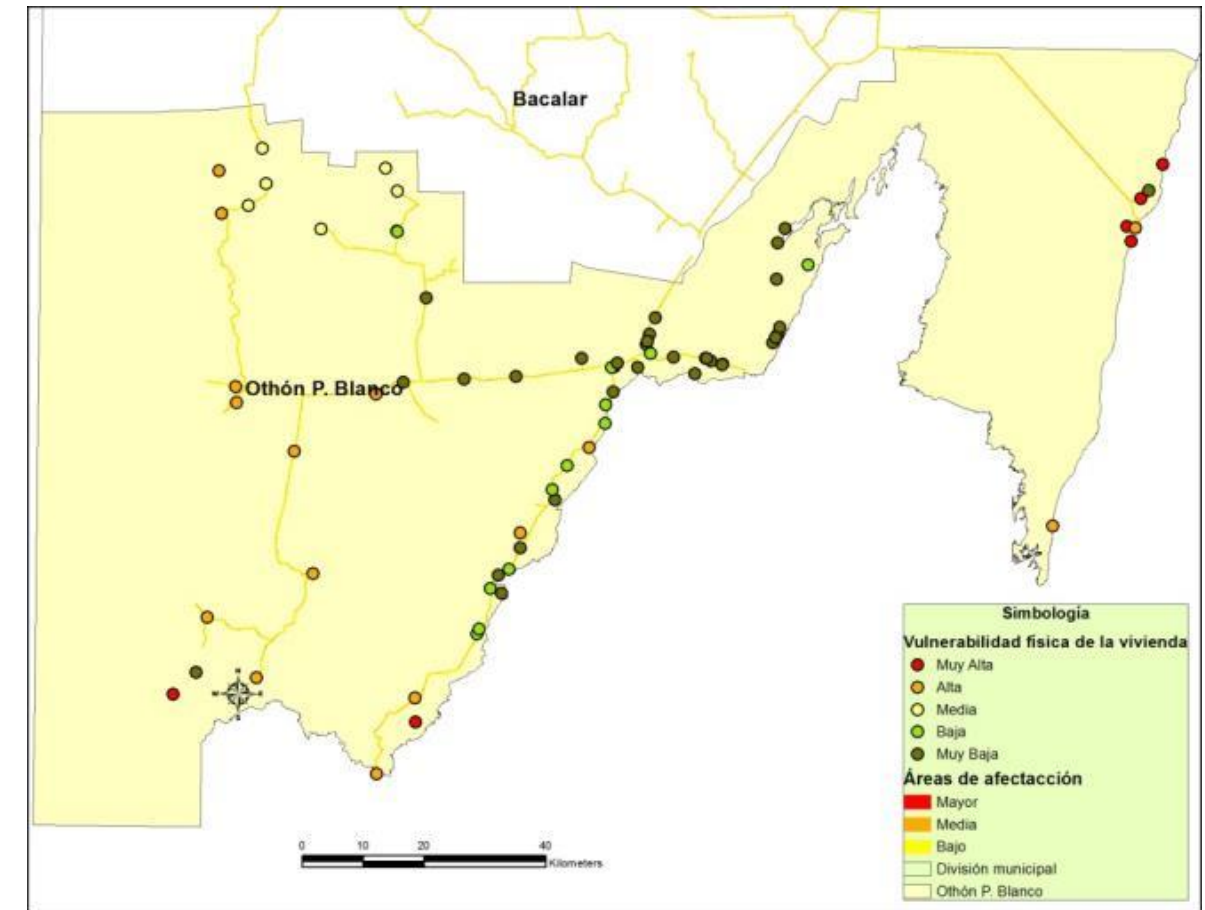


Figura 262. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del transporte de sustancias peligrosas en localidades rurales de Othón P. Blanco

Solidaridad

En Playa del Carmen la vulnerabilidad física de la vivienda ante explosiones o incendios se consideró muy baja en la mayoría de las manzanas analizadas, únicamente en la periferia de la ciudad se ubicaron algunas zonas en las cuales predominó el uso de materiales como lámina o palma en techos y bahareque o madera en muros, y que registraron niveles altos de vulnerabilidad.

En total se ubicaron 20 establecimientos que almacenan algún tipo de sustancia peligrosa, además, la carretera Federal 307 atraviesa la ciudad, aunque el tráfico de vehículos que transportan materiales peligrosos no necesariamente usa esta vía pues se construyó un arco vial que se utiliza como libramiento. (Figura 263)

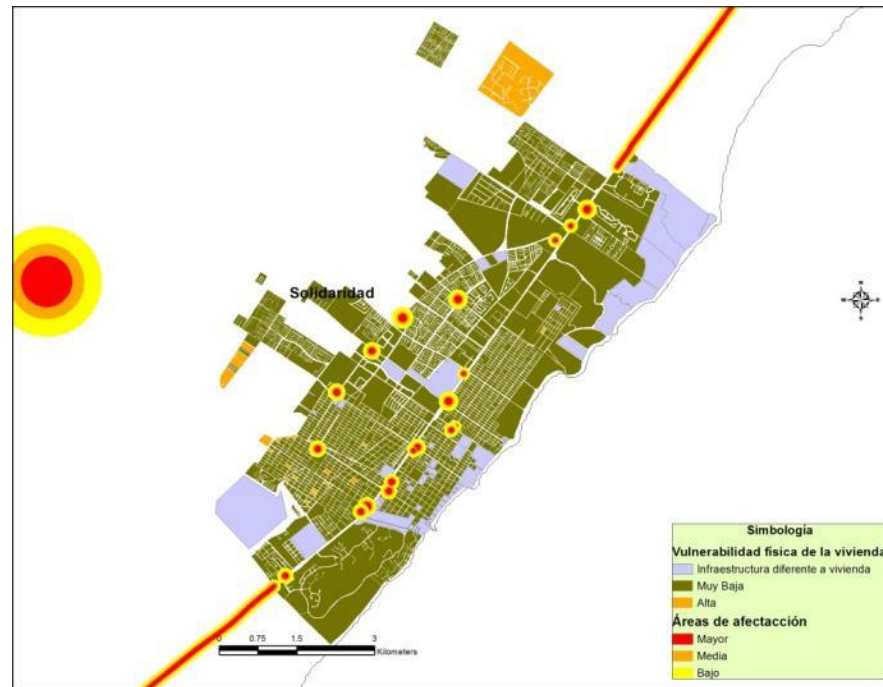


Figura 263. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas en la ciudad de Playa del Carmen.

A nivel rural únicamente se analizaron 24 localidades, de las cuales el 29.2% presentaron niveles muy altos de vulnerabilidad, 8.3% altos, 4.2% bajos y 58.3% muy bajos. Se identificaron además 12 localidades a pie de carretera, que en caso de algún evento las áreas de afectación las alcanzarían. (Figura 264)

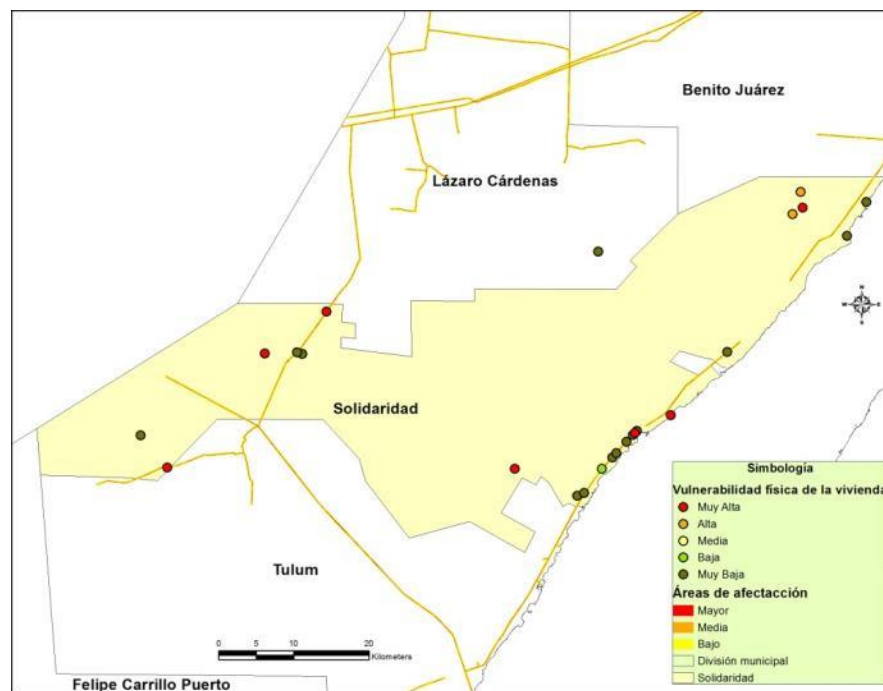


Figura 264. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del transporte de sustancias peligrosas en localidades rurales de Solidaridad.

Tulum

Por último en la ciudad de Tulum se observó la misma tendencia que en la mayoría de las ciudades del Estado, es decir, predominaron las manzanas en las cuales las viviendas se consideran con una vulnerabilidad muy baja. En total se identificaron siete establecimientos que almacenan sustancias peligrosas en cantidades importantes, la mayoría se encuentra a las afueras de la ciudad y son gasolineras o gaseras.

La ciudad es atravesada por dos carreteras federales importantes, la 307 y la 109 por lo que periódicamente se pueden observar vehículos que transportan sustancias peligrosas y que en caso de algún accidente podría ocasionar afectaciones en zonas habitadas. (Figura 265)



Figura 265. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas en la ciudad de Tulum.

A nivel rural se analizaron 22 localidades, de las cuales 31.8% registraron un nivel de vulnerabilidad muy alto, 18.2% alto, 4.5% bajo y 45.5% muy bajo. En caso de algún evento en las principales carreteras que atraviesan el municipio, únicamente siete localidades se encuentran dentro de las posibles áreas de afectación. (Figura 266)

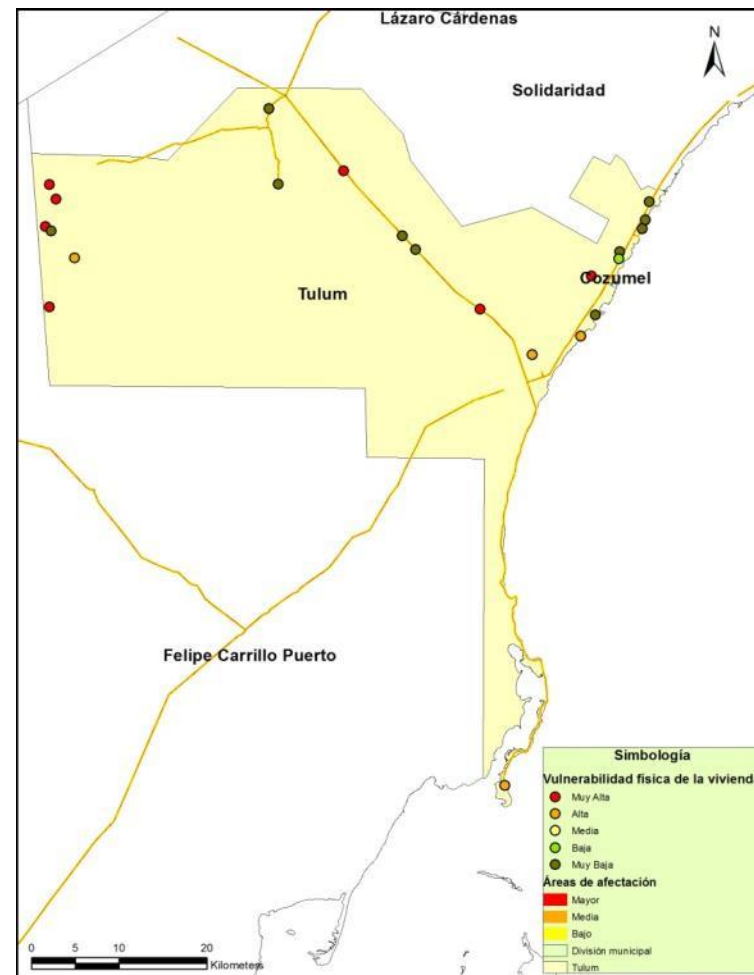
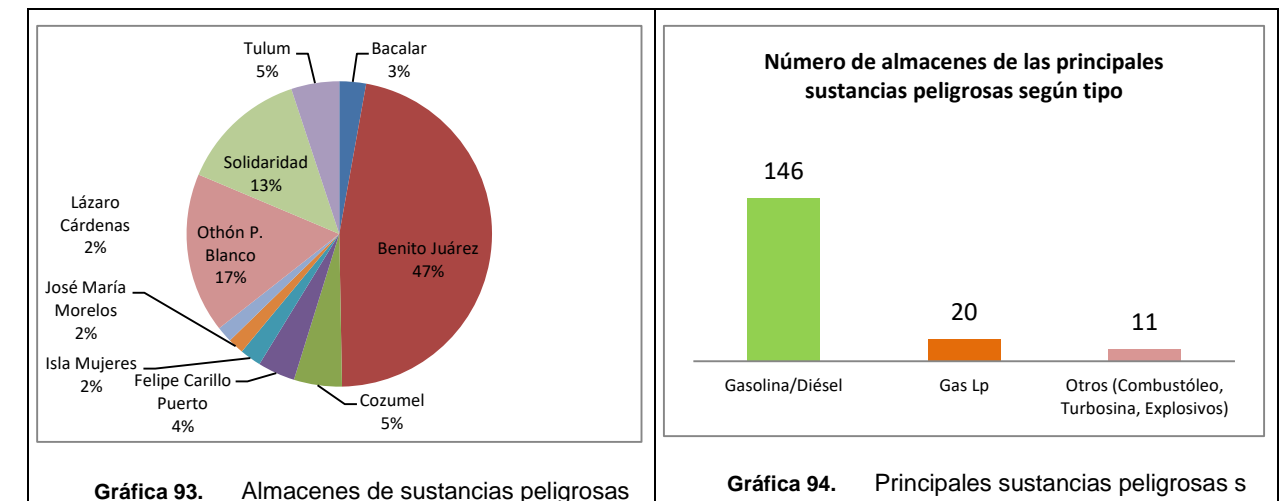


Figura 266. Vulnerabilidad física de la vivienda ante incendios o explosiones derivados del transporte de sustancias peligrosas en localidades rurales de Tulum

5.1.4 Resultados

Los resultados de la investigación bibliográfica y el trabajo de campo realizado permitieron constatar que en el Estado de Quintana Roo existen un total de 119 almacenes de sustancias peligrosas (Diésel, gasolina, gas L.P., turbosina y combustóleo). De estos, el 47% se encuentran dentro de los municipios de Benito Juárez, 17% en Othón P. Blanco y 13% en Solidaridad, el resto se distribuyen entre los demás municipios. Así mismo, un total de 146 de estos almacenes contienen gasolina o diésel, 20 gas L.P. y 11 otras sustancias. (Tabla 149, Gráfica 93 y Gráfica 94)



Gráfica 93. Almacenes de sustancias peligrosas

Gráfica 94. Principales sustancias peligrosas s

9. Total de almacenes de Sustancias Químicas por Municipio (Gasolina, Diésel, Gas Lp, Combustóleo, Turbosina).

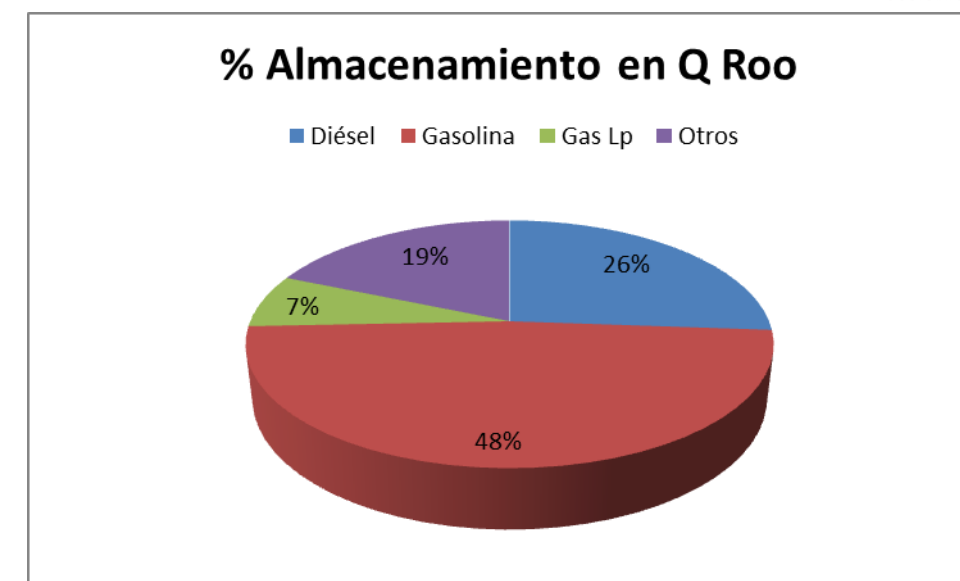
Municipio	Gasolina/Diésel	Gas Lp	Otros (Combustóleo, Turbosina, Explosivos)	Total
Bacalar	5	0	0	5
Benito Juárez	73	5	5	83
Cozumel	4	2	3	9
Felipe Carrillo Puerto	5	2	0	7
Isla Mujeres	2	2	0	4
José María Morelos	2	1	0	3
Lázaro Cárdenas	2	1	0	3
Othón P. Blanco	22	5	3	30
Solidaridad	22	2	0	24
Tulum	9	0	0	9
Total	146	20	11	177

Para los almacenes anteriores, de igual forma se estimó el volumen de cada sustancia para cada municipio del estado de Quintana Roo:

Tabla 150. Sustancias almacenadas en el Estado de Quintana Roo.

Municipio	Cantidad de Sustancia Química Almacenada (Gasolina, gas Lp, combustóleo, turbosina, explosivos)				Volumen General mts3
	Diésel mts3	Gasolina mts3	Gas Lp mts3	Otros	
Bacalar	230.00	460.00	0	0	690.00
Benito Juárez	5,382.00	9,641.00	1,122.5	7,500 turbosina y 6 ton de explosivo	16,895.5 + 6 Ton de explosivos
Cozumel	1,200.00	1,490.00	0	150 Combustóleo	2,840.00
Felipe Carrillo Puerto	450.00	850.00	300	0	1,600.00
Isla Mujeres	120.00	120.00	405	0	645.00
José María Morelos	120.00	240.00	5	0	365.00
Lázaro Cárdenas	0.00	220.00	500	0	720.00
Othón P. Blanco	2,250.00	3,052.00	321	250 turbosina, 250 combustóleo	5943.00
Solidaridad	1,174.00	3,680.00	405	0	5,259.00
Tulum	490.00	1,300.00	0	0	1,790.00
Total Q, Roo	11,416.00	21,053.00	3,058.5	8,150	43,677.5

En la siguiente figura se muestran los porcentajes que representa cada una de las sustancias químicas peligrosas (Diésel, Gasolina, Gas Lp, Turbosina, Combustóleo) almacenadas en el Estado de Quintana Roo. Las sustancias que se encuentran en mayor cantidad son Gasolina 48 % y Diésel 26%.



Gráfica 95. Almacenamiento Quintana Roo.

Cabe mencionar, que para la modelación por explosión a causa de derrame o fuga de las sustancias antes mencionadas, se tomaron en cuenta como variables los volúmenes de almacenamiento, el tipo de tanques, la temperatura y la humedad; una vez ingresados los datos en el Software SCRI Fuego, se obtuvieron los tres radios de afectación, un ejemplo de estos resultados se enlistan en la siguiente tabla, tomando como ejemplo el que mayor peligrosidad representa para el municipio:

Tabla 151. Gasolineras en el estado de Quintana Roo.

		Afectación Mayor	Afectación Media	Afectación Baja
10815	Bacalar	58.02 mts	95.10 mts	150.47 mts
3202	Benito Juárez	94.87 mts	153.34 mts	241.41 mts
4865	Cozumel	54.67 mts	89.78 mts	142.16 mts
2493	Felipe Carrillo puerto	61.19 mts	100.12 mts	158.32 mts
8775	Isla Mujeres	54.67 mts	89.78 mts	142.16 mts
3073	José María Morelos	67.07 mts	109 mts	172.16 mts
6602	Lázaro Cárdenas	47.25 mts	78 mts	123.73 mts
3173	Othón P. Blanco	67.07 mts	109 mts	172.16 mts
6169	Solidaridad	85.07 mts	95.71 mts	151.18 mts

9661	Tulum	76.26 mts	123.96 mts	195.57 mts
-------------	-------	-----------	------------	------------

Tabla 152. Gaseras en Quintana Roo.

		Afectación Mayor	Afectación Media	Afectación Baja
Delta Gas	Benito Juárez	535 mts	786.39 mts	1156.12 mts
Z Gas	Cozumel	535 mts	786.39 mts	1156.12 mts
Gas Imperial	Felipe Carrillo puerto	300 mts	450 mts	650 mts
Z Gas	Isla Mujeres	492.82 mts	723.36 mts	1063.27 mts
Gas Imperial	José María Morelos	72.51 mts	108.84 mts	159.73 mts
Gas Tomza	Lázaro Cárdenas	535 mts	786.39 mts	1156.12 mts
Z Gas Planta 1	Othón P. Blanco	313.30 mts	461.49 mts	676.83 mts
Z Gas	Solidaridad	492.82 mts	723.36 mts	1063.27 mts

En las siguientes tablas se muestran el volumen y el porcentaje de sustancia química que manejan los municipios de Q, Roo.

Tabla 153. Volumen y distribución de Diesel en el estado de Quintana Roo

Bacalar	230.00
Benito Juárez	5,382.00

Distribucion de Diésel en los Municipios del Estado de Quintana Roo

■ Bacalar ■ Benito Juárez ■ Cozumel
■ Felipe Carrillo Puerto ■ Isla Mujeres ■ José María Morelos

Cozumel	1,200.00
Felipe Carillo Puerto	450.00
Isla Mujeres	120.00
José María Morelos	120.00
Lázaro Cárdenas	0.00
Othón P. Blanco	2,190.00
Solidaridad	1,174.00
Tulum	490.00

Tabla 154. Volumen de almacenamiento y distribución de Gas LP en el Estado de Quintana Roo

Municipio	Volumen de Gas Lp almacenado mts ³
Bacalar	0
Benito Juárez	1,122.5
Cozumel	0
Felipe Carillo	300

Distribucion de Gas Lp en los Municipios del Estado de Quintana Roo

■ Bacalar ■ Benito Juárez
■ Cozumel ■ Felipe Carrillo Puerto
■ Isla Mujeres ■ José María Morelos
■ Lázaro Cárdenas ■ Othón P. Blanco

Puerto	
Isla Mujeres	405
José María Morelos	5
Lázaro Cárdenas	500
Othón P. Blanco	321
Solidaridad	405
Tulum	0
Análisis	Los principales municipios que manejan Gas Lp son el municipio de Benito Juárez, Lázaro Cárdenas e Isla Mujeres.

Tabla 155. Volumen de almacenamiento y distribución de gasolina en el Estado de Quintana Roo

Isla Mujeres	120.00
José María Morelos	240.00
Lázaro Cárdenas	220.00
Othón P. Blanco	2932.00
Solidaridad	3,680.00
Tulum	1,300.00
Análisis	Los principales municipio que manejan gasolina son el municipio de Benito Juárez, Solidaridad y Othón P. Blanco.

Tabla 156. Volumen de almacenamiento y distribución de Turbosina en el Estado de Quintana Roo

Municipio Volumen otras sustancias almacenadas mts3 Grafica 90.

Bacalar	0
Benito Juárez	7,500 turbosina y 6 ton de explosivo
Cozumel	150 Combustóleo

Municipio Volumen de Gasolina almacenado mts3 Gráfica 97.

Bacalar	460.00
Benito Juárez	9,641.00
Cozumel	1,490.00
Felipe Carillo Puerto	850.00

Distribucion de Gasolina en los Municipios del Estado de Quintana Roo

- Bacalar
- Benito Juárez
- Cozumel
- Felipe Carillo Puerto
- Isla Mujeres
- José María Morelos
- Lázaro Cárdenas
- Othón P. Blanco
- Solidaridad
- Tulum

Felipe Carillo Puerto	0	<h3>Distribucion de Turbosina en los Municipios del Estado de Quintana Roo</h3> <table border="1"> <caption>Distribucion de Turbosina</caption> <thead> <tr> <th>Municipio</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Benito Juárez</td> <td>97%</td> </tr> <tr> <td>Othón P. Blanco</td> <td>3%</td> </tr> </tbody> </table>	Municipio	Porcentaje	Benito Juárez	97%	Othón P. Blanco	3%
Municipio	Porcentaje							
Benito Juárez	97%							
Othón P. Blanco	3%							
Isla Mujeres	0							
José María Morelos	0							
Lázaro Cárdenas	0	<h3>Distribucion de Combustóleo en los Municipios del Estado de Quintana Roo</h3> <table border="1"> <caption>Distribucion de Combustóleo</caption> <thead> <tr> <th>Municipio</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Othón P. Blanco</td> <td>63%</td> </tr> <tr> <td>Cozumel</td> <td>37%</td> </tr> </tbody> </table>	Municipio	Porcentaje	Othón P. Blanco	63%	Cozumel	37%
Municipio	Porcentaje							
Othón P. Blanco	63%							
Cozumel	37%							
Othón P. Blanco	250 turbosina, 250 combustóleo							
Solidaridad	0							
Tulum	0							
Análisis	Se hace mención que el municipio de Cozumel igual maneja Turbosina, sin embargo no se obtuvo información de los tanques de almacenamiento.							

Es Sumamente importante es la selección del modelo numérico a usar para la simulación de los radios de afectación, ya que se debe tomar en cuenta la información de la que se dispone, como es la cantidad de material, sus condiciones fisicoquímicas y el tipo de almacenamiento, las condiciones ambientales (temperatura, humedad, estabilidad atmosférica, dirección y velocidad del viento predominante, etc.), localización y distribución de construcciones cercanas, entre otros factores. La falta de esta información o la suposición incorrecta de datos dará por resultado que las áreas de afectación resulten muy distintas a las que realmente se producen en un evento real.

En este trabajo se presentan las sustancias químicas que se almacenan en cada municipio del Estado de Q. Roo, y se proporcionan sus volúmenes de almacenamiento y sus radios de afectación en caso de explosión. De esta manera se pueden conocer las áreas propensas a sufrir el impacto de las sustancias químicas, así como las áreas de mitigación y amortiguación para cada tipo de escenario. Lo anterior con el fin de identificar a la población e infraestructura expuesta, determinar los recursos humanos y materiales con que se cuentan, así como los servicios de emergencia disponibles, tal como bomberos, cruz roja y centros de atención médica. Así, las autoridades o empresas responsables podrían desarrollar sus planes de atención de emergencias con información actualizada y confiable, tomando en cuenta los mencionados aspectos.

De igual forma, se puede apreciar que existe una relación con la capacidad de almacenamiento y el desarrollo del municipio, la ciudad de Cancún, perteneciente al municipio de Benito Juárez es la ciudad que más almacenamiento de sustancias químicas tiene tanto en Diésel, Gasolina, Gas Lp, Turbosina, así como sustancias químicas adicionales.

Con los radios de afectación obtenidos se pueden establecer medidas de desarrollo urbano, ya que se puede panificar una mejor estrategia de crecimiento de las ciudades, alejando a la población de peligros químicos, o en caso contrario tomar mayores medidas de seguridad, respecto al ordenamiento del territorio. Como ejemplo, tenemos que en la ciudad de Playa del Carmen, en donde se ubicó una planta de almacenamiento de la Gasera Z, los radios de afectación del análisis realizado no mostraron impactos en la población ni en la zona urbana en general, sin embargo se puede observar que el crecimiento de la ciudad se está dando justo en dirección a la planta.

Otro aspecto que se observó en el trabajo de investigación fue que en muchos de los casos, las instalaciones no se encuentran a una distancia segura de la población, ya que en repetidos casos, la separación de los almacenes con respecto a las viviendas, escuelas, templos o comercios, no cumple con la distancia mínima requerida de 30 metros.

Se sugiere, como una forma de proteger a los miembros de la comunidad ubicada en la cercanía de sitios de almacenamientos, contar con un adecuado control del uso del suelo en lo que se refiere a las restricciones en los permisos de construcción para obras de tipo habitacional y comercial, siendo estas distancias indicadas en los Planes y Programas de Desarrollo Urbano de cada uno de los municipios del estado, así como en las normas emitidas.

5.1.6 Referencias bibliográficas

ACARMEX (2000). Base de datos de Accidentes Químicos en el transporte carretero. Área de Riesgos Químicos, CENAPRED-SEGOB. México.

ACQUIM (2000). Base de datos de Accidentes Químicos en fuentes fijas y móviles. Área de Riesgos Químicos, CENAPRED-SEGOB. México.

BELTRAN, L. (1996). Evaluación de la peligrosidad en un parque industrial (Caso de estudio: Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca, Mor.). Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. División de Estudios de Posgrado de la

Facultad de Ingeniería, UNAM. México.

LGEEPA (1996). Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Diario Oficial de la

Federación. 13 de Diciembre de 1996.

NOM-052-ECOL-1993 (1993) Características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Diario Oficial de la Federación, 22 de octubre de 1993. México.

Dinámica Heurística. 2008. análisis de Riesgos en los procesos utilizando el software SCRI-Modelos, SCRI Fuego, Scri Hazop, SCRI- FMEA y SCRI What if?

Dinámica Heurística S.A. de C.V.

HSE PERU S.A. (s.f.). Recuperado el 07 de 10 de 2014, de <http://hseperu.blogspot.mx/>

5.2 Transportación de sustancias peligrosas

5.2.1 Introducción

Los fenómenos de origen químico que se analizan en el presente apartado se relacionan con el almacenamiento y transporte de sustancias peligrosas. Si bien éstas siempre han existido (ya sea en estado líquido, sólido o gaseoso), el desarrollo tecnológico de la humanidad ha derivado en un uso intensivo de las mismas, así como en su modificación.

Actualmente el uso y consumo de sustancias químicas peligrosas es común en la vida diaria de la mayoría de las personas. Se conocen más de 100 millones de sustancias en un lapso de medio siglo de investigaciones sobre la orgánico e inorgánico¹⁰⁶, de este número 856,300 contienen al cobre como elemento de referencia. De igual forma, las actividades productivas, principalmente en la industria, implican un aumento en el manejo, transporte y almacenamiento de éstas.

A lo largo de la historia y del desarrollo tecnológico de la humanidad, han estado presentes las sustancias químicas en su estado líquido, gaseoso y sólido, las cuales han sido manipuladas, de una u otra forma, provocando, en algunas ocasiones y por descuido humano principalmente, explosiones, incendios o intoxicación a las personas. Esta situación prevaleció hasta que se logró conocer sus propiedades físicas y químicas.

En la actualidad aún se registran accidentes con sustancias químicas, tanto en su manejo, como en el almacenamiento y transporte de las mismas. Las principales manifestaciones de estos accidentes son las explosiones, los derrames y los incendios, y sus consecuencias van desde la intoxicación de personas o afectación de la infraestructura, hasta la muerte.

Como se puede observar, los accidentes químicos no están ligados a una sola sustancia, y sus consecuencias afectan tanto al ser humano como al medio ambiente. Además pueden ocurrir como resultado de diferentes causas, como son fenómenos naturales (sismos, huracanes, inundaciones, etc), fallas operativas en los procesos industriales, errores humanos y causas premeditadas.

Es este apartado se estudian los peligros químicos, particularmente lo relacionado con su almacenamiento y transporte, en el Estado de Quintana Roo.

Las sustancias químicas en estado líquido y gaseoso, así como los productos derivados del petróleo se almacenan en tanques o depósitos atmosféricos y a presión, los cuales pueden estar en la superficie o enterrados; su tamaño, diseño, materiales, forma e instrumentación dependen de la cantidad y del producto que almacenan.

Tomando en cuenta que tanto el transporte de sustancias peligrosas, como su almacenaje y uso que afecta a las ciudades de nuestro Estado, y considerando que hasta hace un par de años no se desarrollaba la gestión integral de riesgos de manera implícita en la planificación de las ciudades, se ha observado que la incorporación de este tipo de análisis es primordial tomar las medidas necesarias encaminadas a reducir y mitigar los riesgos y evitar daños materiales, así como pérdidas económicas y humanas.

El aumento demográfico trae consigo el incremento de las actividades industriales, comerciales y de servicio que involucran la producción, almacenamiento y transporte de sustancias químicas, por lo que existe el peligro potencial de que ocurra algún accidente en algunas de estas etapas; y como consecuencia, una liberación no controlada o la presencia de un incendio y/o explosión que pueda dañar a la población, al ambiente o a los patrimonios. Cancún, capital del municipio de Benito Juárez es el mejor ejemplo donde el número de habitantes es el 50% de la población del Estado, esto es favorecido por que Quintana Roo tiene la segunda tasa neta migratoria nacional con un 8.7%. Más población es sinónimo de más riesgo, principalmente urbano.

Los eventos químicos pueden ser detonados de múltiples formas, entre las más importantes CENAPRED (2004), señala las siguientes: fenómenos naturales, fallas operativas en los procesos industriales, fallas mecánicas, errores humanos y causas premeditadas. Cabe señalar que estos eventos no son excluyentes entre sí, pues un suceso químico puede encadenarse a otros fenómenos químicos y/o naturales, y combinarse entre sí provocando un efecto dominó con la multiplicación y amplificación de los efectos o consecuencias.

Por lo cual, es indispensable que estas actividades se realicen de manera segura, siendo importante conocer las propiedades y características de las sustancias y materiales con los que se trabaja, con el fin de prevenir y en su caso, mitigar el impacto de cualquier accidente.

La magnitud y severidad de los eventos químicos dependen del tipo y de la cantidad de material peligroso involucrado, así como también de la localización del suceso, particularmente la localización la define la población y los recursos expuestos, así como las condiciones ambientales y atmosféricas que permitirán el desplazamiento del contaminante en el ambiente.

Por medio del análisis de los escenarios de peligro en las diferentes gasolineras, gaseras y almacenes de sustancias explosivas, se pueden plantear, de manera general, instrumentos para gestionar el riesgo en sus diferentes etapas (prevención, mitigación y respuesta a emergencias), así como determinar la vulnerabilidad de los principales bienes expuestos; por lo anterior, es importante que los resultados de este trabajo se difundan entre todas aquellas instancias y dependencias involucradas en la atención de emergencias ambientales, con el fin de que dispongan de más y mejor información respecto a la identificación de las principales fuentes de peligros asociados a las sustancias químicas, para así planear e implementar acciones preventivas y correctivas oportunamente.

Los objetivos particulares del trabajo son:

¹⁰⁶ (<http://www.cas.org/news/media-releases/100-millionth-substance>, 2015)

Generar un mapa de peligro para fugas en el transporte de sustancias químicas en las carreteras federales y estatales del estado.

CLASIFICACION DE LAS SUSTANCIAS QUIMICAS PARA SU TRANSPORTE

El transporte y distribución de materiales industriales por vía carretera representa más del 50% del uso de vehículos de autotransporte federal. Algunos de los principales materiales transportados y usados en prácticamente todas las actividades industriales, comerciales, de servicios, agrícolas y extractivas son los distintos tipos de hidrocarburos: gas LP, gas natural, diésel, combustóleo, gasóleo, turbosina, etc.

Para el transporte de sustancias químicas se utiliza un rombo el cual tiene la pictografía del peligro del material transportado el cual deberá ir provisto igual de números de identificación UN (Consiste en un conjunto de cuatro cifras que representan la identificación de la sustancia de que se transporta), prescritos para cada sustancia, los que deberán ser fácilmente visibles por personas situadas al frente, atrás o a los costados de los vehículos. (Fotografía 15)



Fotografía 15. Rombo el cual tiene la pictografía del peligro del material transportado.

El transporte de sustancias químicas está regulado por las NOM-002-SCT/2011 "Listado de las sustancias y materiales peligrosos más usualmente transportados", la NOM-003-SCT/2008 "Características de las etiquetas de envases y embalajes, destinadas al transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos", la NOM-004-SCT/ 2008 "Sistemas de identificación de unidades destinadas al transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos" y la NOM-009-SCT2/2009 "Especificaciones especiales y de compatibilidad para el almacenamiento y transporte de las sustancias, materiales y residuos peligrosos de la clase 1 explosivos."

IDENTIFICACION DE PELIGROS

Para identificar los peligros asociados al transporte y almacenamiento de sustancias químicas se requiere: conocer los escenarios indeseables e identificar el material, sistema, proceso o actividad que pueda provocar afectaciones. (Actividades altamente riesgosas 1er y 2do listado).

Las consecuencias indeseables asociadas a las sustancias peligrosas se pueden agrupar en tres categorías generales:

Impactos a personas

Impactos al ambiente

Impactos económicos.

A su vez, estas categorías pueden subdividirse de acuerdo al tipo de resultado (ejemplo: exposición a material tóxico, exposición a calor o energía, sobrepresión, etc.).

La identificación de los peligros químicos puede realizarse por medio de la determinación de las propiedades del material y de las condiciones del recipiente que las contiene. A partir de las propiedades del material pueden determinarse las consecuencias de interés (explosión, incendio, etc.). Las condiciones en que se encuentra el material (por ejemplo: presión, temperatura) y su interacción con el ambiente pueden ayudar a establecer el peligro.

5.2.2 Metodología

Con base en la metodología del CENAPRED (2014), se comenzó por identificar los sitios que manejan sustancias químicas, poniendo especial énfasis en las de mayor presencia en el estado (diesel, gasolina, gas L.P., turbosina y combustóleo)

Con la información obtenida, se procedió a realizar los modelos de explosión con el Software SCRI Fuego 1.3 (información del producto), este programa permite efectuar simulaciones una vez que se alimenta de los siguientes datos: tipo de sustancia química, características fisicoquímicas de la sustancia, volumen almacenado o transportado, etc.

Los tipos de eventos que determina el Software SCRI Fuego 1.3 pueden ser:

Explosión por expansión de líquido en ebullición

El acrónimo BLEVE se utiliza para designar una explosión mecánica en la que interviene un líquido en ebullición que se incorpora rápidamente al vapor en expansión. La traducción literal es "expansión explosiva del vapor de un líquido en ebullición" correspondiente a Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion. La BLEVE es un caso especial de estallido catastrófico de un recipiente a presión en el que ocurre un escape súbito a la atmósfera de una gran masa de líquido o gas licuado a presión sobrecalentados.

Incendios de charco

Como consecuencia de un derrame de líquidos inflamables, se forma un charco de líquido cuya extensión dependerá de la geometría y naturaleza del suelo. Por evaporación se generan gases inflamables, si la temperatura del líquido está por encima de la temperatura de ignición de la sustancia, puede conducir a un incendio del propio charco. Al incendiarse, se producen llamas, cuya altura depende principalmente del diámetro del charco y del calor de combustión. El incendio también puede tener lugar en el interior de un tanque de almacenamiento de líquidos inflamables. Los efectos peligrosos de estos accidentes son fundamentalmente de dos tipos:

- La radiación térmica generada por los incendios
- Los efectos de los posibles gases tóxicos generados en la combustión

Dardo de fuego

Tanto en las tuberías como en los depósitos con gas a presión, la aparición de una pequeña fisura en las paredes trae como consecuencia la descarga del gas contenido, formando un chorro de gas a presión. Si la fuga entra en contacto con una fuente de ignición, el resultado será la formación de un incendio en forma de chorro o, como normalmente se le llama, dardo

de fuego o "jet fire". Los efectos de este tipo de accidentes son fundamentalmente los causados en el entorno por el calor generado e irradiado desde el dardo.

Bola de fuego

El resultado de la mezcla de vapor y aire ocasiona la formación de una bola de fuego (fireball), la cual sucede cuando a la nube de vapor la alcanza una fuente de ignición. Las bolas de fuego pueden llegar a afectar áreas importantes por los efectos de radiación térmica emitida. La parte interna de la nube está constituida totalmente por combustible, mientras que la capa externa, (donde la ignición ocurre) está formada por una mezcla aire-combustible. Como la capacidad de flotación se incrementa por el calor en el gas, la nube incendiada tiende a elevarse, extenderse y tomar una forma esférica.

A consecuencia de las explosiones, las personas pueden sufrir de forma directa diversos daños, que van desde la ruptura de tímpano por la intensidad del ruido, hasta la muerte por hemorragia pulmonar o por proyección del cuerpo. Los daños indirectos incluyen heridas por fragmentos de cristal y proyectiles, así como muerte provocada por colapso de edificios y estructuras". También incluye una ponderación de los daños que personas y estructuras podrían presentar dependiendo de la magnitud de la radiación térmica.

Para ello, se parte de la identificación de los sitios que manejan sustancias peligrosas, se realiza la investigación del tipo de sustancia y los volúmenes que manejan. Con esa información, se procede a modelar el peligro de interés para así obtener los radios con posible afectación.

Identificación de los sitios con mayor afluencia en el transporte de sustancias químicas

Para el transporte de sustancias peligrosas, el análisis se realizó únicamente en la red carretera del estado de Quintana Roo.

La principal fuente de información para la elaboración de este subtema fueron los trabajos previos elaborados por la Comisión Federal de Mejora Regulatoria (COFERMEX) referentes a los accidentes con sustancias químicas registrados en la República Mexicana¹⁰⁷, y el documento "Vulnerabilidad de las carreteras por el transporte de materiales y residuos peligrosos" publicado por el CENAPRED.

Para identificar los transportes que llevan sustancias químicas, estos deben portar carteles de identificación de acuerdo con la NOM-004-SCT-2000 "sistema de identificación de unidades destinadas al transporte de sustancias o sustancias químicas"; así mismo, para determinar la sustancia o material peligrosos que se transporta se utiliza la clasificación de las Naciones Unidas (UN) la cual es parte de la NOM-002-SCT-2003 "Listado de sustancias y materiales peligrosos más usualmente transportados".



Fotografía 16. Transportación de sustancias químicas regulado.

A pesar de que el transporte de sustancias químicas está regulado por la SCT, durante el trabajo en campo se observó el uso de vehículos particulares adaptados para el transporte de sustancias químicas. Dichos vehículos no cuentan con los señalamientos o las mínimas medidas de seguridad para realizar estas actividades, lo que se traduce en un aumento significativo del riesgo de que ocurra un accidente, ya que al no contar con los señalamientos correspondientes y realizar el transporte en recipientes inadecuados, la posibilidad de un evento es mayor y la atención del mismo podría ser más complicada, puesto que no se puede saber con exactitud el tipo de materiales que se transportan.



Fotografía 17. Transportación de sustancias químicas no regulado.

5.2.3 Desarrollo

Para el análisis de los peligros químicos, se utilizó un modelo matemático a partir del programa SCRI Fuego, en la cual se modeló el escenario más catastrófico que en este caso sería una explosión. Así, se pudieron determinar los posibles radios de afectación y definir la exposición, la cual se puede expresar en términos de concentración de la sustancia que se fugó o derramó. Para el caso de un incendio o explosión se considera la cantidad de calor expresada en las unidades

¹⁰⁷ ACARMEX (<http://www.cofemermir.gob.mx/mir/uploadtests/18256.66.59.5.Accidentes1%201-50.pdf>)

correspondientes, así como la fuerza necesaria para desplazar a un individuo a una cierta distancia sin causarle un daño al organismo. Con base en estos datos, se definieron los criterios para determinar las zonas de afectación y amortiguamiento, dentro de las cuales se recomienda evitar los asentamientos humanos, escuelas, hospitales, infraestructura estratégica, o cualquier inmueble en el que haya concentraciones de población.

Los principales criterios que se utilizaron para la modelación de fugas o derrames son los siguientes:

Datos adicionales

Temperatura ambiente	27 °C
Humedad relativa	79%
Velocidad media del viento	2 m/s
Duración del fuego	500 segundos

Para el análisis de gasolina, diésel, gas L.P., turbosina y combustóleo se usó la capacidad de almacenamiento y transporte de los tanques, asumiendo que estos se encuentran llenos. Para el caso específico del gas L.P. los litros se convirtieron a kilogramos, ya que el Software requiere los datos de esta sustancia en dicha unidad.

El programa, una vez alimentado con los datos mencionados, arroja como resultado tres radios de afectación dependiendo del efecto de la exposición, que se mide con base en la radiación térmica, y se jerarquizan en alto (31.50 kW/m²), medio (12.60 kW/m²) y bajo (5.05 kW/m²).

Los efectos de las explosiones en las personas pueden ir desde la ruptura de tímpanos por ondas sonoras hasta la muerte por diversos factores (hemorragia pulmonar o proyección del cuerpo, entre otras). En la Tabla 3 se mencionan los daños que pueden registrar los seres vivos y la infraestructura a causa de la radiación térmica.

Tabla 157. Efectos de las explosiones en las personas

Radiación térmica (kW/m ²)	Efecto
1.4	Se considera inofensivo para personas sin protección especial.
1.7	Mínimo necesario para causar dolor.
2.1	Mínimo necesario para causar dolor después de 60 segundos.
4.0	Suficiente para causar dolor con una exposición de 20 segundos (quemaduras de primer grado).
4.7	Causa dolor en 15 - 20 seg y heridas después de 30 segundos.
11.7	El acero delgado (parcialmente aislado) puede perder su integridad mecánica.
12.6	La madera puede alcanzar el punto de ignición después

	de una larga exposición; 100% de letalidad.
25.0	El acero delgado (aislado) puede perder su integridad mecánica.
37.5	Suficiente para causar daños a equipos de proceso y colapso de estructuras.

Es importante señalar que los modelos de simulación de explosión sólo se aplicaron para gasolina, diésel, gas Lp, turbosina, combustóleo y dinamita. Los radios de afectación varían de acuerdo a la cantidad de sustancia que se almacenan y la sustancia involucrada. Cabe mencionar que todos los modelos y metodologías para estimar el peligro químico tienen sus limitaciones, y la interpretación de los resultados requiere de personal capacitado y con gran habilidad, ya que los antecedentes sugieren que no existen dos accidentes químicos iguales.

Estos modelos no abarcan las combinaciones sucesivas (efecto dominó) y paralelas de eventos ocasionados por dos o más sustancias, ni las reacciones combinadas de los diversos materiales dentro de una o varias afectaciones.

5.2.4 Resultados

Para el transporte de sustancias químicas, en especial para Gas Lp, Gasolina, Diésel, Turbosina y combustóleo, el análisis se realizó con base en la red de carreteras federales y municipales del Estado de Quintana Roo, y por medio del Software SCRI Fuego se modeló un área de afectación para toda la red carretera, la cual estableció los radios de afectación en caso de explosión, con base en las variables utilizadas. Para el caso del transporte de sustancias peligrosas y su mapeo en las carreteras federales que son las que únicamente se graficaron, se procedió a modelar un radio de acción paralelo a las vías de comunicación con el mismo Software.

Con base en lo anterior, se determinó que la peligrosidad de los radios de afectación serían de la siguiente manera:

- Radio de Peligro Alto, con radiación térmica de 31.5 kW/m² es suficiente para causar daños a equipos de proceso y colapso de estructuras, fatalidad para seres vivos que estén dentro de este radio de afectación.
- Radio de Peligro Medio, con radiación térmica de 12.60 kW/m², la madera puede alcanzar el punto de ignición, el acero delgado puede perder su integridad mecánica, y los seres vivos que estén en este radio tienen posibilidades de perder la vida.
- Radio de Peligro Bajo, con radiación de 5.05 kW/m², en el que los seres vivos pueden presentar quemaduras de diversos grados, por una exposición de 20 segundos.



Figura 267. Transporte de Sustancias químicas en el estado de Quintana roo

5.2.5 Conclusiones

Es sumamente importante la selección del modelo numérico a usar para la simulación de los radios de afectación, ya que se debe tomar en cuenta la información de la que se dispone, como es la cantidad de material, sus condiciones fisicoquímicas y el tipo de almacenamiento, las condiciones ambientales (temperatura, humedad, estabilidad atmosférica, dirección y velocidad del viento predominante, etc.), localización y distribución de construcciones cercanas, entre otros factores. La falta de esta información o la suposición incorrecta de datos dará por resultado que las áreas de afectación resulten muy distintas a las que realmente se producen en un evento real.

En este trabajo se presentan las sustancias químicas que se almacenan en cada municipio del Estado de Quintana Roo, y se proporcionan sus volúmenes de almacenamiento, y sus radios de afectación en caso de explosión. De esta manera, se pueden conocer las áreas propensas a sufrir el impacto de las sustancias químicas así como las áreas de mitigación y amortiguación para cada tipo de escenario. Lo anterior con el fin de identificar a la población e infraestructura expuesta, determinar los recursos humanos y materiales con que se cuentan, así como los servicios de emergencia disponibles, tal como bomberos, cruz roja y centros de atención médica. Así, las autoridades o empresas responsables podrían desarrollar sus planes de atención de emergencias con información actualizada y confiable, tomando en cuenta los mencionados aspectos.

De igual forma, se puede apreciar que existe una relación con la capacidad de almacenamiento y el desarrollo del municipio, la ciudad de Cancún, perteneciente al municipio de Benito Juárez, es la ciudad que más almacenamiento de

sustancias químicas tiene tanto en Diésel, Gasolina, Gas Lp, Turbosina, así como sustancias químicas adicionales.

Con los radios de afectación obtenidos se pueden establecer medidas de desarrollo urbano, ya que es posible panificar una mejor estrategia de crecimiento de las ciudades, alejando a la población de peligros químicos, o en caso contrario tomar mayores medidas de seguridad, respecto al ordenamiento del territorio. Como ejemplo, tenemos que en la ciudad de Playa del Carmen, en donde se ubicó una planta de almacenamiento de la Gasera Z, los radios de afectación del análisis realizado no mostraron impactos en la población ni en la zona urbana en general, sin embargo se pudo observar que el crecimiento de la ciudad se está dando justo en dirección a la planta.

Otro aspecto que se observó en el trabajo de investigación fue que en muchos de los casos, las instalaciones no se encuentran a una distancia segura de la población, ya que en repetidos casos, la separación de los almacenes con respecto a las viviendas, escuelas, templos o comercios, no cumple con la distancia mínima requerida de 30 metros.

Se sugiere, como una forma de proteger a los miembros de la comunidad ubicada en la cercanía de sitios de almacenamientos, contar con un adecuado control del uso del suelo en lo que se refiere a las restricciones en los permisos de construcción para obras de tipo habitacional y comercial, siendo estas distancias indicadas en los Planes y Programas de Desarrollo Urbano de cada uno de los municipios del estado, así como en las normas emitidas.

5.2.6 Referencias bibliográficas

ACARMEX (2000). Base de datos de Accidentes Químicos en el transporte carretero. Área de Riesgos

Químicos, CENAPRED-SEGOB. México.

ACQUIM (2000). Base de datos de Accidentes Químicos en fuentes fijas y móviles. Área de Riesgos

Químicos, CENAPRED-SEGOB. México.

BELTRAN, L. (1996). Evaluación de la peligrosidad en un parque industrial (Caso de estudio: Ciudad

Industrial del Valle de Cuernavaca, Mor.). Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental. División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM. México.

LGEEPA (1996). Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Diario Oficial de la

Federación. 13 de Diciembre de 1996.

NOM-052-ECOL-1993 (1993) Características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Diario Oficial de la Federación, 22 de octubre de 1993. México.

Dinámica Heurística. 2008. Análisis de Riesgos en los procesos utilizando el software SCRI-Modelos, SCRI Fuego, Scri Hazop, SCRI- FMEA y SCRI What if?

Dinámica Heurística S.A. de C.V.

HSE PERU S.A. (s.f.). Recuperado el 07 de 10 de 2014, de <http://hseperu.blogspot.mx/>

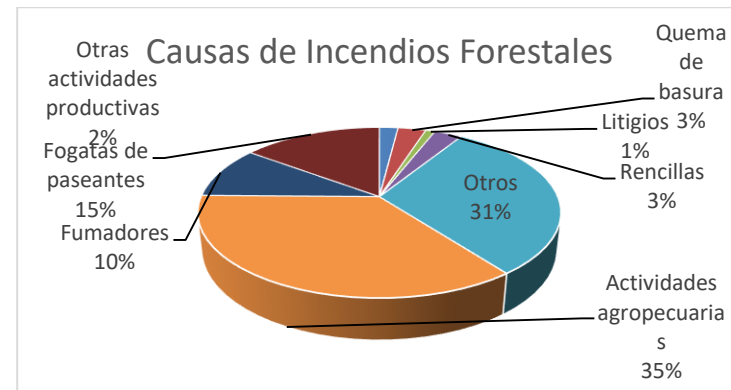
5.3 Incendios forestales

5.3.1 Introducción

La Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de la Organización de las Naciones Unidas define los incendios forestales como "cualquier fuego producido en áreas vegetales, independientemente de sus fuentes de ignición, daños o beneficios".¹⁰⁸

Estos eventos han ocurrido en el planeta desde hace millones de años, ya sea a consecuencia de fenómenos naturales, como tormentas eléctricas o erupciones de volcánicas, o por actividades humanas. Se presentan, generalmente, cuando materiales combustibles en los diferentes tipos de vegetación son consumidos de forma incontrolada por el fuego.

En la actualidad, el 98% de los incendios forestales que acontecen en nuestro país son resultado de la intervención humana, es decir, son de origen antropogénico. En la mayoría de los casos, el mal manejo del fuego es la principal causa. Tan sólo en 2012, se calculó que el 35% de dichos eventos fue atribuible a actividades agropecuarias; 31% a otros factores; 15% a fogatas de paseantes; 10% a fumadores; 3% a quema de basura y rencillas y el 1% restante a litigios.¹⁰⁹



Gráfica 98. Causas de incendios forestales.

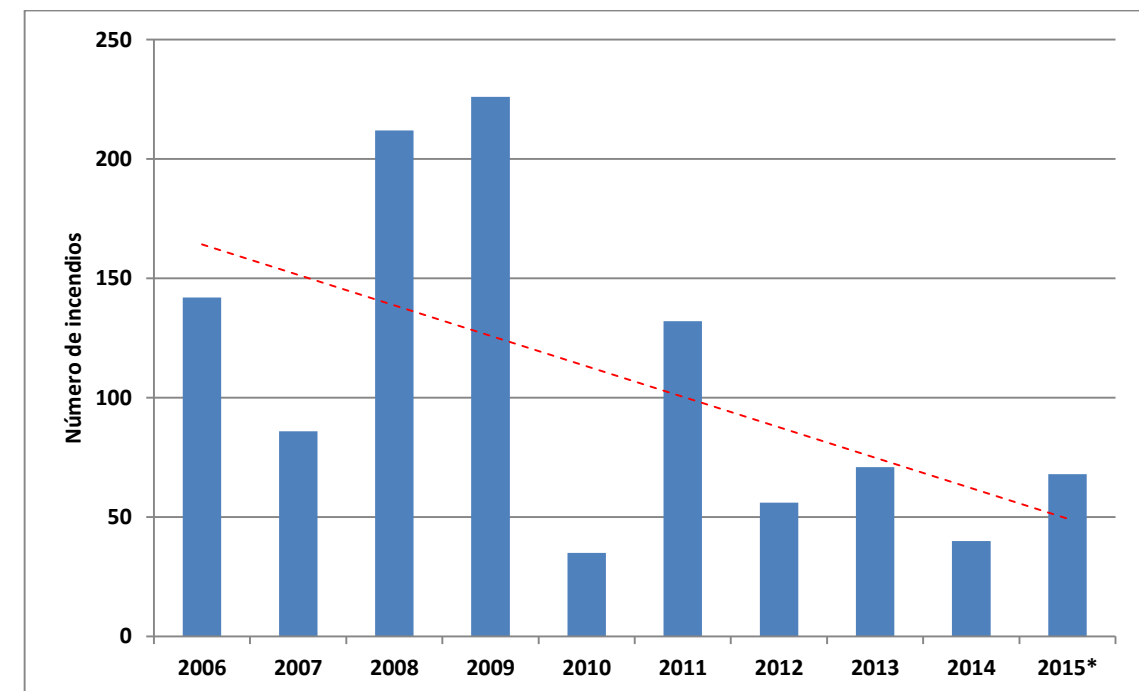
Información al 8 de noviembre de 2012. Fuente: Centro Nacional de Control de Incendios Forestales. CONAFOR, 2012.

Algunos incendios forestales se generan de manera natural, debido a la excesiva acumulación de materia orgánica seca. Intervienen en ellos las condiciones climáticas de sequía, la topografía del lugar y el tipo de vegetación existente.



Fotografía 18. Panorámica de un incendio forestal.

En los últimos 10 años, Quintana Roo ha registrado 1,068 incendios forestales, que afectaron 225, 261 hectáreas de diferentes tipos de vegetación. 2009 fue el año con el mayor número de conflagraciones: 226. Sin embargo, se observa una tendencia a la baja en cuanto a la cantidad de eventos registrados. (Gráfica 99)

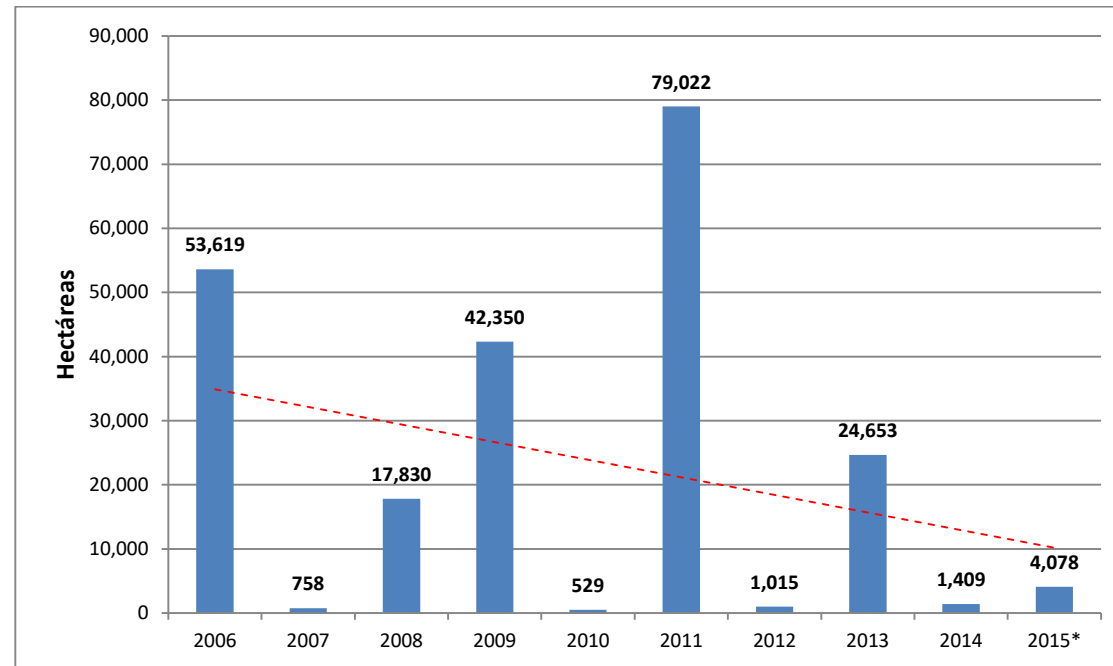


Gráfica 99. Incendios ocurridos en el estado de Quintana Roo. Periodo 2006-2015. Fuente CONAFOR. / *Los datos de 2015, están actualizados hasta el 4 de junio.

En cuanto a la superficie afectada, en 2011 se registraron los mayores impactos, con más de 79 mil hectáreas perjudicadas. Cabe destacar que la temporada de huracanes en 2010 fue bastante importante, lo que probablemente influyó en la cantidad de material combustible existente en la temporada de incendios de 2011 (Gráfica 100).

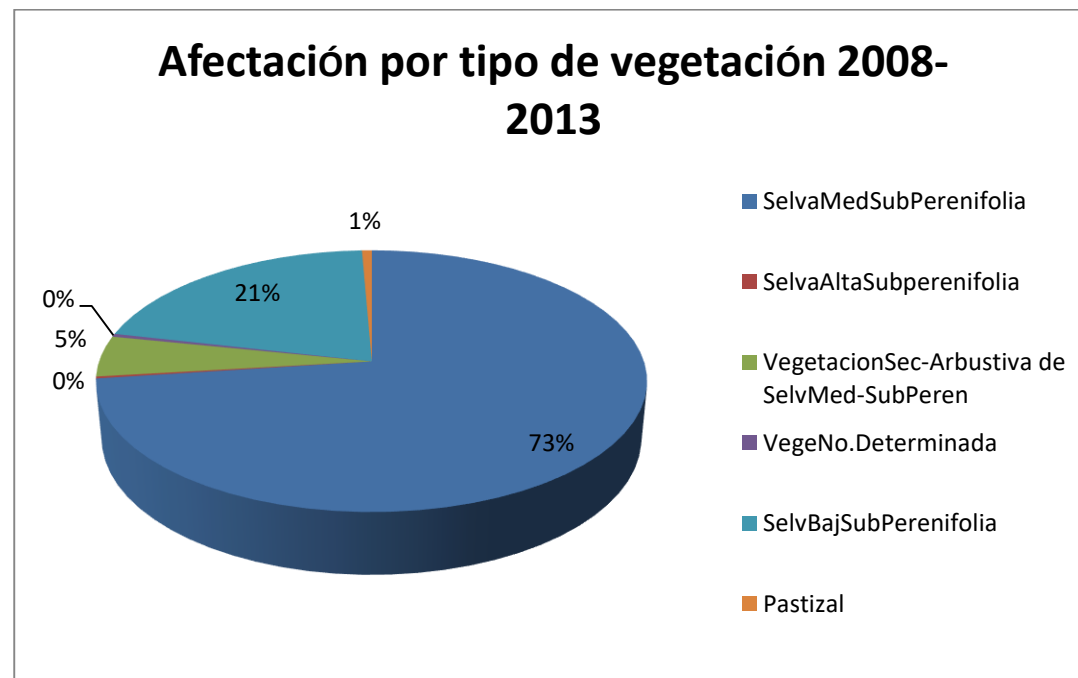
¹⁰⁸ EIRD. Terminología: Términos principales relativos a la reducción del riesgo de desastres. / www.eird.org.

¹⁰⁹ Centro Nacional de Control de Incendios Forestales. CONAFOR, 2012.



Gráfica 100. Superficie afectada por incendios forestales en el periodo 2006-2015. Fuente CONAFOR.

Con respecto al tipo de vegetación, las selvas han sido las más perjudicadas, con cerca de 148 mil hectáreas entre 2008 y 2013. El 73% ha correspondido a selva mediana subperennifolia, y el 21% a selva baja subperennifolia, (Gráfica 101).



Gráfica 101. Porcentaje de hectáreas afectadas según tipo de vegetación. Periodo 2008-2013. Fuente CONAFOR.

El fuego puede tener efectos positivos, tanto en los ecosistemas como en el bienestar de las personas. Entre éstos sobresale su uso en la agricultura, silvicultura y pastoreo, así como en el mantenimiento de algunos ecosistemas, ya que

estimula el crecimiento de pastizales y ciertas plantas.



Fotografía 19. El método ancestral de roza, tumba y quema todavía es muy utilizado en Quintana Roo, de no realizarse con las precauciones adecuadas, podría provocar incendios forestales.

En cuanto a sus efectos negativos, cuando los incendios son extensos y destructivos, pueden ocasionar daños en la salud de las personas; pérdida de cultivos y vegetación; disminución de diferentes tipos de plantas y animales en la zona incendiada, e incluso afectaciones en infraestructura como caminos y viviendas.



Fotografía 20. Incendios forestales.

Es de gran importancia prevenir este tipo de eventos, ya que pueden perjudicar severamente la vegetación, la fauna, la flora y el suelo. Particularmente en Quintana Roo, pueden provocar la pérdida de selvas y aumentar el peligro de la erosión o desertificación de los suelos.

Para prevenir los incendios forestales es fundamental conocer todos los factores que intervienen en su ocurrencia,

para así llevar a cabo un buen manejo del uso del fuego.

El objetivo principal de este trabajo es elaborar un mapa de índice de peligro para cada una de las estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno), tomando como base la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, tomo Fenómenos Químicos, de la Serie Atlas Nacional de Riesgos del CENAPRED.

Esta metodología considera las características generales del fenómeno y las variables con las que es posible establecer el índice que mide la posibilidad de que se genere un incendio forestal.

En términos prácticos, "este indicador no representa una probabilidad de ocurrencia, valorada por una intensidad y un periodo de retorno, sino una mayor o menor posibilidad de incendios forestales" (CENAPRED)¹¹⁰

Contar con estos mapas de índice de peligro permitirá tomar mejores decisiones en torno al uso y manejo del fuego; conocer las áreas más susceptibles de registrar incendios forestales en el Estado, y elaborar estrategias, programas o planes encaminados a disminuir los impactos negativos de este fenómeno.

5.3.2 Metodología

Para el análisis de la información en gabinete y de campo se partió de la metodología del CENAPRED, la cual establece necesario identificar los tres componentes principales que intervienen y detonan un incendio forestal. Estos son:

1. Componente de Combustible Forestal (CCF).
2. Componente Meteorológico (CM).
3. Componente Causa (Cc).

Componente de Combustible Forestal (C_{CF})

Este componente se encuentra determinado por tres parámetros: carga de combustible, compuesta por ligeros (1,10hrs), medianos (100hrs) y pesados (1000hrs); cama de combustible y profundidad de mantillo.

Tabla 158. Relación del diámetro del combustible con el tiempo de retardo (adaptado de Rodríguez et ál., 2002)¹¹¹.

Clase	Tamaño	Ejemplo
1 horas	< 0.6	Ramillas
10 horas	0.61 a 2.5	Ramillas, ramas

100 horas	2.51 a 7.6	Ramas
1000 horas	> 7.61	Troncos

El CENAPRED propone la determinación de la carga de combustible mediante "un muestreo y aplicando la técnica de intersecciones planares (Van Wagner, 1982)¹¹²," la cual se complementó con la metodología propuesta por el INIFAP: "intersecciones planares in situ, descrita por Brown et ál. (1982), que estima el volumen mediante procedimientos rápidos y sencillos de utilizar en cualquier tipo de bosque (Bautista et ál., 2005)¹¹³."

Cada sitio de muestreo se analizó con el programa de Excel denominado SICCO (Sistema para el Cálculo de Combustibles), en el que se ingresan las cantidades de materia orgánica encontradas en campo (ramas, troncos y hojarasca) clasificados por tiempo de retardo equivalente a la Clase.

El SICCO "se encuentra fundamentado por dos grupos de ecuaciones. El primero se usa para la estimación de cargas de combustibles de 1, 10, 100 y 1000 horas, que como se ha señalado se basan en el conteo de las intersecciones planares. El segundo grupo se usa para la estimación de las cargas de combustibles de las que se obtuvieron muestras de campo, es decir, la hojarasca y el material de fermentación. Dichas ecuaciones fueron definidas por Sánchez y Zerecero (1983)¹¹⁴."

Ecuaciones utilizadas para los combustibles de las intersecciones planares

Los combustibles 1, 10, 100 y 1000 horas se estiman con base en el conteo de intersecciones hecho en relación con un plano imaginario, definido por líneas de transecto.

A continuación se presenta la secuencia de cálculo de cargas correspondientes a estos combustibles (INIFAP):

Corrección por pendiente

"El primer cálculo necesario es la corrección por factor pendiente (Brinker y Paul, 1982)¹¹⁵."

$$c = \sqrt{1 + \left(\frac{\text{pendiente}(\%)^2}{100}\right)} \dots \dots \dots (1)$$

En donde:

C = Factor de corrección por pendiente.

Pendiente (%) = Es el porcentaje de la pendiente.

Estimación de cargas de combustible de 1 hora

¹¹² Tomado de la página 163 de la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Fenómenos Químicos. (CENAPRED).

¹¹³ Tomado de la página 6 de Sistema para el Cálculo de Combustibles Forestales (SICCO). SAGARPA. INIFAP (Junio 2011, folleto técnico No. 4).

¹¹⁴ Alvaro Agustin CHAVEZ DURÁN, José Germán FLORES GARNICA, Jaqueline XELHUANTZI CARMONA. Sistema para el cálculo de combustibles forestales (SICCO) 2011. SAGARPA. INIFAP. Pág. 11

¹¹⁵ Alvaro Agustin CHAVEZ DURÁN, José Germán FLORES GARNICA, Jaqueline XELHUANTZI CARMONA. Sistema para el cálculo de combustibles forestales (SICCO) 2011. SAGARPA. INIFAP. Pág. 12

¹¹⁰ CENAPRED (2006). Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Fenómenos Químicos. Serie: Atlas Nacional de Riesgos. Pag. 147.

¹¹¹ Alvaro Agustin CHAVEZ DURÁN, José Germán FLORES GARNICA, Jaqueline XELHUANTZI CARMONA. Sistema para el cálculo de combustibles forestales (SICCO) 2011. SAGARPA. INIFAP. Pág. 6

Para el cálculo de los combustibles de 1 hora se utiliza la siguiente fórmula:

$$1hr = \frac{11.64 * n * d^2 * s * a * c}{NI * (C1)} * C2 \dots \dots \dots (2)$$

En donde:

1hr = Combustibles de 1 hora en toneladas/hectáreas.

11.64 = Constante.

n = Número de intersecciones.

d = Constante compuesta para diversos tipos de vegetación y especies para combustibles menores a 0.6 cm de diámetro (0.0151).

s = Gravedad específica para combustibles inferiores a 0.6 cm de diámetro (0.48).

a = Factor de corrección por ángulo no horizontal para combustibles inferiores a 7.5 cm de diámetro (1.13).

c = Factor de corrección de pendiente.

NI = Longitud de transecto en metros.

C1 = Constante por factor de conversión de metros a pies 3.2808.

C2 = Constante para conversión de toneladas /acre a toneladas / hectárea 2.47105.

Estimación de cargas de combustible de 10 horas

Para el cálculo de combustibles de 10 horas se utiliza la siguiente ecuación:

$$10hr = \frac{11.64 * n * d^2 * s * a * c}{NI * (C1)} * C2 \dots \dots \dots (3)$$

En donde:

10hr = Combustible de 10hr en toneladas/hectáreas.

11.64 = Constante.

n = Número de intersecciones.

d = Constante compuesta para diversos tipos de vegetación y especies para combustibles menores de 0.6 a 2.5 cm de diámetro (0.48).

s = Gravedad específica para combustibles de 0.6 a 2.5 cm de diámetro (0.48).

a = Factor de corrección por ángulo no horizontal para combustibles de 2.7 a 7.5 cm de diámetro (1.13).

c = Factor de corrección por pendiente.

NI = longitud del transecto en metros.

C1 = Constante por factor de conversión de metros a pies 3.2808.

C2 = Constante para conversión de toneladas/acre a toneladas/hectárea 2.47105.

Estimación de cargas de combustible de 100 horas

Para el cálculo de combustibles de 100 horas se utiliza la siguiente ecuación:

$$100hr = \frac{11.64 * n * d^2 * s * a * c}{NI * (C1)} * C2 \dots \dots \dots (4)$$

En donde:

100hr = Combustible de 100hr en toneladas/hectáreas.

11.64 = Constante.

n = Número de intersecciones.

d = Constante compuesta para diversos tipos de vegetación y especies para combustibles menores de 2.5 a 7.5 cm de diámetro (2.76).

s = Gravedad específica para combustibles de 2.5 a 7.5 cm de diámetro (0.40).

a = Factor de corrección por ángulo no horizontal para combustibles de 2.7 a 7.5 cm de diámetro (1.13).

c = Factor de corrección por pendiente.

NI = longitud del transecto en metros.

C1 = Constante por factor de conversión de metros a pies 3.2808.

C2 = Constante para conversión de toneladas/acre a toneladas/hectárea 2.47105.

Estimación de cargas de combustibles de 1000 horas firmes

Para el cálculo de combustibles de 1000 horas se utiliza la siguiente ecuación:

$$1000hrF = \frac{11.64 * (\sum d^2 * C_3) * s * a * c}{NI * (C1)} * C2 \dots \dots \dots (5)$$

En donde:

1000hrF = Combustibles de 1000 horas firmes en toneladas/hectáreas.

11.64 = Constante.

$\sum d^2$ = Sumatoria de diámetros de combustibles encontrados.

s = Gravedad específica para combustibles superiores a 7.5 cm de diámetro (0.40).

a = Factor de corrección por ángulo no horizontal para combustibles superiores a 7.5 cm de diámetro (1.13).

C = Factor de corrección por pendiente.

NI = Longitud del transecto en metros.

C1 = Constante por factor de conversión de metros a pies 3.2808.

C2 = Constante para conversión de toneladas /acre a toneladas/hectáreas 2.47105.

C3 = Constante para conversión de cm a pulgadas (0.3937).

Ecuaciones utilizadas para el cálculo de combustibles finos mediante la toma de muestras

Como se mencionó, la carga de combustible de hojarasca es estimada con base en muestras obtenidas en campo, las cuales son procesadas en laboratorio para la medición de su peso seco.

A continuación, se muestra la secuencia de carga correspondiente a dicho combustible:

Estimación de la carga de hojarasca

Para el cálculo del combustible fino, definido como hojarasca, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Pch = \bar{x} = \frac{x \cdot C3}{C4} \dots \dots \dots (6)$$

En donde:

Pch = Peso del combustible hojarasca en toneladas/hectáreas.

\bar{x} = promedio de pesos de los transectos.

X = Peso seco de la muestras.

C3 = Contante 10,000.

C4 = Constante 9,000.

Componente Meteorológico (C_M)

“Este componente tiene gran influencia en la determinación del índice de peligro, ya que de él depende el contenido de humedad del material combustible, situación que regula la ocurrencia de los incendios forestales.

Las variables meteorológicas que el modelo considera son:

1. Temperatura media máxima mensual (*tmm*).
2. Precipitación media normal mensual (*pnm*).
3. Orientación de la pendiente (*op*)¹¹⁶.

El CENAPRED recomienda verificar las estaciones meteorológicas presentes en el estado mediante el Servicio Nacional Meteorológico, lo cual se llevó a cabo, al verificar que algunas estaciones no contaban con el mismo periodo de información en sus bases de datos; se optó por utilizar las capas de información que proporciona el WorldClim117, ya que su información es homogénea.

Las capas de datos se generaron a través de la interpolación de datos promedio mensuales para clima de las estaciones meteorológicas, en un 30 arco-segundos rejilla de resolución (a menudo denominados “1 km²” resolución). Las

variables incluidas son: la precipitación total mensual, la media mensual, la temperatura mínima y máxima, y 19 derivados bioclimáticos variables.

De igual forma, el CENAPRED recomienda hacer un análisis de la orientación de la pendiente. Debido a que el Estado de Quintana Roo es una planicie y presenta una pendiente mínima, esta recomendación no se tomó en cuenta.

Asimismo, la poca pendiente que tiene el Estado se encuentra en los municipios de Othón P. Blanco y Bacalar, en la parte Este. Con base en ello, y en los antecedentes registrados, se llegó a la conclusión de que no tiene ningún peso en relación con los incendios forestales.

Con el componente temperatura se obtuvo la evapotranspiración, que corresponde al agua contenida en el suelo y en la vegetación. Se obtuvo un mapa que representa el índice de humedad en un área determinada.

Componente Causa (C_c)

De acuerdo con la Guía, es de gran importancia determinar los componentes causales de los incendios: accidentales, negligencias, intencionales y naturales. En Quintana Roo, según los antecedentes de incendios forestales proporcionados por el CONAFOR, la principal causa es la negligencia en las actividades socioeconómicas (agricultura, ganadería, etcétera).

Actividades socioeconómicas

Las actividades primarias son la primera causa de los incendios forestales, pues con ellas se practican técnicas en donde se incluye el uso del fuego, tal es el caso del “roza, tumba y quema”, que puede derivar en un mal manejo y de ahí desencadenar un incendio.

Para la identificación de las áreas en donde la agricultura se desarrolla, se contó con la delimitación de la frontera agrícola (FA)118 con respecto a las zonas con vocación forestal y urbana, esta capa de información fue proporcionada por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la SAGARPA.

Localidades y vías de comunicación

En las localidades se concentra el sector primario y se practican las quemas prescritas, lo que las convierte en un elemento importante para este estudio. Asimismo, las vías de comunicación (carreteras, veredas, brechas) son zonas alteradas por el hombre, en donde el paso de personas que arrojan basura, cigarrillos, entre otros, puede detonar en un incendio forestal.

Desarrollo

Con base en las dos metodologías anteriormente descritas, se adecuó cada uno de los insumos obtenidos para el análisis e interpretación de los datos, con el fin de obtener los mapas.

Antecedentes de incendios

Estudiar los incendios forestales que han ocurrido en las mismas áreas año con año, permite tratar de establecer los factores que podrían contribuir a que este tipo de eventos se susciten de nuevo.

La ocurrencia de este fenómeno puede deberse a factores como la técnica de roza, tumba y quema; la alta

¹¹⁶ CENAPRED (2006). Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Fenómenos Químicos. Serie: Atlas Nacional de Riesgos. Pag. 169

¹¹⁷ Conjunto de capas climáticas globales, es una página web que ofrece información climatológica de temperatura y precipitación, de un periodo de 50 años (1950-2000).

¹¹⁸ En formato *shape*, compatible con ArcGIS.

concentración de actividades socioeconómicas o la adaptación de la selva al fuego. Existe vegetación que necesita del fuego para reproducirse y otra que no; cuando una que no es dependiente de este elemento necesita de él, tiende a incendiarse.

Puntos de calor¹¹⁹

Es cualquier fuente que puede ser detectada por un sensor (satélite), que oscila entre los 25 y 32°C. Los puntos de calor pueden ser provocados por incendios, quemas agrícolas, suelos calentados por el sol, grandes chimeneas, llamas de gas en pozos petroleros, volcanes activos, etcétera.

Los puntos de calor se tomaron a partir del periodo 2005-2014 en Quintana Roo, los cuales mostraron una distribución espacial agrupada notable en los municipios de Benito Juárez, Lázaro Cárdenas, Isla Mujeres, Bacalar y partes de Othón P. Blanco.

Los datos se extrajeron para cada estación del año para facilitar el estudio del comportamiento espacial en cada una de ellas. Se observó que en la primavera es cuando más se presentan dichos puntos; para verano empiezan a disminuir modernamente y en las dos estaciones restantes son mínimos.

A partir de esta información, es posible comprender por qué en la primavera es cuando más incendios se presentan en el Estado; además de que se correlacionan con los otros componentes causales.

Modelos de combustibles

Con base a 13 modelos de combustibles propuestos de Rothermel (1972) & Albini (1976); seis se adecuaron al tipo de vegetación existente en el estado y a la carga de combustible en donde las selvas ocupan la mayor parte, éstas son de gran importancia en el análisis, pues son las áreas en las que se han registrado incendios forestales.

Temperatura

La temperatura es una variable importante, aunque no afecta directamente. De ella depende, aparte de otras variables meteorológicas, en qué zonas pudiéramos detectar sequías, así como una mayor evapotranspiración, lo cual provocaría que los combustibles se encontraran secos.

Evapotranspiración

La evapotranspiración es una variable que permite conocer en qué parte del estado hay menos humedad en el ambiente, tanto en el suelo como en la vegetación. Con dicha información, podremos analizar geoespacialmente en dónde podría haber una carga de combustible más propensa a incendiarse.

Precipitación

La precipitación ayuda a identificar las zonas con menor humedad, debido a la poca presencia de ésta. En conjunto con las demás variables meteorológicas, permite localizar aquellas zonas de peligro.

Proceso Analítico Jerárquico (PAJ).

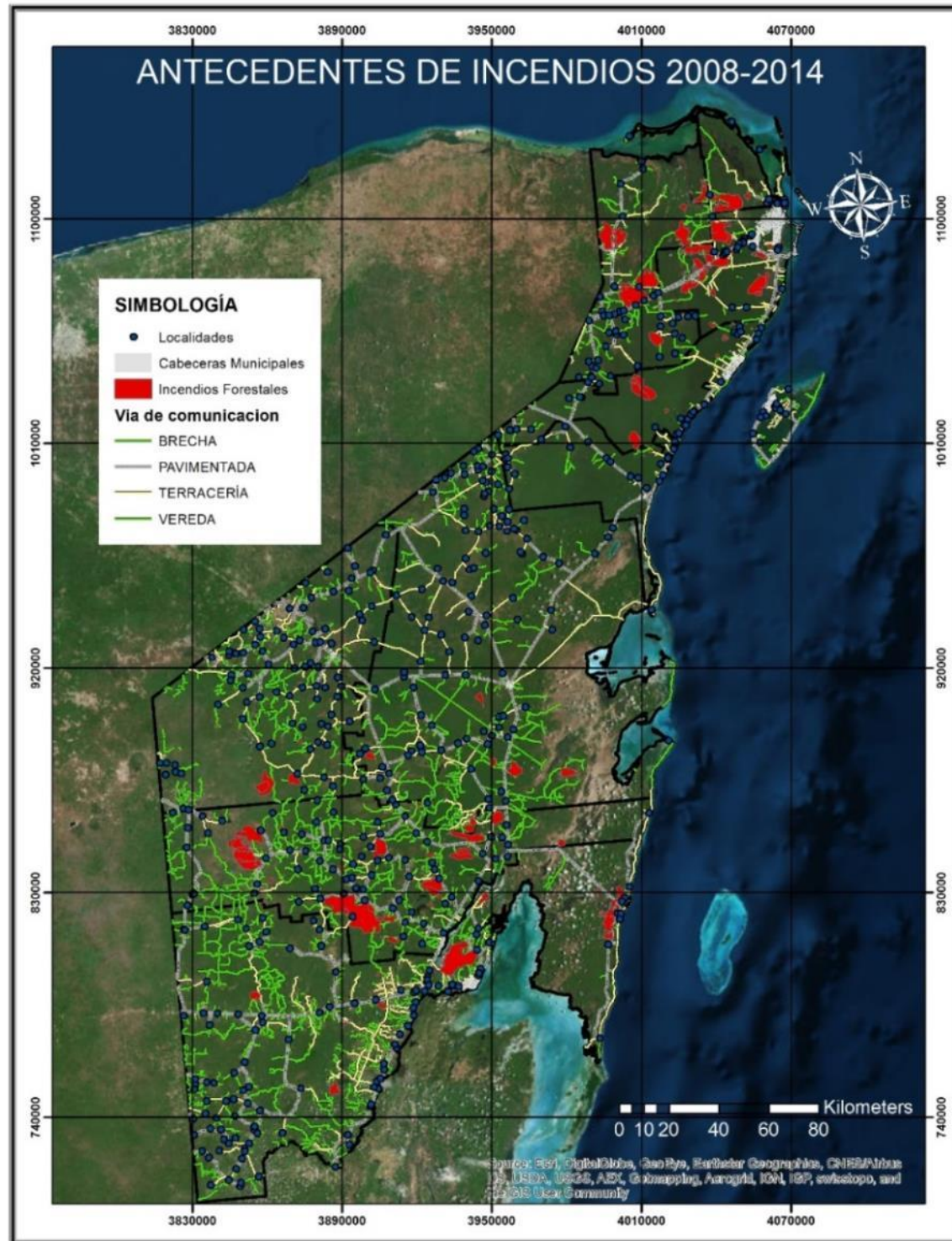
El PAJ posibilita asignarle un peso a cada una de las variables que se utilizaron para elaborar el Índice de Peligro por

Incendios Forestales (IPIF). Este ejercicio fue de gran utilidad para ponderar la importancia de los diferentes factores que inciden en la ocurrencia de un incendio forestal, y así establecer el índice de peligro de este fenómeno.

Con el apoyo del CONAFOR de Chetumal, institución que proporcionó a GUSLUHER los antecedentes de incendios ocurridos de 2008 a 2014, se realizó una investigación de los incendios que se han presentado en Quintana Roo en dicho periodo.

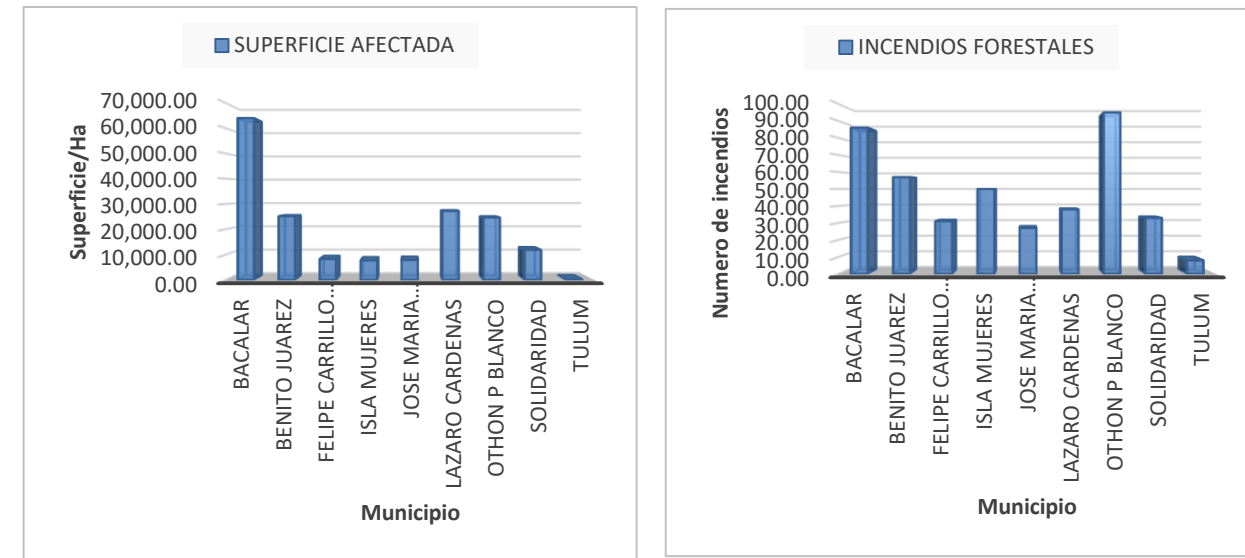
Se procesó la información en el Sistema de Información Geográfica ArcGis 10.2, para obtener el mapa de antecedentes de incendios forestales georreferenciados, esto para realizar un análisis geoespacial, con el cual se obtuvo la siguiente información:

¹¹⁹ <http://incendios1.conabio.gob.mx/>



Mapa 137. Antecedentes de incendios forestales georreferenciados 2008-2014.

En el periodo analizado se detectaron un total de 425 incendios en todo el Estado, con una superficie de afectación de 177, 072 ha.



Gráfica 102. Superficie afectada por municipio e Incendios forestales por municipio.

Bacalar es el municipio que ha registrado mayor impacto: una superficie afectada de 63, 967 ha, y un total de 86 incendios forestales ocurridos en dicho periodo.

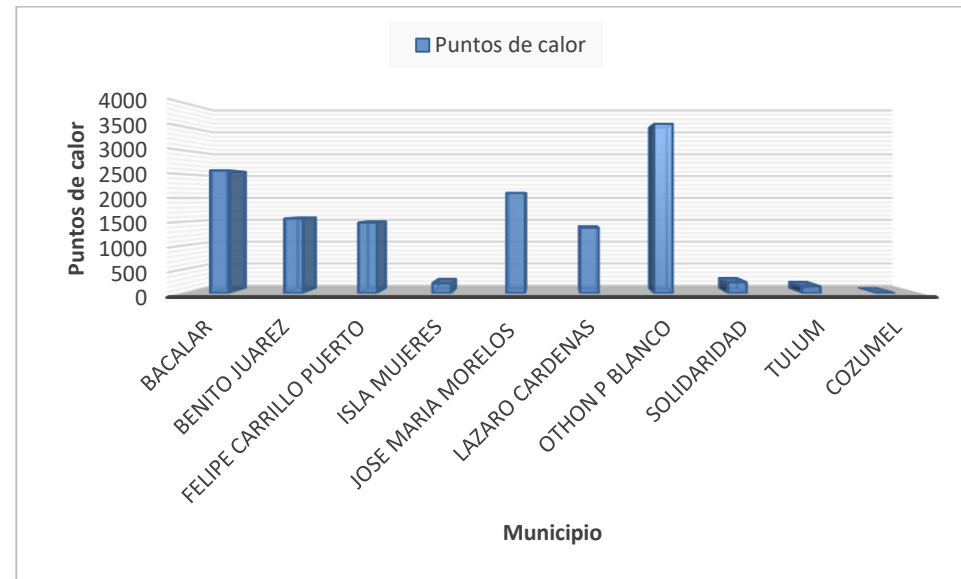
Se observó que en Cozumel, según los registros del CONAFOR, no se ha presentado algún incendio forestal. Esto puede obedecer a que en dicho municipio las actividades primarias son pocas, ya que el sector con mayor retribuciones es el turismo y sus áreas ecoturísticas.

59 localidades fueron afectadas por estos incendios, de los cuales, Bacalar registró 19, convirtiéndose en el municipio con más localidades afectadas.

Puntos de calor

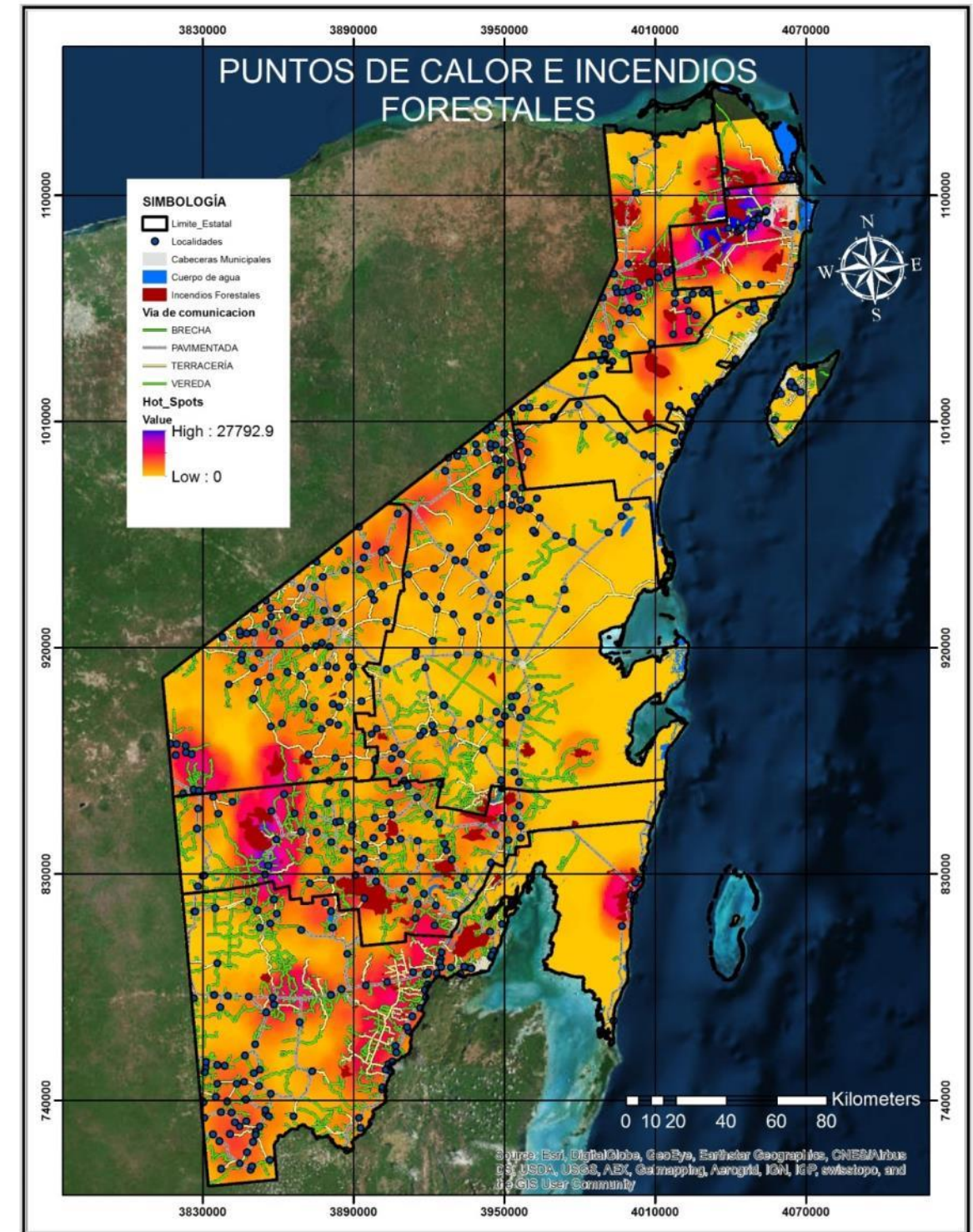
A partir de la información de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) se obtuvieron los puntos de calor para el periodo 2005-2014, los cuales se agruparon conforme las estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno).

Posteriormente, se analizaron en el sistema ArcGis10.2, con la herramienta Densidad, para obtener su agrupamiento general en todo el Estado y, después, para cada estación del año.



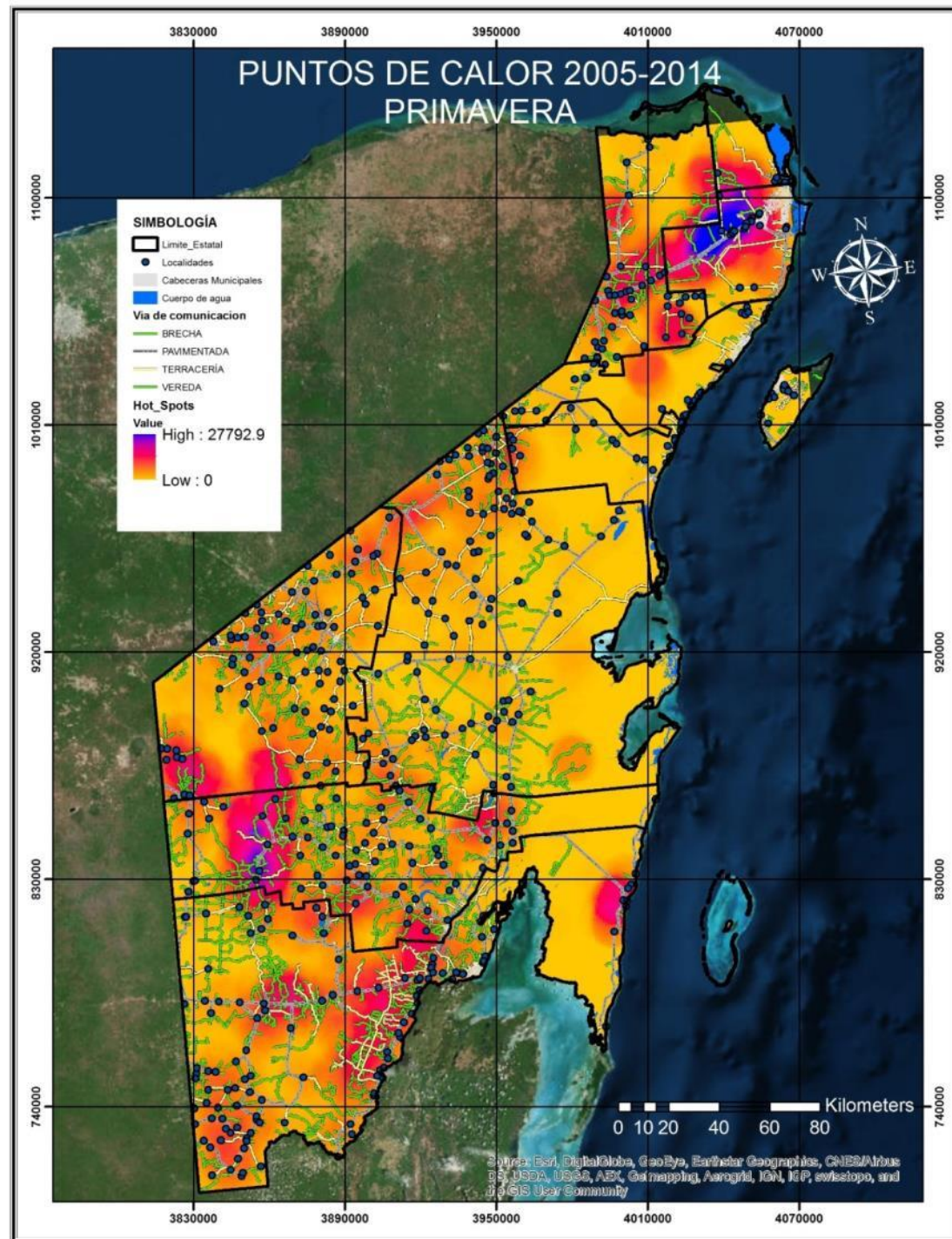
Gráfica 103. Puntos de calor.

Los municipios con mayor agrupamiento de puntos en este periodo fueron Othón P. Blanco, Bacalar, José María Morelos, Benito Juárez y Felipe Carrillo Puerto.



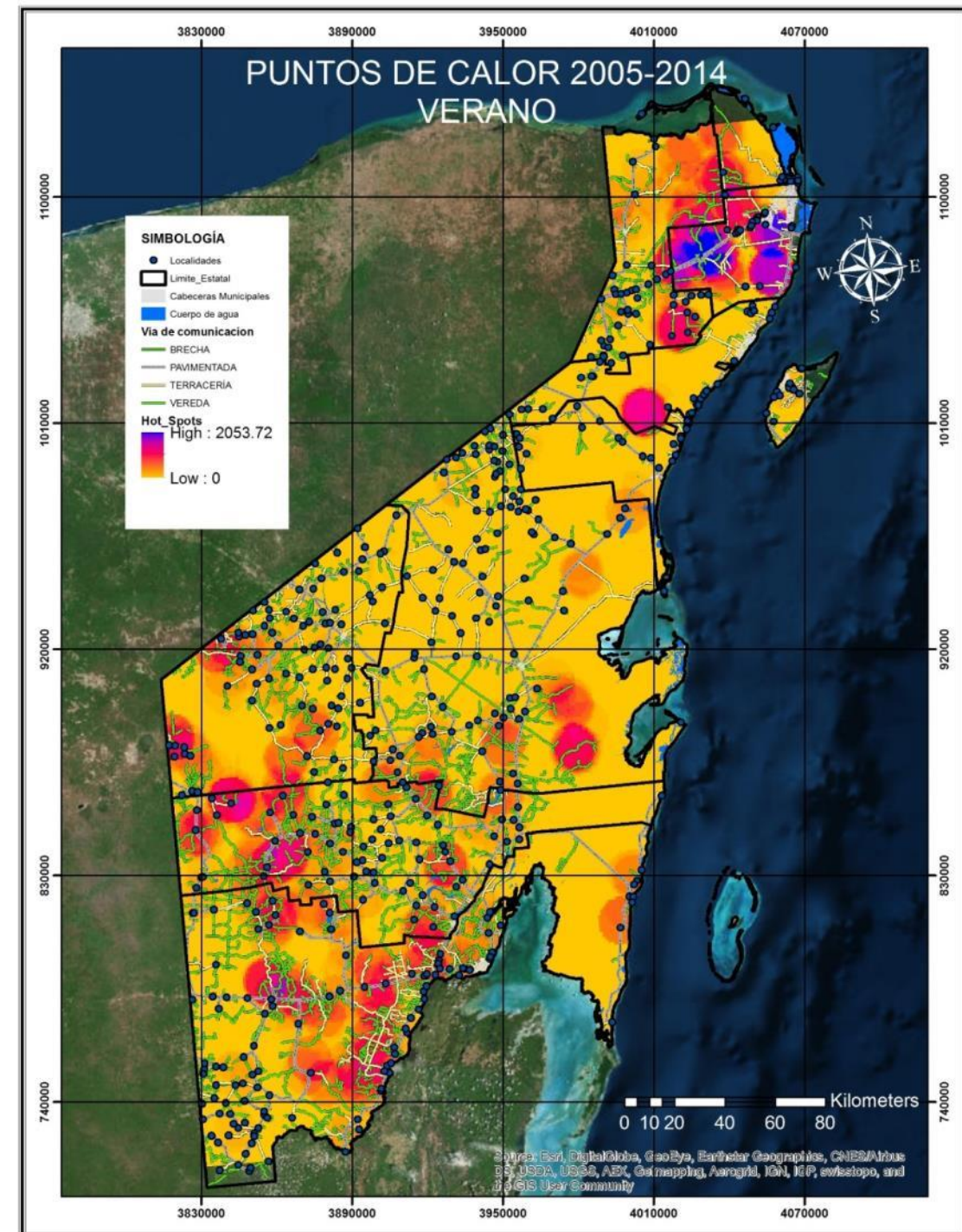
Mapa 138. Relación: antecedentes de incendios y puntos de calor.

Para la estación de primavera, se aprecia el mismo patrón que en el mapa de puntos de calor e incendios forestales.



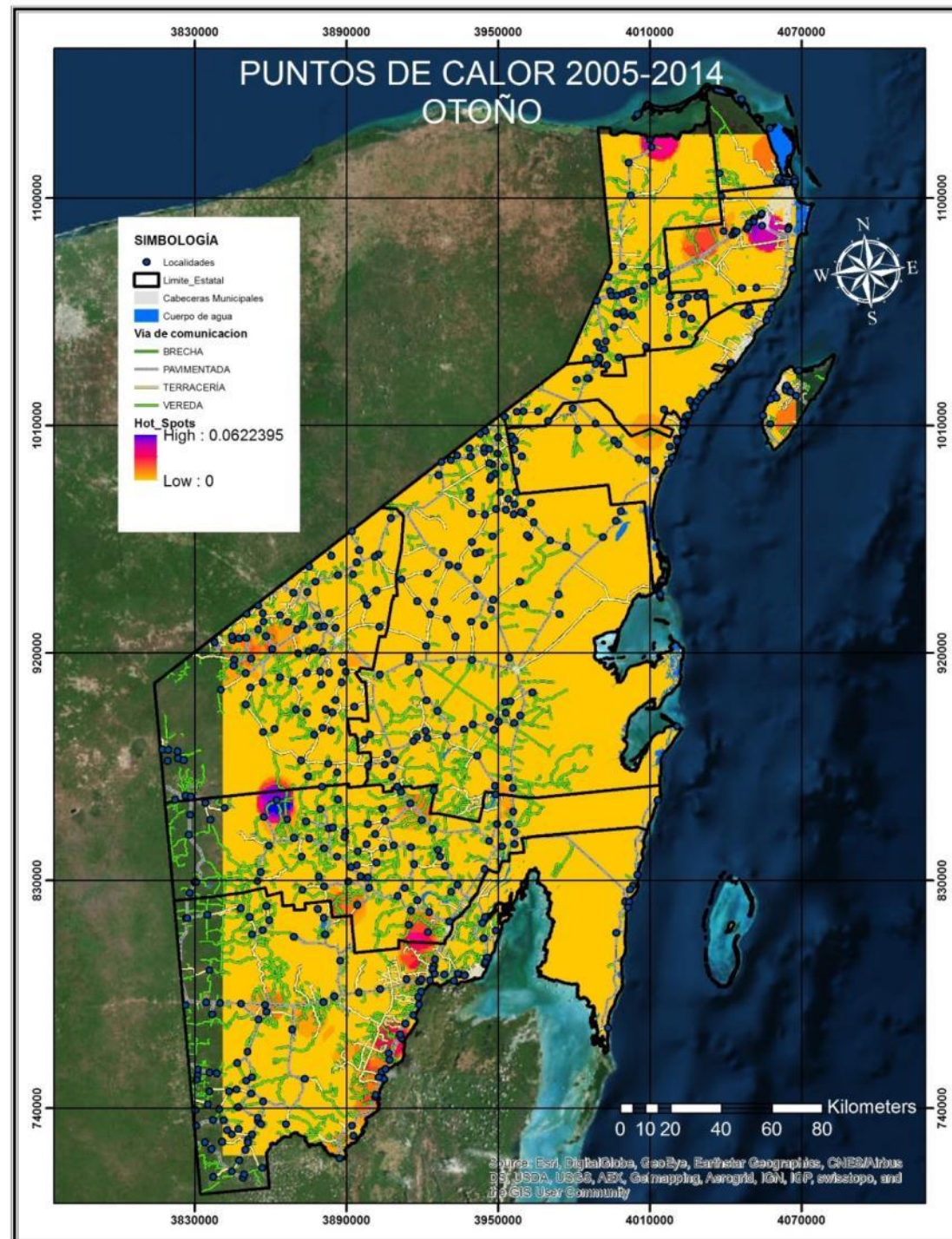
Mapa 139. Puntos de calor en primavera.

En el verano se percibe un comportamiento diferente: todavía se da un agrupamiento, pero se puede apreciar cómo éste empieza a difuminarse.



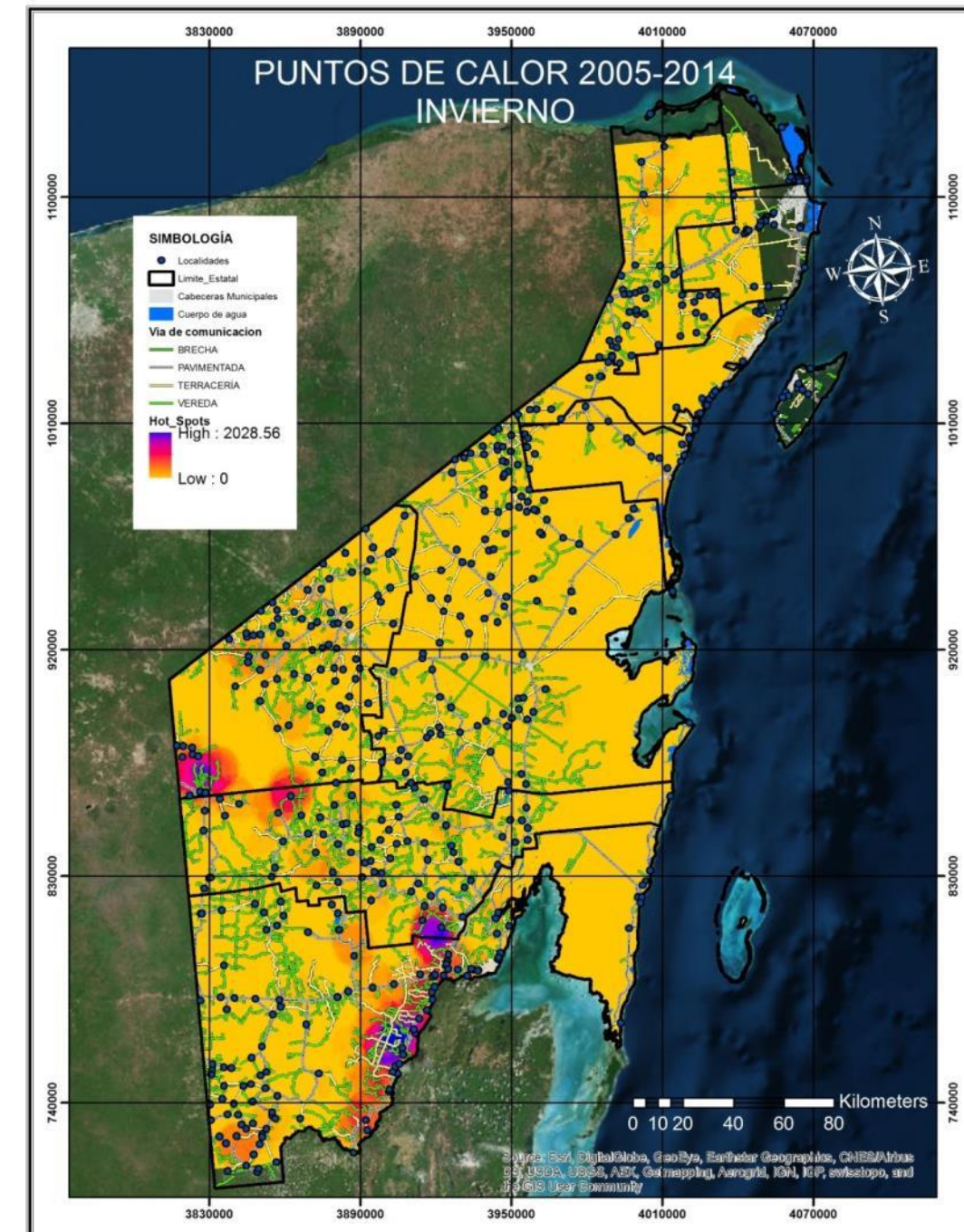
Mapa 140. Puntos de calor en verano.

Para el otoño los puntos de calor son menos, ya que comienza la temporada de huracanes que trae consigo lluvias, lo cual mantiene húmeda la vegetación presente.



Mapa 141. Puntos de calor en otoño.

En el invierno se percibe que en los municipios de Othón P. Blanco, Bacalar y José María Morelos empieza de nuevo la agrupación de puntos de calor, lo que podría deberse al incremento de las temperaturas de febrero.



Mapa 142. Puntos de calor en invierno.

Selección de puntos de verificación para determinar la carga de combustible

Para definir los puntos de verificación se tomaron en cuenta los siguientes criterios, establecidos por el CENAPRED:

1. Poblaciones con un radio de 2, 500 (m).
2. Caminos con un radio de 1, 500 (m).
3. Brechas y veredas con un radio de 1, 000 (m).

4. Incendios con un radio de 1, 000 (m).
5. Comunidad vegetal (selvas).
6. Áreas naturales protegidas (sitios aleatorios).

Localidades

El ser humano es el principal causante de los incendios forestales debido a las actividades socioeconómicas que realiza, entre las que destacan la agricultura, la ganadería, la apicultura y el cambio de uso de suelo.

Por tal motivo, la cercanía de una población o una localidad es determinante en la ocurrencia de un incendio forestal.

Caminos

Los caminos son vías de comunicación que transitan diariamente miles de personas, y en las cuales, dependiendo de la afluencia y de otros factores como la educación de la población, se arrojan desperdicios o residuos que pueden ser detonantes de un incendio, tales como colillas de cigarros, plásticos o vidrios.

Debido a lo anterior, la afluencia y cercanía de estas vías de comunicación resulta una variable importante que aumenta la probabilidad de ocurrencia de un incendio forestal.

Brechas y veredas

Al igual que los caminos, las brechas y veredas son vías de acceso que recorren las personas que viven en los poblados, particularmente los rurales, y que sirven para llegar a las zonas donde realizan sus actividades socioeconómicas. Son áreas perturbadas, donde la carga de combustible es mayor debido a los impactos de dichas actividades.

Antecedentes de incendios

Los antecedentes de incendios forestales también se tomaron en cuenta como una variable importante, debido a la probabilidad de que ocurran nuevamente. Asimismo, se amplificó el área de afectación utilizando un buffer para cubrir una mayor superficie. De acuerdo con el registro de la CONAFOR, se detectaron 425 incendios georreferenciados en el periodo 2008-2014.

Selvas

Las selvas han sido las más afectadas en dicho periodo, por lo que este tipo de vegetación se consideró como una variable más en el análisis de peligro realizado. Además, éstas equivalen al 73.4% de la superficie de todo el Estado.

Áreas naturales protegidas

Estas áreas se eligieron como criterio por la riqueza natural que hay en ellas, tanto en biodiversidad en especies de fauna y flora, como por los muchos servicios ambientales que brindan.

Análisis (puntos de verificación)

Para delimitar los puntos de verificación, la Guía del CENAPRED propone utilizar las cartas topográficas y de uso de suelo y vegetación del INEGI, con una escala de 1:50,000.

En el presente apartado, se llevó a cabo un análisis geoespacial, mediante el programa ArcGis 10.2, para la ubicación de los puntos de verificación, tomando en cuenta los criterios ya mencionados.

Con la herramienta denominada Buffer, se le asignó un radio a cada criterio, a excepción de las selvas. Después, con la herramienta llamada Intersec, se intersecaron todos los criterios, salvo las áreas naturales protegidas.



Figura 268. Intersec criterios.

No se colocaron las áreas naturales protegidas en el Intersec debido a que sería una condicionante demasiado fuerte, que haría que los polígonos que colorea quedaran sólo en dichas zonas.

Después de obtener la intersección, se utilizó la herramienta Feature to Point para convertir los polígonos en puntos. Se calcularon un total de 104,000.

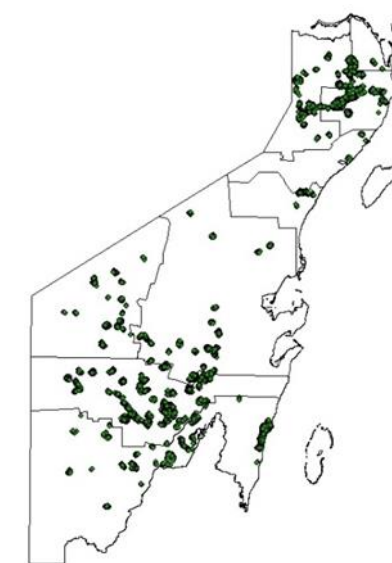


Figura 269. Puntos obtenidos utilizando Feature to Point.

Al obtener los puntos, se colocó una cuadrícula (malla) para delimitar las áreas, dejando solamente un punto de verificación en donde se conglomeraban dos o más puntos en un mismo tipo de vegetación. Cada cuadro de la malla tiene una superficie de 100 ha (10,000 m²). Al final de la depuración, se definieron sólo 45 sitios de muestreo.

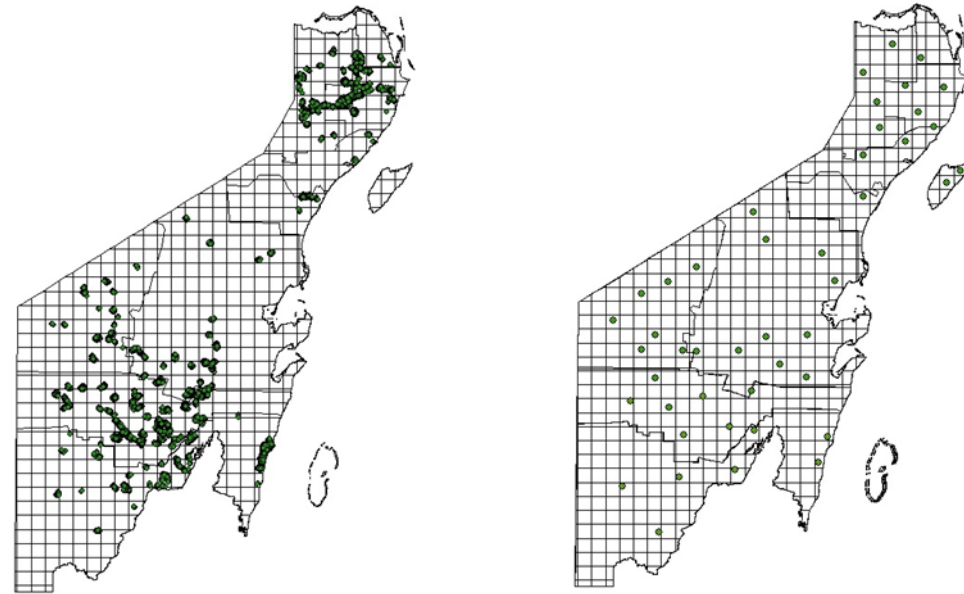
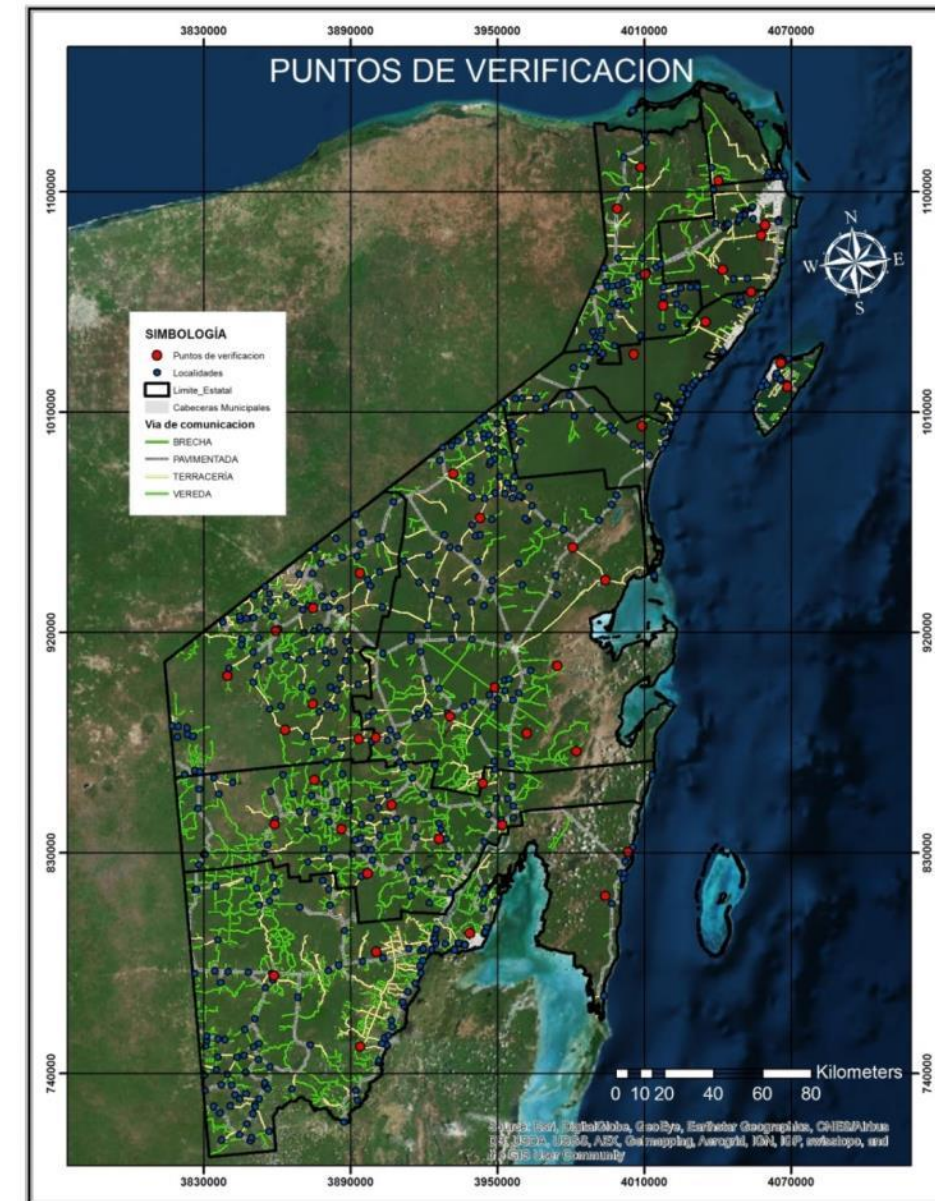


Figura 270. Depuración de los sitios de muestreo.

Como resultado de este análisis, se definieron los puntos de verificación en los cuales se recogieron datos de campo, y se analizó la materia orgánica encontrada en el área, así como el mantillo.

Estos 45 sitios se distribuyeron geoespacialmente por comunidad vegetal, para captar la mayor variabilidad. Es importante destacar que en Quintana Roo las comunidades vegetales son muy homogéneas en función a su estrato.



Mapa 143. Mapa de puntos de verificación.

Campo (transecto por conglomerados)

Para los sitios de muestreo se aplicó la metodología del INIFAP (Fuego, n.d.) (Dur et al., n.d.), que se basa en el análisis por conglomerados, la cual menciona que primero hay que ubicar el centro del sitio, para posteriormente moverse 8.9 m en dirección franco norte.

Esto para ubicar el primer conglomerado, ya ubicado el conglomerado procederemos a movernos franco norte de igual forma que para ubicar el centro del sitio hacer lo mismo pero esta vez a 15 m. Reescribir, no se entiende. Donde mediremos todas las piezas de combustibles (ramas) que intersecten el transecto, éstas se dividen por tiempo de retardo en 1, 10, 100 y 1,000 hrs.

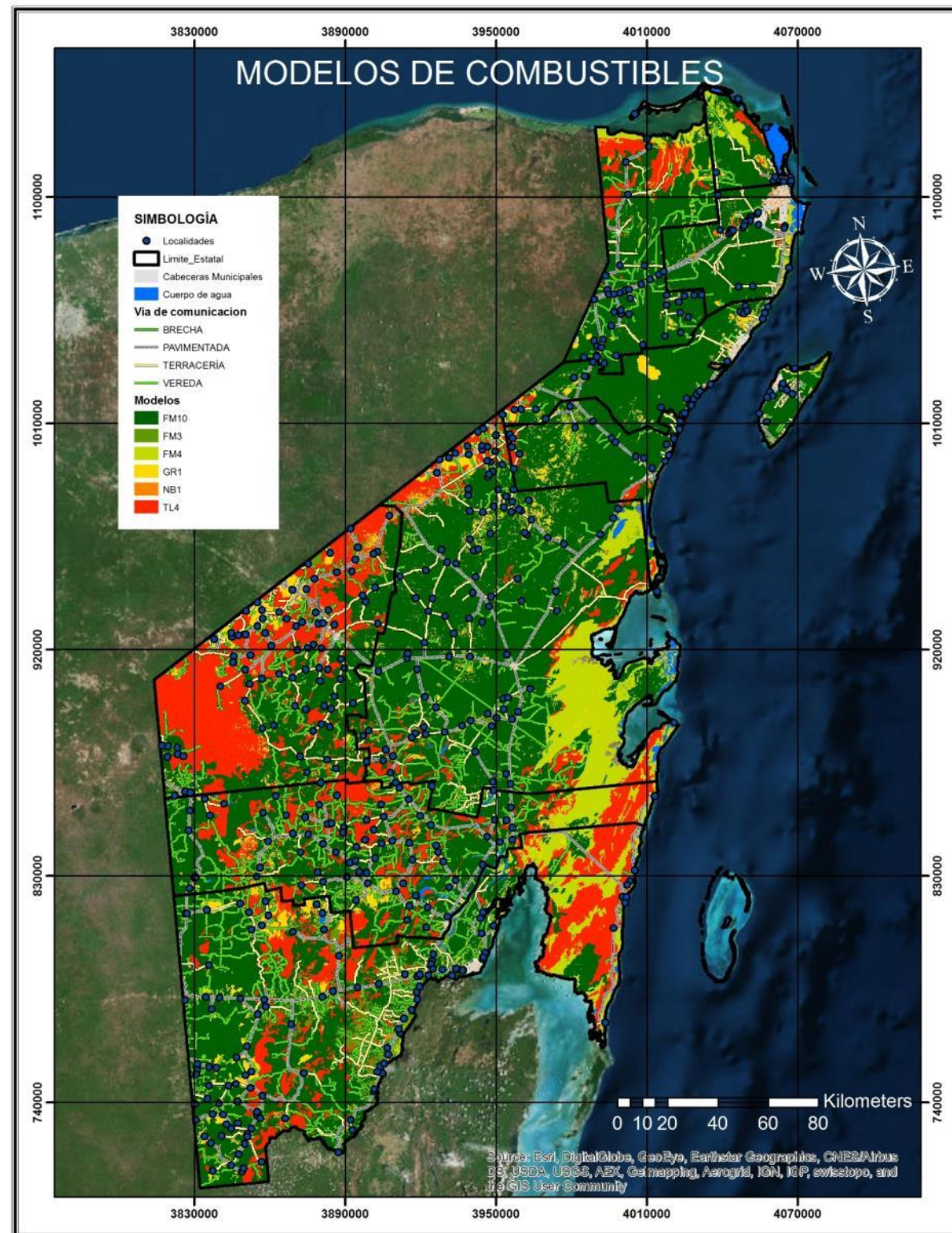
Las de 1 hora, son aquéllas que tienen un diámetro de 0.1 a 0.6 cm; las de 10 hrs, de 0.6 a 2.5 cm; de 100 hrs, de 2.5 a 7.5 cm, y de ahí en adelante son de 1, 000 hrs.

NB1

Asentamientos humanos.

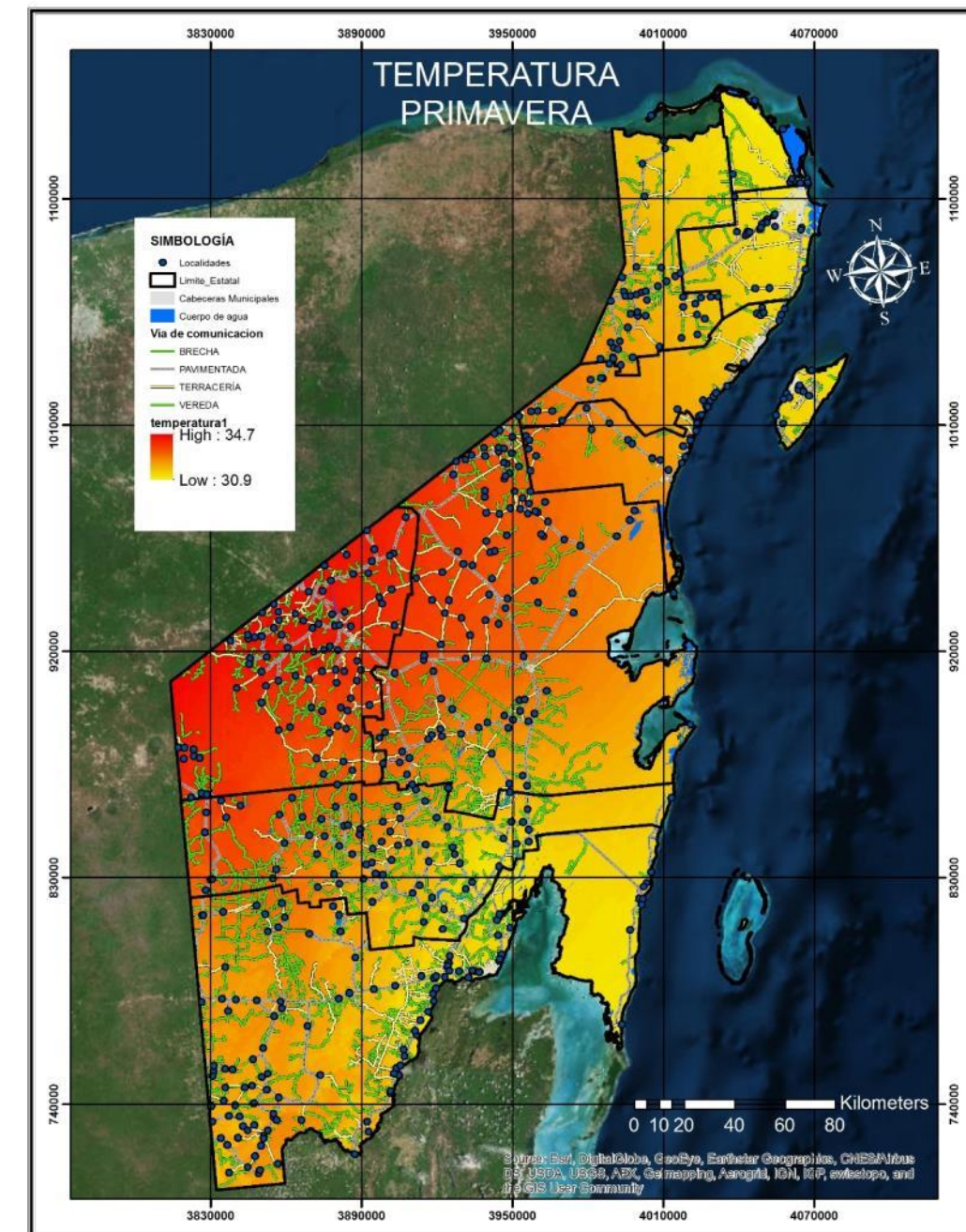
Mapa 144.

Mapa de modelos de combustibles.



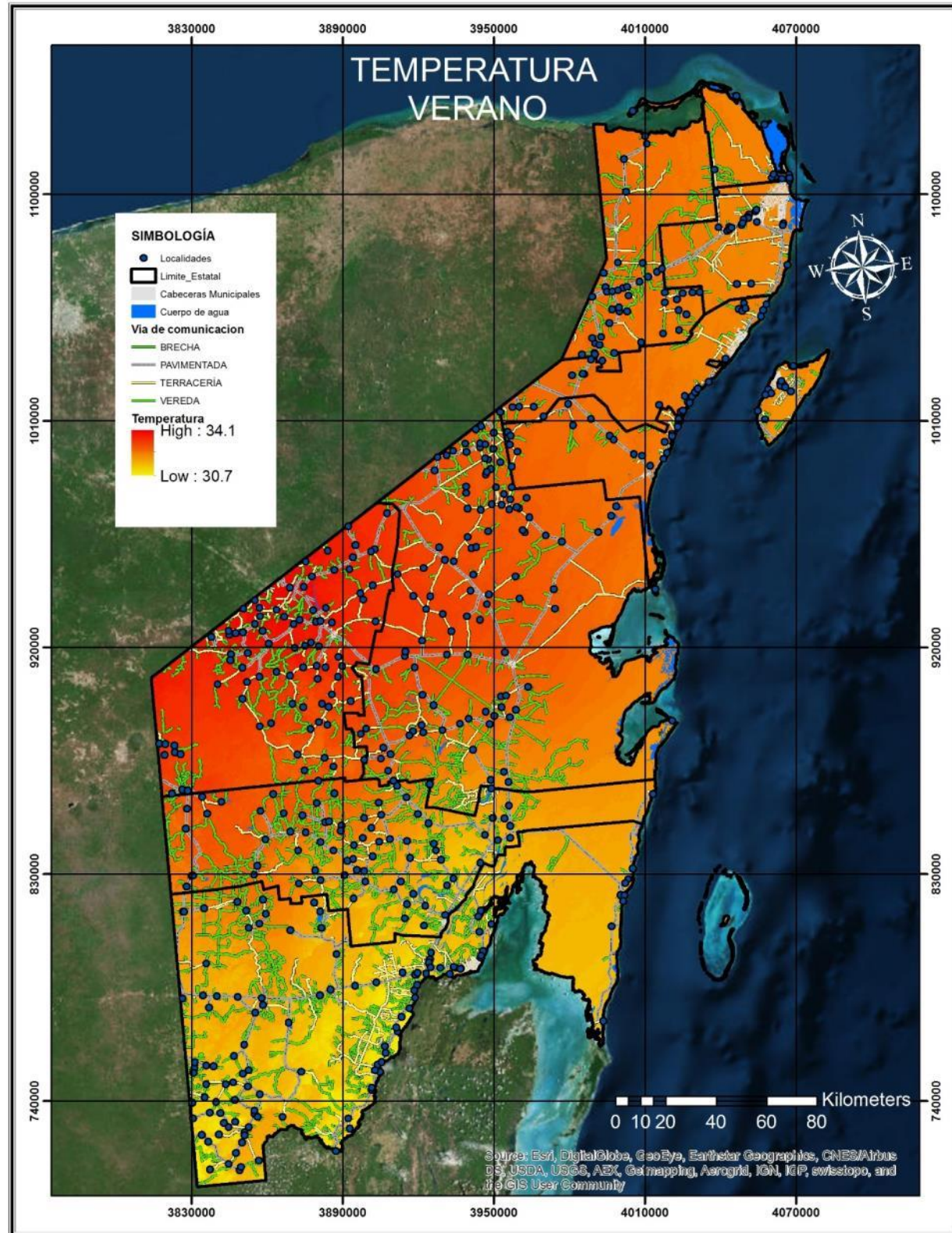
Obtención de mapas por estaciones mediante datos de WorldClim

Se generaron Raster por mes de temperatura y precipitación, los cuales se trabajaron en el sistema ArcGis 10.2, con la herramienta Calculadora Raster, para procesar y obtener mapas por estaciones.

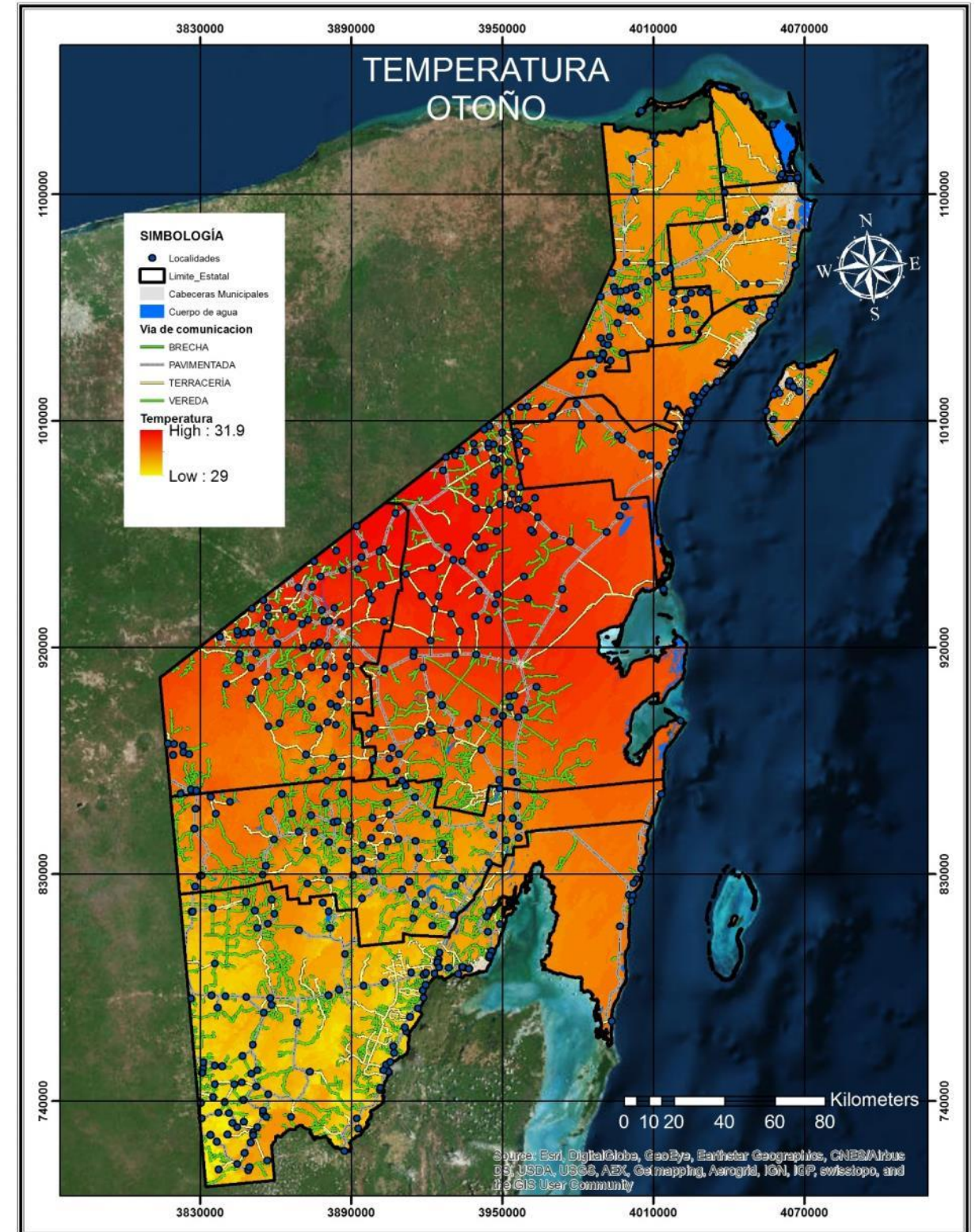


Mapa 145.

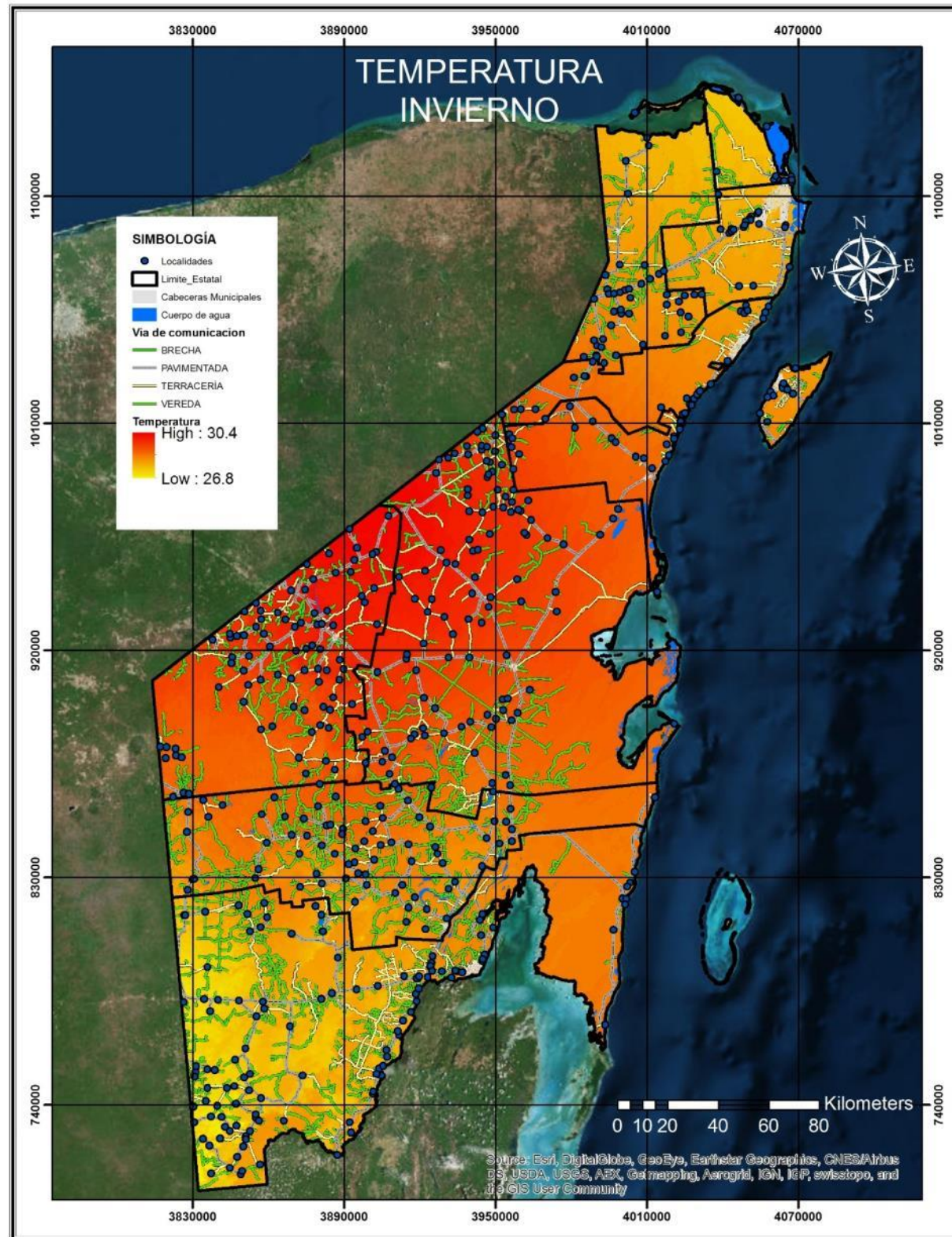
Temperatura primavera.



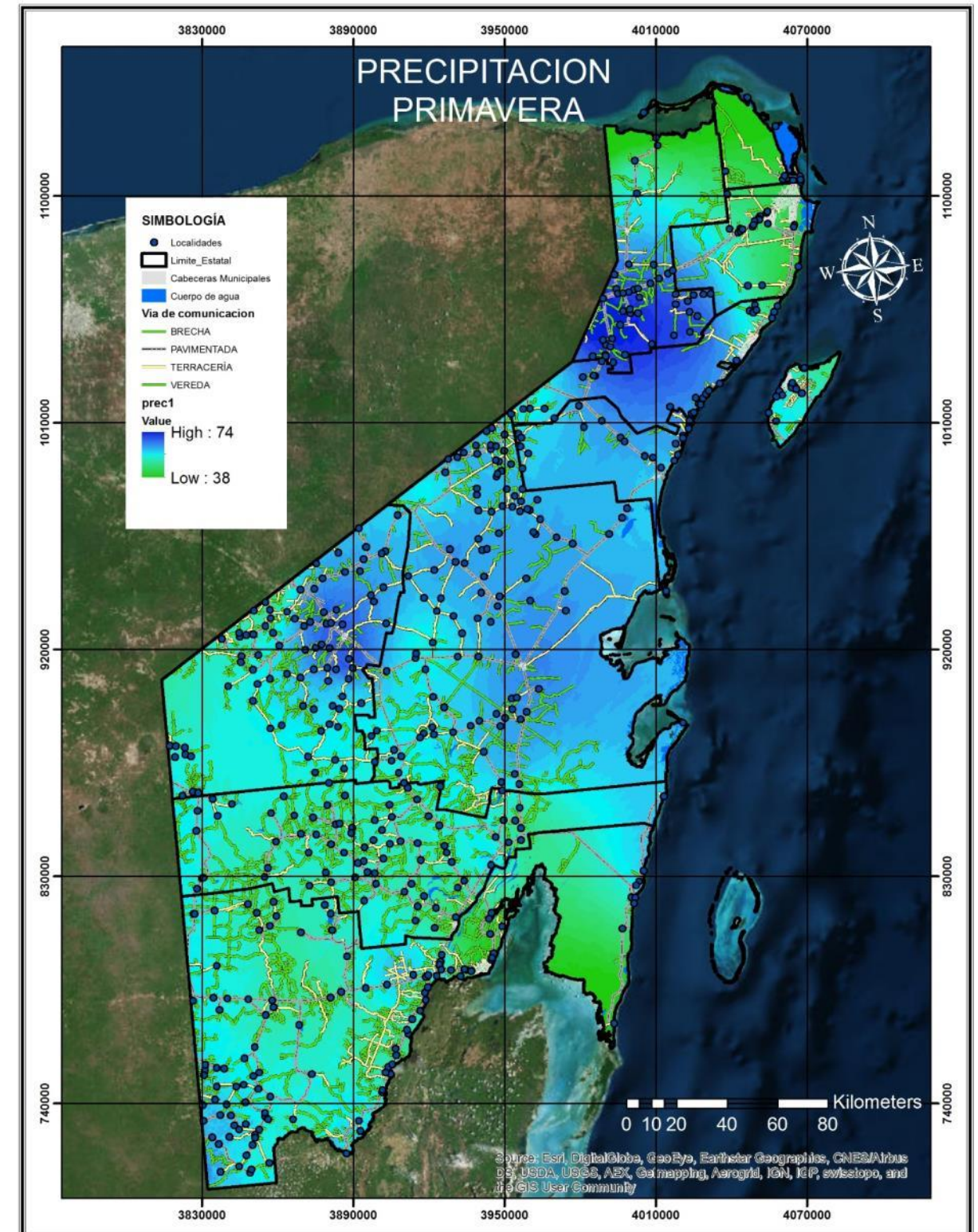
Mapa 146. Temperatura verano.



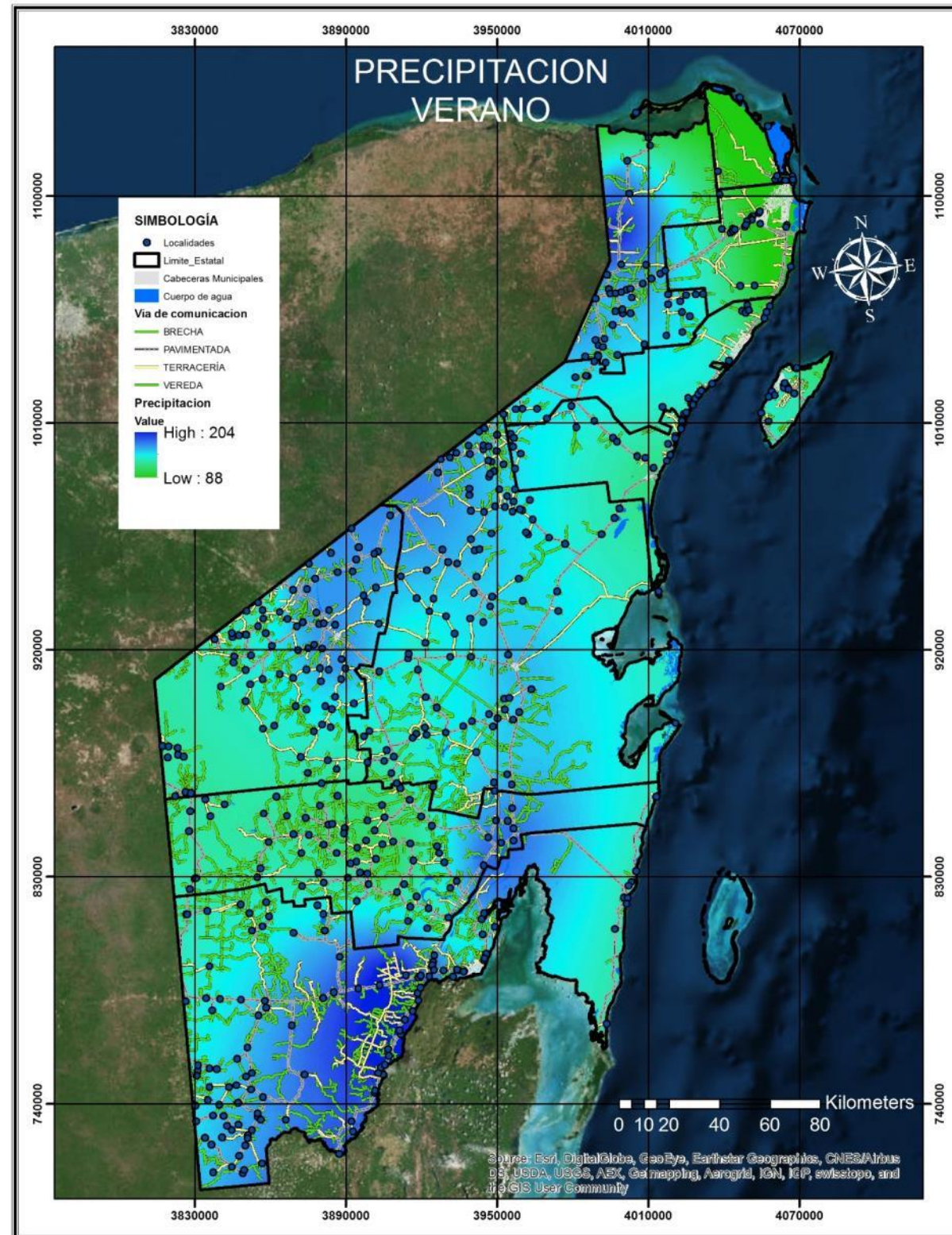
Mapa 147. Temperatura otoño.



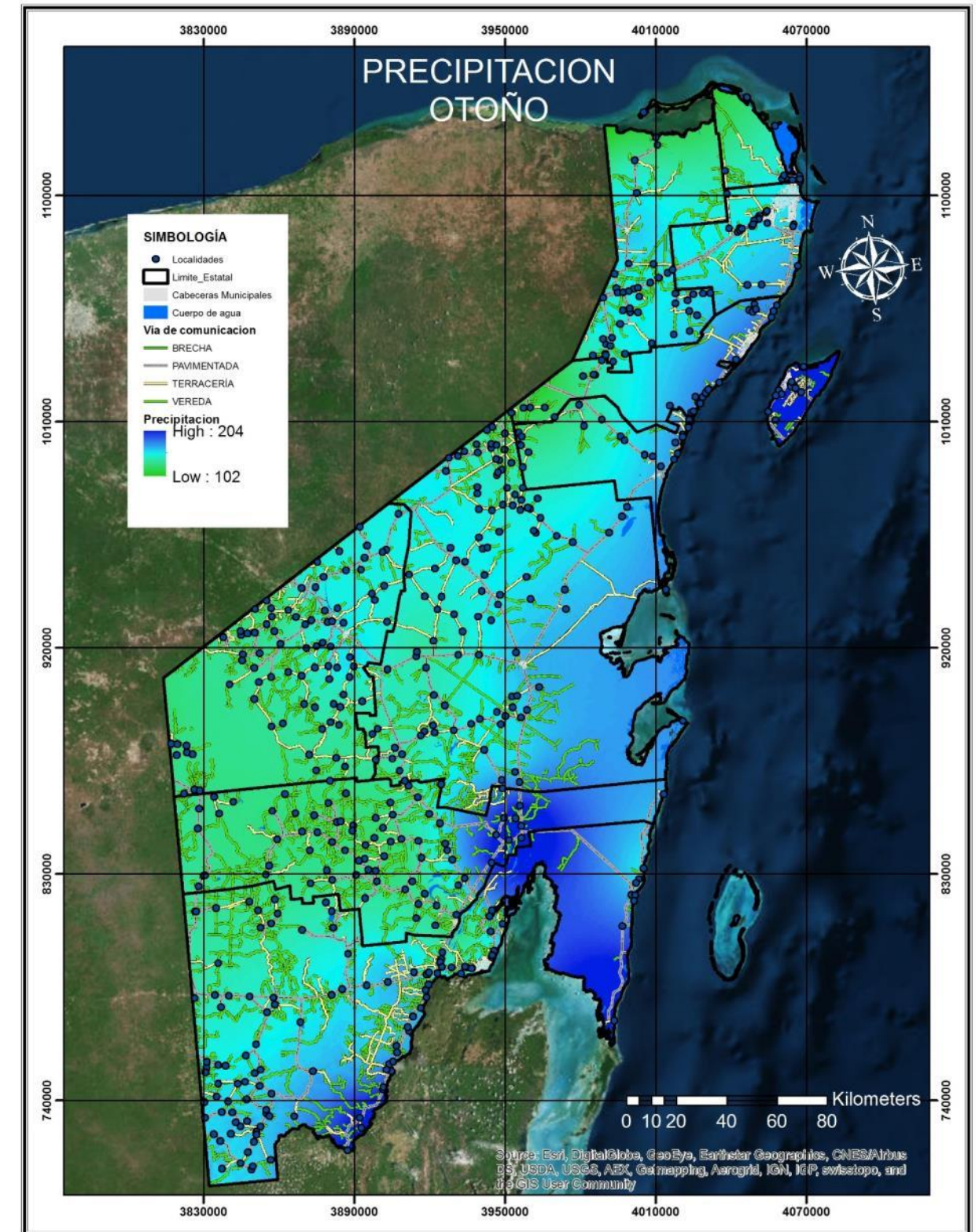
Mapa 148. Temperatura invierno.



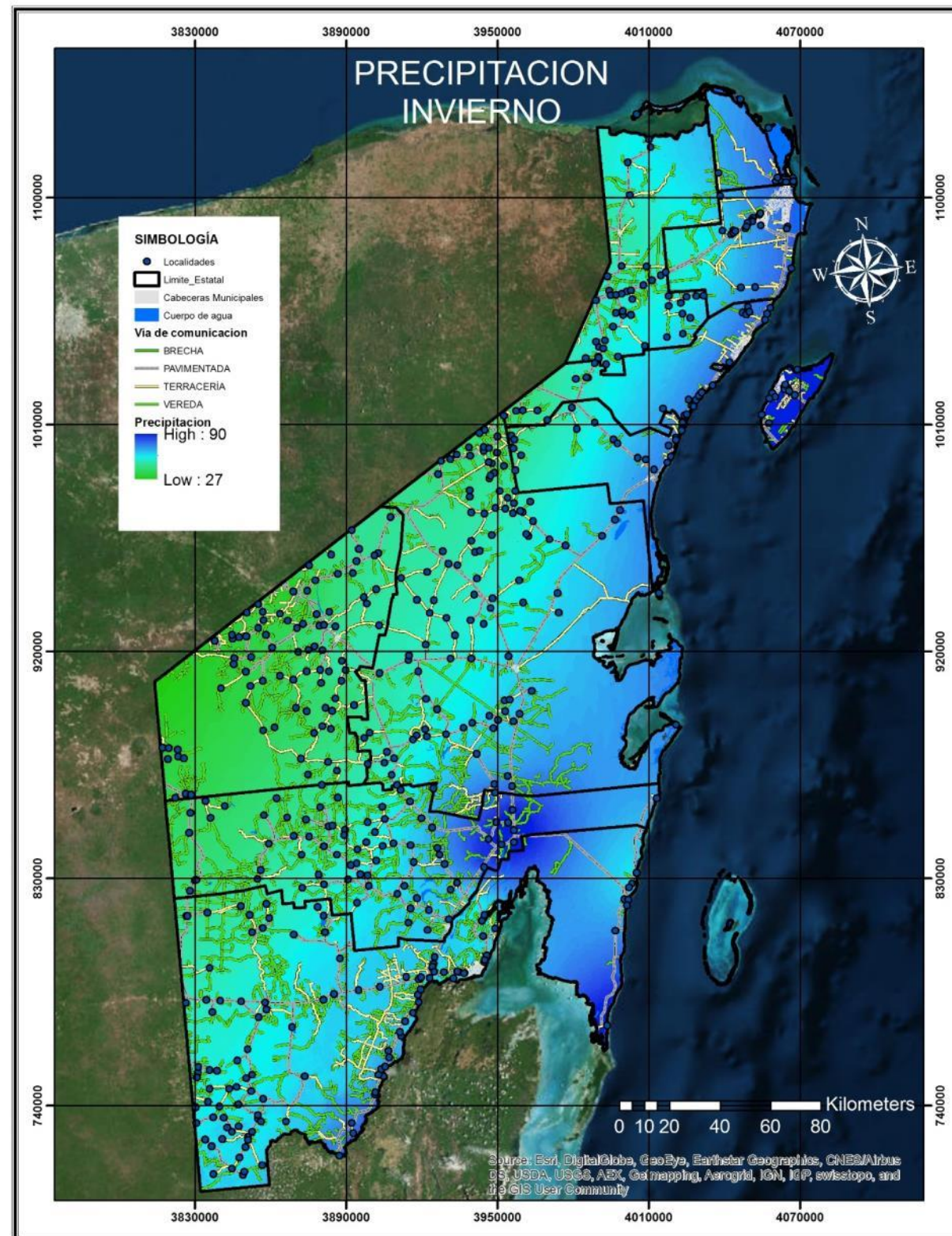
Mapa 149. Precipitación primavera.



Mapa 150. Precipitación verano.



Mapa 151. Precipitación otoño.

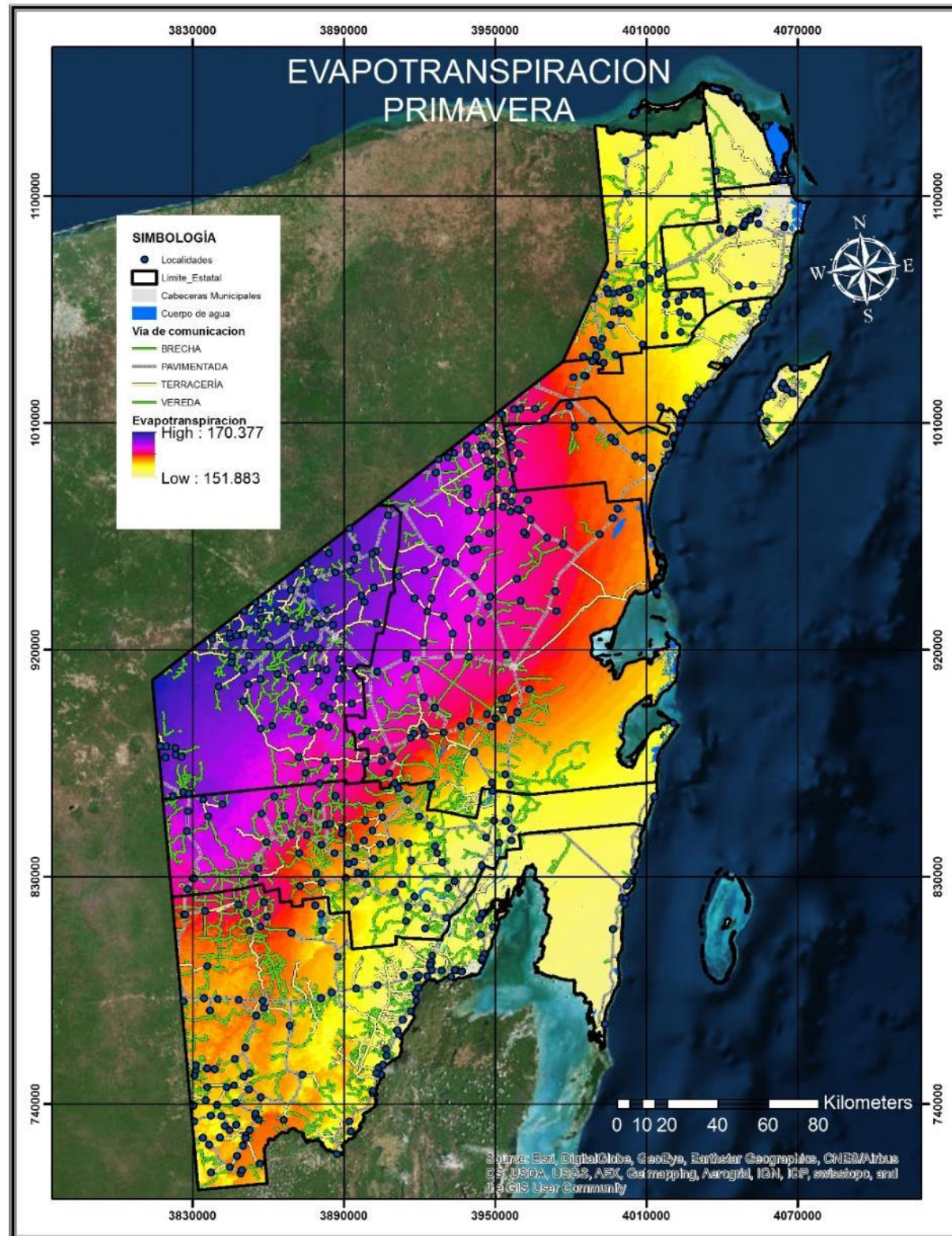


Mapa 152. Precipitación invierno.

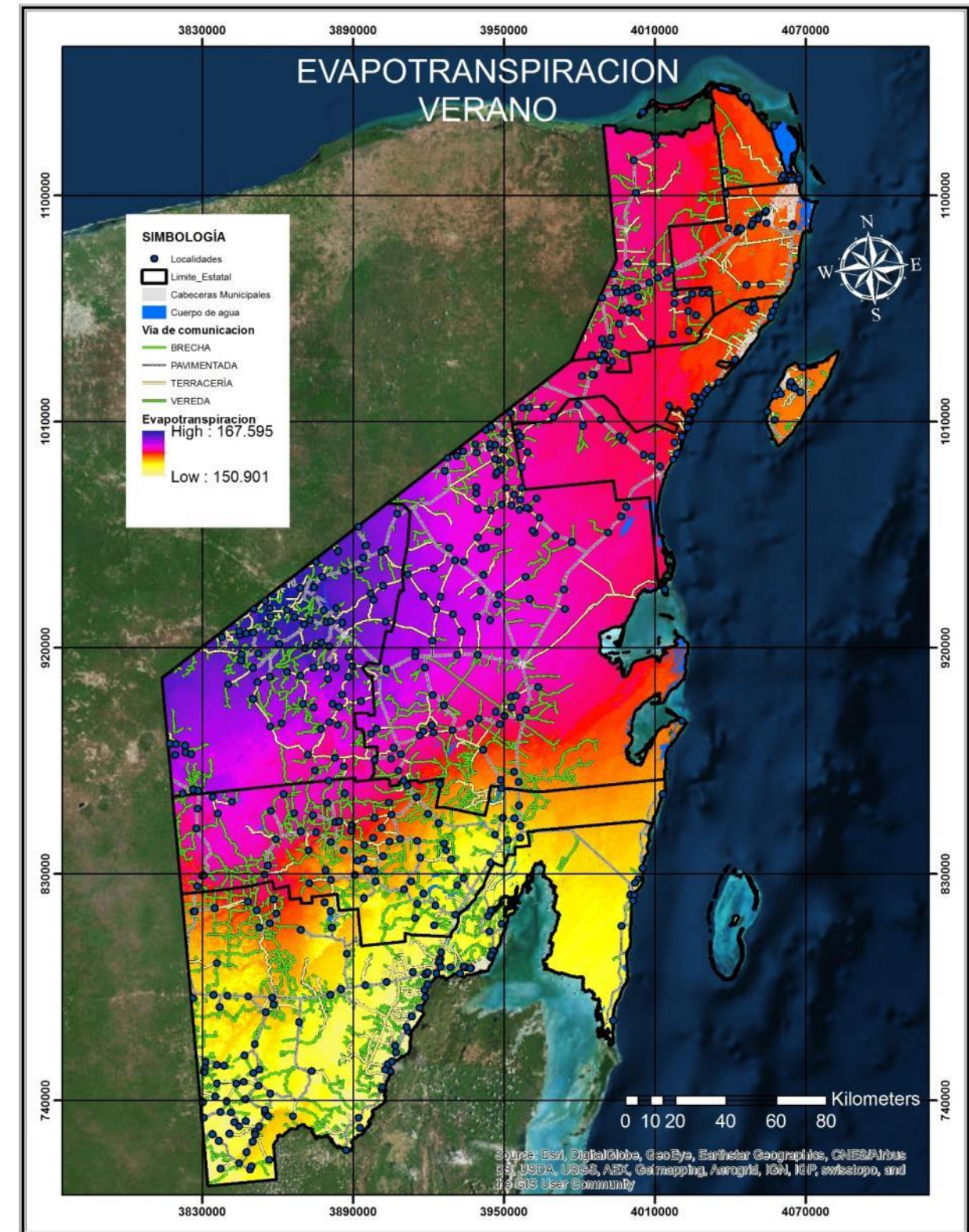
publicó una expresión para estimar la evapotranspiración potencial (ETp), actualmente definida como evapotranspiración de referencia (ETo), por ALLEN *et al.* (1998); y la ASCE-EWRI (2005) para regiones tropicales y subtropicales, que determina el ritmo e intensidad de los procesos fisiológicos de las plantas (fotosíntesis, respiración y transpiración), y la tasa de evaporación directa del agua contenida en el suelo y en la vegetación.

El modelo de Holdridge establece que por día se libera una lámina de 0.161 ml*m², lo que al mes resulta en una lámina de 4.90 ml*m². Este valor se multiplica por el promedio de temperatura por periodo para obtener la evapotranspiración.

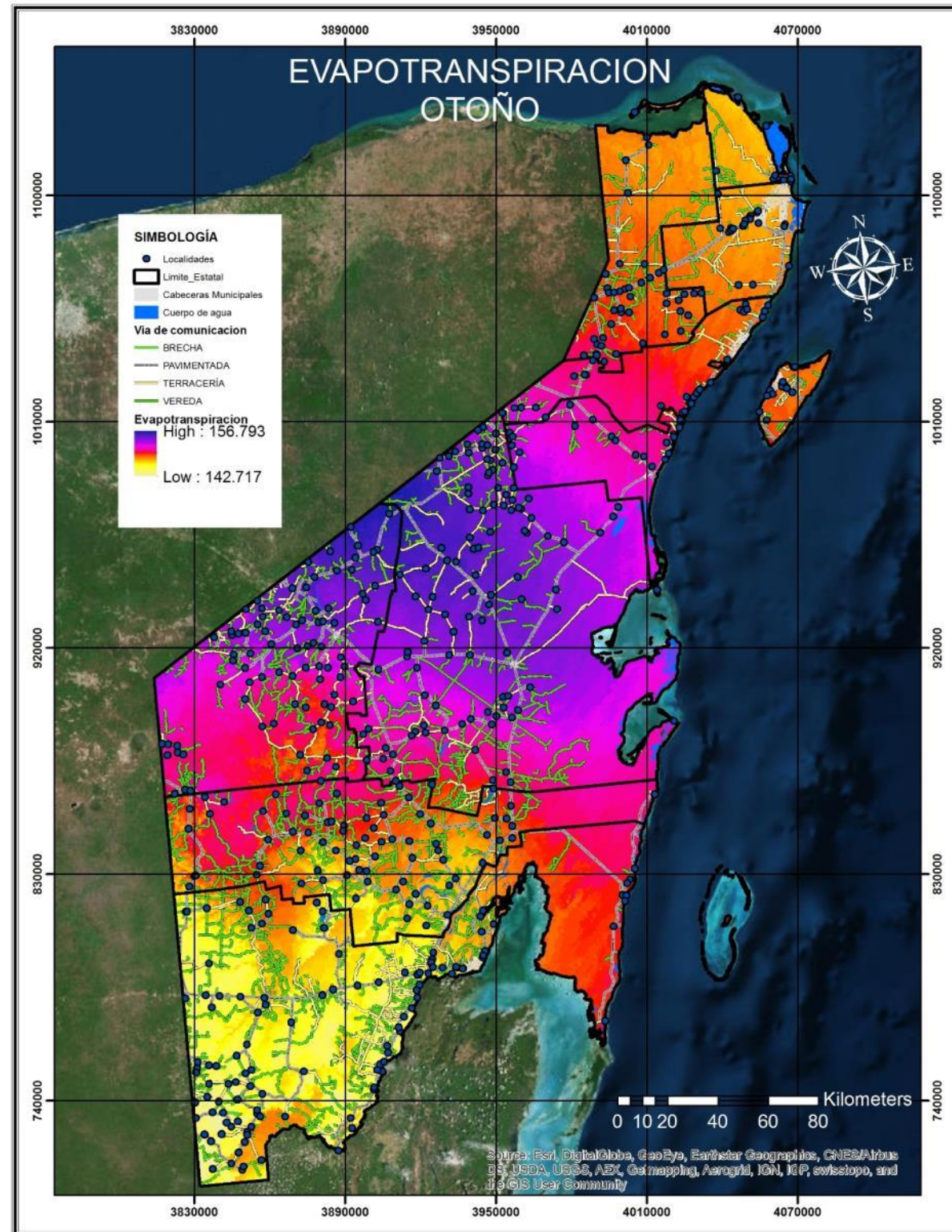
Del insumo de la temperatura se obtuvo la evapotranspiración, mediante el modelo de Holdridge (1959), quien



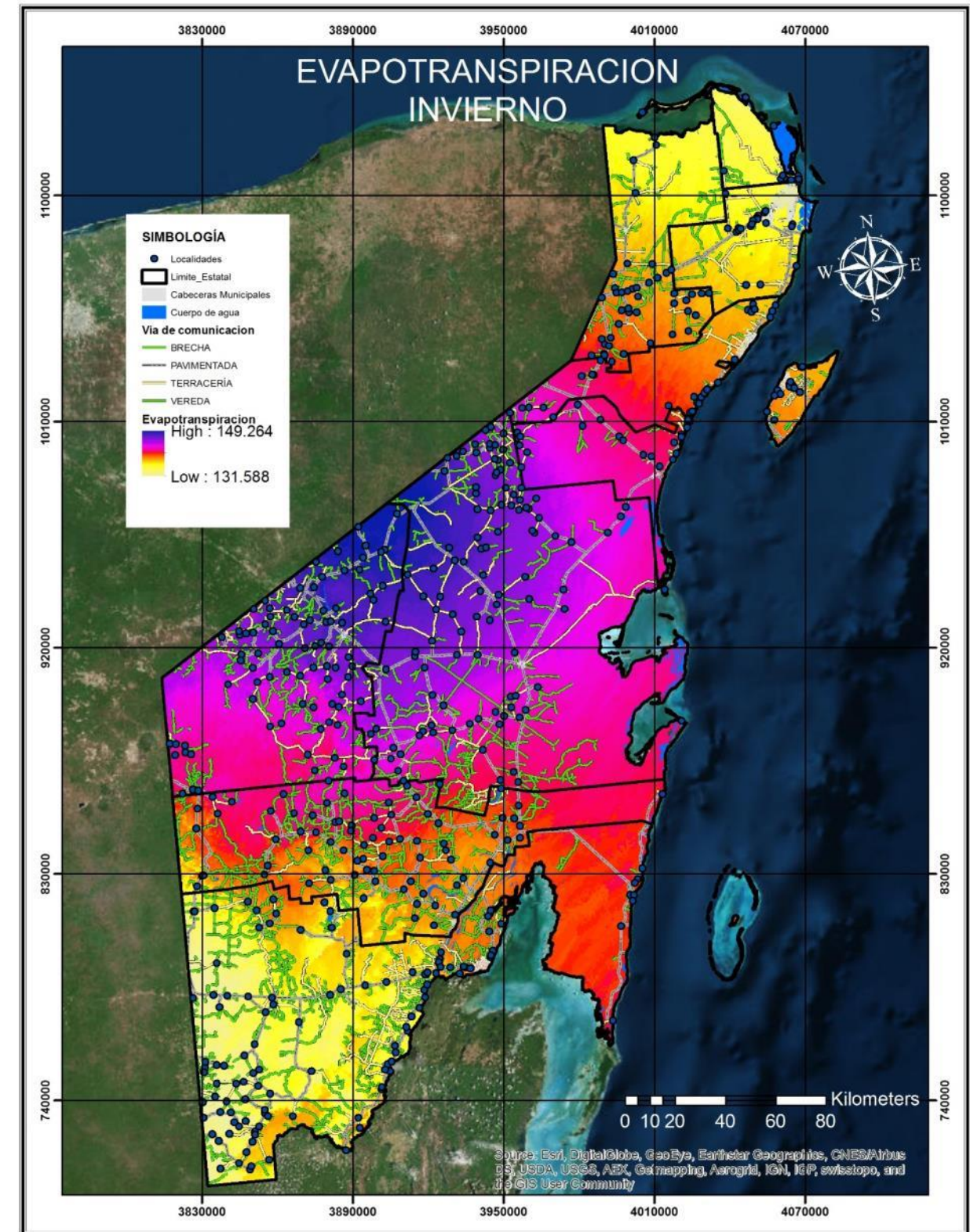
Mapa 153. Evapotranspiración primavera.



Mapa 154. Evapotranspiración verano.

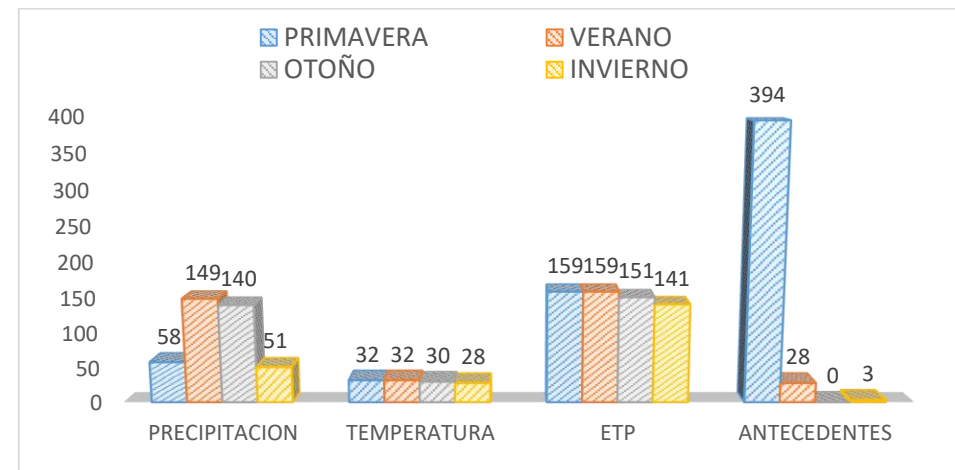


Mapa 155. Evapotranspiracion otoño.



Mapa 156. Evapotranspiración invierno.

Análisis de las variables climatológicas



Gráfica 109. Promedio de variables climatológicas.

En la gráfica podemos observar cómo las variables van cambiando en el año, lo que nos permite entender cómo se relacionan unas con otras en los diferentes mapas que se elaboraron.

Para cada variable se obtuvo el promedio y se les comparó con los incendios forestales que se registraron, los cuales se dividieron igualmente por estación. Como se mencionó, los incendios se analizaron en un periodo de siete años, que van de 2008 a 2014.

Se observó que en la primavera hay poca precipitación, en promedio 58 mm mensual, y una temperatura de 32 grados centígrados, lo que provoca que el agua contenida en el suelo y en la vegetación se libere fácilmente (ETp). Esto a su vez propicia que el combustible vegetal esté seco y sea un detonante de incendios.

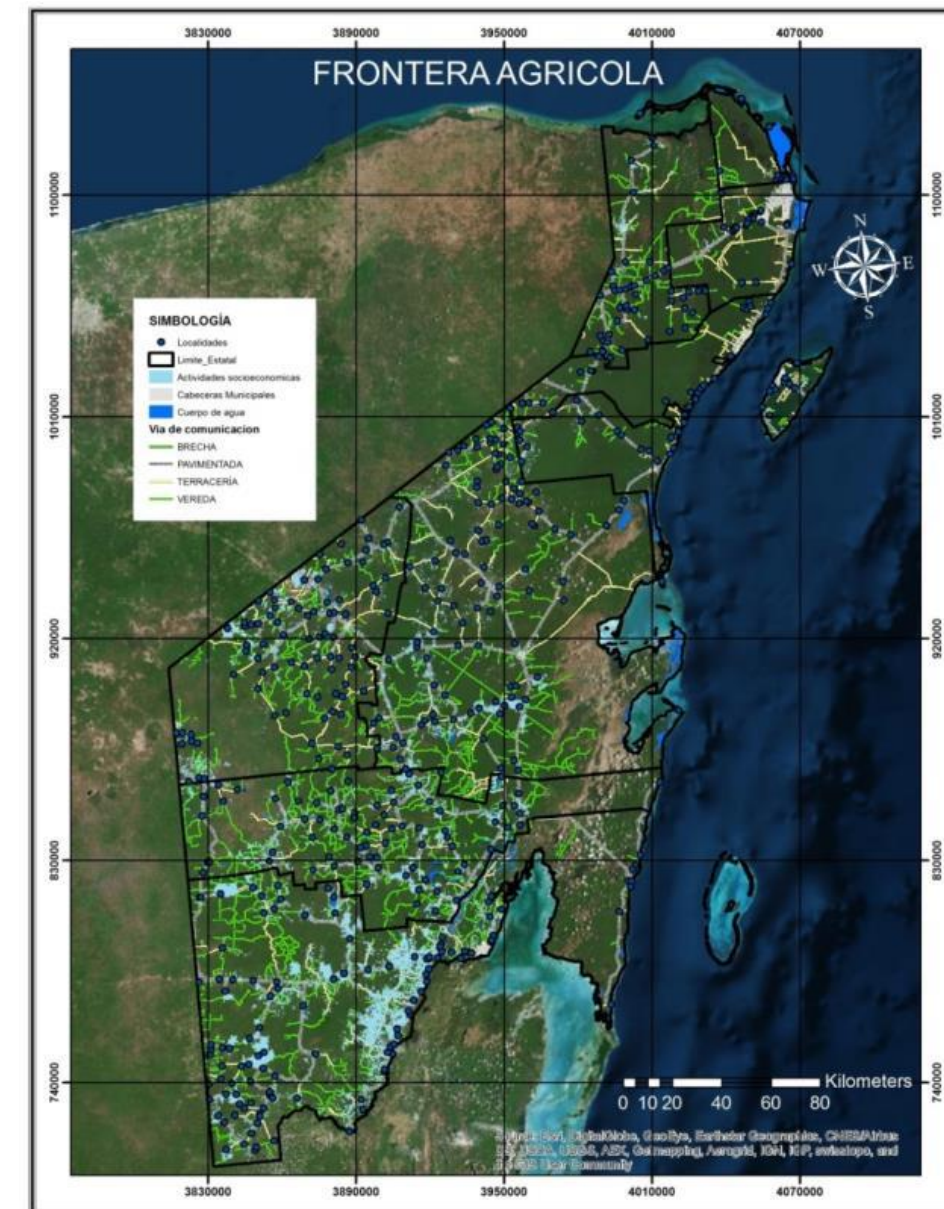
En el verano se ve reflejado el incremento de precipitación; comienzan las primeras lluvias, y la temperatura y la salida de agua se mantienen igual. En esta época los incendios disminuyen.

Para el otoño se presenta la temporada de huracanes, que trae consigo una precipitación abundante (en promedio 140 mm mensual). La temperatura empieza a descender, lo que disminuye la salida de agua del ambiente. Asimismo, el combustible se mantiene húmedo y hace que sea menos probable que ocurra un incendio.

En el invierno baja la precipitación, la temperatura y la salida de agua del ambiente. Sin embargo, esta situación perdura los primeros meses de la estación y para febrero comienza a aumentar la temperatura; dan inicio las quemaduras prescritas y comienza el ciclo de los incendios nuevamente.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP/SAGARPA)

La frontera agrícola es el límite que divide la tierra dedicada a la agricultura y la que aún se mantiene como área natural intacta. Debido a la presión de las poblaciones humanas, esta frontera avanza cada vez más hacia las áreas naturales.



Mapa 157. Mapa Actividades socioeconómicas.

Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ)

Se empleó el Proceso de Análisis Jerárquico en el cual se utilizaron ocho variables para identificar el IPIF. Los valores para la discusión de cada criterio fueron los siguientes:

Tabla 160. Proceso de análisis jerárquico.

Valor	Descripción
-------	-------------

1	Cuando dos elementos son igualmente preferidos
3	Moderadamente preferido
5	Fuertemente preferido
9	Extremadamente preferido
2,4,6,8	Situaciones intermedias

Cada variable se sometió a discusión con los expertos para determinar su peso. Los resultados fueron colocados en las tablas de atributos de cada criterio, para después realizar procesos geospaciales en el programa ArcGis 10.2. Con el procedimiento anterior fue posible identificar las áreas con un índice de peligro bajo, medio y alto.

Tabla 161. Geoprocesos Espaciales.

Criterio	Antecedentes	Puntos de calor	Modelos	Act_Econo	Loc_Caminos	Temp	ETP	Precip
Antecedentes	1	2	3	4	4	5	8	9
P_calor	1/2	1	2	4	5	8	8	9
Modelos	1/3	1/2	1	3	5	5	6	8
Act_Econo	1/4	1/4	1/3	1	3	5	6	9
Loc_Caminos	1/4	1/5	1/5	1/3	1	3	5	8
Temp	1/5	1/8	1/5	1/5	1/3	1	3	6
ETP	1/8	1/8	1/6	1/6	1/5	1/3	1	3
Precip	1/9	1/9	1/8	1/9	1/8	1/6	1/3	1

Dónde: P_calor (Puntos de calor), Act_Econo (Actividades Socioeconómicas), Loc_Caminos (Localidades y Caminos), Temp (Temperatura), ETP (Evapotranspiración) y Precip (Precipitación).

Los pesos que arrojó el análisis fueron los siguientes:

ATRIBUTO	PESO
Antecedentes	0.293
P_calor	0.244
Modelos	0.172

Act_Econo	0.118
Loc_Caminos	0.080
Tem	0.049
ETP	0.027
Pre	0.017

INDICE DE CONSISTENCIA

0.096

Una consideración importante, en términos de la calidad de la decisión final, se refiere a la consistencia de los juicios que muestra el tomador de decisiones en el transcurso de comparaciones pareadas. Esto quiere decir que los criterios se juzgaron por igual y no se les atribuyó ninguna preferencia.

5.3.3 Resultados

Para cumplir el objetivo de obtener un IPIF para cada estación del año, se utilizó la herramienta ArcGis 10.2 para el procesamiento de los insumos. Éstos se procesaron para un análisis geoespacial con la herramienta Unión, en donde se agruparon todos los criterios.

Los mapas se obtuvieron por periodos de tiempo, como se mencionó anteriormente, tomando en cuenta las estaciones del año. Cada periodo consta de tres meses: primavera (marzo, abril y mayo), verano (junio, julio y agosto), otoño (septiembre, octubre y noviembre) e invierno (diciembre, enero y febrero).

Tabla 162. Criterios para la implementación de mapas.

CRITERIOS	PRIMAVERA	VERANO	OTOÑO	INVIERNO
Antecedentes				
P_calor				
Modelos				
Act_Econo				
Loc_Caminos				
Temp				
ETP				

Precip				
CONDICIONES TRANSITORIAS	Cada criterio se dividió por estación, porque no son constantes y cambian con el tiempo. (Condiciones transitorias)			
NO SE CONTABA CON DATOS	La única variable que no contaba con datos para todos los meses son los "antecedentes de incendios", ya que éstos se presentan en primavera, parte del verano e invierno.			
CONDICIONES PERMANENTES	Para estos criterios se utilizaron valores constantes, ya que no cambian, sólo se actualizan. (condiciones permanentes)			

Para cada criterio se utilizaron valores promedios por mes, según la estación. Para los antecedentes, que son aquellos incendios ocurridos en el periodo 2008-2014, no se utilizaron en otoño, debido a que en esos meses no se registraron incendios. Los meses que abarcan los antecedentes son: febrero, marzo, abril, mayo y junio, siendo los de la primavera en los que ocurren la mayor parte de estos eventos.

En los modelos de combustibles, actividades socioeconómicas, poblaciones y caminos se utilizaron los mismos valores, ya que son constantes y no varían, a diferencia de los demás criterios.

Para los criterios de temperatura, precipitación, evapotranspiración y puntos de calor se cuantificaron sus valores en cuatro estratos, que van de alto a bajo. Se tomaron los dos estratos de mayor rango para temperatura y puntos de calor, y los dos más bajos para la precipitación y evapotranspiración.

Lo anterior se realizó por la necesidad de tomar en cuenta que para que se produzca un incendio forestal se deben de cumplir ciertos criterios. Partiendo de los valores extraordinarios tendremos una mayor probabilidad de conocer aquellas zonas o áreas donde podrían ocurrir.

Al final del análisis se obtuvieron los mapas de los periodos de tiempo mencionados.

Primavera

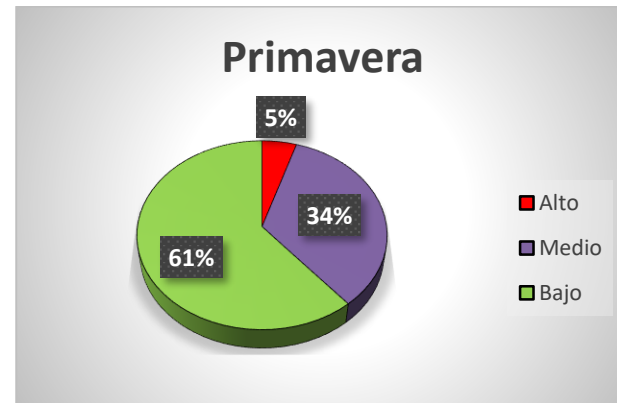
En este periodo aumentan las temperaturas y la precipitación disminuye al grado de provocar sequías; comienzan las quemadas prescritas, lo cual nos lleva a entender que hay mayor probabilidad de ocurrencia de un incendio forestal.

En esta etapa el índice se puede relacionar con variaciones del clima y, particularmente, con la precipitación pluvial. Se observó en el mapa de precipitación (ver mapa estación primavera) que existe una relación inversa entre la precipitación pluvial y la superficie afectada por el IPIF. El mapa está dividido en tres categorías: alto, medio y bajo.

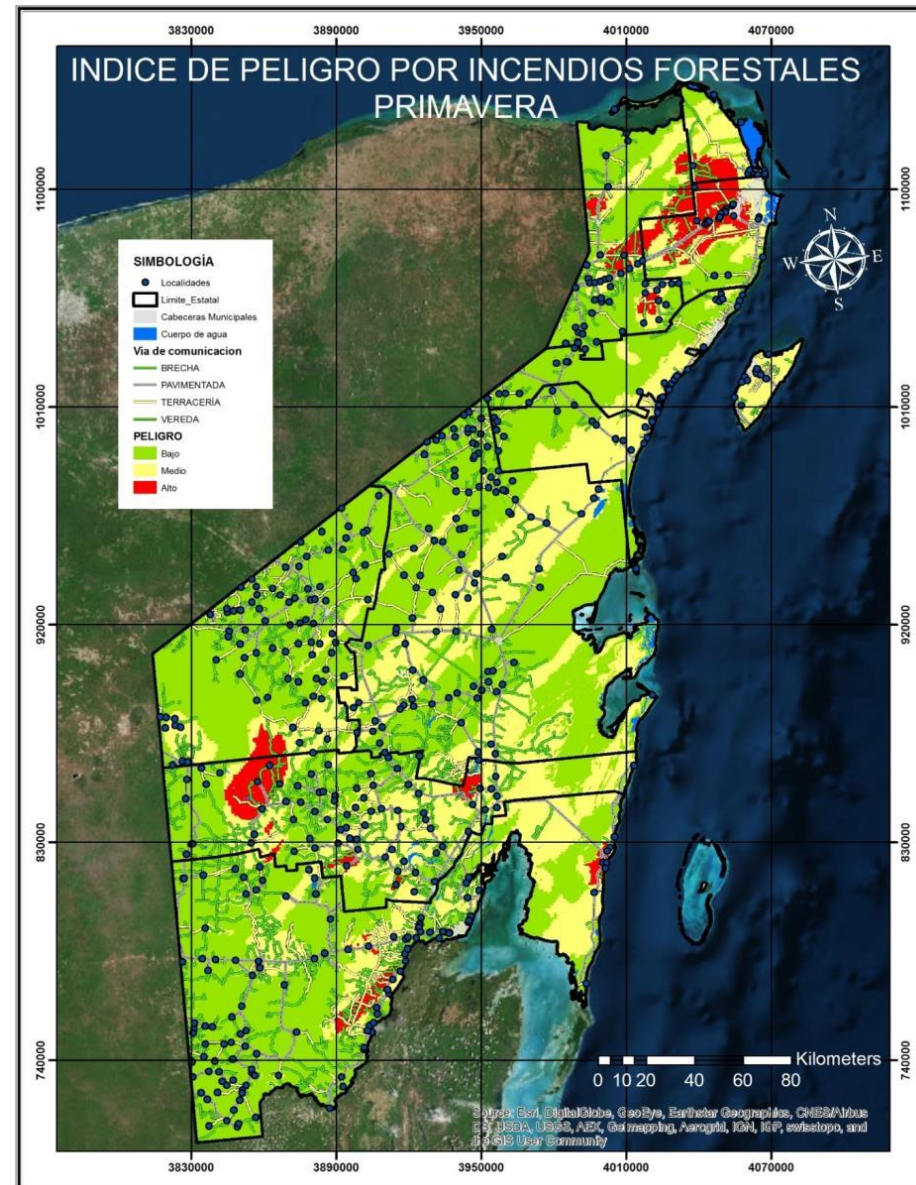
Asimismo, se puede apreciar que en los municipios de Benito Juárez, Lázaro Cárdenas, Isla Mujeres, José María Morelos, Bacalar y Othón P Blanco hay una tendencia de mayor probabilidad de ocurrencia de este fenómeno, puesto que fueron los que registraron poca precipitación pluvial en la estación.

Tabla 163. Municipios, ejidos y localidades en los que se tiene un Índice de Peligro Alto por Incendios Forestales. (Estación Primavera)

MUNICIPIO	EJIDOS	LOCALIDADES
Othón. P. Blanco	Laguna Om, Sacxàn, Palmar, Ramonal, Allende Sabidos, Álvaro Obregón, Pucte, Cacao, Cocoyol.	El Cedralito, Jesús González Ortega, Nachicom, Allende Sabidos. Las Tres Potrancas.
Bacalar	Chun Ek, Nuevo Tabasco, Valentín Gómez Farías, Melchor Ocampo, Río Verde, Miguel Alemán Payo Obispo, Altos De Sevilla, San Román, Bacalar, Chac-choben, Cuauhtémoc.	Nuevo Tabasco, Cuatro Banderas, Valentín Gómez Farías, Río Verde, San Román.
José María Morelos	Ignacio M. Altamirano II, Nuevo Cunducan.	Nuevo Cunducan, San Isidro Poniente.
Lázaro Cárdenas	San Francisco, Agua Azul, San Lorenzo, Juárez, San Martiniano, Victoria, Héroes de Nacozari, El Tintal, Santo Domingo, Cristóbal Colón, Valladolid Nuevo, La Esperanza, Vicente Guerrero, El Cedral.	Victoria, Juárez, El Tintal.
Benito Juárez	Valladolid Nuevo, Leona Vicario, Alfredo Bonfil y Su Anexo, Isla Mujeres	Los coquitos, Emiliano Zapata, Tres Marías, Nuevo Jerusalén, Mi Ranchito, El Porvenir, Las Palmas, La Primavera, Nuevo Amanecer, Los Olmos, Bosques del Caribe, Las Arboledas, El Carajito, El Jabalí.
Isla Mujeres	Isla Mujeres	Francisco May.



Gráfica 110. Porcentaje que abarca cada categoría de peligro en la superficie del estado.



Mapa 158. Mapa IPIF Primavera.

Verano

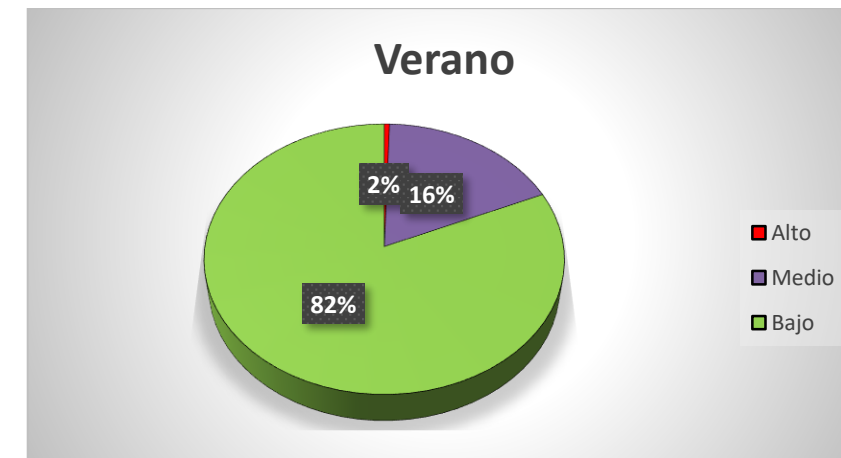
En el verano empiezan las primeras lluvias; la temperatura comienza a disminuir y se detienen las quemadas prescritas, ya que las precipitaciones mantienen los combustibles húmedos, lo que evita que ocurra la ignición.

Para junio todavía existe la probabilidad de que ocurra un incendio, ya que la temporada de lluvias apenas comienza. El sector primario, debido a la cercanía de este periodo, tiende a apresurar sus quemadas, lo que se convierte en un probable detonante.

Derivado de lo anterior, y con fundamento en los antecedentes de incendios forestales levantado por el CONAFOR, se pueden encontrar algunos registros de incendios en este mes.

El mapa de verano, al igual que el de primavera, está dividido en tres categorías: peligro alto, medio y bajo. En este periodo se puede apreciar que disminuye el peligro, debido a las variables meteorológicas ya mencionadas.

Los municipios en los que se registra un peligro alto son: Benito Juárez, Isla Mujeres, Solidaridad, Felipe Carillo Puerto y Othón P Blanco.

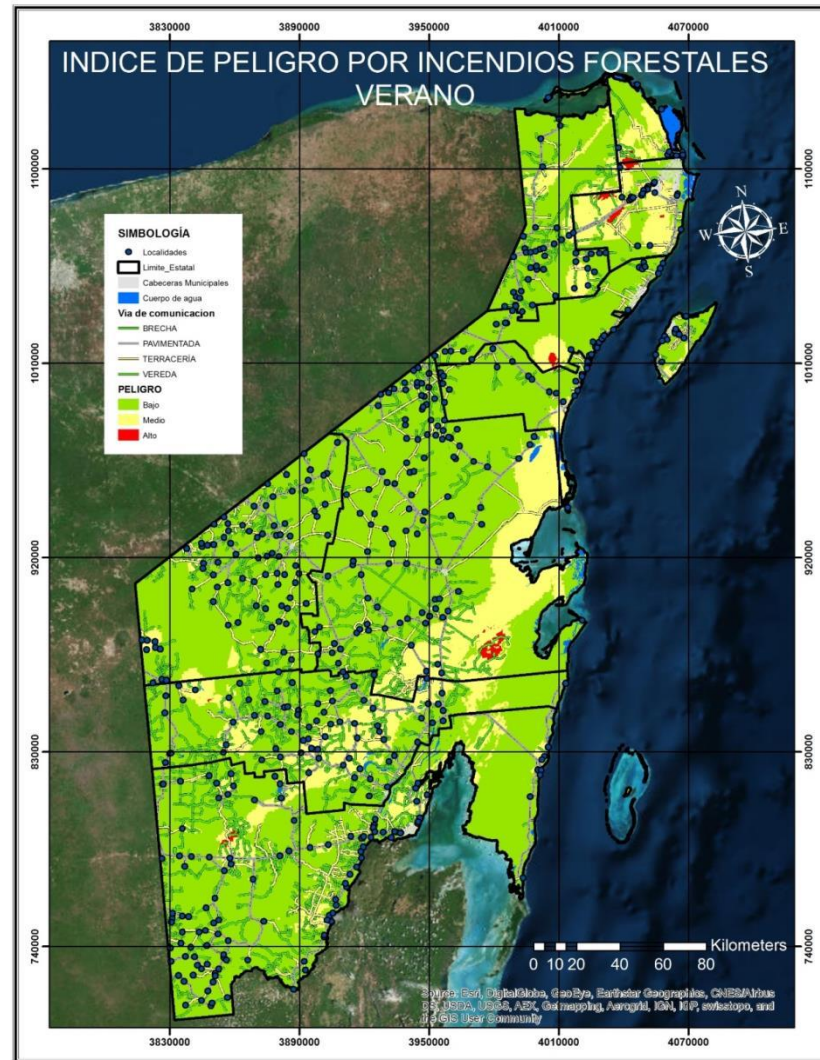


Gráfica 111. Porcentaje que abarca cada categoría de peligro en la superficie del estado.

Tabla 164. Municipios, ejidos y localidades en los que se tiene un Índice de Peligro Alto por Incendios Forestales. (Estación Verano)

Municipio	Ejido	Localidad
Benito Juárez	Leona Vicario	El Porvenir, Las Palmas, El Ramonal, Los Olmos

Isla Mujeres	Isla Mujeres	El Jabalí
Felipe Carrillo Puerto	Sian Ka'an	Sian Ka'an
Solidaridad	Centro Ecoturístico	Uxuxubi
Othón P. Blanco	Laguna Om	San José De La Montaña

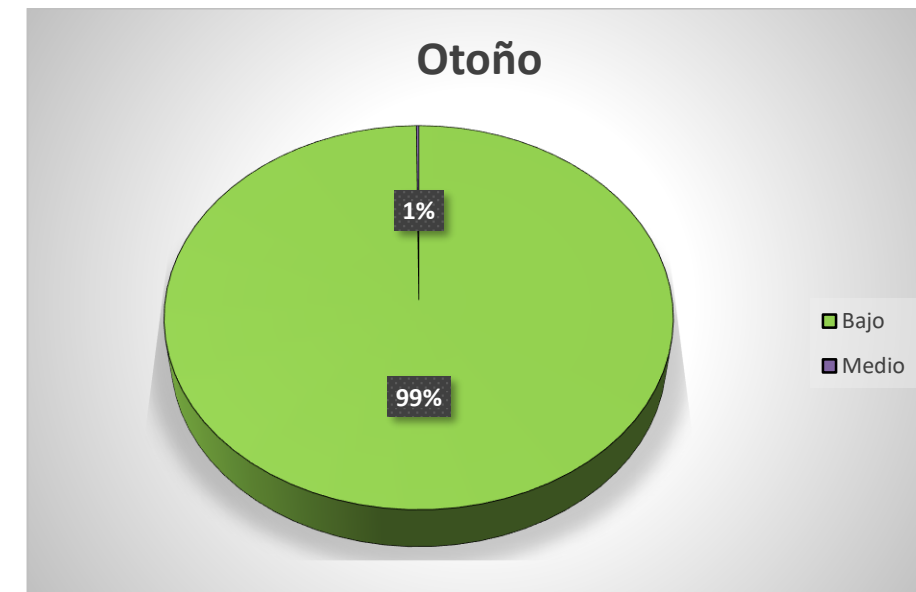


Mapa 159. Mapa IPIF Verano.

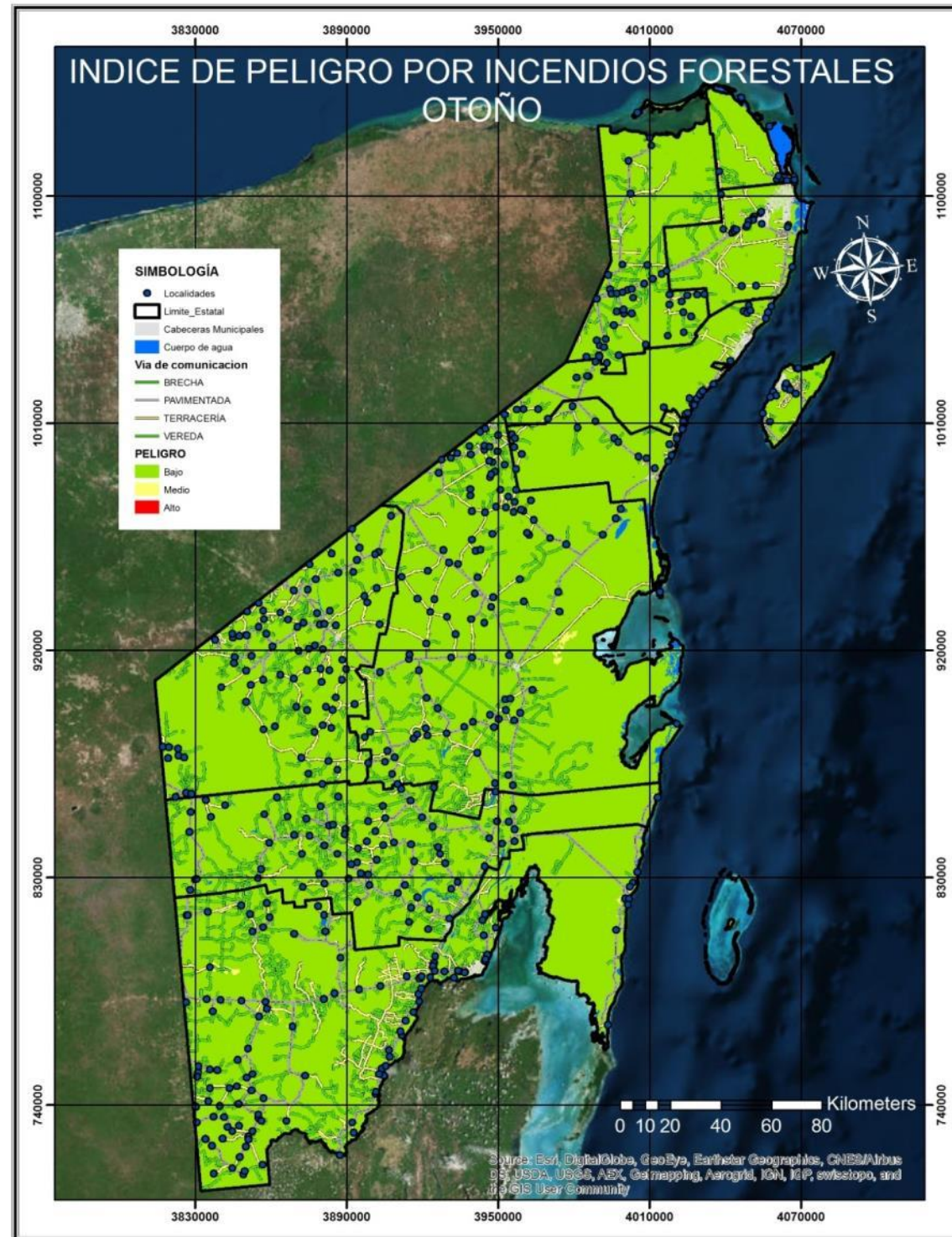
Otoño

Durante el otoño, la precipitación aumenta considerablemente por lo que la vegetación está más húmeda. Las quemas prescritas se detienen en su totalidad y la presencia de puntos de calor disminuye.

Como se observa en el mapa de esta temporada, ya no existe ninguna zona con un índice de peligro alto y de peligro medio; sólo representa el 1%, como se aprecia en la siguiente gráfica:



Gráfica 112. Porcentaje que abarca cada categoría de peligro en la superficie del estado.

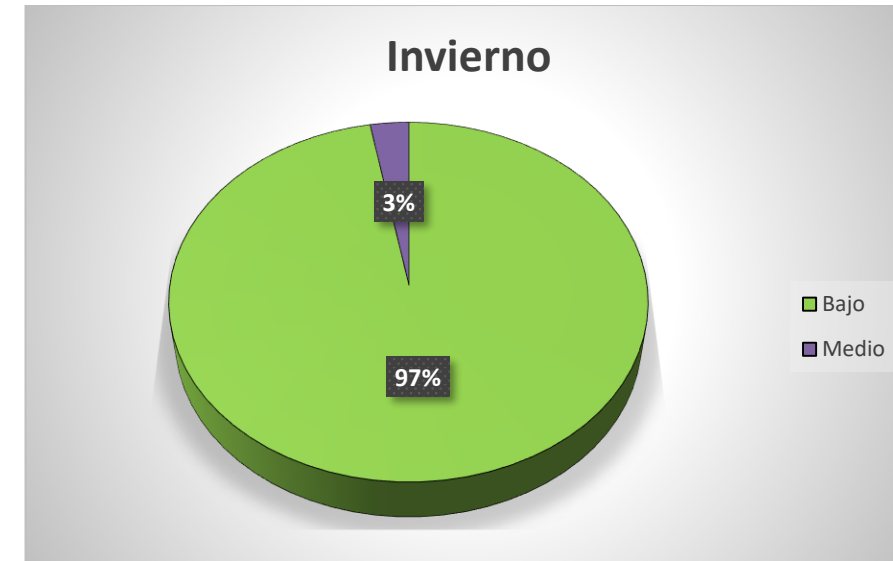


Mapa 160. Mapa IPIF Otoño.

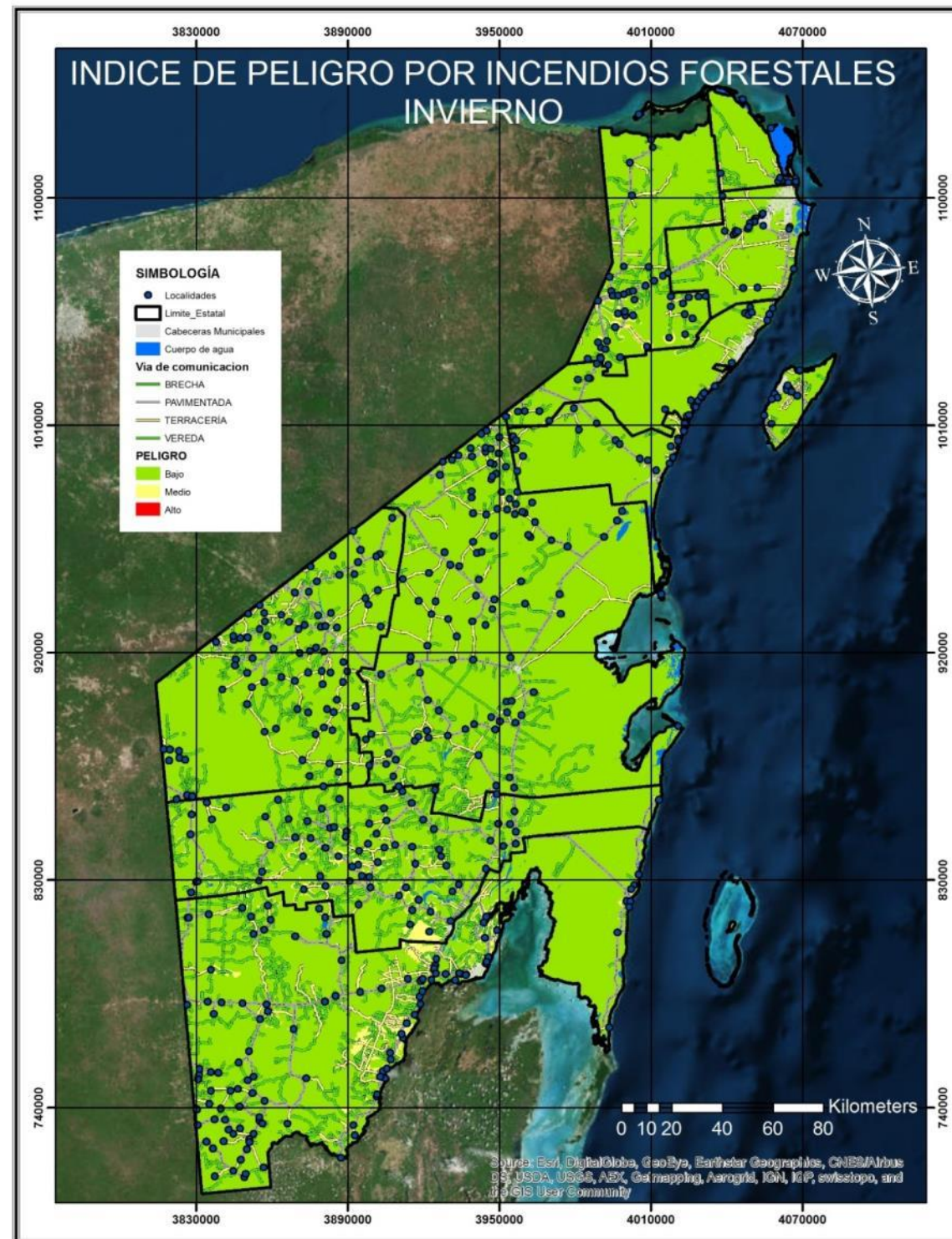
Invierno

El invierno no representa ningún índice de peligro alto; sin embargo, empieza a tener un pequeño incremento del 3% de IPIF (medio). Es probable que se deba a que la precipitación comienza a disminuir.

Como se muestra en el mapa de invierno, las zonas con peligro medio son los municipios de Othón P. Blanco y Bacalar.



Gráfica 113. Porcentaje que abarca cada categoría de peligro en la superficie del estado.



Mapa 161. Mapa IPIF Invierno.

Los incendios forestales son resultado de diversos factores; sin embargo, su manifestación en ocasiones obedece a un patrón determinado. Con frecuencia, las áreas de mayor índice se encuentran cercanas a vías de comunicación, poblaciones, actividades socioeconómicas, áreas de aprovechamiento, etcétera.

Los resultados obtenidos revelan que los incendios forestales han sido un fenómeno significativo. La mayor parte de éstos se reportaron en los meses de marzo, abril y mayo, que comprenden la estación primavera.

Las actividades agropecuarias fueron las principales causas de los incendios reportados por el CONAFOR para la estación de primavera. No se reportaron incendios por causas naturales, aunque no podríamos descartar que pudieran ocurrir por algún agente natural (un rayo, por ejemplo). La vegetación más afectada fue la selva mediana y alta subperennifolia, seguida de las selvas bajas.

Los huracanes han sido un amplificador que genera mucho material combustible, el cual hace que la magnitud del incendio sea mayor. Los municipios más afectados por el IPIF fueron: Benito Juárez, Isla Mujeres, Lázaro Cárdenas, José María Morelos, Bacalar, y Othón P. Blanco. La temporada de incendios comienza en febrero y termina en mayo.

1. Primavera mayor incendios.
2. Actividad socioeconómica, una de las principales causas.
3. Factor meteorológico influye directamente en la cantidad de humedad del combustible.
4. Mayo termina temporada de incendios.
5. El paso de los huracanes influye en la generación de material combustible forestal.

5.3.5 Medidas de prevención y mitigación

Plan de manejo para la reducción de material combustible forestal o modificación de su continuidad horizontal o vertical, según sea el caso. Podas, aclareos y quemas prescritas del sotobosque, siguiendo las especificaciones técnicas de uso de fuego de la NOM 015- SEMARNAT/SAGARPA 2007.

Instalación de brigadas, torres de observación, brechas corta fuego, vuelos aéreos en donde haya detección de conglomerados de puntos de calor, en los municipios en los que el IPIF es alto.

Además de lo anterior, se recomienda que los productores agropecuarios consulten y apliquen:

- Brigadas.
- Manual de quemas prescritas.
- Comité cada año para nuevas medidas de mitigación.
- Dar cursos en los ejidos donde se concentra mayor índice de peligro.

5.3.6 Referencias bibliográficas

Colombia, P. A. E. (2010). Boletín páramostrar, (11). Retrieved from http://www.condesan.org/ppa/sites/default/files/recursos/archivos/paramostrar_11.pdf

Cruz, R. R. (2012). Incenos Forestales, 12–13.

Dur, V. E. Z., Investigador, F. G., Manejo, R., Sustentable, F., Xelhuantzi, J., Investigador, C., ... Sustentable, F. (n.d.). No Title.

Fuego, D. E. L. (n.d.). No Title.

Guía para la selección de Modelos de Combustible Usados en la Estimación del Comportamiento del Fuego. (1982). Standar Fire Behavior Fuel Models : A Comprehensive Set Use With Rothermel,s Surface Fire Spread Model.

<http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/7/4339Campa%C3%B1a%20de%20contra%20incendios%202013.pdf>

WorldClim-Global de datos del clima, <http://www.worldclim.org/>

Chávez D. A. A.; Flores G. J. G., Xelhuantzi C. J. 2011. Sistema para el Cálculo De Combustibles forestales. Campo Experimental Centro Altos de Jalisco, CIRPAC, INIFAP. Folleto Técnico Núm. 4. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México.

La Norma oficial mexicana NOM-015-SEMARNAT/SAGARPAS 2007

Puntos de calor CONABIO: http://conabio.gob.mx/conocimientos/puntos_calor/doctos/puntos_calor.

VI. Vulnerabilidad social

6.1 Introducción

La vulnerabilidad, el peligro y el sistema expuesto son tres conceptos fundamentales que componen el riesgo, y que son necesarios estudiar por separado para comprender el sistema que conforman. En lo que se refiere al primero, el Atlas Estatal de Riesgos del Estado de Quintana Roo. Fase I: Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo, consideró el análisis de la vulnerabilidad física y social.

El presente documento incluye los trabajos realizados a partir de la metodología del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED),¹²⁰ para estimar la vulnerabilidad social de la población. Es importante señalar que ésta no sólo identifica el municipio o las localidades más susceptibles de registrar impactos negativos a consecuencia de un fenómeno natural o antropogénico extremo, sino que también muestra múltiples áreas de oportunidad que de atenderse incidirían directamente en la calidad de vida de la población y, evidentemente, en el fortalecimiento de la misma para enfrentar los riesgos que la circundan. Como menciona Allan Lavell, “los desastres son problemas no resueltos del desarrollo”.¹²¹

6.2 Metodología

El CENAPRED define la vulnerabilidad social como el “conjunto de características sociales y económicas de la población que limita la capacidad de desarrollo de la sociedad, en conjunto con la capacidad de prevención y respuesta de la misma frente a un fenómeno y la percepción social del riesgo de la población”.¹²² En la Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos se sugiere elaborar un índice, con base en tres componentes que se ajustan a dicha definición:

¹²⁰ CENAPRED, *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Riesgo*.

¹²¹ Lavell, Allan, “Desastres y desarrollo: Hacia un entendimiento de las formas de construcción social de un desastre: el caso del huracán Mitch en Centroamérica”, en *Del desastre al desarrollo sostenible: El caso de Mitch en Centroamérica*, publicado por el BID Y CIDHS, 2000.

¹²² CENAPRED, *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Evaluación de la vulnerabilidad física y social*. P. 75-104.

Indicadores económicos y sociales (IES). Consiste en el análisis de información estadística relacionada con las condiciones básicas de bienestar y desarrollo de la población.

Capacidad de respuesta de los municipios (CR). Se obtiene de la aplicación de un cuestionario a las autoridades responsables de protección civil a nivel municipal.

Percepción local del riesgo de la población (PLR). Se adquiere a través del levantamiento de encuestas en los municipios.

Es importante mencionar que el índice de vulnerabilidad social, con los tres componentes enlistados anteriormente, únicamente se obtuvo a nivel municipal. Sin embargo, el análisis de los indicadores económicos y sociales se llevó a cabo a nivel de localidades rurales y de manzanas, en el caso de las localidades urbanas.

Para el caso de la capacidad de respuesta, se analizó la información obtenida de los cuestionarios aplicados a los directores de las unidades municipales de protección civil.

En cuanto a la percepción local del riesgo, se conformó una base de datos con las encuestas levantadas y se interpolaron los resultados, obteniendo un mapa para todo el estado.

El Índice de Vulnerabilidad Social (IVS) se obtuvo entonces de los valores obtenidos del análisis de los ISE, CR y PLR, asignándoles un peso de 50% para el primero y de 25% para los otros dos:

$$IVS = (ISE * 0.50) + (CP * 0.25) + (PLR * 0.25)$$

Básicamente, la metodología utilizada para la obtención del índice de Vulnerabilidad Social fue la publicada por el CENAPRED. Sin embargo, el análisis no se realizó únicamente a nivel municipal. En lo que respecta a los indicadores socioeconómicos se replicó el ejercicio en localidades rurales y en ciudades. En algunos casos se modificó ligeramente, dadas algunas justificaciones que a lo largo de todo el documento se detallarán.

Quizá, la adaptación más importante que se realizó de la metodología del CENAPRED fue que se dio mayor énfasis en la representación cartográfica de la percepción local de riesgos, ya que se consideró que, si su percepción es limitada con respecto a los riesgos que le circundan y existe un desconocimiento de cómo actuar o a quién acudir en caso de una emergencia, éste se seguirá reconstruyendo y las muertes asociadas a la ocurrencia de fenómenos naturales y antrópicos seguirán sucediendo, independientemente del sistema expuesto, los peligros y la vulnerabilidad de las personas, así como de las acciones de prevención que se implementen.

6.3 Indicadores socioeconómicos

Existen ciertas particularidades de la población que la hacen más, o menos, vulnerable ante el impacto de fenómenos naturales o antropogénicos: Carencias en la educación, acceso a la salud, oportunidades de empleo y calidad de la vivienda son solo algunos de los factores que influyen, no sólo en la susceptibilidad de sufrir daños o pérdidas a consecuencia de un desastre, sino en la capacidad de recuperación de las personas.

Como se mencionó anteriormente, los desastres son problemas no resueltos del desarrollo, es decir, las condiciones socioeconómicas de las personas inciden directamente en su vulnerabilidad. De igual forma, el desastre también impacta claramente en el desarrollo o atraso de las regiones afectadas.

En este sentido, y con el fin de conocer la situación de los 10 municipios, las ciudades más importantes y las más de 500 localidades del estado, se utilizaron 17 indicadores a nivel municipal y 15 a nivel de localidades rurales y manzanas para

determinar el grado de vulnerabilidad social.

El CENAPRED propone 18 indicadores; sin embargo, el INEGI dejó de publicar en el Censo de Población y Vivienda 2010 dos de ellos, por lo que no fue posible utilizarlos. Asimismo, se seleccionó uno nuevo relacionado con el tema de género, ya que es un tema relevante en la agenda estatal y nacional.

Los indicadores se agruparon en cinco grandes grupos, según lo indicado en la metodología del CENAPRED. En la siguiente tabla se pueden observar los empleados en esta primera etapa del Índice de Vulnerabilidad Social.

Tabla 165. Indicadores socioeconómicos empleados según nivel de análisis

Grupo	Indicador	Municipio	Localidades rurales	Ciudades (Manzanas)
Salud	Número de médicos por cada mil habitantes	x	X	
	Porcentaje de población no derechohabiente	x	X	x
Educación	Porcentaje de población analfabeta	x	X	x
	Porcentaje de población de 6 a 14 años que asiste a la escuela	x	X	x
	Grado promedio de escolaridad	x	X	x
Vivienda	Porcentaje de viviendas sin servicio de energía eléctrica	x	X	x
	Porcentaje de viviendas sin servicio de agua entubada	x	X	x
	Porcentaje de viviendas sin servicio de drenaje	x	X	x
	Porcentaje de viviendas con piso de tierra	x	X	x
	Déficit de vivienda	x		
Empleo e ingresos	Tasa de desempleo abierto	x	X	x
	Razón de dependencia	x	X	x
Población	Porcentaje de población con limitación en la actividad	x	X	x
	Porcentaje de población de 5 años y más que habla alguna lengua indígena	x	X	x
	Porcentaje de hogares con jefatura femenina	x	X	x
	Dispersión poblacional	x		
	Densidad de población	x		

Fuente: Elaboración propia con información del CENAPRED.

La mayoría de los indicadores se calcularon con base en el Censo Nacional de Población 2010. Cuando fue posible, y las fuentes de información lo permitieron, se utilizaron datos más recientes.

Es importante aclarar que los rangos publicados en la metodología del CENAPRED fueron ajustados, ya que éstos son aplicables a nivel nacional y de haberse utilizado como se sugiere no hubieran reflejado la situación a nivel estatal o local. El método utilizado para establecer los rangos que definieron la condición de vulnerabilidad de cada indicador fue el de intervalos iguales

Análisis a nivel municipal

Los resultados de cada indicador se presentan en la siguiente tabla para facilitar su comprensión y análisis. De igual forma, se elaboró un mapa temático para representar espacialmente la condición de vulnerabilidad de cada municipio.

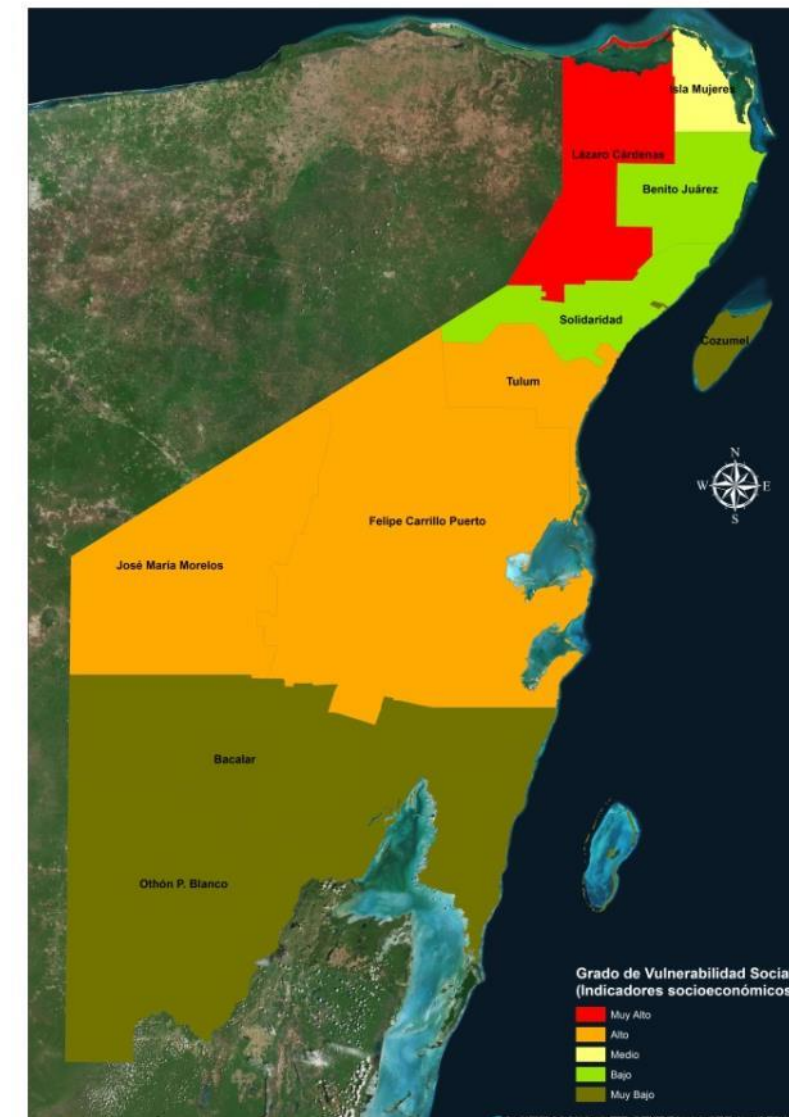
En términos generales, Lázaro Cárdenas registro una condición de vulnerabilidad social Muy Alta relacionada con los indicadores socioeconómicos calculados, José María Morelos, Tulum y Felipe Carrillo Puerto Alta, Isla Mujeres Media, Benito Juárez y Solidaridad Baja y Cozumel, Bacalar y Othón P. Blanco Muy Baja.

Tabla 166. Condición de vulnerabilidad social según cada indicador a nivel municipal

Indicador	Cozumel	Felipe Carrillo Puerto	Isla Mujeres	Othón P. Blanco	Benito Juárez	José María Morelos	Lázaro Cárdenas	Solidaridad	Tulum	Bacalar*
Número de médicos por cada mil habitantes	2.58	1.61	1.79	3.09	2.41	1.08	0.79	0.95	0.04	3.09
Porcentaje de población no derechohabiente	25.86	25.24	27.75	23.48	32.02	20.53	26.27	34.56	45.60	23.48
Porcentaje de analfabetismo	3.47	14.00	4.04	7.06	2.77	13.63	12.47	2.73	8.10	7.06
Porcentaje de población de 6 a 14 años que asiste a la escuela	96.70	96.66	93.51	95.92	95.76	97.43	95.88	93.79	95.22	95.92
Grado promedio de escolaridad	9.11	7.34	8.30	8.79	9.59	6.87	6.94	9.54	8.06	8.79
Porcentaje de viviendas sin servicio de agua entubada	5.10	7.93	22.01	5.14	10.69	9.33	14.06	1.44	10.64	5.14
Porcentaje de viviendas sin servicio de drenaje	0.78	35.45	4.72	5.60	1.27	33.22	24.45	0.53	11.03	5.60
Porcentaje de viviendas sin servicio de energía eléctrica	1.07	4.89	8.06	2.24	1.71	5.55	5.97	0.65	3.48	2.24
Porcentaje de viviendas con piso de tierra	1.33	8.55	4.41	5.51	2.86	11.40	8.09	1.72	4.57	5.51

Déficit de vivienda	2.36	8.85	7.04	6.08	5.71	11.83	8.55	5.70	6.78	6.08
Razón de dependencia	51.26	70.66	52.99	56.70	46.46	75.92	70.72	42.41	55.47	56.70
Tasa de desempleo abierto	2.79	2.49	2.64	2.62	3.57	1.03	3.13	3.60	2.14	2.62
Densidad de población	155.57	5.68	16.44	16.80	318.55	7.74	7.67	46.56	46.56	16.80
Porcentaje de población de habla indígena	13.21	70.33	13.70	10.51	12.68	59.44	51.68	19.36	44.93	10.51
Porcentaje de población con alguna limitación	3.03	3.15	3.21	2.61	4.20	2.64	4.00	4.26	2.45	2.48
Porcentaje de hogares con jefatura femenina	23.73	15.96	23.39	25.04	23.26	13.66	12.99	22.27	19.10	25.04
Dispersión poblacional	2.89	45.05	5.60	26.42	0.34	59.59	71.78	2.14	35.49	26.42
Grado de vulnerabilidad social (Indicadores socioeconómicos)	Muy Bajo	Alto	Medio	Muy Bajo	Bajo	Alto	Muy Alto	Bajo	Alto	Muy Bajo

Fuente: Elaboración propia.



Mapa 162. Grado de vulnerabilidad social (Indicadores socioeconómicos). Fuente: GLH, 2015.

Al hacer un análisis por cada grupo de indicadores, se pudo observar que en los relacionados con el rubro de salud la situación es bastante homogénea en la mayoría de los municipios, puesto que predomina una condición de vulnerabilidad entre Baja y Muy Baja. Sin embargo, el caso de Tulum llama la atención, pues fue el único municipio en el cual se presentó una condición de vulnerabilidad Muy Alta. Lo anterior podría ser producto de su reciente creación, ya que en 2009 se fundó oficialmente, y aunque Bacalar es el municipio más nuevo de la entidad,

Tabla 167. Indicadores del grupo de salud y su condición de vulnerabilidad a nivel municipal

Indicador	Condición de vulnerabilidad	Gráfico
-----------	-----------------------------	---------

	(Número de municipios)					(Condición de vulnerabilidad)
	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto	
Número de médicos por cada mil habitantes	7	2	0	0	1	
Porcentaje de población no derechohabiente	4	3	2	0	1	

Fuente: Elaboración propia con información del INEGI y del Instituto Nacional de Salud Pública.

En lo que refiere al rubro de educación, siguen predominando los municipios con una condición de vulnerabilidad Muy Baja y Baja según cada indicador, aunque también se observa un aumento en el número de municipios con una condición de vulnerabilidad Muy Alta para algunos indicadores, particularmente en el grado promedio de escolaridad, que a nivel estatal es de 9.1 años (secundaria terminada). Sin embargo, para municipios como José María Morelos y Lázaro Cárdenas se obtienen poco más de 6 años, niveles similares a los que se registran en Chiapas y Oaxaca, los estados con los niveles de escolaridad más bajos a nivel nacional.

El porcentaje de población analfabeta en el estado es de 4.8%, que equivale a 63,628 habitantes. Los municipios en los que existe una mayor proporción son Felipe Carrillo Puerto (14.0%), José María Morelos (13.6%) y Lázaro Cárdenas (12.5%). En Solidaridad y Benito Juárez los niveles de analfabetismo son mínimos.

Tabla 168. Indicadores del grupo de educación y su condición de vulnerabilidad

Indicador	Condición de vulnerabilidad (Número de municipios)					Gráfico (Condición de vulnerabilidad)
	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto	

Porcentaje de analfabetismo	4	2	1	0	3	
Porcentaje de población de 6 a 14 años que asiste a la escuela	3	3	2	0	2	
Grado promedio de escolaridad	3	2	2	0	3	

Fuente: Elaboración propia con información del INEGI.

Los indicadores de vivienda reflejan una cobertura del servicio de agua entubada a nivel estatal de 89.7%, aunque se observa una amplia brecha entre los municipios más urbanizados con respecto a los predominantemente rurales. Por ejemplo, en Solidaridad únicamente el 1.4% de las viviendas no cuentan con este servicio, mientras que en Isla Mujeres, sobre todo en la parte continental del municipio, la proporción se eleva al 22%.

En el servicio de drenaje es, justamente, en donde la brecha se amplía: mientras que en Solidaridad y Cozumel menos del 1% de las viviendas no cuentan con este servicio, en Felipe Carrillo Puerto y José María Morelos la proporción asciende a más del 30%.

La cobertura de energía eléctrica en el estado es del 96.2%, y a nivel municipal las cifras no varían mucho. El municipio más rezagado en este rubro es Isla Mujeres, en donde el 8.1% de las viviendas no disponen de este servicio.

El porcentaje de viviendas con piso de tierra tampoco es muy elevado a nivel estatal, ya que sólo en José María Morelos rebasa el 10%. Lo anterior, es producto de los diversos apoyos otorgados por los tres órdenes de gobierno.

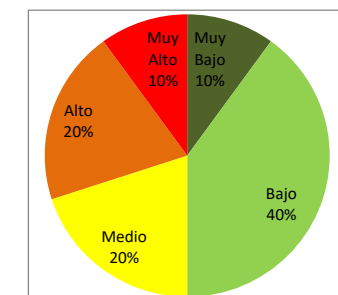
Por último, se observó que el déficit de vivienda tampoco es elevado, salvo en José María Morelos, Felipe Carrillo Puerto y Lázaro Cárdenas que presentan una condición de vulnerabilidad Muy Alta y Alta por este indicador.

Tabla 169. Indicadores del grupo de vivienda y su condición de vulnerabilidad

Indicador	Condición de vulnerabilidad (Número de municipios)					Gráfico (Condición de vulnerabilidad)
	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto	
Porcentaje de viviendas sin servicio de agua entubada	1	3	1	3	2	
Porcentaje de viviendas sin servicio de drenaje	6	1	1	0	2	
Porcentaje de viviendas sin servicio de energía eléctrica	3	3	1	2	1	
Porcentaje de viviendas con piso de tierra	4	2	1	2	1	

Déficit de vivienda

1 4 2 2 1



Fuente: Elaboración propia con información del INEGI.

Los dos indicadores utilizados en el grupo de empleo e ingresos fueron la razón de dependencia y la tasa de desempleo abierto. En el caso de la primera, los municipios de José María Morelos, Lázaro Cárdenas y Felipe Carrillo Puerto registraron una mayor dependencia, ya que más de 70 personas, por cada 100, son dependientes.

En relación con la tasa de desempleo abierto, el municipio de solidaridad presenta la condición de vulnerabilidad más alta. Cabe señalar que en el caso del estado, particularmente en los municipios con vocación turística, este indicador es muy variable, ya que en temporadas bajas puede rebasar los cuatro puntos porcentuales. Sobresale también que en los meses de menor afluencia turística (septiembre y octubre), es justo cuando la temporada de huracanes está en su etapa más álgida.

Tabla 170. Indicadores del grupo de empleo e ingresos y su condición de vulnerabilidad

Indicador	Condición de vulnerabilidad (Número de municipios)					Gráfico
	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto	
Razón de dependencia	2	3	2	0	3	

Tasa de desempleo abierto	1	2	1	3	3	
---------------------------	---	---	---	---	---	--

Fuente: Elaboración propia con información del INEGI.

Por último, en cuanto al grupo de indicadores de Población, se observó que en la mayoría de los municipios la densidad de población registra una condición de vulnerabilidad entre Muy Baja y Baja. Sin embargo, en Cozumel y Benito Juárez la concentración de la población podría acrecentar la probabilidad de sufrir afectaciones a consecuencia de un evento desastroso.

En el Estado de Quintana Roo el 16% de la población habla alguna lengua indígena. De cada 100 personas con esta particularidad, 14 no hablan español. A nivel municipal, Felipe Carrillo Puerto, José María Morelos, Lázaro Cárdenas y Tulum se consideraron predominantemente indígenas, pues más del 40% de sus habitantes habla alguna lengua.

Se considera "población con limitaciones en la actividad" a todas aquellas personas que presentan alguna dificultad para realizar tareas básicas de la vida diaria, como caminar, moverse, ver, escuchar, hablar, atender su cuidado, poner atención o aprender. Este grupo poblacional es más vulnerable que otros por factores de movilidad, principalmente. En este sentido, los municipios de Benito Juárez, Solidaridad y Lázaro Cárdenas presentaron una mayor proporción de habitantes con estas características.

El tema de género ha cobrado importancia en la última década, y al igual que la gestión integral de riesgos se debe abordar desde una perspectiva transversal. Por tal motivo, se consideró incluir como indicador el porcentaje de hogares con jefatura femenina.

Por lo general, en caso de desastre las mujeres se ven afectadas de distinta manera que los hombres, dada su condición social, las responsabilidades familiares y el rol que desempeñan en dicha estructura. Sin embargo, esto no necesariamente las hace vulnerables; no siempre es cuestión de género.

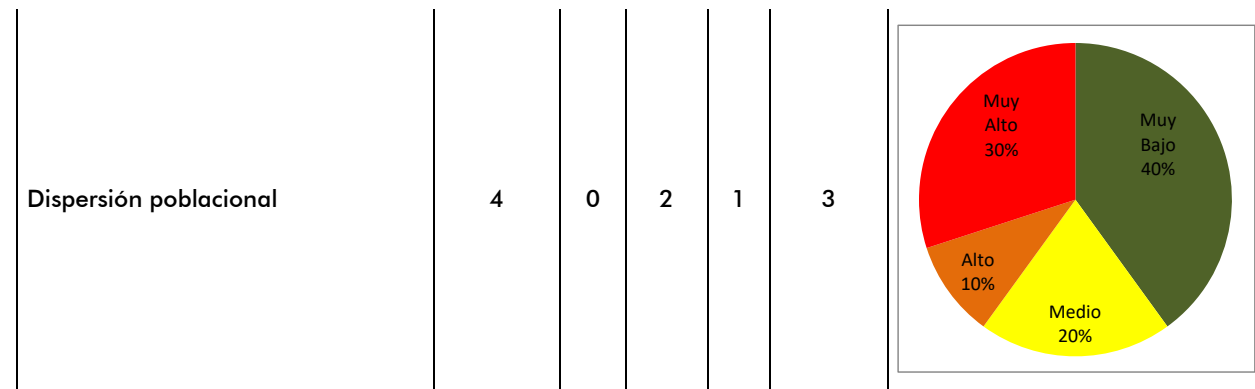
Cuando la responsabilidad de un hogar recae únicamente en la jefa de familia, su incorporación al mercado laboral se da, generalmente, en el sector informal.¹²³ Lo anterior conlleva a múltiples factores que elevan su condición de vulnerabilidad. En el caso de Quintana Roo, los municipios de Bacalar, Othón P. Blanco, Cozumel, Benito Juárez e Isla Mujeres registraron más del 20% de hogares con jefatura femenina.

Tabla 171. Indicadores del grupo de población y su condición de vulnerabilidad

Indicador	Condición de vulnerabilidad	Gráfico
-----------	-----------------------------	---------

	(Número de municipios)					
	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto	
Densidad de población	6	2	0	0	2	
Porcentaje de población de habla indígena	6	0	0	0	4	
Porcentaje de población con alguna limitación	4	2	1	0	3	
Porcentaje de hogares con jefatura femenina	2	1	1	1	5	

¹²³ Chávez Carapia, Julia del Carmen. UNAM. Dirección General de Comunicación Social. Boletín UNAM-DGCS-288.

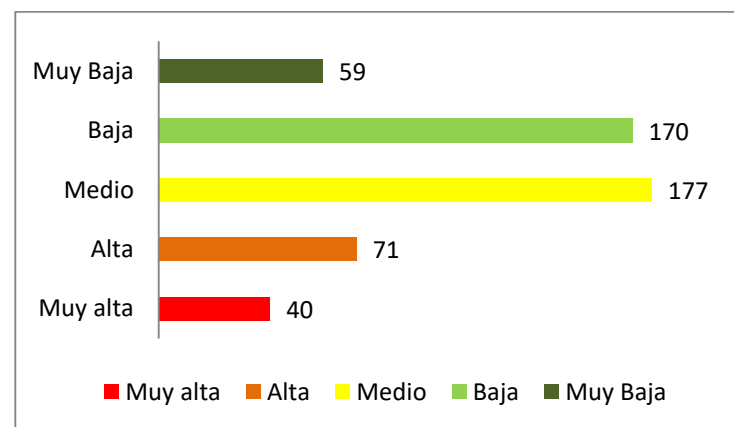


Fuente: Elaboración propia con información del INEGI.

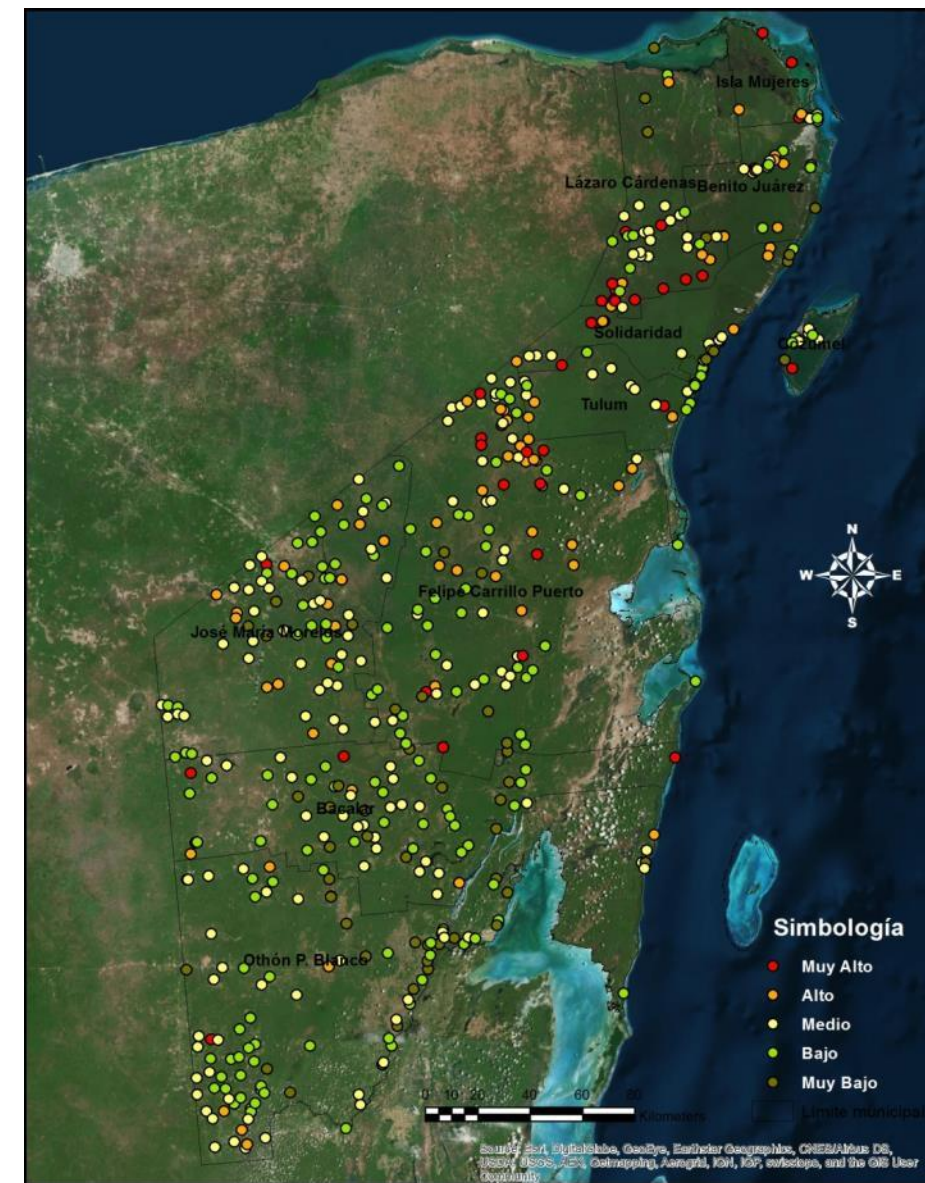
Análisis a nivel localidad

Con el fin de tener una perspectiva más detallada de la situación socioeconómica del Estado, se calcularon los mismos indicadores para las localidades rurales, con excepción de la dispersión poblacional y la densidad de población.

El universo de localidades tomadas en cuenta fue de 553; sin embargo, sólo se realizó el cálculo en 517 de ellas, por ser las que contaban con todos los indicadores. Los resultados obtenidos revelaron que más de dos terceras partes de las localidades analizadas tienen condiciones socioeconómicas que las colocan con un grado de vulnerabilidad social entre Medio y Bajo. También se observó que el 25.1% registraron vulnerabilidad social Alta y Muy Alta.



Gráfica 114. Número de localidades según su grado de vulnerabilidad social, basado en sus características socioeconómicas.



Mapa 163. Grado de vulnerabilidad social con base en los indicadores socioeconómicos.

A continuación se describen brevemente los resultados de cada indicador a nivel rural; posteriormente se hará un análisis para cada uno de los municipios.

La proporción de médicos por habitantes para la población rural del estado refleja una condición de vulnerabilidad Muy Alta para aproximadamente el 75% de las localidades analizadas, ya que no existe ni un sólo médico en ellas. La atención médica después de un desastre es primordial para salvaguardar la vida y la salud de la población.

Por otro lado, la proporción de población no derechohabiente arrojó resultados inversos, es decir, que aproximadamente el 72% de las localidades rurales registran una condición de vulnerabilidad entre Baja y Muy Baja.

Si bien estos resultados pudieran reflejar cierta incongruencia, lo cierto es que a partir de la instauración del Seguro

Popular, un importante porcentaje de la población accedió a este servicio; sin embargo, para poder atenderse tienen que trasladarse de sus localidades de origen a las clínicas incorporadas a dicho programa, en las cuales la presencia de personal médico es prácticamente nula.

Tabla 172. Indicadores del grupo de salud y su condición de vulnerabilidad en localidades rurales

Indicador	Condición de vulnerabilidad (Número de localidades)						Gráfico
	Muy Alta	Alta	Media	Baja	Muy Baja	Sin datos	
Número de médicos por cada mil habitantes	415	0	4	5	98	31	
Porcentaje de población no derechohabiente	22	37	60	212	189	36	

Fuente: Elaboración propia con información del INEGI y del INSP.

En el grupo de indicadores de educación se obtuvieron, en general, condiciones de vulnerabilidad Bajas y Muy Bajas. En el caso de la población analfabeta, en el 57% de las localidades dos de cada 10 personas tienen esta característica. En aproximadamente 10% de las localidades, el porcentaje de población que no sabe leer ni escribir superó el 30%.

En cuanto a la cobertura de educación básica, el 83% de las localidades presentaron una condición de vulnerabilidad Muy Baja, ya que en ellas más del 80% de la población de seis a 14 años asiste a la escuela.

Con relación al grado promedio de escolaridad, de acuerdo con los datos obtenidos el 38% de las localidades registraron una condición de vulnerabilidad Media. Lo anterior se debe a que en dichas localidades el grado promedio de escolaridad es de entre 3.95 y 5.91 años, es decir, primaria inconclusa. También sobresale el hecho de que para el 23% de las localidades no se obtuvo información.

Tabla 173. Indicadores del grupo de educación y su condición de vulnerabilidad en localidades rurales

Indicador	Condición de vulnerabilidad (Número de localidades)						Gráfico
	Muy Alta	Alta	Media	Baja	Muy Baja	Sin datos	
Porcentaje de analfabetismo	20	30	152	201	114	36	
Porcentaje de población de 6 a 14 años que asiste a la escuela	7	4	10	24	458	50	
Grado promedio de escolaridad	2	26	208	139	51	127	

Fuente: Elaboración propia con información del INEGI.

Los indicadores de vivienda nos dan una idea de la cobertura de servicios básicos, como lo son drenaje, agua entubada y energía eléctrica. Asimismo, muestran la proporción de viviendas con piso de tierra.

En este sentido, en lo que respecta a la proporción de viviendas sin servicio de agua entubada, en el 56% de las localidades la condición de vulnerabilidad es Muy Baja, es decir, menos del 20% de las viviendas no cuentan con este servicio. Llama la atención que en el 22% de las localidades, más del 80% de las viviendas no tenía agua entubada.

En lo que se refiere a la proporción de viviendas que no cuentan con drenaje, en el 30% de las localidades la condición de vulnerabilidad asociada a este indicador fue Muy Baja; sin embargo, en el 32% se registraron niveles Altos y Muy Altos.

El servicio de energía eléctrica es el que mayor cobertura presentó a nivel estatal, puesto que en 76% de las localidades fue superior al 80%; únicamente en 40 localidades la condición de vulnerabilidad fue Muy Alta.

Por último, al porcentaje de viviendas con piso de tierra también se le asoció una condición de vulnerabilidad Muy

Baja, puesto que en 381 localidades, que representan el 74%, el número de viviendas con piso de tierra fue menor al 20%.

conveniente contar con datos a cerca del porcentaje de la población económicamente activa que se encuentra ocupada en los sectores informales.

Tabla 174. Indicadores del grupo de vivienda y su condición de vulnerabilidad en localidades rurales

Indicador	Condición de vulnerabilidad (Número de localidades)						Gráfico
	Muy Alta	Alta	Media	Baja	Muy Baja	Sin datos	
Porcentaje de viviendas sin servicio de agua entubada	119	15	24	49	310	36	
Porcentaje de viviendas sin servicio de drenaje	98	78	80	96	165	36	
Porcentaje de viviendas sin servicio de energía eléctrica	40	16	15	28	418	36	
Porcentaje de viviendas con piso de tierra	16	12	26	82	381	36	

Fuente: Elaboración propia con información del INEGI.

Al igual que en los indicadores de salud, en los de empleo e ingresos se observaron fuertes contrastes en los dos indicadores utilizados. Mientras que para la razón de dependencia el 69% de las localidades registraron una condición de vulnerabilidad entre Alta y Muy Alta, para la tasa de desempleo abierto se invirtió la proporción, puesto que el 87% de las localidades registraron una condición de vulnerabilidad Muy Baja. En lo que se refiere a este último indicador, sería

Tabla 175. Indicadores del grupo de empleo e ingresos y su condición de vulnerabilidad en localidades rurales

Indicador	Condición de vulnerabilidad (Número de localidades)						Gráfico
	Muy Alta	Alta	Media	Baja	Muy Baja	Sin datos	
Razón de dependencia	155	228	86	30	18	36	
Tasa de desempleo abierto	4	3	9	20	481	36	

Fuente: Elaboración propia con información del INEGI.

Por último, en los indicadores de población sobresale el hecho de que casi la mitad de las localidades analizadas se consideraron predominantemente indígenas, puesto que más del 40% de la población de cinco años y más hablaba alguna lengua indígena. Si bien este factor por sí sólo no debiera hacer más o menos vulnerable a una persona, es un hecho que este grupo poblacional es de los más rezagados y marginados a nivel nacional. Además, la comunicación del riesgo y de las medidas de prevención podría no llegarles en su lengua natal, lo que complicaría la comprensión de las mismas.

La condición de vulnerabilidad asociada al porcentaje de población con alguna limitación fue para el 83% de las

localidades Bajo y Muy Bajo, es decir, que menos del 8% de la población de dichas localidades tenía estas características.

Situación similar se observó en el porcentaje de hogares con jefatura femenina, ya que cerca del 90% de las localidades presentó condiciones de vulnerabilidad relacionadas con este indicador entre Bajas y Muy Bajas. Es importante señalar que el porcentaje de hogares con jefatura femenina aumentó exponencialmente en las localidades urbanas, como se verá más adelante.

Tabla 176. Condiciones de vulnerabilidad.

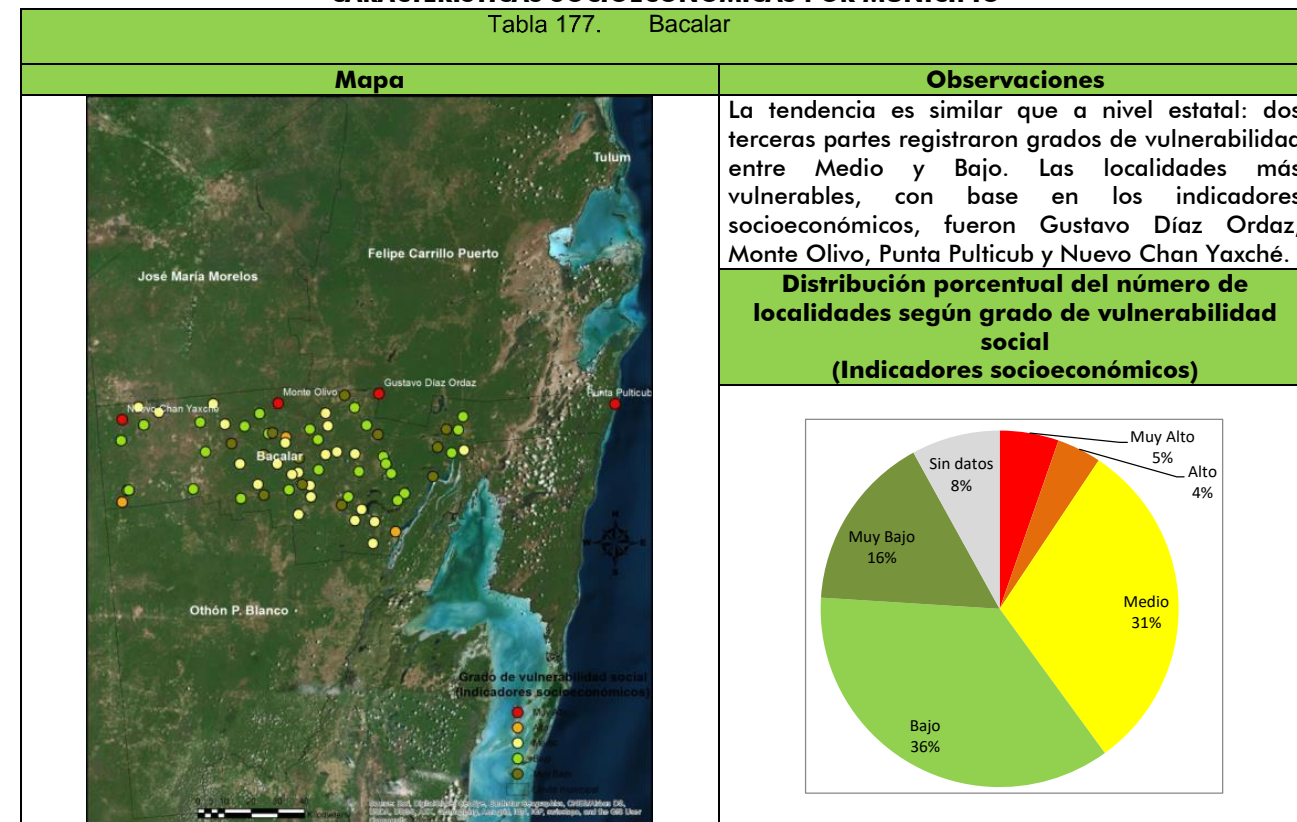
Indicador	Condición de vulnerabilidad (Número de localidades)						Gráfico
	Muy Alta	Alta	Media	Baja	Muy Baja	Sin datos	
Porcentaje de población de habla Indígena	270	0	0	0	247	36	
Porcentaje de población con alguna Limitación	12	20	27	147	311	36	
Porcentaje de hogares con jefatura Femenina	3	3	25	152	334	36	

Fuente: Elaboración propia con información del INEGI.

A continuación se presentan los resultados de las localidades rurales a nivel municipal, con el fin de identificar aquéllas que presentaron las características socioeconómicas menos favorables, mismas que propiciaron que su vulnerabilidad social fuera mayor.

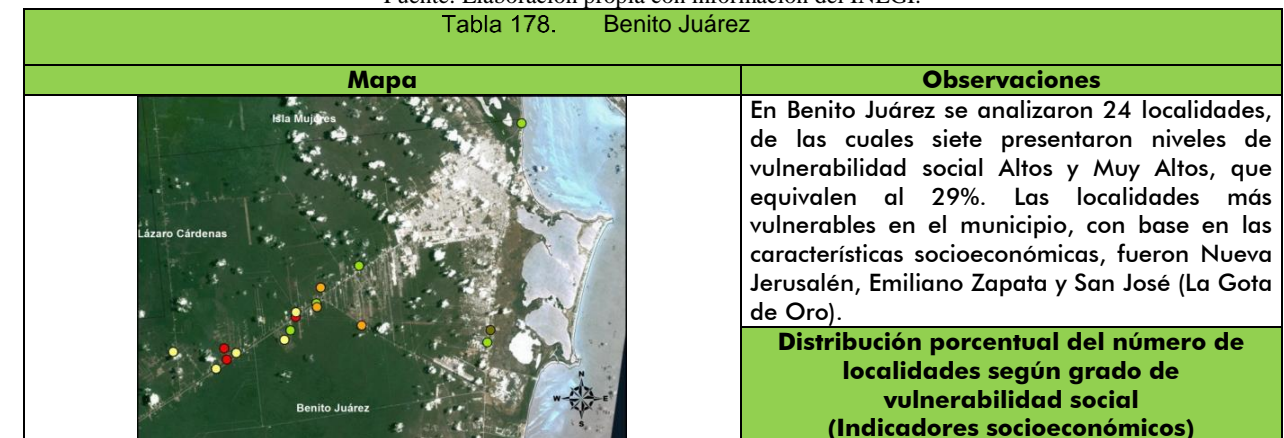
CARACTERÍSTICAS SOCIOECONÓMICAS POR MUNICIPIO

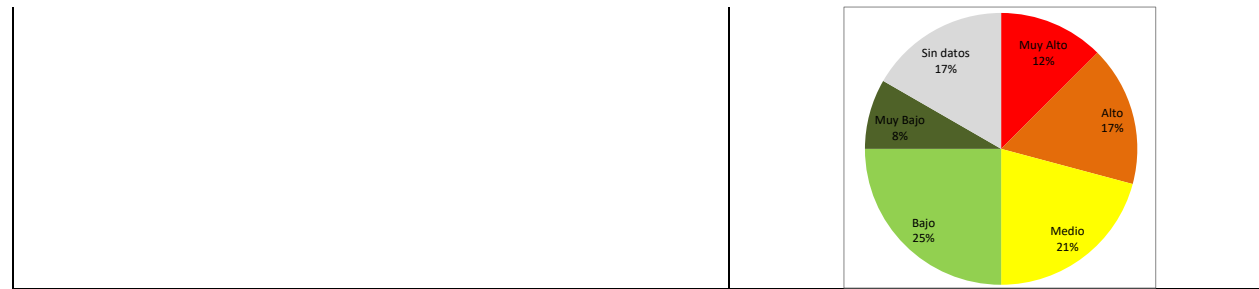
Tabla 177. Bacalar



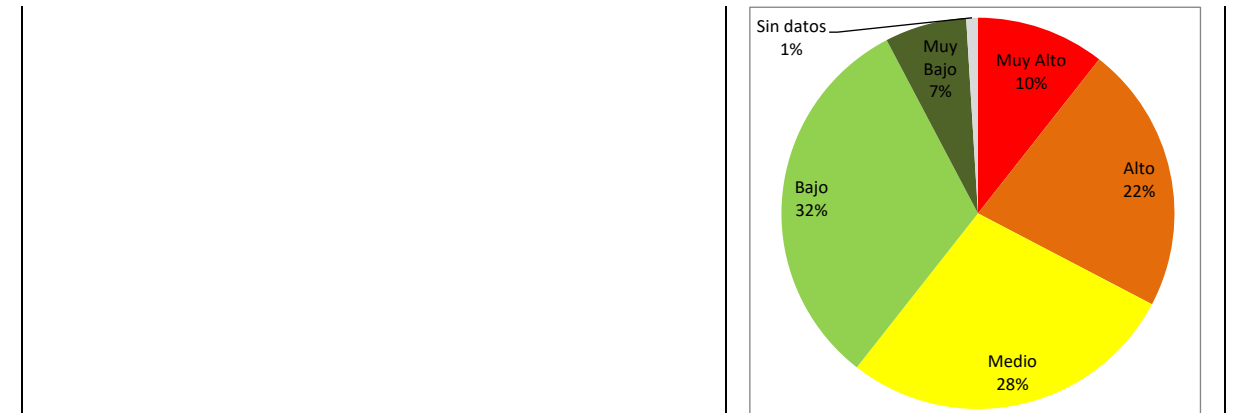
Fuente: Elaboración propia con información del INEGI.

Tabla 178. Benito Juárez





Fuente: Elaboración propia con información del INEGI.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 179. Cozumel															
Mapa	Observaciones														
	<p>Para el municipio de Cozumel se analizaron 25 localidades. El 76% presentaron niveles de vulnerabilidad social entre Bajos y Muy Bajos; solamente la localidad de El Cedral, ubicada al sur de la isla, registró una vulnerabilidad social Muy Alta.</p> <p>Distribución porcentual del número de localidades según grado de vulnerabilidad social (Indicadores socioeconómicos)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Nivel de Vulnerabilidad Social</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Muy Bajo</td> <td>4%</td> </tr> <tr> <td>Sin datos</td> <td>8%</td> </tr> <tr> <td>Muy Alto</td> <td>4%</td> </tr> <tr> <td>Alto</td> <td>8%</td> </tr> <tr> <td>Medio</td> <td>36%</td> </tr> <tr> <td>Bajo</td> <td>40%</td> </tr> </tbody> </table>	Nivel de Vulnerabilidad Social	Porcentaje	Muy Bajo	4%	Sin datos	8%	Muy Alto	4%	Alto	8%	Medio	36%	Bajo	40%
Nivel de Vulnerabilidad Social	Porcentaje														
Muy Bajo	4%														
Sin datos	8%														
Muy Alto	4%														
Alto	8%														
Medio	36%														
Bajo	40%														

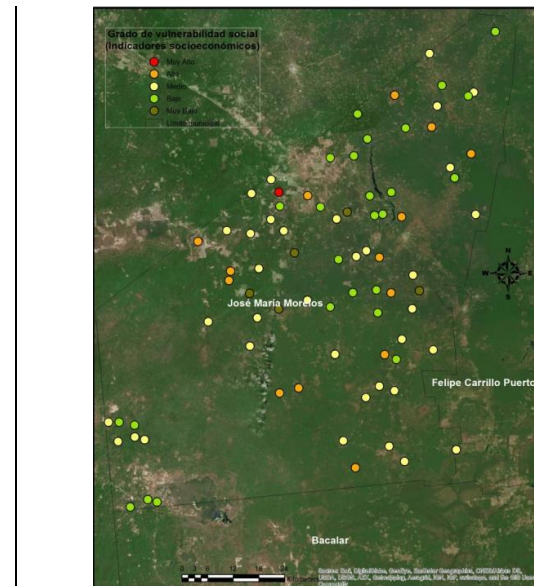
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 181. Isla Mujeres													
Mapa	Observaciones												
	<p>El municipio está conformado por una parte de territorio continental y por tres islas (Isla Mujeres, Isla Contoy e Isla Blanca). De las 15 localidades analizadas, el 40% cuenta con características socioeconómicas que se traducen en grados de vulnerabilidad social Altos y Muy Altos. Cabe destacar que aquellas con niveles bajos se concentran en el sur del municipio, y son prácticamente zonas conurbadas a la ciudad de Cancún.</p> <p>Distribución porcentual del número de localidades según grado de vulnerabilidad social (Indicadores socioeconómicos)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Nivel de Vulnerabilidad Social</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sin datos</td> <td>7%</td> </tr> <tr> <td>Muy Alto</td> <td>27%</td> </tr> <tr> <td>Alto</td> <td>13%</td> </tr> <tr> <td>Medio</td> <td>20%</td> </tr> <tr> <td>Bajo</td> <td>33%</td> </tr> </tbody> </table>	Nivel de Vulnerabilidad Social	Porcentaje	Sin datos	7%	Muy Alto	27%	Alto	13%	Medio	20%	Bajo	33%
Nivel de Vulnerabilidad Social	Porcentaje												
Sin datos	7%												
Muy Alto	27%												
Alto	13%												
Medio	20%												
Bajo	33%												

Fuente: Elaboración propia.

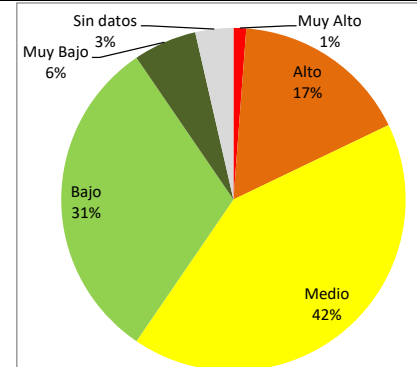
Tabla 180. Felipe Carrillo Puerto	
Mapa	Observaciones
	<p>En Felipe Carrillo Puerto se analizaron 104 localidades, de las cuales una proporción importante (32%) cuenta con condiciones socioeconómicas que derivan en grados de vulnerabilidad social Altos y Muy Altos. Yaxché Chal, Dzaptún, Chun Akidz, X-Hazil Primero y Chan-Yodzonot son las que registraron mayores niveles de vulnerabilidad social. De hecho, en el norte y noroeste del municipio es en donde prevalecen dichas condiciones.</p> <p>Distribución porcentual del número de localidades según grado de vulnerabilidad social (Indicadores socioeconómicos)</p>

Tabla 182. José María Morelos	
Mapa	Observaciones



En José María Morelos predominaron las localidades que por sus condiciones socioeconómicas arrojaron un grado de vulnerabilidad social Medio. Únicamente Uitziná registró niveles Muy Altos de vulnerabilidad social.

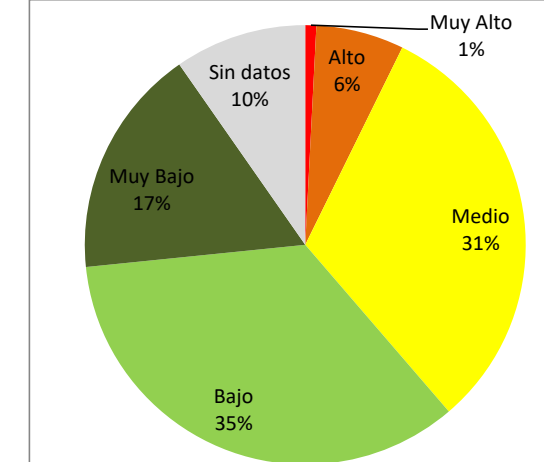
Distribución porcentual del número de localidades según grado de vulnerabilidad social (Indicadores socioeconómicos)



Fuente: Elaboración propia.

asociadas con niveles de vulnerabilidad social Bajos y Muy Bajos. De hecho, sólo Las Tres Huastecas (El Vergel) se consideró con vulnerabilidad social muy Alta.

Distribución porcentual del número de localidades según grado de vulnerabilidad social (Indicadores socioeconómicos)



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 183. Lázaro Cárdenas

Mapa	Observaciones														
	<p>Para Lázaro Cárdenas se analizaron 45 localidades, de las cuales dos terceras partes registraron características socioeconómicas que se relacionaron con grados de vulnerabilidad social Altos y Muy Altos. Particularmente en el sur del municipio prevalecieron dichas condiciones. Yokdzonot, Poxil, Banco de Cenotes y San Carlos fueron las localidades con mayores índice de vulnerabilidad social.</p> <p>Distribución porcentual del número de localidades según grado de vulnerabilidad social (Indicadores socioeconómicos)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Grado de vulnerabilidad social</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Muy Alto</td> <td>24%</td> </tr> <tr> <td>Alto</td> <td>11%</td> </tr> <tr> <td>Medio</td> <td>36%</td> </tr> <tr> <td>Bajo</td> <td>18%</td> </tr> <tr> <td>Muy Bajo</td> <td>9%</td> </tr> <tr> <td>Sin datos</td> <td>2%</td> </tr> </tbody> </table>	Grado de vulnerabilidad social	Porcentaje	Muy Alto	24%	Alto	11%	Medio	36%	Bajo	18%	Muy Bajo	9%	Sin datos	2%
Grado de vulnerabilidad social	Porcentaje														
Muy Alto	24%														
Alto	11%														
Medio	36%														
Bajo	18%														
Muy Bajo	9%														
Sin datos	2%														

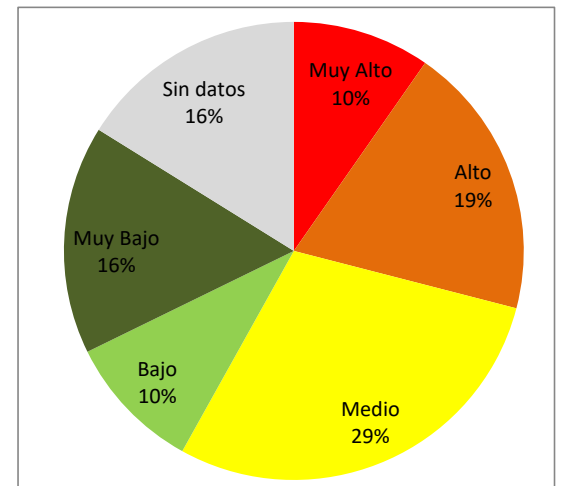
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 185. Solidaridad

Mapa	Observaciones
	<p>De las 31 localidades analizadas en Solidaridad, cerca del 30% presentaron grados de vulnerabilidad social relacionados con sus características socioeconómicas entre Altos y Muy Altos. La mayoría de éstas se localizaron al oeste del municipio. La Ceiba, San Pedro y Guadalupe son las que registraron los niveles más Altos de vulnerabilidad social.</p> <p>Distribución porcentual del número de localidades según grado de vulnerabilidad social (Indicadores socioeconómicos)</p>

Tabla 184. Othón P. Blanco

Mapa	Observaciones
	<p>En Othón P. Blanco se analizaron 124 localidades. Más del 50% presentaron características socioeconómicas</p>



Fuente: Elaboración propia.

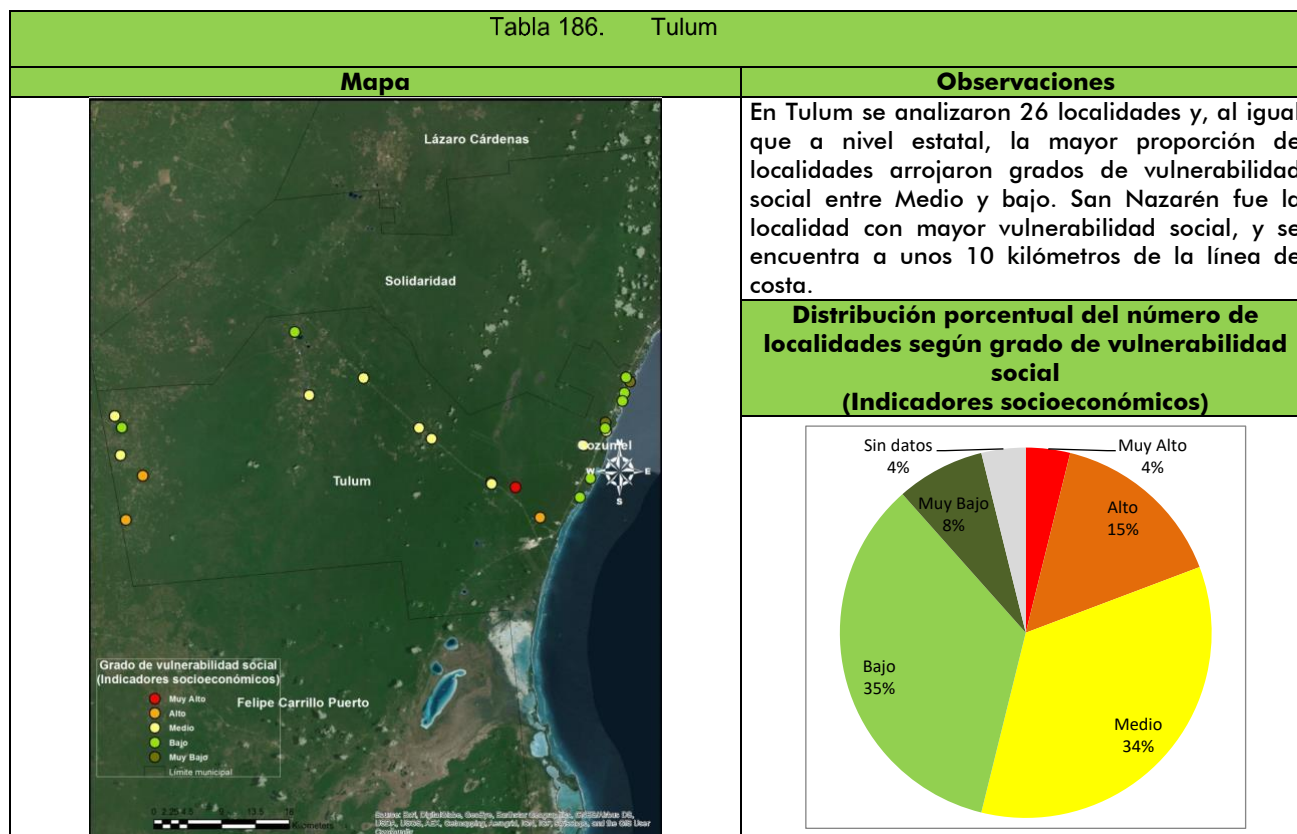
Finalmente, se realizó el mismo ejercicio en las localidades urbanas a nivel de manzana, utilizando los indicadores mencionados anteriormente. El propósito de presentar los resultados a este nivel es dejar en claro que, a pesar de que a nivel municipal pudiera considerarse que la vulnerabilidad social es Muy Baja, cuando se analizan los datos a nivel de localidad y manzana, es posible identificar las regiones en las cuales las condiciones socioeconómicas de la población se traducen en mayores niveles de vulnerabilidad social.

Tabla 187. Localidades urbanas analizadas por municipios

Municipio	Localidades urbanas
Benito Juárez	Cancún, Alfredo V. Bonfil (zona conurbada de Cancún), Leona Vicario y Puerto Morelos
Solidaridad	Playa del Carmen y Puerto Aventuras
Lázaro Cárdenas	Kantunilkin
Othón P. Blanco	Chetumal, Álvaro Obregón, Calderitas, Javier Rojo Gómez, Nicolás Bravo y Sergio Butrón Casas
Isla Mujeres	Isla Mujeres y Ejido Isla Mujeres (Zona conurbada de Cancún)
Cozumel	Cozumel
Felipe Carrillo Puerto	Felipe Carrillo Puerto, Chunhuhub, Señor, Tepich y Tihosuco
José María Morelos	José María Morelos y Dziuché
Bacalar	Bacalar y Limones
Tulum	Tulum

Si bien el ejercicio se llevó a cabo para todas las localidades urbanas del Estado, en este apartado únicamente se muestran los resultados de la cabecera municipal de cada municipio. Sin embargo, la cartografía se puede consultar en el sistema.

Para el caso de la ciudad de Cancún, en el municipio de Benito Juárez, se observaron claramente niveles de vulnerabilidad social mayores en la periferia, sobre todo en las colonias más alejadas del litoral del mar Caribe. Estas zonas, si bien todavía no están densamente pobladas, no sólo presentan niveles de vulnerabilidad altos, sino que la calidad de las viviendas, como se puede constatar en el apartado de vulnerabilidad física, es deficiente.

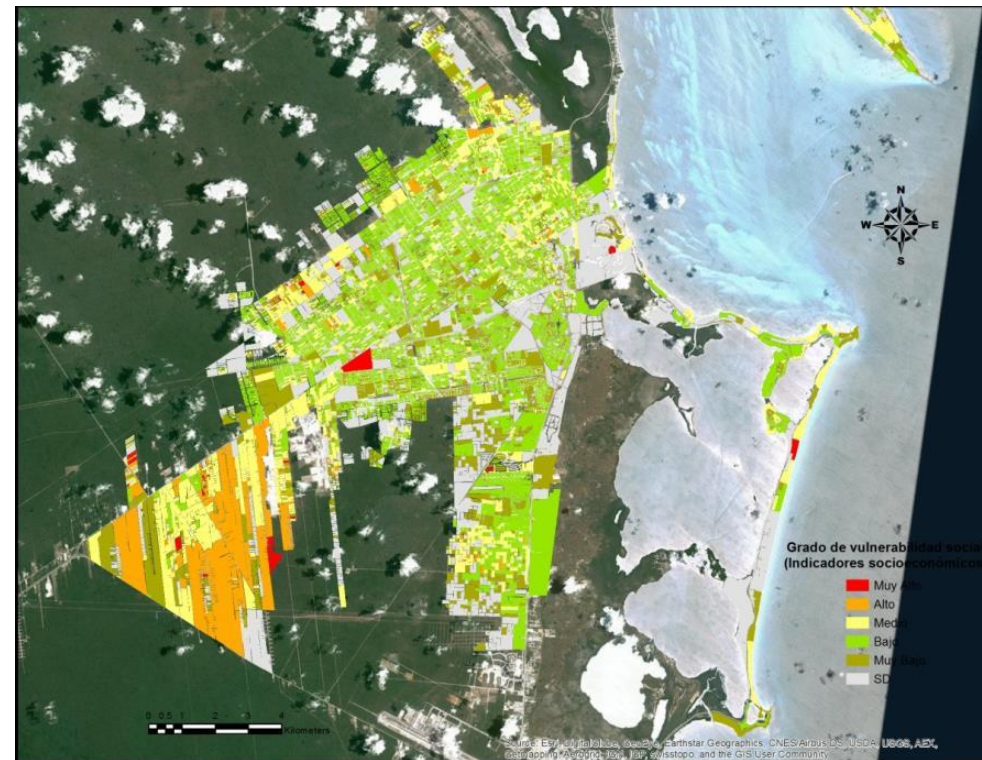


Fuente: Elaboración propia.

En resumen, a nivel rural se observan brechas importantes entre las diferentes localidades. Una de las características más evidentes es que la cercanía a la línea de costa, sobre todo hacia el mar Caribe, puede ser determinante en los niveles de vulnerabilidad social, pues es justamente allí en donde se encuentran los principales destinos turísticos, así como las cabeceras municipales, por lo que la calidad de los servicios y el acceso a los mismos es mayor.

Sin embargo, estas localidades también son las que tienen un mayor grado de exposición, principalmente a los ciclones tropicales, que a lo largo de la historia han sido los más destructivos en el Estado.

Análisis por ciudad

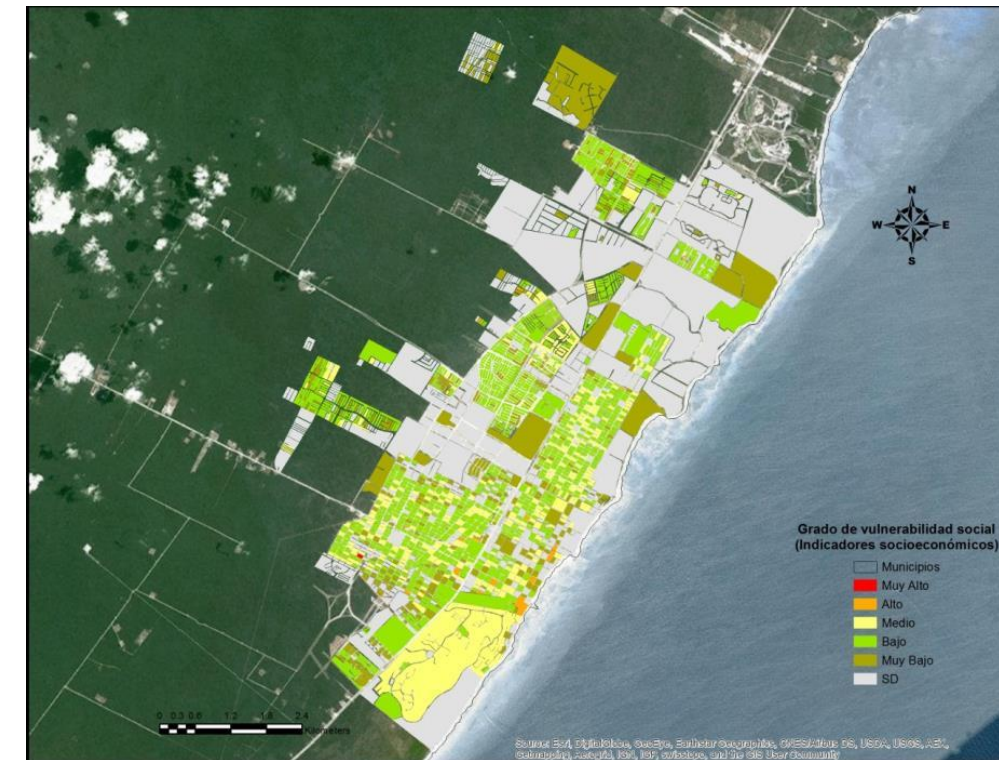


Mapa 164. Vulnerabilidad social de la ciudad de Cancún y su zona conurbada. (Indicadores socioeconómicos).

Playa del Carmen es una de las ciudades con mayor crecimiento en el Estado; por tal motivo, en el mapa se pueden observar un gran número de áreas sin información. Esto se debe a que actualmente esas manzanas son áreas verdes que probablemente en un futuro próximo se conviertan en zonas habitacionales.

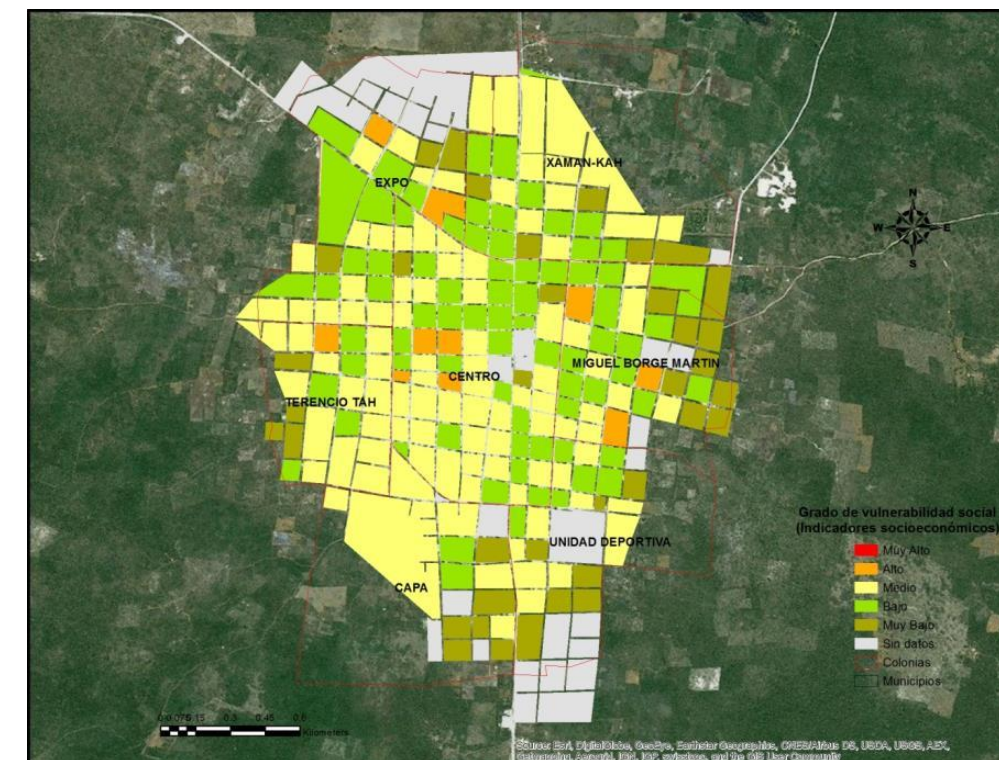
Por ejemplo, la colonia denominada Playacar, que es un complejo turístico conformado por varios hoteles, también cuenta con algunas viviendas particulares habitadas. El grado de vulnerabilidad social, basado en los indicadores utilizados, arrojó un nivel Medio para esta zona. Lo anterior podría asociarse a que la población fija de la zona es relativamente poca con relación a la flotante, por lo que las características socioeconómicas de la primera determinan el resultado de toda el área geográfica.

En general, en Playa del Carmen son pocas las manzanas que presentaron niveles de vulnerabilidad social Altos o Muy Altos, la mayoría de éstas se encontraron en la colonia Ejidal.



Mapa 165. Vulnerabilidad social de la ciudad de Playa del Carmen, Solidaridad. (Indicadores socioeconómicos).

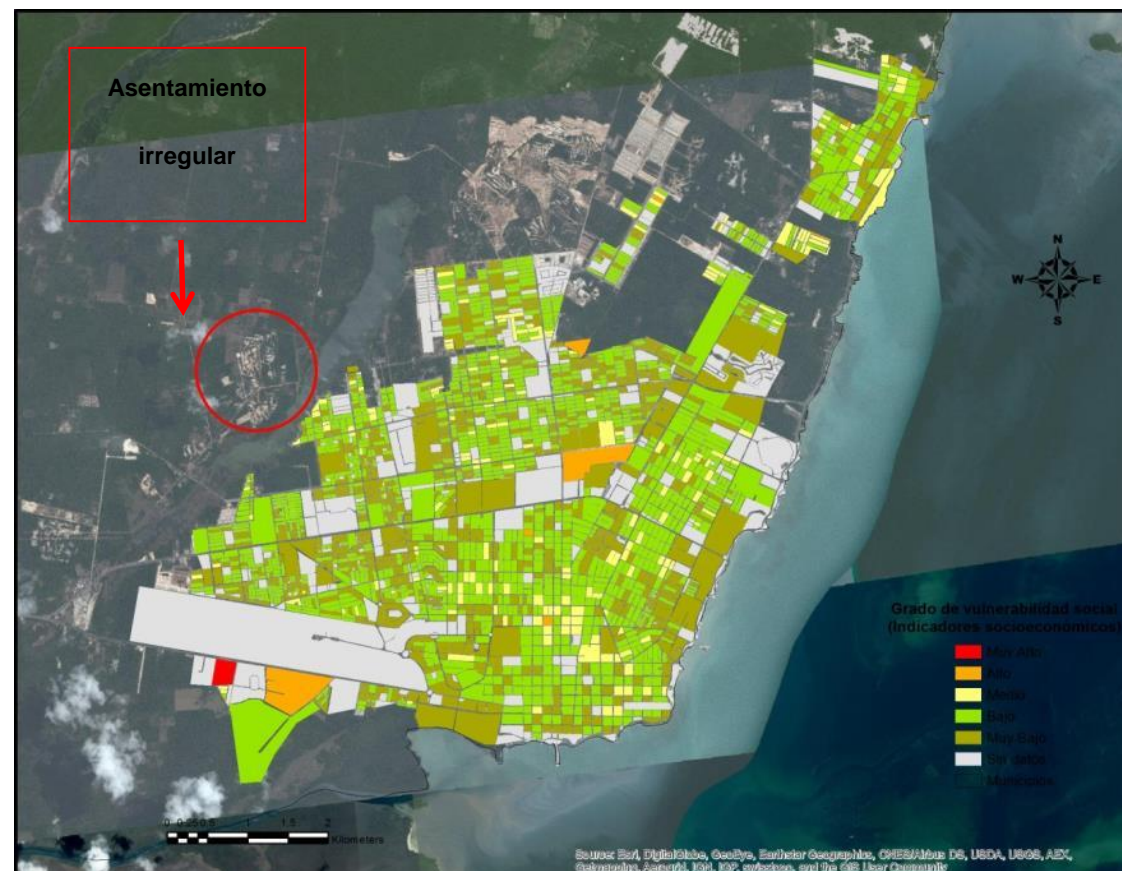
Kantunilkin, ubicada en el municipio de Lázaro Cárdenas, presentó una proporción mayor de manzanas con vulnerabilidad social Media. Sin embargo, en la colonia Centro, Expo, Miguel Borge Martín y Terencio Tah se observaron algunas manzanas con vulnerabilidad social Alta.



Mapa 166. Vulnerabilidad social de la ciudad de Kantunilkin, Lázaro Cárdenas. (Indicadores socioeconómicos)

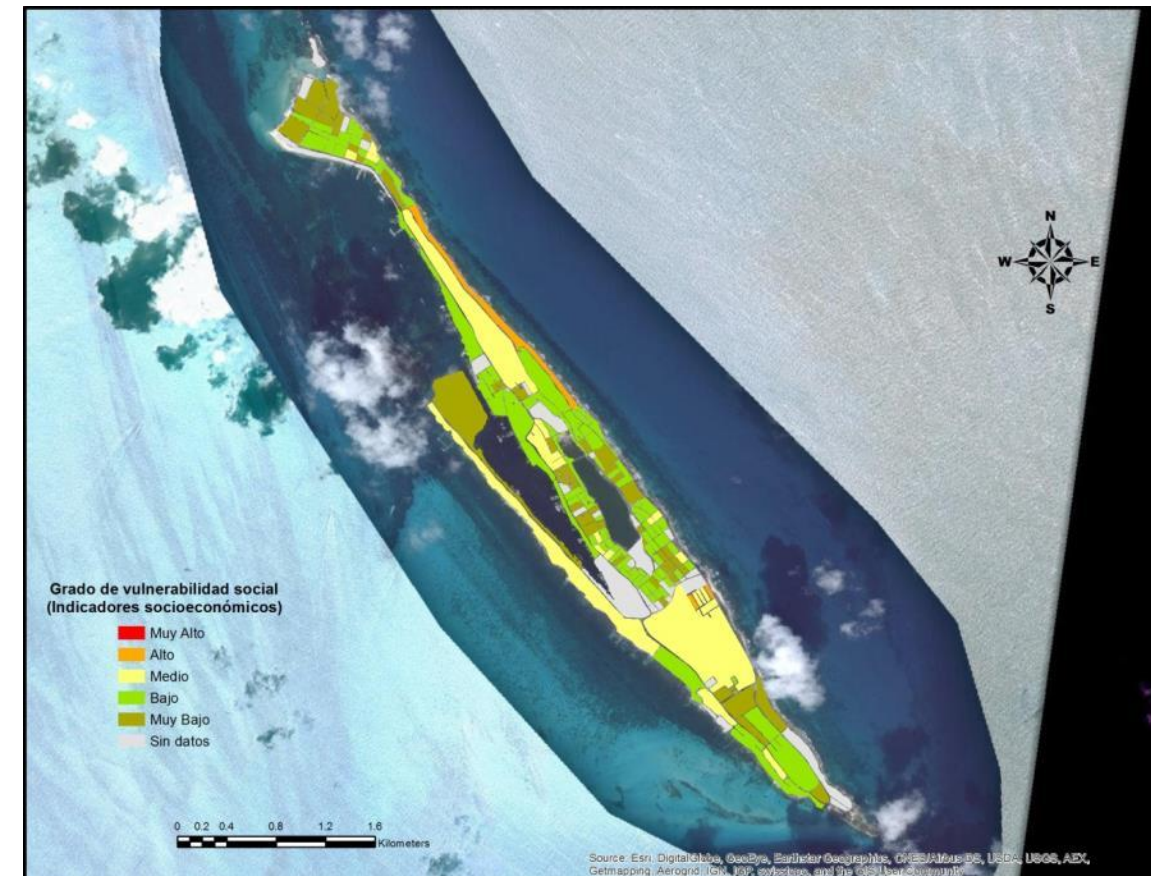
En la capital de la entidad, la mayoría de las manzanas presentaron características socioeconómicas que se tradujeron en grados de vulnerabilidad social Baja y Muy Baja. Únicamente en el Fraccionamiento Aeropuerto, los niveles de vulnerabilidad social se consideraron Muy Altos.

Cabe destacar que en la zona denominada La Sabana existe un asentamiento irregular que, desafortunadamente, no cuenta con información censal. Sin embargo, se pudo deducir, con base en una inspección física del lugar, que los niveles de vulnerabilidad social son Muy Altos. Lo anterior adquiere especial relevancia porque la región en la que se encuentran dichos asentamientos es una zona de inundación, por lo que si se pretende regularizar mediante la dotación de servicios básicos se estaría legitimando el riesgo.



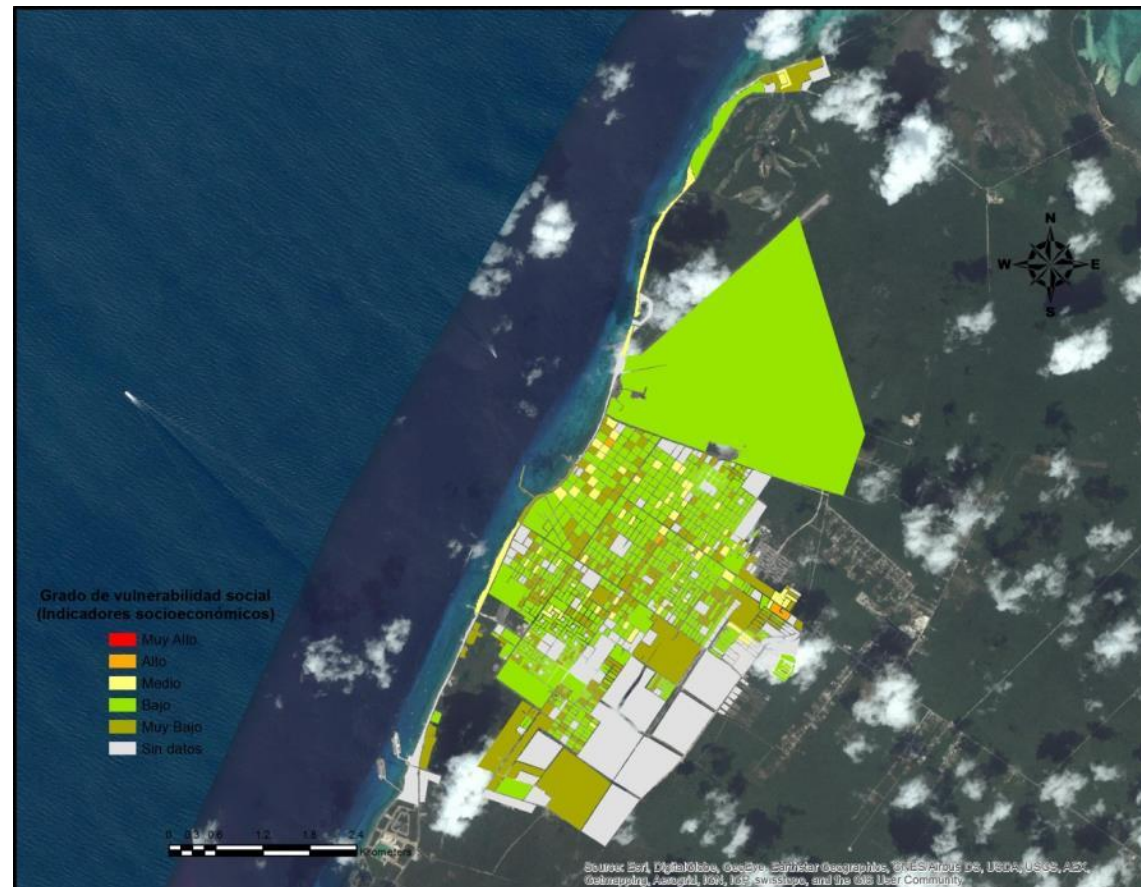
Mapa 167. Figura 355. Vulnerabilidad social de la ciudad de Chetumal, Othón P. Blanco. (Indicadores socioeconómicos)

La cabecera municipal de Isla Mujeres se ubica en la insula del mismo nombre, la cual está urbanizada prácticamente en su totalidad. Con base en el análisis de los indicadores socioeconómicos, se observó que sólo tres manzanas presentaron grados de vulnerabilidad social Altos, y se ubican en el litoral oriental.



Mapa 168. Figura 356. Vulnerabilidad social de la ciudad de Isla Mujeres, Isla Mujeres. (Indicadores socioeconómicos)

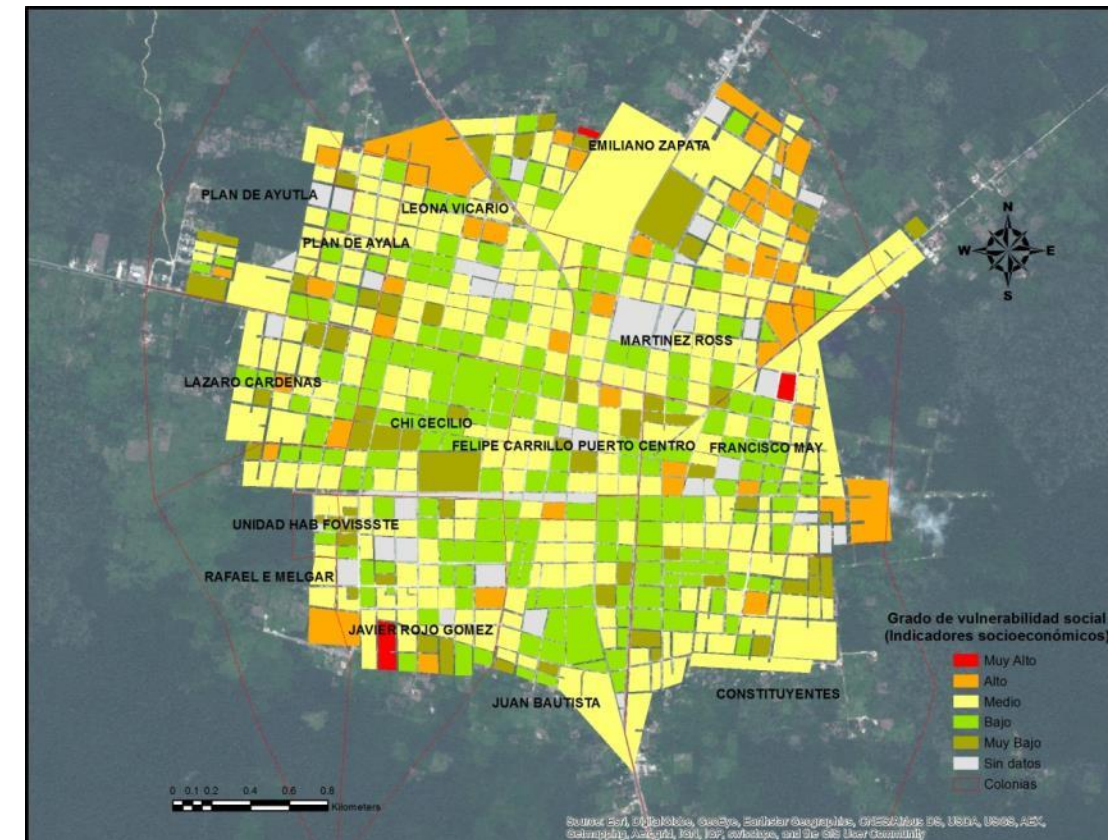
La ciudad de Cozumel es la de menor vulnerabilidad social asociada a sus indicadores socioeconómicos. La mayoría de las manzanas de la isla registraron niveles Bajos y Muy Bajos, principalmente porque la dotación de servicios básicos en la vivienda es alta; hay una amplia cobertura de servicios de salud y los niveles educativos de la población están por encima del promedio estatal.



Mapa 169. Vulnerabilidad social de la ciudad de Cozumel, Cozumel. (Indicadores socioeconómicos).

En la cabecera municipal de Felipe Carrillo Puerto se observaron niveles de vulnerabilidad social Medios y Altos asociados a los indicadores socioeconómicos calculados. Lo anterior se debe a que la demanda de servicios básicos es baja en comparación con otras ciudades, la proporción de población indígena es elevada, los hogares con jefatura femenina superan el promedio estatal y la razón de dependencia es elevada. Se sugiere corroborar que el párrafo esté correcto.

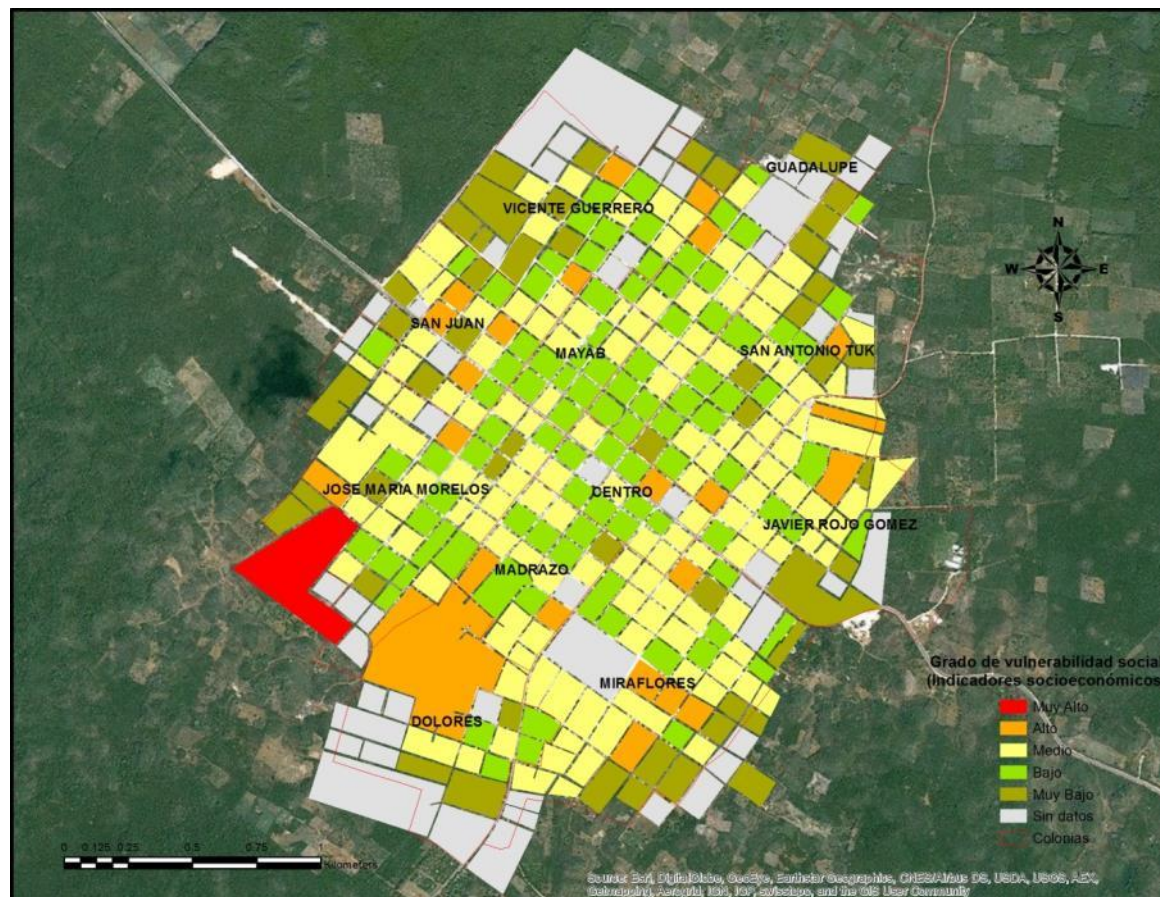
Las colonias con el mayor número de manzanas con grados de vulnerabilidad social Alto y Muy Altos fueron: Emiliano Zapata, Javier Rojo Gómez, Francisco May y Leona Vicario.



Mapa 170. Vulnerabilidad social de la ciudad de Felipe Carrillo Puerto, Felipe Carrillo Puerto. (Indicadores socioeconómicos).

La ciudad de José María Morelos, ubicada en el municipio del mismo nombre, también es de las que presentó niveles de vulnerabilidad social relacionados con sus indicadores socioeconómicos de entre Bajos y Medios. Sin embargo, 22 manzanas arrojaron una vulnerabilidad social Alta. Se puede observar que en la periferia de la sociedad es en donde hay una mayor presencia de éstas.

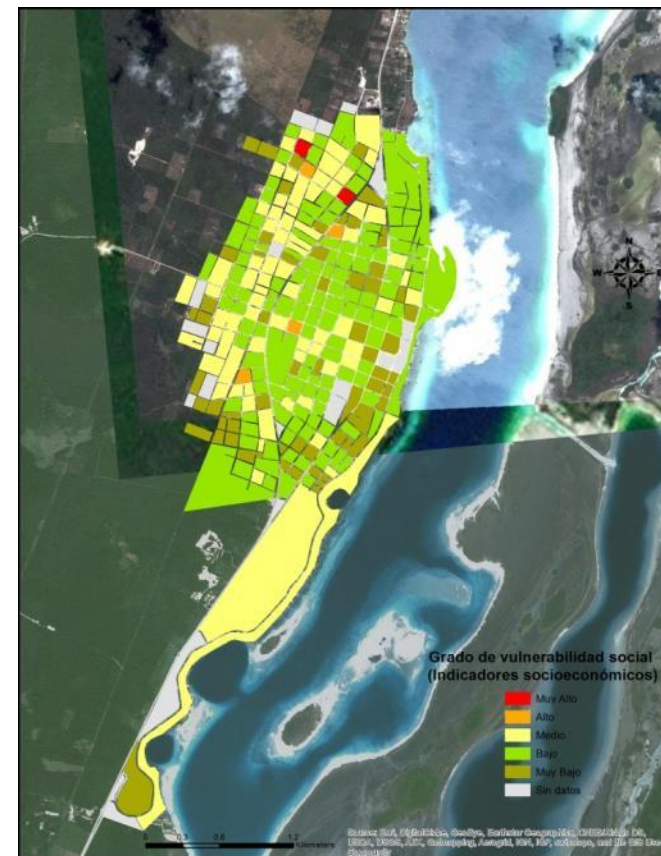
Al igual que en Felipe Carrillo Puerto, en José María Morelos la proporción de población indígena es elevada. Además, el porcentaje de analfabetismo es de los más altos del Estado y la razón de dependencia, para un número significativo de manzanas, es de más del 80%.



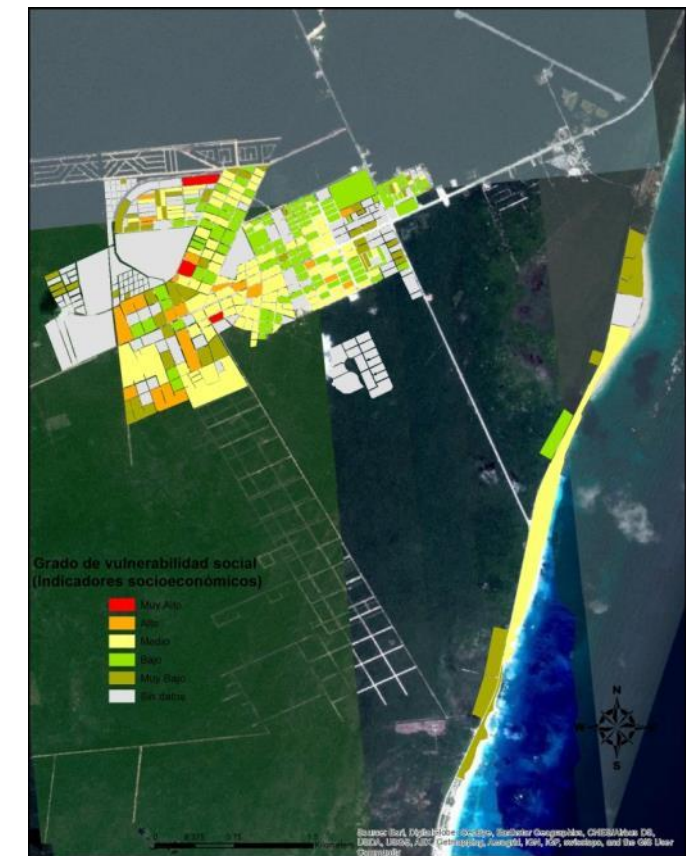
Mapa 171. Vulnerabilidad social de la ciudad de José María Morelos, José María Morelos. (Indicadores socioeconómicos).

En Bacalar fueron muy pocas las manzanas que por sus características socioeconómicas registraron grados de vulnerabilidad social Altos y Muy Altos. En la mayoría de la ciudad se observaron niveles Bajos y Medios. La colonia Luis Donaldo Colosio es en donde se presentó un mayor número de manzanas con vulnerabilidad social Alta.

Por último, la ciudad de Tulum registró niveles de vulnerabilidad social Medios en la mayoría de sus manzanas. Sin embargo, al norte de la ciudad y al poniente se observaron algunas manzanas con niveles Altos y Muy Altos.



Mapa 172. Vulnerabilidad social de la ciudad de Bacalar, Bacalar (Indicadores socioeconómicos).



Mapa 173. Vulnerabilidad social de la ciudad de Tulum, Tulum (Indicadores socioeconómicos).

6.4 Percepción local del riesgo

La percepción local del riesgo es un componente de la vulnerabilidad social que, además de contribuir a la medición de esta última mediante un indicador cuantitativo, merece un análisis detallado que permita identificar las principales áreas de oportunidad en materia de desarrollo de la conciencia colectiva y la prevención de riesgos.

Este análisis se llevó a cabo a partir de la cuantificación de los datos obtenidos de las encuestas aplicadas en todo el Estado de Quintana Roo, con apego al nivel de agregación geográfica establecido por el gobierno de dicha entidad federativa. Este tipo de aspectos metodológicos se explican en el siguiente inciso, al que le sigue un análisis a nivel municipal.

Determinación de la muestra

Los datos analizados se obtuvieron mediante la aplicación de 1,360 cuestionarios en todo el Estado, los cuales se distribuyeron por igual en los 10 municipios, en los que se distinguió entre zonas rurales y urbanas. Esta decisión obedeció a los diversos planteamientos que se pueden formular a priori, a cerca de las diferencias existentes entre los centros urbanos con mayor número de habitantes y mejor dotación de servicios e infraestructura, y aquellos más pequeños que se encuentran alejados, dispersos y con menor densidad poblacional.

Tomando lo anterior en cuenta, se entrevistó, por una parte, a una muestra de 68 personas de cada cabecera

municipal y, por la otra, a una de 68 personas distribuidas en las localidades rurales de cada municipio. Para definir las localidades rurales se utilizó el criterio establecido por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), es decir, aquellas que cuentan con una población menor a 2,500 habitantes.¹²⁴

El número de cuestionarios, por cabecera municipal y por conjunto de localidades rurales de cada municipio, se determinó por medio de muestreo aleatorio simple, con márgenes de error del 10% e intervalos de confianza del 90%.¹²⁵

Lo anterior significa, en términos simples y con respecto al error, que la diferencia entre el valor que se estime para la investigación y el valor verdadero será del 10%. Por ejemplo, si en la realidad 5% de los habitantes de una ciudad opinan afirmativamente sobre una cuestión específica, mientras que la investigación hecha aplicando cuestionarios muestra que 15% de los habitantes opinan que sí, el error de muestreo es del 10% (15% - 5%). Considerando lo anterior, en la estimación del tamaño de muestra se definirá el valor de esta variable, es decir, el máximo error que se esté dispuesto a aceptar. En cuanto al nivel de confianza, se trata de la probabilidad de que el error de muestreo real sea menor que el error de muestreo admitido por la encuesta.

Aunque no es una práctica habitual permitir tal flexibilidad en ambas variables, lo cierto es que las guías metodológicas correspondientes del CENAPRED no plantean la utilización de ningún método estadístico para definir una muestra de elementos a encuestar, dejando abierta esta decisión al criterio del responsable de la aplicación de los cuestionarios. Por ello, para el presente trabajo se decidió utilizar métodos estadísticos estándar, de aplicación sencilla, que permitieran obtener un número factible de personas a encuestar, sin hacer de lado la aleatoriedad y, en cierta medida, la representatividad de la realidad que caracterice a las diversas regiones de la entidad.

Sobre el número de encuestas, es importante analizar un aspecto adicional que tiene que ver con la creencia popular de que el tamaño de la muestra tendría que ser un porcentaje de la población, pero tal como lo sugiere la bibliografía especializada (Triola, 2006), la aplicación de la siguiente fórmula permite comprobar que el tamaño de la población es irrelevante:

$$n = \frac{[Z_{\alpha/2}]^2 \hat{p} \hat{q}}{E^2}, \text{ donde:}$$

n = Tamaño de la muestra.

$Z_{\alpha/2}$ = Valor crítico o valor positivo "z", que se encuentra en el límite vertical que separa a un área igual a $\alpha/2$ en la cola derecha de la distribución normal estándar.

$\hat{p} = \frac{x}{n}$ = Proporción muestral de "x" "éxitos" en una muestra de tamaño "n".

$\hat{q} = 1 - \hat{p}$

E = Margen de error.

De este modo, para los parámetros seleccionados en el presente caso, tanto en Cancún, con sus 722,844 habitantes, como en una ciudad con aproximadamente una décima parte de tal población (por ejemplo Cozumel, que tiene 85,986¹²⁶), se necesitaría una muestra aleatoria igual a 68. Es más, la modificación del margen de error y del nivel de confianza para fines ilustrativos permite realizar un ejercicio práctico que muestra cómo, aún cuando el tamaño de la población aumente en grandes proporciones, el incremento en el tamaño de muestra requerido es prácticamente marginal.

En concreto, si se utiliza el caso de Cozumel, aplicando la fórmula antes presentada mediante el uso de la calculadora online citada, se puede apreciar en la tabla **, que con una población 10 veces mayor (esto es, que aumente 900%) se necesitaría una muestra que se incremente solamente un 0.3%. Asimismo, se aprecia que a medida que aumenta el tamaño de la población (número de habitantes), la muestra requerida aumenta cada vez menos, hasta situarse en un mismo número.

Tabla 188. Porciento de encuestas

	Número de habitantes	Δ número de habitantes	Muestra requerida (personas a encuestar)	Δ número de personas a encuestar
Pob. Cozumel * 1000	85,986,000	99,900%	385	0.5%
Pob. Cozumel * 100	8,598,600	9,900%	385	0.5%
Pob. Cozumel * 10	859,860	900%	384	0.3%
Pob. Cozumel en 2014	85,986	-	383	-

Fuente: Elaboración propia.

Una vez definido el número de personas a encuestar, se estableció que para la aplicación de cuestionarios únicamente se tomarían en cuenta a personas mayores de edad, y a aquellas cuyo lugar de residencia fuese la ciudad en cuestión.

Para la realización de dichas encuestas en localidades rurales, que como ya se mencionó la guía no sugería técnicas de muestreo y aplicación específicas, sobre la aplicación de cuestionarios estuvo sujeta a las rutas de las brigadas que visitaban localidades para determinar su vulnerabilidad física. Para las zonas urbanas, es decir las cabeceras municipales, se eligieron puntos con gran afluencia de personas, como plazas públicas o zonas comerciales.

Es importante señalar que se utilizó el cuestionario incluido en la guía del CENAPRED.¹²⁷ Su diseño permitió asignar

¹²⁴ Véase la definición de localidad rural en:

<http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/rutinas/glogen/default.aspx?t=ehehoe>. Consulta realizada el 22 de enero de 2015.

¹²⁵ El cálculo se realizó por medio de una calculadora online: Santos, Glauber Eduardo de Oliveira. Cálculo amostral: calculadora on-line. Disponible en: <<http://www.calculoamostral.vai.la>>. Consulta realizada en septiembre de 2014.

¹²⁶ Fuente: Consejo Nacional de Población (CONAPO). Quintana Roo, "Proyecciones de población de localidades seleccionadas", 2010-2030. <http://www.conapo.gob.mx/>. Consulta realizada el 21 de julio de 2014.

¹²⁷ CENAPRED, *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Evaluación de la vulnerabilidad física y social*, pp. 95-101.

un valor entre 1 y 0 a cada respuesta. Una respuesta con valor asignado igual a 0 representará el mínimo nivel de vulnerabilidad, sucediendo exactamente lo contrario en caso de que el valor sea 1.

En la fuente, los rangos en algunos casos son distintos según la naturaleza de la pregunta; sin embargo, el valor de las respuestas siempre se situó entre 0 y 1. Una vez hechas estas aclaraciones, se da paso al análisis de los resultados obtenidos tras haber aplicado los cuestionarios en el Estado y sus municipios.

Tabla 189. Cuestionario de percepción local de riesgos

Número	Pregunta
1	¿Dentro de los tipos de peligro que existen cuántos tipos de fuentes de peligro identifica en su localidad?
2	Respecto a los peligros mencionados en la pregunta no. 1, ¿recuerda o sabe si han habido emergencias asociadas a estas amenazas en los últimos años?
3	¿Considera que un fenómeno natural se puede convertir en desastre?
4	¿Considera que su vivienda está localizada en un área susceptible de amenazas (que se encuentre en una ladera, en una zona sísmica, en una zona inundable, etc.)?
5	¿Ha sufrido la pérdida de algún bien a causa de un desastre natural?
6	En caso que recuerde algún desastre, los daños que se presentaron en su comunidad fueron: Ninguna fatalidad, daños leves a viviendas e infraestructura; Personas fallecidas, algunas viviendas con daño total y daños a infraestructura (medio); o Personas fallecidas, daño total en muchas viviendas y daños graves en infraestructura.
7	¿Alguna vez ha quedado aislada su comunidad a causa de la interrupción de vías de comunicación, por algunas horas, debido a algún tipo de fenómeno?
8	¿Cree que en su comunidad se identifican los peligros?
9	¿Conoce algún programa, obra o institución que ayuda a disminuir efectos de fenómenos naturales (construcción de bordos, presas, terrazas, sistema de drenaje, sistema de alertamientos, etc.)?
10	¿En los centros educativos de su localidad o municipio se enseñan temas a cerca de las consecuencias que trae consigo un fenómeno natural?
11	¿Alguna vez en su comunidad se han llevado a cabo campañas de información acerca de los peligros existentes?
12	En caso de haberse llevado campañas de información, ¿cómo se enteró?
13	¿Ha participado en algún simulacro en alguna ocasión?
14	¿Sabe a quién o a dónde acudir en caso de una emergencia?
15	¿Sabe si existe en su comunidad un sistema de alertamiento para dar aviso a la población sobre alguna emergencia?
16	En caso de haber sido afectado a causa de un fenómeno natural, ¿se le brindó algún tipo de apoyo?
17	¿Ha sido evacuado a causa de un fenómeno natural (inundación, sismo, erupción)?
18	De acuerdo con experiencias anteriores, ¿considera que su comunidad está lista para afrontar una situación de desastre tomando en cuenta las labores de prevención?
19	¿Existe en su comunidad /localidad/municipio alguna organización que trabaje en la atención de desastre?
20	¿Conoce la existencia de la unidad de protección civil?
21	¿Sabe dónde está ubicada y qué función desempeña la unidad de protección civil?
22	¿Estaría preparado para enfrentar otro desastre como el que enfrentó?
23	¿Considera que su comunidad puede afrontar una situación de desastre y tiene la información necesaria?
24	¿Qué tanto puede ayudar la unidad de protección civil? ¿Puede afrontar una situación de desastre y tiene la información necesaria?
25	Si usted tuviera la certeza de que su vivienda se encuentra en peligro, ¿estaría dispuesto a reubicarse?

Fuente: CENAPRED.

Resultados de la encuesta

Como se explicó con anterioridad, las encuestas se llevaron a cabo en zonas urbanas y rurales y es por esta razón que el análisis para cada uno de estos estratos se presenta en dos tablas, cada una con resultados para todos los municipios.

Dentro de dichas tablas es preciso notar que las celdas contienen un color y un porcentaje. El color se refiere a la condición de vulnerabilidad social que corresponde al municipio en cuestión (el rojo se utiliza para referirse a vulnerabilidad Muy Alta, mientras que el verde es para vulnerabilidad Muy Baja), derivado de la opción que haya respondido la mayoría de las personas que ahí se haya encuestado. El valor contenido en cada celda se refiere al porcentaje que representa el número de personas cuya respuesta elegida fue la que más se repitió.

Tabla 190. Condición de vulnerabilidad asociada a la percepción local de riesgo en cabeceras municipales.

Municipio	Numero de pregunta*																								
	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
Bacalar	88%	91%	99%	63%	54%	93%	58%	78%	24%	73%	61%	76%	76%	82%	69%	72%	36%	55%	55%	90%	61%	73%	66%	36%	97%
Benito Juarez	82%	99%	99%	75%	85%	96%	93%	90%	66%	87%	69%	90%	90%	94%	66%	82%	96%	90%	43%	84%	49%	84%	93%	52%	100%
Cozumel	76%	96%	99%	64%	55%	67%	78%	96%	90%	91%	67%	60%	60%	93%	84%	57%	58%	78%	90%	82%	42%	75%	73%	54%	55%
Othon P. Blanco	84%	85%	97%	55%	76%	93%	52%	79%	52%	63%	64%	73%	73%	79%	73%	46%	69%	55%	57%	88%	42%	63%	67%	43%	91%
Felipe Carrillo Puert	76%	91%	90%	51%	78%	96%	51%	57%	76%	69%	46%	79%	79%	73%	67%	52%	81%	51%	54%	90%	64%	60%	49%	48%	88%
Isla Mujeres	57%	97%	100%	78%	75%	70%	85%	79%	64%	82%	52%	66%	66%	94%	76%	72%	67%	64%	57%	82%	52%	69%	81%	37%	76%
Jose Maria Morelos	87%	94%	99%	54%	66%	97%	57%	60%	85%	66%	55%	67%	67%	72%	57%	58%	79%	57%	73%	88%	42%	58%	57%	52%	94%
Lazaro Cardenas	93%	100%	99%	69%	72%	100%	82%	85%	79%	76%	79%	67%	67%	81%	79%	57%	91%	48%	82%	97%	79%	46%	46%	58%	69%
Solidaridad	54%	96%	96%	61%	84%	99%	70%	54%	85%	73%	54%	63%	63%	79%	64%	60%	88%	55%	64%	96%	58%	57%	54%	43%	93%
Tulum	73%	99%	93%	51%	84%	97%	75%	61%	84%	76%	52%	79%	79%	67%	63%	66%	88%	51%	67%	94%	57%	57%	61%	46%	93%

* Color de celda = nivel de vulnerabilidad asociado; Valor (porcentaje) en la celda = porcentaje de respuestas asociadas a ese grado de vulnerabilidad

Tabla 191. Condición de vulnerabilidad asociada a la percepción local de riesgo en localidades rurales.

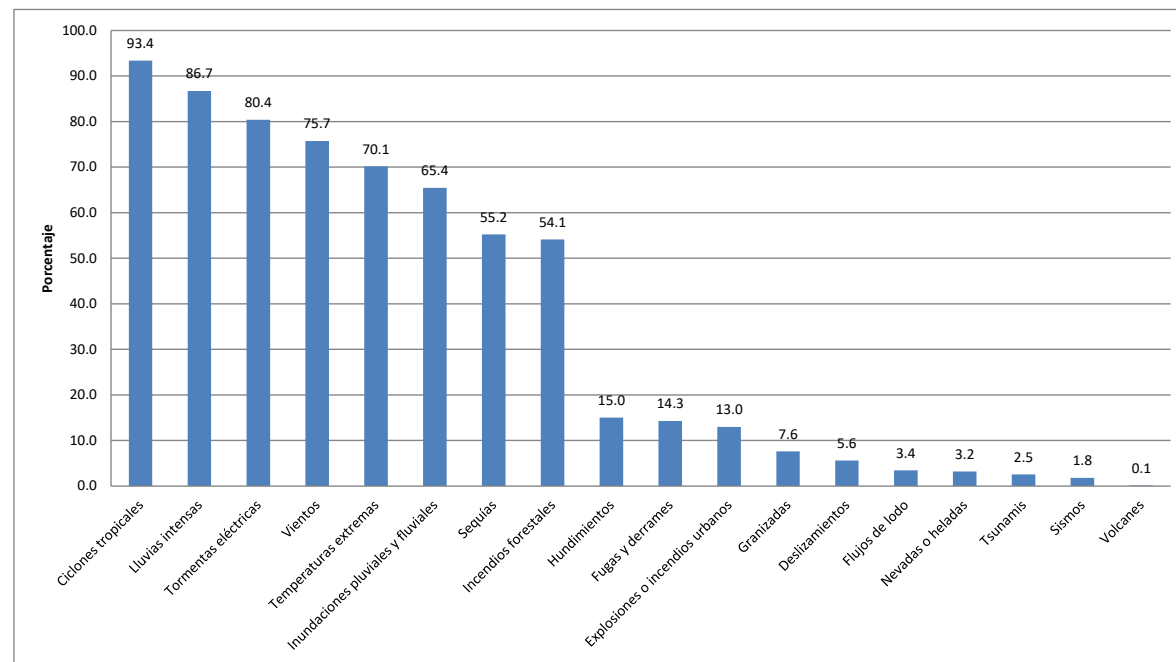
Municipio	Numero de pregunta*																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Bacalar	85%	93%	91%	70%	60%	100%	82%	63%	87%	48%	63%	93%	93%	51%	54%	60%	52%	82%	84%	58%	79%	60%	66%	51%	93%
Benito Juarez	93%	90%	100%	54%	57%	90%	51%	85%	96%	88%	49%	97%	97%	54%	78%	88%	84%	76%	93%	60%	64%	85%	88%	61%	100%
Cozumel	52%	99%	96%	60%	49%	93%	48%	81%	73%	84%	58%	78%	78%	84%	61%	55%	87%	60%	54%	78%	36%	70%	76%	31%	75%
Othon P. Blanco	76%	90%	88%	66%	57%	96%	72%	69%	85%	57%	60%	90%	90%	57%	54%	57%	52%	69%	79%	52%	70%	54%	55%	49%	90%
Felipe Carrillo Puert	87%	91%	78%	54%	70%	100%	76%	55%	90%	49%	84%	93%	93%	60%	61%	79%	69%	81%	90%	69%	54%	58%	69%	64%	99%
Isla Mujeres	58%	100%	99%	42%	55%	97%	66%	75%	76%	85%	45%	87%	87%	85%	79%	52%	87%	58%	66%	75%	43%	70%	64%	33%	81%
Jose Maria Morelos	85%	100%	96%	67%	57%	100%	78%	54%	91%	64%	55%	70%	70%	75%	63%	51%	54%	70%	84%	85%	49%	55%	67%	48%	93%
Lazaro Cardenas	90%	97%	96%	63%	88%	97%	78%	85%	82%	79%	67%	93%	93%	76%	61%	79%	78%	48%	69%	78%	43%	67%	58%	34%	81%
Solidaridad	55%	100%	79%	60%	69%	97%	69%	73%	94%	58%	69%	75%	75%	51%	64%	78%	81%	85%	88%	82%	76%	61%	73%	55%	93%
Tulum	90%	93%	73%	57%	60%	100%	54%	52%	88%	66%	58%	55%	55%	58%	49%	57%	72%	64%	82%	79%	66%	57%	61%	42%	97%

* Color de celda = nivel de vulnerabilidad asociado; Valor (porcentaje) en la celda = porcentaje de respuestas asociadas a ese grado de vulnerabilidad

Un análisis generalizado de los resultados muestra, en primera instancia, un mayor número de celdas en color rojo, es decir, registros asociados a niveles Muy Altos de vulnerabilidad, para el caso de las localidades rurales (92 en el caso rural, y 65 en el caso urbano). Lo anterior nos indica que en la mayoría de los municipios la percepción del riesgo es menor en las localidades rurales.

Con relación a la primera pregunta, en la cual se pretende **conocer las amenazas que la propia población identifica en su comunidad**, se pudo observar, por ejemplo, que el 93.4% de los encuestados identificó a los ciclones tropicales, colocándolos como el fenómeno que más presencia tiene en la mente de los quintanarroenses; seguido por las lluvias intensas, las tormentas eléctricas y los fuertes vientos. Los flujos de lodo, nevadas o heladas, tsunamis, sismos y

volcanes fueron los menos mencionados por la población encuestada.



Gráfica 115. Principales amenazas identificadas por la población.

Llama la atención que en las ciudades de Cancún y Cozumel la población identificó un menor número de amenazas, mientras que en la cabecera municipal de Felipe Carrillo Puerto ubicó una mayor diversidad de fenómenos.

Tanto a nivel urbano como rural, **la población tiene presente alguna emergencia asociada a la ocurrencia de cualquiera de los fenómenos identificados**. Cabe destacar que eventos como los huracanes Emily, Wilma y Dean ocasionaron afectaciones prácticamente en todo el estado, por lo que lo acontecido en aquellas ocasiones aún permanece en la mente de los habitantes de la entidad.

En la ciudad de Chetumal se encontró la menor proporción de población que recuerda alguna emergencia. Lo anterior se debe a que justamente el municipio de Othón P. Blanco fue el que sufrió en menor medida el embate de los ciclones mencionados anteriormente. De igual forma, **la mayoría de la población rural y urbana consideró que un fenómeno natural puede convertirse en desastre**.

Con relación a la percepción de la población en torno a la ubicación de sus viviendas, en el ámbito rural la mayoría piensa que están asentados en zonas susceptibles de amenazas, salvo en el municipio de Isla Mujeres. A nivel urbano está situación cambia, ya que en Cancún, Chetumal, Felipe Carrillo Puerto, José María Morelos y Playa del Carmen, la población piensa que sus viviendas no se encuentran en áreas susceptibles a sufrir el impacto de un evento.

En las preguntas 4 y 5 la mayoría de las zonas urbanas presentaron un nivel Muy Alto de vulnerabilidad asociada. En ambos casos, las respuestas negativas demuestran que, pese a encontrarse en zonas que han sufrido algunos de los desastres más destacables de los últimos años,¹²⁸ la gente no es consciente de las implicaciones directamente asociadas a su

ubicación.

En cuanto a la pregunta 4, la condición de vulnerabilidad se explica porque la gente responde que no está, o no sabe si está, en un área susceptible de amenazas, cuando en realidad lo está y, por tanto, su percepción sobre el grado de exposición se podría decir que es "errónea".

En la pregunta 5, el grado asociado de vulnerabilidad se relaciona con el hecho de que la mayor parte de la población de la región ha sufrido daños derivados de fenómenos como los enlistados y, sin embargo, los encuestados no asocian las pérdidas sufridas a la ocurrencia de dichos fenómenos.

A los encuestados que recordaron algún desastre ocurrido en sus comunidades, se les preguntó sobre el tipo de daños que se registraron. **Tanto a nivel rural como urbano, la población tuvo el recuerdo de daños en infraestructura y viviendas sin ninguna fatalidad**. Lo anterior concuerda con las cifras de los últimos años, ya que de acuerdo con el registro sobre el impacto socioeconómico de los desastres ocurridos entre 2000 y 2012, evaluados por el CENAPRED,¹²⁹ los desastres de origen hidrometeorológico han dejado daños y pérdidas en Quintana Roo por más de 22 mil millones de pesos, pero sólo una persona fallecida.

Tabla 192. Impacto de desastres de origen hidrometeorológico en el estado de Quintana Roo durante el periodo 2000-2012.

Año	Número de eventos	Muertos	Población afectada	Viviendas dañadas	Escuelas	Hospitales	Área de cultivo dañada (hectáreas)	Total de daños (Millones de pesos)
2000	1	0	0	0	0	0	0	42.5
2001	1	0	2,500	0	0	0	0	0.0
2002	2	0	100	0	0	0	0	1.4
2003	2	0	182	0	0	0	0	0.0

¹²⁸ Por ejemplo, el paso del huracán "Wilma", en 2005, tuvo efectos devastadores que supusieron daños materiales valorados en 4,506 millones de pesos, y pérdidas de 13,752 millones de pesos, sumando un total de 18,258 millones de pesos. Por su parte, el huracán "Emily", que también se presentó ese año, registró un impacto económico por un total de 1,110.8 millones de pesos, dividido en 431.1 millones en daños y 679.7 millones en pérdidas (CENAPRED, 2006b).

¹²⁹ CENAPRED. Base de datos del impacto socioeconómico de los desastres. Subdirección de estudios económicos y sociales.

2004	2	1	24,140	98	17	0	0	14.4
2005	2	0	123,862	23,601	434	49	18,141	19,369.0
2007	4	0	98,305	19,661	292	58	55,363	2,338.0
2008	2	0	975	195	0	0	0	141.6
2012	3	0	10,451	80	0	0	0	206.1
Total	19	1	260,515	43,635	743	107	73,504	22,112.9

Fuente: CENAPRED.

Tanto en **Tulum como en Solidaridad, la población encuestada en las zonas rurales y urbanas consideró que sus localidades han quedado aisladas, al menos en alguna ocasión, a consecuencia del impacto de fenómenos naturales.** En localidades rurales, también Cozumel e Isla Mujeres manifestaron haber quedado incomunicados.

En la mayoría de los municipios la población consideró que **los habitantes de su localidad identifican los peligros a los que están expuestos**, con excepción de las localidades rurales de Felipe Carrillo Puerto, Solidaridad y Tulum.

Los resultados de la pregunta 9 ponen de manifiesto la necesidad de **difundir los programas, acciones y dependencias que inciden directamente en la disminución, mitigación y prevención de desastres, sobre todo en el ámbito rural, ya que en todos los municipios la mayoría de la población manifestó desconocerlos.** De igual forma, en las cabeceras municipales se observó el mismo comportamiento de esta variable, aunque en Isla Mujeres y Cozumel, la mayoría de los encuestados de la zona urbana expresó tener conocimiento de algunos programas u obras orientados a disminuir el impacto de los desastres.

La enseñanza de temas relacionados con la gestión de riesgos en instituciones educativas es de gran importancia para concientizar a la población. En este sentido, **la mayoría de los encuestados en todos los municipios manifestó tener conocimiento de que en los centros educativos de su localidad se imparten estos tópicos.** Tan sólo en la zona rural de Bacalar y Felipe Carrillo Puerto la población opinó lo contrario.

A pesar de la difusión que se da a través de diversos medios de comunicación, sobre todo durante la temporada de ciclones tropicales, en varios **municipios la población manifestó que en su localidad no se han llevado a cabo campañas de información relacionadas con los peligros existentes.** Esta situación representa un área de oportunidad, ya que probablemente los medios utilizados para hacer llegar la información a la población no están penetrando en todos los niveles, por lo que sería importante explorar otras alternativas de difusión. A pesar de lo anterior, **la población que sí identificó acciones de difusión expresó haberse enterado por radio o televisión.** En este sentido, los medios de comunicación juegan un papel sustancial, principalmente las radiodifusoras y televisoras locales.

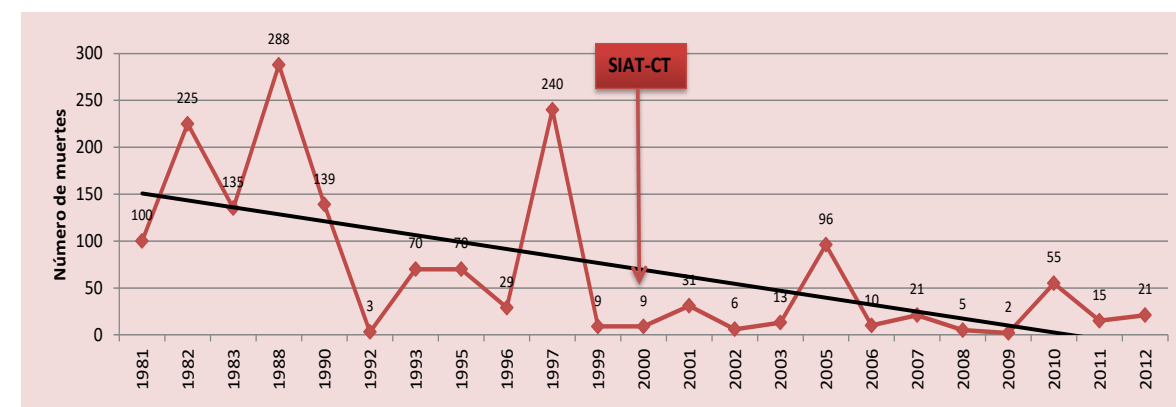
La mayoría de la población en todos los municipios, tanto en la zona urbana como rural, manifestó nunca haber participado en un simulacro. Únicamente Bacalar, en su cabecera municipal, y Tulum, en las localidades rurales, obtuvieron una condición de vulnerabilidad Baja en esta variable. Destaca el caso de Benito Juárez, en donde más del 90% de los encuestados afirmó nunca haber participado en este tipo de ejercicios.

En caso de alguna emergencia la mayor proporción de los encuestados manifestaron saber a quién acudir. Tanto Isla Mujeres como Cozumel fueron los municipios con los valores más altos, lo que se puede interpretar como una

buena presencia de las autoridades, tanto en la zona urbana como en la rural. El hecho de que la población haya contestado afirmativamente, no quiere decir que acudirá a Protección Civil, ya que existen otras instituciones, como la Cruz Roja Mexicana o dependencias municipales, estatales o federales, en las cuales el encuestado pudo haber pensado.

Solamente en la ciudad de Lázaro Cárdenas la mayoría de la población desconoce si existe un sistema de alerta para dar aviso a la población sobre alguna emergencia. Por el contrario, **se observó que en las zonas rurales están menos familiarizados con los sistemas de alerta ante posibles contingencias.**

Por la alta incidencia de ciclones tropicales en el estado, la utilización y adecuada comunicación del Sistema de Alerta Temprana contra Ciclones Tropicales (SIAT-CT) es fundamental para reducir los impactos, tanto económicos como sociales de estos fenómenos, ya que permite informar con antelación a la población sobre los posibles efectos, así como las medidas preventivas que debe adoptar ante su inminente impacto. Cabe señalar que desde su implementación, el número de muertos por ciclones tropicales a nivel nacional ha disminuido considerablemente.



Gráfica 116. Número de muertes por ciclones tropicales en la República Mexicana en el periodo 1981-2012.¹³⁰

En relación con los apoyos en caso de desastre, **la población que habita en las localidades rurales, y que manifestó haber sido afectada anteriormente por la ocurrencia de algún fenómeno, declaró en mayor proporción haber recibido alguna ayuda o apoyo por parte del gobierno municipal, estatal o federal.** En ciudades como Cancún, Playa del Carmen, Felipe Carrillo Puerto, Chetumal, José María Morelos y Tulum, los encuestados mencionaron, en su mayoría, nunca haber recibido apoyos por parte del gobierno.

Aún cuando el número de preguntas a las que se asocia una condición Muy Alta de vulnerabilidad es mayor para las localidades rurales, debe notarse que en muchos casos es muy similar entre este ámbito y el urbano. Tal es el caso de la evacuación en caso de emergencia, en donde **a nivel urbano Cozumel e Isla Mujeres fueron las únicas ciudades en donde la mayoría de los encuestados reconocieron haber sido evacuados en alguna ocasión.** Cabe señalar que, por su condición de islas, en caso del inminente impacto de un ciclón tropical, los protocolos de evacuación están claramente definidos y se han aplicado anteriormente.

La pregunta 18, en la que se le pide a los encuestados que respondan si consideran que su comunidad está

¹³⁰ CENAPRED. Características e Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurredos en la República Mexicana en el año 2012.

preparada para afrontar una situación de desastre, es muestra de las discrepancias entre cabeceras municipales y localidades rurales, puesto que en éstas últimas es negativa la valoración subjetiva acerca de la capacidad para enfrentar desastres como los que se han presentado en el pasado, tanto en lo individual como en lo colectivo.

La mayoría de los encuestados no pueden identificar organizaciones e instituciones que trabajen en la atención de desastres a nivel local, por lo que la tendencia generalizada en este sentido es hacia una condición de vulnerabilidad Muy Alta. Aunque a nivel urbano hay mayor conocimiento de algunas ONG's o instituciones que realizan labores de prevención o atención de emergencias, particularmente en Cozumel, Chetumal, Isla Mujeres y Bacalar.

En general, *la mayoría de la población conoce la existencia de las coordinaciones de protección civil a nivel municipal*, tanto en zonas urbanas como rurales; sin embargo, en estas últimas *se desconoce su ubicación*. Asimismo, por medio de los cuestionarios aplicados se observó que la población rural no está familiarizada con las funciones que desempeña protección civil.

Al igual que con la pregunta 18, la 22 y la 23 evidencian las diferencias entre lo urbano y lo rural, *mientras que en las cabeceras municipales la población se considera preparada para enfrentar una situación de desastre, a nivel rural la percepción es contraria*. Lo anterior, puede ser reflejo del mayor acceso a equipamiento urbano, información y mejor infraestructura que existe en las ciudades.

Los resultados de la pregunta 24, en la que se pide la opinión de la población con respecto a la capacidad que tienen las autoridades de protección civil para enfrentar una situación de desastre, son similares tanto en el ámbito rural como urbano, poniendo de manifiesto, en general, *deficiencias en materia de conciencia ciudadana a cerca de la protección civil y falta de credibilidad de la institución, o presencia de la misma, sobre todo en localidades rurales*.

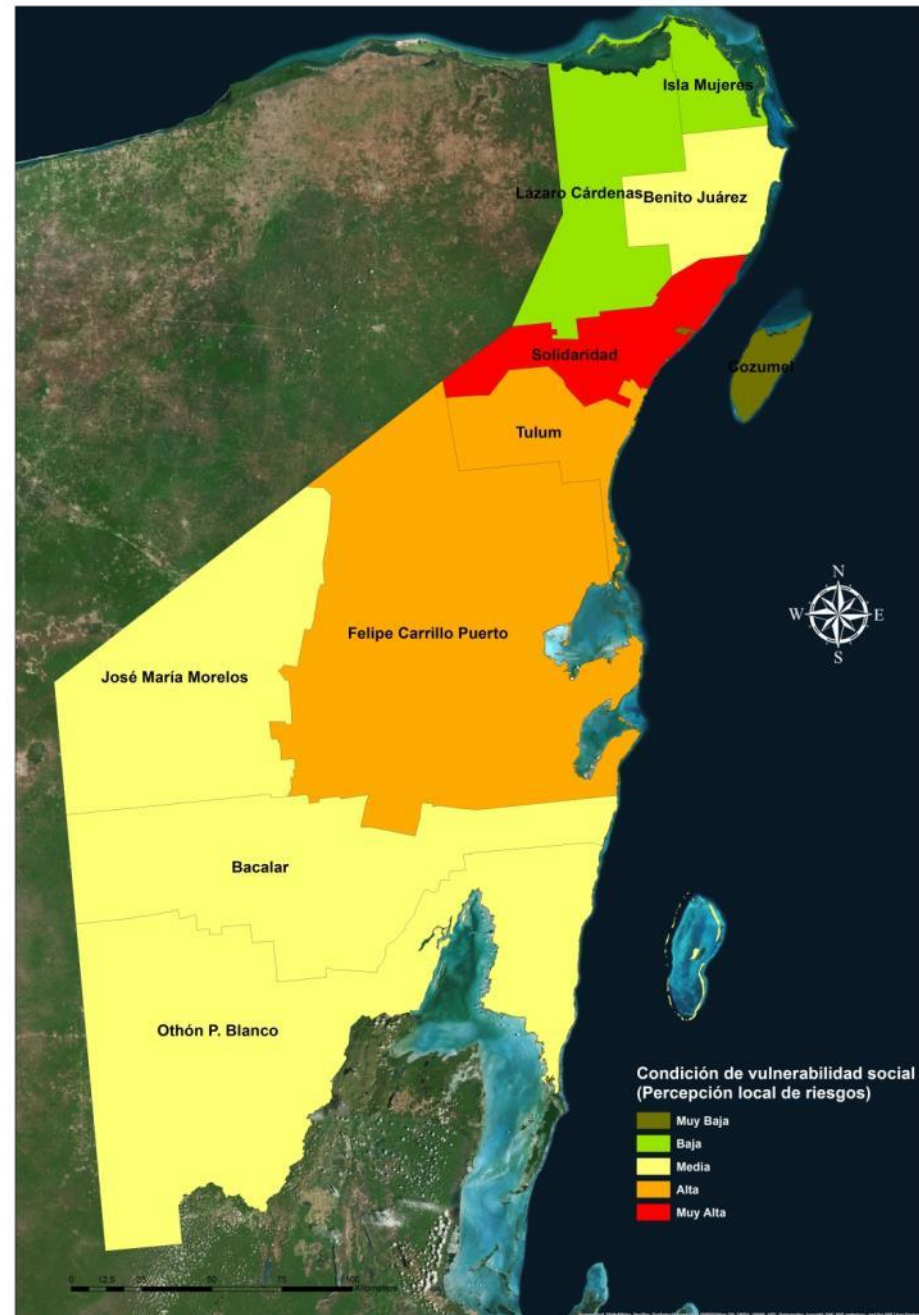
Por último, *la mayoría de la población manifestó que estaría dispuesta a reubicarse si tuviera la certeza de que su vivienda se encuentra en zona de riesgo*.

Así, una vez procesados todos los cuestionarios, y valorados conforme a lo estipulado en la metodología del CENAPRED, se establecieron rangos para determinar la condición de vulnerabilidad de la población, asociada a la percepción local del riesgo.

Municipio	Condición de vulnerabilidad social asociada a la percepción local de riesgos		
	Rural	Urbano	Municipal
Bacalar	Bajo	Alto	Medio
Benito Juárez	Bajo	Alto	Medio
Cozumel	Muy Bajo	Bajo	Muy Bajo
Othón P. Blanco	Bajo	Alto	Medio
Felipe Carrillo Puerto	Medio	Muy Alto	Alto
Isla Mujeres	Muy Bajo	Muy Alto	Bajo
José María Morelos	Medio	Medio	Medio
Lázaro Cárdenas	Medio	Bajo	Bajo
Solidaridad	Alto	Muy Alto	Muy Alto
Tulum	Alto	Alto	Alto

Para aprovechar la información obtenida en el análisis de la percepción local de riesgos, se optó por presentar dos mapas. El primero muestra la condición de vulnerabilidad social a nivel municipal.

Tabla 193. Condición de vulnerabilidad social asociada a la percepción local de riesgos.



antecedentes de impactos de ciclones tropicales, han sido aprovechados por las autoridades para difundir y comunicar adecuadamente la situación de su municipio. Esta información ha sido asimilada por sus habitantes, y podría decirse que la cultura de la protección civil en la isla es bastante buena; la población sabe qué hacer en caso de algún ciclón tropical, conoce las funciones y acciones que lleva a cabo protección civil y participa de manera activa en las actividades relacionadas con el tema.

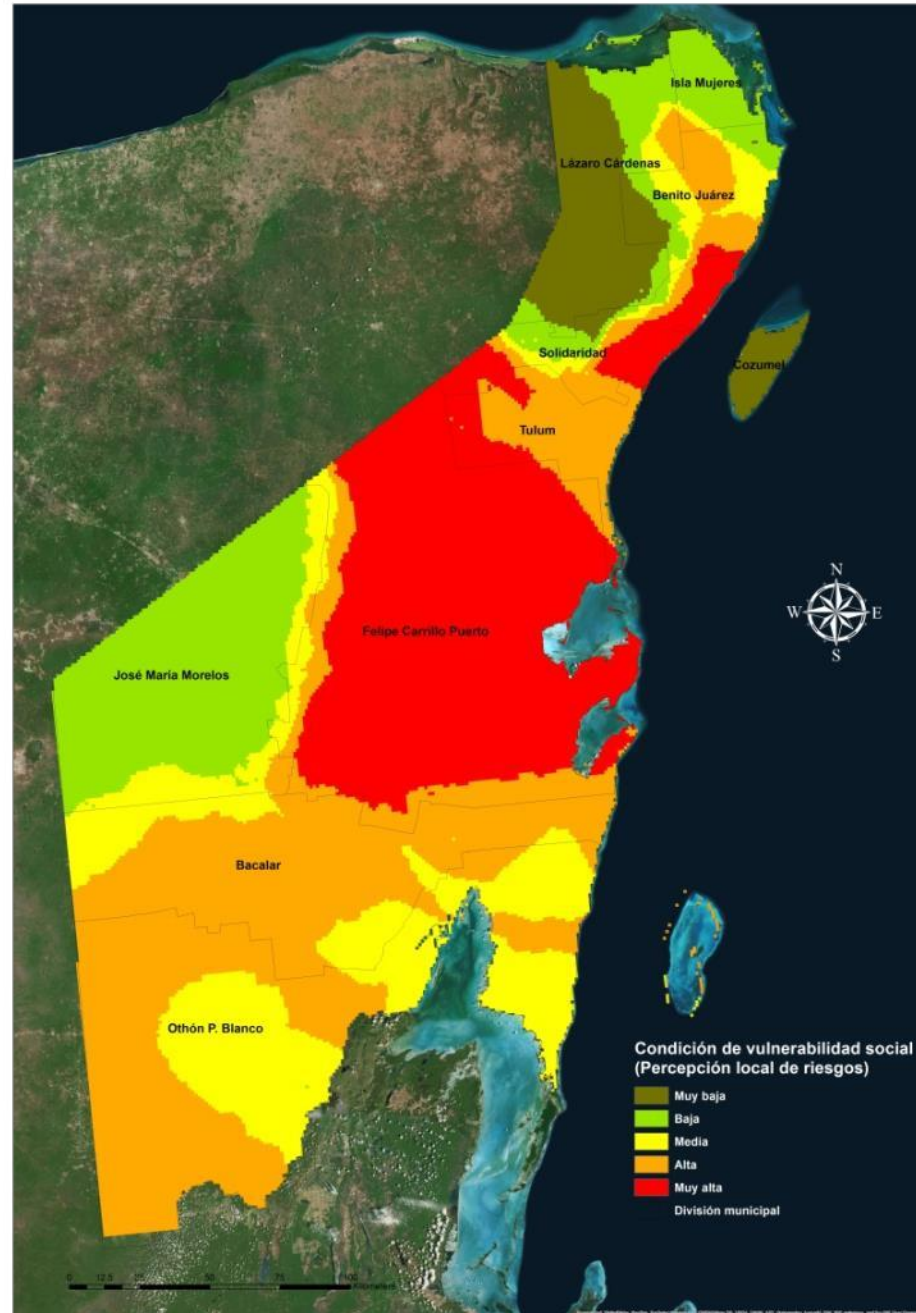
El siguiente mapa que se elaboró con la información de las encuestas, se hizo interpolando los valores asignados conforme a la guía del CENAPRED, según la condición de vulnerabilidad, lo que permitió obtener una imagen Raster, en la que se puede suponer cierta influencia de las zonas urbanas en las localidades rurales más cercanas, y viceversa.

Mapa 174. Condición de vulnerabilidad social, asociada al nivel de percepción local de riesgos, a nivel municipal.

Se puede observar que el municipio de Solidaridad es el que presentó una menor percepción de riesgos, lo que lo hace más vulnerable. Lo anterior se puede atribuir al acelerado crecimiento que ha registrado el municipio en los últimos años, pues tan sólo entre 2000 y 2010 prácticamente triplicó su población.

De igual forma, cabe señalar que la mayor parte de las personas que se han asentado en Playa del Carmen, principalmente, provienen de otras entidades, e incluso países, en donde los ciclones tropicales, por ejemplo, no son un fenómeno que se registre con la frecuencia en la que se presentan en Quintana Roo.

Por otro lado, Cozumel registró los mejores niveles de percepción local de riesgos. Su condición de isla, y los



Mapa 175. Interpolación de los valores asignados para determinar la condición de vulnerabilidad, asociada a la percepción local de riesgos.

En resumen, los valores que se asignaron a cada municipio, y que conforman el 25% del Índice de Vulnerabilidad Social (IVS), se presentan en la siguiente tabla:

Municipio	Percepción local de riesgos	Condición de vulnerabilidad	Valor asignado
Bacalar	Medio	Media	0.50
Benito Juárez	Medio	Media	0.50
Cozumel	Muy Alto	Muy Baja	0.00
Othón P. Blanco	Medio	Media	0.50
Felipe Carrillo Puerto	Bajo	Alta	0.75
Isla Mujeres	Alto	Baja	0.25
José María Morelos	Medio	Media	0.50
Lázaro Cárdenas	Alto	Baja	0.25
Solidaridad	Muy Bajo	Muy Alta	1.00
Tulum	Bajo	Alta	0.75

Fuente: Elaboración propia.

6.5 Capacidad de respuesta

Se concibe como capacidad de respuesta a todas aquellas acciones que lleva a cabo la dependencia encargada de la protección civil en el municipio, "para incorporar conductas preventivas y ejecutar tareas para la atención de la emergencia".¹³¹

El objetivo principal de esta sección de la metodología es justamente cuantificar, utilizando un cuestionario como instrumento de investigación, la capacidad de respuesta de las coordinaciones municipales de Protección Civil.

Para tal efecto, se aplicó el cuestionario propuesto por el CENAPRED, aunque al momento de asignarle valores a cada una de las respuestas, y en la obtención final de la condición de vulnerabilidad social asociada con la capacidad de respuesta del municipio, se realizaron algunos ajustes, mismos que se explican a lo largo del presente apartado.

El cuestionario constó de 24 preguntas (22 cerradas y dos abiertas) y se aplicó al encargado de la protección civil de cada municipio, o a la persona que éste designó. A cada pregunta se le asignó un valor, dependiendo de la respuesta obtenida. En la siguiente tabla se detallan las preguntas que conformaron el instrumento de investigación.

Tabla 195. Cuestionario para estimar la capacidad de respuesta a nivel municipal.

No	Pregunta	SI	NO
----	----------	----	----

Tabla 194. Resumen del análisis de la percepción local de riesgos por municipio y valores asignados para el cálculo del IVS.

¹³¹ CENAPRED, *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Evaluación de la vulnerabilidad física y social*, p. 88.

1	¿El municipio cuenta con una unidad de protección civil o con algún comité u organización comunitaria de gestión del riesgo que maneje la prevención, mitigación, preparación y la respuesta?		
2	¿Cuenta con un plan de emergencia?		
3	¿Cuenta con un consejo municipal de Protección Civil? ¿Cada cuándo sesiona?		
4	¿Existe una Ley Municipal de Protección Civil?		
5	¿Conoce los programas federales de apoyo para la prevención, mitigación y atención de desastres?		
6	¿Cuenta o utilizan algún mecanismo de alerta temprana?		
7	¿Cuenta con canales de comunicación a través de los cuales se pueda coordinar con otras instituciones, áreas o personas en caso de una emergencia?		
8	¿Las instituciones de salud municipales cuentan con programas de atención a la población (trabajo social, psicológico, vigilancia epidemiológica) en caso de desastre?		
9	¿Tiene establecidas las posibles rutas de evacuación y acceso (caminos y carreteras) en caso de una emergencia y/o desastre?		
10	¿Tiene establecidos los sitios que pueden fungir como helipuertos?		
11	¿Tiene ubicados los sitios que pueden funcionar como refugios temporales en caso de un desastre?		
12	¿Tiene establecido un stock de alimentos, cobertores, colchonetas, etc. para casos de emergencia?		
13	¿Tiene establecido un vínculo con centros de asistencia social (DIF, DICONSA, LICONSA, etc.) para la operación de los albergues y distribución de alimentos, cobertores, etc.?		
14	¿Se llevan a cabo simulacros en las distintas instituciones (escuelas, centros de salud, etc.) sobre qué hacer en caso de una emergencia y promueve un Plan Familiar de Protección Civil?		
15	¿Cuántas personas integran el personal operativo de la Unidad Municipal?		
16	¿El personal está capacitado para informar sobre qué hacer en caso de una emergencia?		
17	¿Cuenta con mapas o croquis de su localidad, que tengan identificados puntos críticos o zonas de peligro? Atlas municipal de riesgos.		
18	¿Cuenta con el equipo necesario en su unidad para la comunicación, tanto para recibir como para enviar información (computadora, internet, fax, teléfono, etc.)?		
19	¿Cuenta con acervos de información históricos de desastres anteriores y las acciones que se llevaron a cabo para atenderlos?		
20	¿Cuenta con equipo para comunicación estatal y/o municipal (radios fijos, móviles y/o portátiles)?		

21	¿Cuenta con algún Sistema de Información Geográfica (SIG) para procesar y analizar información cartográfica y estadística, con el fin de ubicar con coordenadas geográficas los puntos críticos en su localidad?		
22	¿Cuenta con algún sistema de Geo Posicionamiento Global (GPS) para georreferenciar puntos críticos en su localidad?		
23	¿Cuál es el grado promedio de escolaridad que tiene el personal activo?		
24	¿Qué actividades realizan normalmente?		

Fuente: CENAPRED.

Es importante tener en cuenta que los resultados obtenidos dependen, únicamente, de la veracidad de la información expuesta por los coordinadores de protección civil de cada municipio, ya que no se realizó una corroboración mediante pruebas físicas o documentales. Sin embargo, con base en la observación realizada al momento de aplicar el cuestionario, y el dialogo establecido durante el ejercicio con ellos, se detectaron necesidades y áreas de oportunidad importantes que se comentarán a lo largo de este apartado.

Con respecto a la primera pregunta, *¿el municipio cuenta con una unidad de protección civil encargada de las acciones de prevención, mitigación, preparación y respuesta?*, se corroboró que los 10 ayuntamientos que conforman la entidad cuentan con una Coordinación de Protección Civil, por lo que el valor asignado a cada uno de ellos fue de 0.

La segunda pregunta, *¿cuenta con un Plan de Emergencia?*, fue contestada de manera positiva por nueve de los 10 municipios. Cabe mencionar que en la mayoría de las coordinaciones de protección civil tienen contemplados únicamente dos planes de emergencia, el de la temporada de ciclones tropicales y el de la correspondiente a incendios forestales. El único municipio que el día que se levantó el cuestionario no contaba con ningún plan de emergencia fue Lázaro Cárdenas, aunque sí contemplan la realización de acciones durante ambas temporadas.

La siguiente pregunta, *¿existe consejo municipal de Protección Civil y cada cuándo sesiona?*, arrojó resultados similares a la anterior, aunque para este caso el único municipio que no cuenta con un consejo municipal de protección civil es Isla Mujeres. Es importante destacar que en aquellos municipios en los que sí está conformado este órgano, sesionan en promedio dos veces al año, justo al inicio de la temporada de huracanes y de la de incendios forestales. En caso de emergencia se convoca a sesiones extraordinarias.

Los consejos municipales de Protección Civil son órganos consultivos de coordinación de acciones, y son una réplica del Consejo Nacional. Es decir, a través de ellos se deben llevar a cabo acciones de planeación en el tema de Protección Civil. Además, son el conducto adecuado para convocar a todos los integrantes del sistema de protección civil, con el fin de promover y establecer acciones que reduzcan el riesgo de la población y sus bienes, así como de la infraestructura del municipio. Por tal motivo, el hecho de no contar con uno eleva la condición de vulnerabilidad del municipio.

El *reglamento de protección civil municipal*, al cual se refiere la siguiente pregunta, es el equivalente de la Ley General de Protección civil a nivel federal, y de la Ley de Protección Civil del Estado de Quintana Roo. El contar con una normatividad clara en el tema obliga a colaborar y coadyuvar con el sistema municipal a todos sus integrantes, desde autoridades y servidores públicos, hasta empresas y cualquier persona que habite o visite el municipio. En este sentido, Lázaro Cárdenas y Bacalar no cuentan con este instrumento legal.

En el caso de Bacalar, al ser el municipio más nuevo del Estado, utiliza la normatividad que le regía antes de ser creado, el 2 de febrero de 2011; es decir, se rige por el reglamento de Othón P. Blanco, de cuyo territorio fue segregado.

La quinta pregunta va enfocada a conocer si los responsables de protección civil **conocen los programas federales de apoyo para la prevención, mitigación y atención de desastres**. En este sentido, en los municipios de Benito Juárez y Felipe Carrillo Puerto existe un desconocimiento total de los programas federales. En Lázaro Cárdenas se mencionó únicamente el Fondo de Desastres Naturales (FONDEN), aunque se desconoce la forma de acceder a él. Por tal motivo, se valoró la respuesta de este municipio con 0.5.

Para la sexta pregunta, **¿cuenta o utiliza algún sistema de alerta temprana?**, la mayoría de los municipios conocen y utilizan el Sistema de Alerta Temprana para Ciclones Tropicales (SIAT-CT). Sin embargo, en varios de los ayuntamientos no se comunica efectivamente la información.

Los sistemas de alerta temprana son señales que indican la posibilidad de ocurrencia de un evento, y su objetivo principal es proteger la vida y los bienes de la población. Se consideran fundamentales en la implementación de estrategias para la reducción de desastres.

Si bien este tipo de herramientas son desarrolladas y administradas por diversos organismos públicos (dependencias de gobierno o universidades principalmente), también pueden emanar de la propia comunidad. Su implementación no depende únicamente de la instrumentación ya que como lo indica el "Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres", de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas: "Para satisfacer adecuadamente las necesidades de la gente, los sistemas deben ser integrados y vincular a todos los actores en la fase inicial de la cadena de alerta temprana, incluyendo a la comunidad científica y técnica, a las autoridades públicas y a las comunidades locales. Es esencial que la comunicación sea precisa, oportuna, confiable e integral".¹³²

En este sentido, en Benito Juárez, Cozumel, Solidaridad, Tulum y Othón P. Blanco los medios de comunicación juegan un papel sumamente importante, pues es a través de ellos que se hace llegar la información a la población. En algunos casos, esta información es transmitida en lenguas indígenas, aunque en los municipios con mayor presencia de población indígena los encargados de protección civil expresaron la falta de sistemas de alerta temprana local.

Así, de los 10 municipios de la entidad, Tulum, José María Morelos, Isla Mujeres y Felipe Carrillo Puerto no cuentan con un sistema propio, pero hacen uso de la información del Servicio Meteorológico Nacional para el caso de los ciclones tropicales.

Tanto en la pregunta siete: **¿cuenta con canales de comunicación a través de los cuales se pueda coordinar con otras instituciones, áreas o personas en caso de una emergencia?**, como en la ocho: **¿Las instituciones de salud municipales cuentan con programas de atención a la población (trabajo social, psicológico, vigilancia epidemiológica) en caso de desastre?**, el único municipio que respondió de manera negativa fue Solidaridad.

La comunicación del encargado de protección civil con otras instituciones públicas y privadas es esencial, ya que la gestión de riesgos es transversal y todas las dependencias, desde su campo de acción y dentro de sus atribuciones, pueden implementar acciones de prevención, mitigación y respuesta en caso de algún evento. Lo anterior no sólo beneficia a toda la

comunidad, también permite ahorrar recursos y no duplicar acciones.

Por otro lado, también es primordial el papel que juegan las instituciones de salud en la gestión integral de riesgos, sobre todo en la atención de emergencias y efectos inducidos. Labores como la atención médica, vigilancia epidemiológica, control de vectores y saneamiento, son fundamentales después de la ocurrencia de un evento. El vínculo entre protección civil y las instituciones de salud debe ser sumamente estrecho, para planificar posibles escenarios y desarrollar planes de acción previa.

En todos los **municipios se tienen claramente identificadas las rutas de evacuación en caso de alguna emergencia y desastre**. Esto es de gran importancia, sobre todo para implementar estrategias para la atención de la emergencia, evacuación de la población y envío de ayuda humanitaria en y hacia las localidades más aisladas y de difícil acceso.

En la pregunta 10, **¿tiene establecidos los sitios que pueden fungir como helipuertos?**, únicamente Benito Juárez no cuenta con esta información, aunque al momento de llevar a cabo el cuestionario en cada uno de los municipios, no se constató que los tengan identificados en algún mapa o documento, simplemente los encargados de protección civil saben en dónde están ubicados.

Todos los municipios **tienen identificados claramente los refugios temporales** dentro de su demarcación, tanto en zonas urbanas como rurales. De igual forma, aquellos municipios cuya vocación principal es el turismo, y los cuales son visitados por miles de personas a lo largo del año (Benito Juárez, Solidaridad, Cozumel y Tulum), tienen establecidos sitios expresos para alojar a turistas en caso de emergencia.

Se detectó que la mayoría de los refugios temporales habilitados en el estado son escuelas. De acuerdo con el UNICEF, "algunas consecuencias de usar escuelas como refugios temporales son la interrupción del proceso enseñanza-aprendizaje, el deterioro de aulas y laboratorios, el uso inadecuado del mobiliario y equipo, el daño de los servicios sanitarios y la pérdida de útiles, materiales didácticos y utensilios. Lo que se ve agravado por el hecho de que después que termina la emergencia es difícil recuperar las estructuras y reanudar las actividades escolares".¹³³ Desafortunadamente en el Estado, sobre todo en las zonas rurales, las escuelas suelen ser la edificación más resistente y mejor construida.

Con relación a la siguiente pregunta, únicamente en Othón P. Blanco, Cozumel, Lázaro Cárdenas y Tulum **se tiene establecido un stock de alimentos e insumos para casos de emergencia**. El contar con recursos materiales y/o económicos especialmente etiquetados, agiliza la atención de la población en caso de desastre y hace más efectiva la capacidad de respuesta del municipio.

Es importante señalar que no es necesario que el stock sea muy grande, puesto que con las reglas de operación vigentes del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN), el apoyo de la federación, en caso de que se declare como emergencia al municipio, es relativamente rápido. Sin embargo, si se cuenta con algunos recursos almacenados la respuesta es inmediata para las personas más afectadas y necesitadas.

La pregunta número 13 tiene como objeto conocer si **existe vinculación entre la dependencia encargada de la**

¹³² EIRD, *Vivir con el riesgo. Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres*, capítulo 5, pp. 397.

¹³³ UNICEF, "La escuela como albergue, una realidad que perjudica a la niñez", en "Albergues en escuelas, ¿Cuándo?, ¿Cómo?, ¿Por qué?". Pp3.

protección civil en el municipio y centros de asistencia social (DIF, DICONSA, LICONSA, etc.) para la operación de los albergues y distribución de apoyos en caso de emergencia. Al respecto, únicamente en el municipio de Solidaridad no existe cooperación con organismos de este tipo, probablemente porque la misma coordinación se hace cargo de estas funciones o se vincula con otras dependencias, como SEDENA o SEMAR.

La **realización de simulacros** en todos los municipios, a excepción de Bacalar, es una constante. Estos se realizan cotidianamente en escuelas, oficinas de gobierno, etc. En algunos ayuntamientos incluso se realizan dos simulacros generales al año, en los cuales participan organismos públicos y privados, así como todas las escuelas. El caso de Bacalar es extraordinario, puesto que es el municipio más nuevo del Estado y, como se verá más adelante, cuenta con recursos humanos reducidos.

El **número de personal activo en cada coordinación municipal de protección civil** es muy variado; mientras que en Cozumel o Benito Juárez son más de 40 personas, Bacalar sólo cuenta con una. Debido a lo anterior, se optó por valorar de manera distinta a la sugerida en la metodología del CENAPRED, en la cual se propone asignar el valor de 0 si cuentan con personal, y el de 1 si carecen de él.

Así, se determinaron tres niveles para la cuantificación, asignándole el valor de 0 a aquellos municipios en donde el personal activo fuera mayor de 40; el de 0.5 a aquellos que tuvieran más de 20, pero menos de 40, y el de 1 a todos los que su personal no alcanzará las 20 personas. Se realizó esta modificación con el fin de reflejar, con mayor claridad, la capacidad operativa de las coordinaciones municipales.

La pregunta 16 pretende conocer si **el personal de la coordinación municipal de protección civil está capacitado para informar qué hacer en caso de una emergencia.** En todos los casos la respuesta fue afirmativa; sin embargo, para el caso de Bacalar, por el hecho de contar con sólo una persona, se le asignó un valor de 0.5.

La siguiente pregunta: **¿cuenta con mapas o croquis de su municipio en los cuales se observen los puntos críticos o zonas de peligro?**, arrojó resultados interesantes. En primer lugar, son pocos los municipios del estado que cuentan con un atlas de riesgos o peligros. La mayoría del material con el que cuentan es impreso, o en formato electrónico (PDF). Lo anterior muestra una importante área de oportunidad, en el sentido de ordenar y analizar esta información usando SIG.

La valoración también se modificó, ya que aquellos municipios que sí cuentan con un atlas de riesgos se les asignó el valor de 0; a los que tienen mapas impresos o en formatos electrónicos no editables 0.5, y a los que no cuentan con ningún insumo de este tipo 1.

La pregunta 18 hace referencia al **equipo de comunicación con que cuentan las unidades municipales**; en Benito Juárez, José María Morelos y Bacalar la respuesta fue negativa. Al momento de levantar el cuestionario en cada municipio, se pudo observar cierta disparidad en la calidad no sólo del equipo de comunicación, sino de mobiliario y de la infraestructura con la que cuenta cada coordinación.

En este sentido, la percepción de cada municipio es muy diferente. Por ejemplo, en Benito Juárez se observó la existencia de teléfono, computadoras portátiles y de escritorio; en Bacalar apenas se cuenta con un par de escritorios, dentro de un área que se comparte con la policía municipal, y una carencia de equipo evidente, lo que limita considerablemente sus funciones.

La **información histórica de desastres** es una herramienta fundamental para diversos aspectos. Permite ir

conformando un acervo de datos que, en el mediano plazo, podría ayudar a identificar regiones y sectores más vulnerables; la incidencia de fenómenos; afinar los planes de protección civil; realizar estudios costo-beneficio, etc. En este sentido, únicamente Benito Juárez, Solidaridad, Tulum y Othón P. Blanco manifestaron contar con acervos históricos de desastres, así como de las acciones realizadas.

Cabe señalar que desde 1999 el CENAPRED se encarga de evaluar el impacto social y económico de los principales desastres ocurridos en el país, con base en una metodología desarrollada por la Comisión Económica Para América Latina y el Caribe (CEPAL). La información es publicada anualmente en la Serie *Impacto Socioeconómico de los Desastres en México*, en la que pueden encontrar estudios detallados de desastres que han impactado al Estado, como los huracanes Emily y Wilma, en 2005, o Dean, en 2007.

La pregunta 20, **¿cuenta con equipo para comunicación estatal y/o municipal (radios fijos, móviles y/o portátiles)?**, fue respondida de manera positiva por Cozumel y Tulum. Lo anterior evidencia la carencia de equipos sustantivos para la transmisión de mensajes y la coordinación durante la atención de una emergencia.

Únicamente en Tulum y Othón P. Blanco se **cuenta con algún Sistema de Información Geográfica (SIG) para procesar información cartográfica y estadística.** Los SIG's son una herramienta de gran utilidad para organizar, manipular, analizar y modelar un gran número de información, y vincularla a una referencia espacial. Lo anterior no sólo permite tomar mejores decisiones en torno a la protección civil, sino que su utilidad se puede aplicar a otros ámbitos de importancia para el municipio, como el ordenamiento territorial, catastro, turismo, etc.

La última pregunta que se valoró fue si las coordinaciones municipales de protección civil **cuentan con algún Sistema de Geoposicionamiento Global.** Únicamente Cozumel utiliza esta herramienta, que permite actualizar la información cartográfica que resulte de relevancia. Por ejemplo, cada año en el mencionado municipio se realiza un levantamiento de las viviendas de material endeble, así tienen perfectamente localizadas en un SIG, tanto su ubicación, como las características de la población que las habita, lo que facilita la toma de decisiones antes, durante y después de un evento.

Las últimas dos preguntas no influyen en la valoración de la capacidad de respuesta; sin embargo, vale la pena analizarlas. La primera hace referencia al nivel de escolaridad del personal activo de cada coordinación de protección civil municipal. En la mayoría, el grado promedio de escolaridad es de 12 años, es decir, bachillerato.

Es necesario que la Protección Civil se profesionalice, sobre todo a nivel local. La mayor vulnerabilidad organizacional de los municipios a nivel nacional es la falta de continuidad, por lo que se supone que, mientras mayor sea la escolaridad de los encargados, más se podrá acortar la curva de aprendizaje y tener mejores resultados, que con los de menor grado de estudios.

Al respecto, también es importante mencionar que la Escuela Nacional de Protección Civil ofrece, entre otros cursos, el plan de estudios para Técnico Básico en Gestión Integral del Riesgo, cuya finalidad es "fortalecer la cultura de la prevención, además de lograr que la población y el personal que se dedica a labores de la gestión integral de riesgos, así como aquellos que se asocian con ésta, cuenten con las competencias necesarias para que su labor sea útil y efectiva para proteger la vida y el patrimonio de los mexicanos".¹³⁴

¹³⁴ CENAPRED. www.enaproc-CENAPRED.gob.mx

Por último, se preguntó cuáles eran las actividades cotidianas que desempeñaban en las coordinaciones municipales de protección civil. En general, la mayor parte del tiempo es dedicado a inspecciones, verificaciones y anuencias, aunque también se realizan simulacros, se da capacitación y se atienden emergencias.

Los datos obtenidos de cada cuestionario se vaciaron en una matriz, con el fin de obtener su valoración final. En la siguiente tabla se muestran los resultados. Los colores indican la condición de vulnerabilidad según cada respuesta. Así, con base en la guía del CENAPRED, se le asignó un valor entre 0 y 1 a cada municipio.

Tabla 196. Matriz de resultados del cuestionario de capacidad de respuesta.

Municipio	Pregunta																						Suma	Valor asignado	Condición de vulnerabilidad
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22			
Cozumel	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2.5	0.00	Muy Baja
Felipe Carrillo Puerto	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1.0	0	0.5	0	1	1	1	1	8.5	0.50	Media
Isla Mujeres	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0.5	0	0.5	0	1	1	1	1	8.0	0.50	Media
Othón P. Blanco	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	1	0	1	3.0	0.25	Baja
Benito Juárez	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0.5	0	1	1	0	1	1	1	8.5	0.50	Media
José María Morelos	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1.0	0	0.5	1	1	1	1	1	8.5	0.50	Media
Lázaro Cárdenas	0	1	0	1	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0	0.5	0	1	1	1	1	8.5	0.50	Media
Solidaridad	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1.0	0	0	0	0	1	1	1	8.0	0.50	Media
Tulum	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0.5	0	0	0	0	1	3.0	0.25	Baja
Bacalar	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1.0	0.5	0.5	1	1	1	1	1	10.0	0.75	Alta

Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que los rangos utilizados para asignar el valor que correspondió a la capacidad de respuesta, se modificaron ligeramente de los sugeridos en la guía del CENAPRED. A continuación se muestra la tabla de intervalos utilizada.

Tabla 197. Intervalos utilizados para valorar la capacidad de respuesta.

Rango	Capacidad de respuesta	Condición de vulnerabilidad	Valor asignado
De 0.00 a 2.99	Muy Alta	Muy Baja	0.00
De 3.00 a 5.99	Alta	Baja	0.25
De 6.00 a 8.99	Media	Media	0.50
De 9.00 a 11.99	Baja	Alta	0.75

12.00 o más

Muy Baja

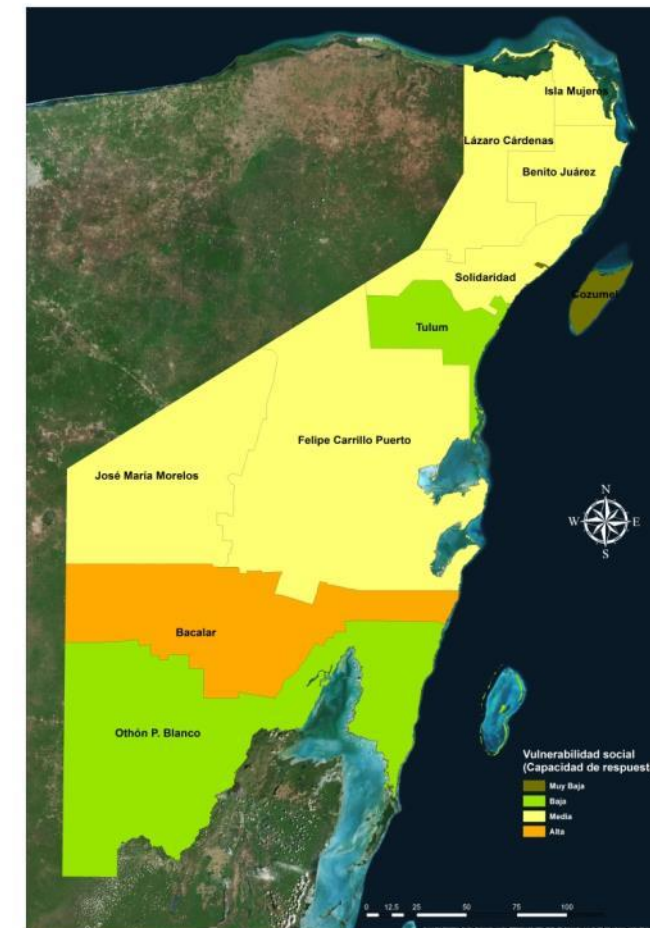
Muy Alta

1.00

Fuente: Elaboración propia.

En resumen, el único municipio que presentó una capacidad de respuesta Muy Alta fue Cozumel. Othón P. Blanco y Tulum, Alta; seis municipios (Felipe Carrillo Puerto, Isla Mujeres, Benito Juárez, José María Morelos, Lázaro Cárdenas y Solidaridad), Media, y únicamente Bacalar registró una capacidad de respuesta Baja.

Es importante mencionar que a mayor capacidad de respuesta, menor condición de vulnerabilidad. Es decir, Cozumel es el que registró menor condición de vulnerabilidad, al tener una mejor capacidad de respuesta.



Mapa 176. Condición de vulnerabilidad según capacidad de respuesta a nivel municipal.

6.6 Índice de Vulnerabilidad Social

Como se mencionó anteriormente, el IVS se obtuvo a partir de la metodología sugerida por el CENAPRED, asignándole un peso del 50% a las características socioeconómicas; 25% a la percepción local de riesgos, y 25% a la capacidad de respuesta del municipio.

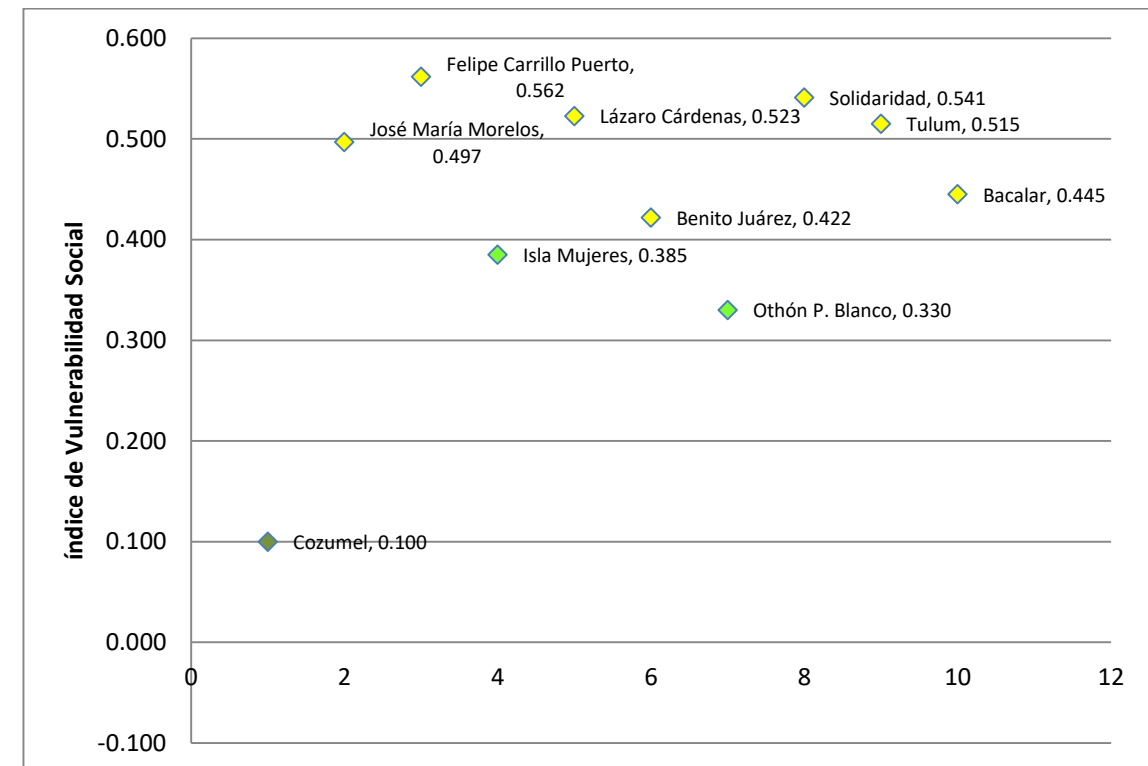
Con base en lo anterior, los resultados arrojaron que siete de los 10 municipios del estado presentaron un grado de vulnerabilidad social Medio, dos Bajo, y solamente Cozumel registró niveles Muy Bajos.

Tabla 198. Índice de Vulnerabilidad Social a nivel municipal.

Municipio	Indicadores socioeconómicos	Capacidad de respuesta	Percepción local de riesgos	Índice de Vulnerabilidad Social	Grado de Vulnerabilidad Social
Cozumel	0.20	0.25	0.00	0.163	Muy Bajo
Felipe Carrillo Puerto	0.50	0.50	0.75	0.562	Medio
Isla Mujeres	0.40	0.50	0.25	0.385	Bajo
Othón P. Blanco	0.29	0.25	0.50	0.330	Bajo
Benito Juárez	0.34	0.75	0.50	0.484	Medio
José María Morelos	0.49	0.50	0.50	0.497	Medio
Lázaro Cárdenas	0.67	0.50	0.25	0.523	Medio
Solidaridad	0.33	0.50	1.00	0.541	Medio
Tulum	0.53	0.00	0.75	0.453	Medio
Bacalar	0.27	0.75	0.50	0.445	Medio

Fuente: Elaboración propia.

Felipe Carrillo Puerto, Solidaridad, Lázaro Cárdenas y Tulum fueron los municipios que registraron mayores índices de vulnerabilidad social. De hecho, están próximos a niveles altos (a partir de 0.601 se considera alta), por lo que, de no atender las recomendaciones sugeridas, podrían cambiar su situación en los próximos años.



Gráfica 117. Índice de vulnerabilidad social.

A continuación se realiza un breve análisis para cada municipio:

Cozumel

El único punto en el que podría mejorar es en la capacidad de respuesta. El hecho de que el municipio sea prácticamente una isla ha derivado en una mayor cobertura de servicios básicos en las viviendas, de salud y educativos, lo que arrojó una condición de vulnerabilidad Muy Baja en lo referente a los indicadores socioeconómicos.

De igual forma, la percepción local de los riesgos es elevada. Lo anterior se atribuye a que, a pesar de tener una población flotante elevada en ciertas temporadas del año, los habitantes tienen conocimiento de los riesgos que les circundan, principalmente de los ciclones tropicales. El papel de las radiodifusoras y televisoras locales ha sido fundamental para difundir información relacionada con la gestión integral de riesgos.

Asimismo, se percibe una mayor cohesión social que en otros municipios; los habitantes muestran un sentido de pertenencia a la comunidad, lo que se ha observado, incluso, en la recuperación de desastres anteriores, como Wilma, cuando a pocos minutos de que el fenómeno se alejó, la población se organizó para limpiar calles y apoyar a las personas afectadas.

Por último, la capacidad de respuesta del municipio también fue de las más elevadas a nivel estatal. Esto es reflejo de la buena relación que existe entre la Coordinación municipal de Protección Civil y todas las dependencias, organizaciones o instituciones que conforman el Sistema Municipal de Protección Civil, lo que ha derivado en la transversalización de acciones encaminadas a disminuir los riesgos de la población, mediante la difusión de información, capacitación, actualización de bienes expuestos y sus características y obras.

Felipe Carrillo Puerto

Presentó los mayores niveles de vulnerabilidad social. Tanto los indicadores socioeconómicos, como la percepción local del riesgo son factores que inciden directamente en la vulnerabilidad de su población.

El hecho de que sea uno de los municipios más grandes del Estado, y con el mayor número de localidades rurales, ha derivado en una menor cobertura de servicios de salud, educativos y de infraestructura en general. Asimismo, contrario a lo que sucede en aquellos ayuntamientos con una alta vocación turística, en Felipe Carrillo Puerto la mayoría de la población depende de las actividades primarias, y es el municipio de Quintana Roo con mayor presencia indígena.

Aunque la capacidad de respuesta del municipio se consideró Media, existen evidentes carencias para que las autoridades locales de protección civil puedan llevar a cabo su labor de una mejor manera. Equipamiento, capacitación, cartografía básica del municipio y acervos de información histórica, etc., son sólo algunas de las áreas de oportunidad que se deben atender para que se dé una mayor presencia de la dependencia en el municipio.

Otro factor que convirtió a Felipe Carrillo Puerto en el municipio con mayores niveles de vulnerabilidad social del Estado, fue el hecho de que sus habitantes no conocen los riesgos que les circundan, ni a quién acudir en caso de alguna emergencia.

Isla Mujeres

El caso de Isla Mujeres es similar al de Cozumel, con la diferencia de que la parte continental del municipio incidió directamente en aumentar los niveles de vulnerabilidad social, ya que es justamente en esta zona en donde existe una mayor dispersión de la población, una menor cobertura de servicios y menos presencia de las autoridades municipales.

En la isla, en cambio, la cobertura de los servicios es amplia y, al igual que en Cozumel, se percibe una mayor cohesión social. La población que la habita está consciente de los riesgos que le circundan, y aunque la capacidad de respuesta es Media, esto se debe más a la falta de equipamiento y de presencia en la zona continental del municipio, sobre todo en las localidades rurales.

Al igual que en aquellos municipios de vocación turística, la población flotante que acude diariamente a Isla Mujeres es bastante significativa, por lo que es preciso encontrar canales adecuados para que los visitantes sepan cómo actuar en caso de alguna emergencia.

Othón P. Blanco

La vulnerabilidad social para Othón P. Blanco se consideró Baja, ya que fue uno de los municipios con mejor valoración en lo referente a los indicadores socioeconómicos, y a la capacidad de respuesta de las autoridades encargadas de protección civil. Al ser Chetumal la cabecera municipal, y a su vez capital del estado de Quintana Roo, la cobertura de los servicios básicos con relación a la salud, educación y vivienda es amplia.

En lo relacionado con la percepción local del riesgo, se observaron discrepancias importantes entre la población rural y la urbana. En este sentido, una mayor difusión de las acciones que realiza protección civil en las localidades rurales, así como campañas informativas sobre qué hacer en caso de emergencia, serían de gran utilidad para cerrar la brecha.

Cabe resaltar que el último desastre con efectos importantes en el municipio fue el huracán "Janet", ocurrido en 1955. Si bien se han registrado otros eventos, el impacto social y económico no ha sido tan severo como el provocado por "Janet". Lo anterior, probablemente ha influido en la percepción de la población entorno a los riesgos que le circundan, ya que con el paso del tiempo se ha ido borrando el recuerdo de lo sucedido en aquella ocasión.



Fotografía 23. Impacto de "Janet" en Chetumal. (Fuente: UNIÓN Cancún)¹³⁵.

Benito Juárez

El municipio más poblado del Estado registró niveles Medios de vulnerabilidad social, atribuibles a la capacidad de respuesta de las autoridades responsables de protección civil, así como a los niveles de percepción local de riesgos.

Con relación a los indicadores socioeconómicos, la cobertura de servicios básicos es bastante amplia en gran parte del municipio, incluyendo la zona rural. Sin embargo, se observó que la Coordinación municipal de Protección Civil no se da abasto para atender las necesidades básicas de la población.

El dotar de mayores recursos a la dependencia, derivaría en aumentar las acciones encaminadas a prevenir el impacto de los desastres. Actualmente, por lo que se pudo detectar con el análisis de la información recopilada, las principales funciones están orientadas a verificar y emitir anuencias de comercios o empresas que se establecen en el municipio. Hace falta orientar esfuerzos en capacitación, innovación tecnológica y difusión de información, para mejorar la capacidad de respuesta y a su vez incidir en la percepción local de riesgos.

De igual forma, se requiere mayor presencia en las zonas rurales del municipio para incluir a la población en la toma de decisiones en torno a los riesgos que le circundan.

José María Morelos

Este municipio presenta características muy similares a Felipe Carrillo Puerto. Hay una alta dispersión poblacional; la mayoría de su población se considera rural y, por tal motivo, la cobertura de servicios básicos no es tan amplia como en las zonas urbanas. Lo anterior arrojó una condición de vulnerabilidad Alta, asociada a las características socioeconómicas.

Lo que ayudó a que el grado de vulnerabilidad social del municipio se mantuviera en Medio, fue que tanto la capacidad de respuesta como la de percepción local de riesgos no fue tan elevada. A pesar de la carencia de equipo, y del desconocimiento de tecnologías como los SIG, la presencia de las autoridades encargadas de protección civil en el municipio se pudo constatar, ya que la población tiene relativamente claro a quién acudir en caso de alguna emergencia, e identifica los principales riesgos a los que está expuesta.

¹³⁵ <http://www.unioncancun.mx/articulo/2014/09/29/ciudadanos/janet-59-anos-exhiben-memorias-del-mortal-huracan-en-chetumal>.

Un área de oportunidad importante es la integración de nuevas tecnologías en la creación de los planes de emergencia. La incorporación de herramientas como los SIGS's, no sólo facilitaría la toma de decisiones de las autoridades encargadas de la protección civil, sino que les permitiría realizar acciones como verificación de inmuebles, anuencias e inspecciones más rápido y de manera más organizada.

Lázaro Cárdenas

A pesar de que el grado de vulnerabilidad social del municipio se consideró Medio, existen diferentes áreas de oportunidad que lograrían disminuirlo, y otros factores que podrían aumentarlo exponencialmente.

A nivel estatal, Lázaro Cárdenas fue el municipio con la condición de vulnerabilidad Más Alta, asociada a las características socioeconómicas de la población. Lo anterior se traduce en una baja cobertura de servicios básicos; una alta presencia de población indígena; una alta ocupación en las actividades primarias, y una dispersión poblacional elevada. Todos estos factores se relacionan con bajos niveles de desarrollo.

Además, uno de los nuevos polos de atracción turística del estado es Holbox, ubicado al norte de la cabecera municipal, y cuyo crecimiento, se espera, podría aumentar considerablemente en los próximos años. El destino turístico se ubica en una zona con alta ocurrencia de ciclones tropicales, por lo que es indispensable planear adecuadamente el desarrollo de la zona, tomando en cuenta, sobre todo, la calidad de la infraestructura que se construya; la cobertura de los servicios básicos, y los riesgos a los que estará expuesta la población.

También es necesario dotar de recursos a la Coordinación Municipal de Protección Civil, con el fin de que ésta pueda tener presencia en todo el territorio para llevar a cabo acciones de capacitación, difusión e implementación de medidas preventivas.

Solidaridad

El municipio de Solidaridad está dentro de los que mayor grado de vulnerabilidad social presentaron en el Estado. Si bien éste se consideró Medio, se encuentra cerca de alcanzar el siguiente nivel (Alto). Lo anterior se debe principalmente a la baja percepción local de riesgos de la población.

Como se ha mencionado, el municipio de Solidaridad es el que presenta el crecimiento más acelerado en la entidad. En él se han asentado miles de personas provenientes de otras entidades de México, así como de otros países. Aunado a ello, este crecimiento se ha dado en un periodo muy corto (la población pasó de 63,752 habitantes, en 2000, a 159,310, en 2010).

Lo anterior influye determinadamente en la percepción local del riesgo, ya que las personas que se han establecido en los años recientes no han vivido la experiencia de un evento desastroso; tienen un conocimiento bajo de los riesgos que les circundan; y desconocen a quién acudir en caso de alguna emergencia, así como los programas y planes de los tres órdenes de gobierno en materia de Protección Civil. El último impacto severo de un ciclón tropical en el municipio fue en 2005, cuando el huracán "Wilma" ocasionó severos daños en todo el norte del Estado.

El reforzar las labores de difusión y comunicación es uno de los principales retos de las dependencias encargadas de la protección civil, para lograr que los habitantes del municipio estén conscientes de los peligros a los que se podrían enfrentar. De igual forma, el establecer un mecanismo para informar a la población flotante sobre las medidas de prevención que puede adoptar en caso de emergencia debería ser una prioridad, puesto que es uno de los destinos más visitados a lo largo del año.

Tulum

Tulum fue el municipio que obtuvo la mayor capacidad de respuesta en el Estado. De acuerdo con el cuestionario aplicado al coordinador de protección civil, situación que evitó que su grado de vulnerabilidad fuera mayor, ya que sus indicadores socioeconómicos, como la percepción local de riesgos, obtuvieron condiciones de vulnerabilidad Altas.

Se detectaron varias áreas de oportunidad en el municipio. En primer lugar, es indispensable ampliar la cobertura de servicios básicos, principalmente en la zona rural. De igual forma, el crecimiento de la mancha urbana se ha dado de una manera acelerada, por lo que la utilización de herramientas que permitan una planeación adecuada del territorio, que tome en cuenta los peligros a los que está expuesto, resulta fundamental.

Al igual que en Solidaridad, el municipio se ha convertido en un importante polo de atracción, por lo que se han asentado un gran número de personas provenientes de otros estados, e incluso países. El concientizar a esta población es uno de los principales retos para que la percepción de los riesgos sea mayor y se refleje en una disminución de su vulnerabilidad social.

Bacalar

Bacalar es el municipio más nuevo del Estado, y el análisis de la información recabada arrojó una vulnerabilidad social Media. Sin embargo, este resultado pudiera ser engañoso, ya que para el procesamiento de los datos referentes a los indicadores socioeconómicos se utilizaron los de Othón P. Blanco, pues de este se desprendió el territorio de Bacalar en 2011, por lo que aún no cuenta con la mayoría de la información censal requerida. Por lo anterior, es probable que la cobertura de servicios básicos de educación, salud, vivienda, etc., sean menores y, por ende, la condición de vulnerabilidad más Alta.

Por otro lado, la capacidad de respuesta del municipio se consideró Baja, ya que se observó una carencia de recursos humanos, materiales y tecnológicos considerable. En cuanto a la percepción local de riesgos de la población, está podría reforzarse mediante acciones de difusión y capacitación.

6.7 Conclusiones

El Estado de Quintana Roo siempre ha registrado una alta incidencia de fenómenos de origen hidrometeorológico, principalmente ciclones tropicales. Antes de la década de los 80, los efectos de estos fenómenos eran prácticamente nulos o muy puntuales, por lo que no se consideraban desastres, con excepción del huracán "Janet", en 1955, que devastó la ciudad de Chetumal.

En los últimos 30 años, el crecimiento poblacional que ha experimentado la entidad, particularmente la zona norte del Estado, ha incrementado potencialmente el sistema expuesto, y ha amplificado los efectos de los ciclones tropicales al devastar amplias extensiones de vegetación, particularmente manglar. Lo anterior ha provocado que ciclones tropicales que probablemente en el pasado hubieran dejado daños y pérdidas mínimas, actualmente ocasionen un impacto social y económico severo.

En este sentido, el identificar la vulnerabilidad social de los municipios permite obtener conclusiones determinantes, que se deben traducir en acciones para prevenir el impacto de futuros desastres; aumentar la resiliencia del Estado, y fortalecer los planes y programas de protección civil.

Una de las principales conclusiones que se obtienen del análisis realizado es que **existen diversas áreas de**

oportunidad para que disminuir la vulnerabilidad de la población ante el impacto de los diferentes tipos de fenómenos.

En cuanto a las características socioeconómicas, se concluye **que se debe ampliar la cobertura de servicios educativos, de salud y de acceso a servicios básicos en las zonas rurales**. Además, la calidad de estos servicios debe mejorar. Acortar las brechas entre lo rural y lo urbano, se verá reflejado en una población más informada, mejor preparada y más resiliente.

El **fortalecimiento de las coordinaciones municipales de Protección Civil es una necesidad imperante para aumentar la capacidad de respuesta de los municipios**. Equipo, tecnología, capacitación, recursos humanos, materiales y financieros, son necesarios para que el esfuerzo que realizan los municipios en materia de protección civil rinda mejores frutos.

La población flotante que reciben algunos municipios puede sobrepasar por mucho la capacidad de respuesta en caso de una emergencia. Benito Juárez, Solidaridad, Isla Mujeres, Cozumel y Tulum reciben miles de turistas al año, que en caso de algún desastre podrían quedar varados. Es indispensable tener en cuenta esto para la elaboración de planes de evacuación y atención de la emergencia.

La percepción local de la población en aquellos municipios que han experimentado un crecimiento acelerado es Muy Baja, lo que se traduce en condiciones de vulnerabilidad Altas. El informar lo antes posible a esta población sobre los riesgos a los que está expuesto el municipio, y sobre las medidas de prevención que puede adoptar, podría disminuir los niveles de vulnerabilidad de la población.

Los resultados obtenidos en referencia a la percepción local de riesgos pusieron de manifiesto, en general, **deficiencias en materia de conciencia ciudadana a cerca de protección civil, falta de credibilidad de la institución, o presencia de la misma, en localidades rurales**.

Es probable que la mayor vulnerabilidad que registran los municipios sea la falta de continuidad de las autoridades de protección civil, ya que no hay un seguimiento de las acciones realizadas por gobiernos anteriores. Lo anterior se observó en varios municipios, en los que prácticamente toda la información de las acciones realizadas por la administración saliente se desconoce.

Por último, más que evitar el impacto económico de los desastres, la función principal de la protección civil es salvaguardar la vida de las personas. En ese sentido, es importante fortalecer la percepción de la población mediante campañas informativas, talleres, capacitación y difusión de medidas preventivas.

6.8 Medidas de prevención y mitigación

Ampliar la cobertura de servicios básicos en zonas rurales.

Utilizar SIG para conformar un acervo de información georeferenciada que facilite la toma de decisiones.

Conformar una base de datos a nivel estatal en la que se registren todos los eventos desastrosos ocurridos y sus efectos.

Lo anterior permitirá, en el mediano plazo, identificar las zonas más vulnerables y de mayor incidencia por tipo de fenómeno.

Transversalizar la protección civil. Coadyuvar con las diferentes dependencias de los tres órdenes de gobierno para identificar sinergias que permitan disminuir la vulnerabilidad de la población mediante la realización de obras,

acciones y planes de trabajo conjunto.

Estrechar relaciones con los medios de comunicación locales para difundir las acciones que realiza protección civil, y para informar a la población sobre cómo actuar en caso de una emergencia.

Crear estrategias de difusión alternativas para las zonas rurales, que sean incluyentes y que tomen en cuenta la multiculturalidad del Estado.

Establecer un plan de acción exclusivo para la población flotante (turistas), que contemple medidas de difusión sobre cómo actuar en caso de alguna emergencia, planes de evacuación y protección.

VII. Epílogo: 2ª Etapa

La fase I ,permitió establecer medidas de prevención, reducción y mitigación de peligros y riesgos por fenómenos naturales y químico-tecnológicos en el Estado de Quintana Roo, mediante la compilación, integración y generación de conocimiento geológico, ambiental, meteorológico, topográfico, social y económico de la entidad, organizado todo en una base de datos asociada a cartografía georreferenciada, validada en campo, disponible para su consulta y actualización en un Sistema de Información Geográfica.

Dicha información fue proporcionada en gran parte por los tres órdenes de gobierno, incluidas Secretarías, Delegaciones, Direcciones Generales, entre otras, y se complementó con un Taller de Planeación y Desarrollo a través de la Gestión Integral de Riesgos al cual asistieron representantes de dichas instancias.

En las etapas subsecuentes, se continuará con el análisis de otros peligros, sus orígenes y consecuencias, también se establecerán acciones orientadas a prevenir y reducir riesgos, mitigar las pérdidas y daños que se puedan derivar del impacto de los fenómenos naturales perturbadores; de igual forma, están incluidas acciones para fortalecer las capacidades de autoprotección de la población ante situaciones de riesgo.

Con la ejecución del ATLAS ESTATAL DE RIESGOS DEL ESTADO DE QUINTANA ROO FASE II: VULNERABILIDAD, RIESGOS Y COMUNICACIÓN se continuará con lo desarrollado en la primera etapa y será un puente hacia la fase III, donde los elementos digitales en programación libre, amigable y de fácil despliegue está dirigida a aquellos usuarios tanto estatales como municipales.

Objetivos Específicos de la fase II:

- Complementar el inventario de cenotes con estudios de calidad de agua y realizar el estudio de susceptibilidad por hundimientos en las ciudades de Bacalar, Cozumel, Felipe Carrillo Puerto, Isla Mujeres, José María Morelos, Kantunilkín, y Chetumal.
- Realizar un análisis de peligro y vulnerabilidad física por sismos y por tsunamis en Bacalar, Felipe Carrillo Puerto, José María Morelos y Lázaro Cárdenas.
- Realizar análisis de susceptibilidad por deslizamiento de laderas en la zona sur del estado.
- Estimar en materia de fenómenos hidrometeorológicos, los peligros y riesgos principales para el sector turístico derivados por ciclones tropicales, así como realizar análisis de peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequías y heladas para el estado.
- Realizar un análisis de la vulnerabilidad social del estado considerando la capacidad de respuesta de las autoridades

de protección civil hacia los grupos indígenas, la percepción del riesgo de la población maya y los indicadores socioeconómicos que se indiquen en la metodología.

- Desarrollar e iniciar estudios de geofísica terrestre entre el corredor Cancún – Tulum con el fin de mitigar asentamientos en zonas poblacionales y vías de comunicación.
- Aportar y desarrollar referencias espaciales y cartográficas para la implementación de refugios temporales y albergues en casos de contingencia y desastre.
- Desarrollar estudios geohidrológicos que incluyan calidad del agua del acuífero, niveles piezométricos, intrusiones salinas, niveles estáticos y dinámicos y dinámica costera en las ciudades de Cancún, Playa del Carmen, Tulum, Chetumal, Cozumel e Isla Mujeres.
- Recopilar información y analizar los fenómenos sanitario-ecológicos que correspondan y los socio-organizativos considerados en el Atlas Nacional de Riesgos.
- Actualizar el Sistema de Información Geográfica (SIG) para que sirva a las autoridades de Protección Civil estatal y municipales como base para la toma de decisiones en caso necesario, a fin de evitar al máximo las pérdidas económicas y sobre todo la de vidas humanas.
- Promover la participación de los diversos sectores de la sociedad que están involucrados en la respuesta a contingencias, por medio de talleres de comunicación y/o capacitación de riesgos.
- Desarrollo de una aplicación para alerta temprana y refugios.

Todo lo anterior comprendido en una base de datos visualizable y manipulable en un Sistema de Información cartográfica, disponible para su consulta y actualización en servicios web de formato WMS y REST.