

# Peligros Naturales en el Estado de Campeche Cuantificación y Protección Civil

Gregorio Posada Vanegas, B. Edith Vega Serratos  
y Rodolfo Silva Casarín (eds.)



Secretaría de Gobernación - Gobierno del Estado de Campeche  
Universidad Autónoma de Campeche



---

# Peligros Naturales en el Estado de Campeche. Cuantificación y Protección Civil

---



# **Peligros Naturales en el Estado de Campeche. Cuantificación y Protección Civil**

Posada Vanegas G., B.E. Vega Serratos, y R. Silva Casarin (eds.), 2013. Peligros Naturales en el Estado de Campeche. Cuantificación y Protección Civil. Universidad Autónoma de Campeche, CENECAM-Gobierno del Estado de Campeche, CENAPRED. 202 p.

© Universidad Autónoma de Campeche  
Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía  
del Golfo de México (EPOMEX)

© Gobierno del Estado de Campeche  
Centro Estatal de Emergencias de Campeche (CENECAM)

ISBN 978-607-7887-53-9 (versión impresa)

ISBN 978-607-7887-54-6 (versión electrónica)

La publicación de esta obra se realizó gracias al apoyo del proyecto *Atlas de Peligros Naturales del Estado de Campeche*, Proyecto FOPREDEN, Gobierno del Estado de Campeche

# Contenido

<b>Presentación</b>	i
<b>Prólogo</b>	iii
<b>Protección Civil en el Estado de Campeche</b> <i>Jorge de Jesús Argáez Uribe, Hugo Raúl Villa Obregón, Martín Zetina García, Beatriz Edith Vega Serratos, Gregorio Posada Vanegas</i>	1
<b>Inundaciones por Desbordamiento de Ríos</b> <i>Beatriz Edith Vega Serratos, Gregorio Posada Vanegas, Ramón Domínguez Mora, Gabriela Esquivel Garduño, Areli Assenett Martínez Reyes, Débora Ramírez Vargas, Ángel Gabriel Kuc Castilla y Gabriel Ruíz Martínez</i>	21
<b>Marea de Tormenta</b> <i>Gregorio Posada Vanegas, Rodolfo Silva Casarín, Edgar Mendoza Baldwin, Beatriz Edith Vega Serratos, Gabriel Ruíz Martínez y Claudia Pisté Pérez</i>	63
<b>Oleaje</b> <i>Mireille Escudero Castillo, Rodolfo Silva Casarín, Edgar Mendoza Baldwin y Gregorio Posada Vanegas</i>	81
<b>Identificación y Caracterización de Bajos Inundables</b> <i>Gerardo Palacio Aponte</i>	125
<b>Sequía y Temperatura</b> <i>Gregorio Posada Vanegas, Beatriz Edith Vega Serratos, Ernesto Peña Puch y Claudia M. Agraz</i>	137
<b>Sismos</b> <i>Germán Daniel Rivillas Ospina</i>	155
<b>Identificación y Caracterización de la Subsistencia y/o Colapso de Terrenos Kársticos</b> <i>Gerardo Palacio Aponte</i>	169
<b>Cenizas Volcánicas</b> <i>Germán Daniel Rivillas Ospina</i>	183
<b>Comentarios finales</b> <i>Gregorio Posada Vanegas, Beatriz Edith Vega Serratos y Rodolfo Silva Casarín</i>	199





## Presentación

El impacto registrado por los eventos naturales ocurridos hasta ahora en nuestra región y la experiencia aquilatada en cada uno de ellos, nos ha permitido conocer sus alcances y fundamentar en el presente la necesidad de fortalecer la cultura de la prevención como una política de vital importancia social.

En ese sentido, resulta imprescindible contar con instrumentos documentales que contribuyan a mejorar el proceso de planeación, prevención, actuación y de respuesta oficial, frente al acontecimiento de contingencias, que en el futuro podrían vulnerar la integridad de los ciudadanos y de su patrimonio.

El *Atlas de Peligros del Estado de Campeche* responde a este requerimiento y fungirá en adelante como una herramienta de consulta prioritaria para trazar acciones institucionales dirigidas a vigorizar la Protección Civil.

En sus páginas reúne información sustanciosa, visual y descriptiva, mediante la cual es posible reconocer los riesgos de diversa naturaleza que prevalecen en nuestra amplia y heterogénea geografía.

Con su publicación culmina un proceso minucioso de integración documental que aportará certeza en la gestión de información territorial, al ofrecer una perspectiva zonificada de la entidad con el fin de especificar aspectos característicos de cada región.

La participación de la población es esencial. Su seguridad es una tarea que el Estado asume con sentido de alta responsabilidad y nos compromete como gobierno a lograr el mayor grado de coordinación interinstitucional.

Con el apoyo del gobierno federal y de los ayuntamientos continuaremos trabajando para solventar los diversos desafíos que revela la llegada de fenómenos como ciclones tropicales, incendios forestales, contaminación ambiental e inundaciones.

Eventos que son obra de la naturaleza propiciada por los cambios experimentados en el planeta durante las últimas décadas, pero que las decisiones que se asuman frente a ellos deben nacer de la prevención de sus efectos.

De esta manera, esta administración pone al alcance de las instituciones y de la sociedad, este importantísimo instrumento técnico que sin duda, marca un referente en el tema de la Protección Civil en la Entidad.

*Fernando Ortega Bernés*  
Gobernador Constitucional  
del Estado de Campeche



## Prólogo

Los campechanos en el devenir del tiempo hemos experimentado el impacto de huracanes y diversos fenómenos meteorológicos como depresiones tropicales y frentes fríos, experiencias que nos llevan a revivir en nuestras mentes la fuerza del mar, del viento y el frío, rodeados de agua, y de incertidumbre.

Las crónicas de 1807 señalan que el nivel de las aguas se incrementó en forma tal, que se podía transitar en cayucos y botes hasta la plaza mayor y en uno de los establecimientos comerciales más concurridos, denominado “Brazo Fuerte”, ubicado en la entonces calle América, hoy calle 59 esquina con 10, los habitantes del todavía distrito de Campeche, pensaron que se avecinaba el fin del mundo o que simplemente, la ciudad desaparecería.

La historia de Campeche se entrelaza con los fenómenos meteorológicos, que han puesto en riesgo la vida y patrimonio de sus habitantes, siendo oportuno reconocer que los mismos, no han menguado nuestra fuerza y solidaridad para sobreponernos, y en especial, nuestro interés por comprender y en especial desarrollar y aprender nuevas y mejores formas de protección.

En el siglo pasado se iniciaron los primeros esfuerzos en materia de protección civil, como respuesta a los fenómenos hidrológicos que son la principal causa de desastres en nuestra entidad, sin embargo aún no contábamos con un *Atlas Estatal de Peligros Naturales*, de ahí el gran valor que cobra el presente libro, que por encargo del Gobierno del Estado de Campeche, ha sido elaborado cuidadosamente por la Universidad Autónoma de Campeche, a través de su Instituto de Ecología, Pesquería y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX). Es oportuno reconocer las valiosas aportaciones de instituciones hermanas, como el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México y la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, así como el apoyo y la supervisión del Centro Nacional de Prevención de Desastres.

*Peligros Naturales del Estado de Campeche: Cuantificación y Protección Civil*, es un estudio desarrollado con las metodologías del CENAPRED y técnicas innovadoras desarrolladas por el instituto EPOMEX, de ahí que resulte no sólo el primero en nuestra entidad, sino un documento de vanguardia por sus aportaciones científicas en el tema, que cumple con todos los requisitos para ser integrado al *Atlas Nacional de Riesgos*.



De ahí nuestra felicitación y reconocimiento al Dr. Gregorio Posada Vanegas, responsable de este importante libro y a todos aquellos que de alguna manera hicieron posible este trabajo orientado al fortalecimiento de la cultura de la prevención, demostrando así, que la Universidad Autónoma de Campeche, cumple con el fin para el que fue creada: servir a Campeche y a los campechanos.

*MA. Adriana Ortiz Lanz*  
Rectora, Universidad Autónoma de Campeche



## Directorio de participantes

### **Claudia M. Agraz**

Universidad Autónoma de Campeche  
Instituto EPOMEX  
Av. Agutín Melgar s/n  
Col. Lindavista 24090  
Campeche, Campeche. México.

### **Jorge de Jesús Argáez Uribe**

Gobierno del Estado de Campeche  
Centro Estatal de Emergencias  
de Campeche (CENECAM)  
Calle 12 No. 126 Centro 24000  
Campeche, Campeche. México.

### **Ramón Domínguez Mora**

Universidad Nacional Autónoma  
de México (UNAM)  
Instituto de Ingeniería  
Circuito interior s/n  
Cd. Universitaria 04510  
México, D.F., México.

### **Mireille Escudero Castillo**

Universidad Nacional Autónoma  
de México (UNAM)  
Instituto de Ingeniería  
Circuito interior s/n  
Cd. Universitaria 04510  
México, D.F., México.

### **Gabriela Esquivel Garduño**

Universidad Nacional Autónoma  
de México (UNAM)  
Instituto de Ingeniería  
Circuito interior s/n  
Cd. Universitaria 04510  
México, D.F., México.

### **Ángel Gabriel Kuc Castilla**

Universidad Autónoma de Campeche  
Instituto EPOMEX  
Av. Agutín Melgar s/n  
Col. Lindavista 24090  
Campeche, Campeche. México

### **Areli Assenett Martínez Reyes**

Universidad Autónoma de Campeche  
Instituto EPOMEX  
Av. Agutín Melgar s/n  
Col. Lindavista 24090  
Campeche, Campeche. México.

### **Edgar Mendoza Baldwin**

Universidad Nacional Autónoma  
de México (UNAM)  
Instituto de Ingeniería  
Circuito interior s/n  
Cd. Universitaria 04510  
México, D.F., México.

---



**Gerardo Palacio Aponte**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
Coordinación de Ciencias Sociales  
y Humanidades  
Av. Industrias 101- A,  
Fraccionamiento Talleres,  
San Luis Potosí, S.L.P, México.

**Ernesto Peña Puch**

Universidad Autónoma de Campeche  
Facultad de Contaduría y Administración  
Av. Agutín Melgar s/n  
Col. Lindavista 24090  
Campeche, Campeche. México.

**Gregorio Posada Vanegas**

Universidad Autónoma de Campeche  
Instituto EPOMEX  
Av. Agutín Melgar s/n  
Col. Lindavista 24090  
Campeche, Campeche. México.

**Claudia Pisté Pérez**

Universidad Autónoma de Campeche  
Instituto EPOMEX  
Av. Agutín Melgar s/n  
Col. Lindavista 24090  
Campeche, Campeche. México.

**Déborá Ramírez Vargas**

Universidad Autónoma de Campeche  
Instituto EPOMEX  
Av. Agutín Melgar s/n  
Col. Lindavista 24090  
Campeche, Campeche. México.

**Germán Daniel Rivillas Ospina**

Universidad Nacional Autónoma  
de México (UNAM)  
Instituto de Ingeniería  
Circuito interior s/n  
Cd. Universitaria 04510  
México, D.F., México.

**Gabriel Ruíz Martínez**

CINVESTAV-Unidad Mérida  
Km. 6 Antigua carretera a Progreso  
Apdo. Postal 73, Cordemex, 97310  
Mérida, Yucatán. México.

**Rodolfo Silva Casarín**

Universidad Nacional Autónoma  
de México (UNAM)  
Instituto de Ingeniería  
Circuito interior s/n  
Cd. Universitaria 04510  
México, D.F., México.

**Beatriz Edith Vega Serratos**

Universidad Autónoma de Campeche  
Instituto EPOMEX  
Av. Agutín Melgar s/n  
Col. Lindavista 24090  
Campeche, Campeche. México.

**Hugo Raúl Villa Obregón**

Gobierno del Estado de Campeche  
Centro Estatal de Emergencias  
de Campeche (CENECAM)  
Calle 12 No. 126 Centro 24000  
Campeche, Campeche. México.

**Martín Zetina García**

Gobierno del Estado de Campeche  
Centro Estatal de Emergencias  
de Campeche (CENECAM)  
Calle 12 No. 126 Centro 24000  
Campeche, Campeche. México.

---

---

# Protección Civil en el Estado de Campeche

*Jorge de Jesús Argáez Uribe, Hugo Raúl Villa Obregón, Martín Zetina García,  
Beatriz Edith Vega Serratos y Gregorio Posada Vanegas*

---

## INTRODUCCIÓN

El *Atlas de Peligros Naturales del Estado de Campeche* es un proyecto de investigación financiado por el Gobierno del estado de Campeche y el Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN), realizado por el Instituto EPOMEX de la Universidad Autónoma de Campeche con la participación del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México y la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, para el Centro Estatal de Emergencias de Campeche, CENECAM. Los resultados de este proyecto permiten identificar, por medio de metodologías científicas, y con fines acordes a la Protección Civil el nivel de peligrosidad natural de las principales localidades del estado de Campeche

En el presente documento se presenta de forma general la descripción física del estado de Campeche, las acciones realizadas en el marco de la Protección Civil, así como los principales

### Objetivos

- Enunciar las acciones realizadas por el Centro Estatal de Emergencias de Campeche con respecto a la Protección Civil en el estado de Campeche.
- Describir las principales características geográficas y naturales del estado de Campeche.
- Especificar los conceptos relacionados con la determinación de peligros y riesgos naturales.



resultados obtenidos en el proyecto *Atlas de Peligros Naturales del Estado de Campeche*.

La cuantificación de los peligros naturales se realizó a partir de las metodologías propuestas por el Centro Nacional de Prevención de Desastres en su serie de libros Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos, la mayoría de estas metodologías fueron mejoradas y adaptadas a la geografía estatal con lo cual se obtuvo una mejor caracterización de los peligros. Destacan las aportaciones de los investigadores del Instituto EPOMEX, de la Universidad Autónoma de Campeche, relacionadas con el desbordamiento de ríos,

marea de tormenta, deslizamiento de laderas y sequía; del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México en el área de hidrología, marea de tormenta y oleaje, así como de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí en el apartado de disolución kárstica.

Los resultados de este proyecto se presentan en mapas impresos y digitales, así como en un sistema de información geográfico en formato ArcMap que permitirá al Centro Estatal de Emergencias, CENECAM complementar sus análisis de una manera rápida, confiable y permanentemente actualizable.

## LA PROTECCIÓN CIVIL EN EL ESTADO DE CAMPECHE

Los primeros esfuerzos en materia de Protección Civil en el estado de Campeche se dieron en el siglo pasado e inicios del presente, como consecuencia de los fenómenos hidrometeorológicos que siguen siendo las principales causas de desastres en el Estado, sin que el Gobierno llegara a crear una instancia especializada para su atención. Podemos recordar un sin número de inundaciones originadas por los ciclones tropicales que año con año amenazan a la península de Yucatán. Tenemos remembranzas de los últimos que llegaron a afectar a nuestro Estado a partir de los años sesenta a la fecha. Entre esto tenemos los siguientes: “Janet” en 1955, “Carla” en 1961, “Inés” en 1966, “Beulah” en 1967, “Edith” en 1971, “Gilbert” en 1988, “Opal” y “Roxanne” en 1995 y por último “Isidore” en el año 2002.

A partir de las graves consecuencias causadas por los huracanes “Opal” y “Roxanne” al estado de Campeche en octubre de 1995, y considerando el riesgo que nuestra entidad

enfrenta anualmente durante la temporada de ciclones tropicales, el Poder Ejecutivo del Estado se dió a la tarea de crear una institución expresamente orientada al control y atención de situaciones de emergencia. Esta iniciativa logra concretarse a través de los esfuerzos públicos, privados y el apoyo de la comunidad internacional. Con recursos provenientes de la Organización de Estados Americanos (OEA), del Gobierno del estado de Campeche y del Fideicomiso del 2% Sobre Nóminas se instala el Centro Estatal de Emergencias (CENECAM) el 21 de abril de 1997 (<http://www.cenecam.gob.mx/antecedentes.php>).

El Centro Estatal de Emergencias, es la estructura técnico-operativa del Sistema Estatal de Protección Civil. Es un órgano desconcentrado de la Secretaría de Gobierno de la Administración Pública Estatal. Sus acciones las desplegará en coordinación con las dependencias, entidades, instituciones y organismos de los sectores público y privado,

con los grupos voluntarios y la población en general. Tiene funciones de autoridad en todo lo relativo a la prevención y mitigación ante la amenaza de los agentes perturbadores de origen geológico, hidrometeorológico, químico tecnológico, sanitario ecológico y sociorganizativo.

También corresponde al Centro la ejecución de las políticas establecidas por el

titular del ejecutivo del Estado en materia de Protección Civil y gestión de riesgos. En caso de una situación de emergencias ocasionado por un agente perturbador todas las instancias del gobierno estatal y municipal deben de cumplir con las disposiciones ordenadas por el Centro Estatal de Emergencias para la atención de la contingencias y auxilio a la población.

## **LAS POLÍTICAS DE PREVENCIÓN DE RIESGOS Y PROTECCIÓN CIVIL DENTRO DEL PLAN ESTATAL DE DESARROLLO 2009 - 2015**

El Plan Estatal de Desarrollo (PED) 2009-2015 tiene como eje de su política pública la prevención de riesgos y la mitigación de desastres. Para ello el Consejo Estatal de Protección Civil definió los objetivos esenciales para salvaguardar la integridad y los bienes de todos los Campechanos ante la presencia de un fenómeno perturbador, como el paso de un ciclón tropical o una inundación (Gov. Edo. Campeche, 2009).

El nuevo contexto mundial, marcado por el calentamiento global, cambio climático e incidencia de desastres naturales cada vez más destructivos, nos obliga a pensar en la necesidad de que las acciones de seguridad se extiendan más allá del concepto tradicional y el planteamiento de contrarrestar toda práctica que al interior de nuestras sociedades no fomente una buena relación entre los seres humanos y la naturaleza o, peor aún, que la altere o afecte directamente.

Por su parte, el concepto de atención a los fenómenos perturbadores naturales o humanos ha evolucionado en los últimos años, dando origen al término de riesgos como un concepto amplio que incluye priorizar la vida de las personas por encima de cualquier

otro criterio político o económico. Es por esto que hoy en día no es posible concebir la atención de desastres de forma reactiva, sino necesitamos darle prioridad a la prevención con el objeto de mitigar los daños. La gestión de riesgos surge como un concepto amplio que atiende las necesidades de la sociedad de manera integral. La gestión de riesgos trabaja en dos líneas estratégicas de acción: Crear y fortalecer las capacidades para enfrentar emergencias o desastres, y elevar la Gestión de Riesgos a política de Estado.

Hoy en día la gestión de riesgos es una política de desarrollo que plantea la necesidad de trabajar en la prevención, entendida en este caso como el mejoramiento de la relación ser humano-naturaleza. Pero también, trabajar con las poblaciones e instituciones en la construcción de capacidades socio-organizativas, técnicas e institucionales para enfrentar posibles desastres naturales o antropogénicos. Para esto es necesario generar una conciencia de responsabilidad colectiva, no solamente en cuanto al riesgo al que estamos expuestos sino también en función del riesgo que generamos en nuestras actividades cotidianas.

Esto nos permitió evaluar las tareas que se tenían asignadas por ley al Centro Estatal de Emergencias, que motivó un nuevo ordenamiento legal, funcional, administrativo y operativo, para cumplir con los objetivos expuestos en el PED 2009-2015, y los que representa el nuevo milenio, pero sobre todo, estar acordes al proceso de globalización y su adaptación al cambio climático.

Las estrategias que se tomaron para establecer una plataforma técnica para el análisis de riesgo y cumplir con los objetivos del Plan Estatal de Desarrollo fueron:

1. Promover en el ámbito académico la investigación en materia de Protección Civil, análisis de riesgos, calentamiento global, cambio climático e incidencia de desastres a través de la realización de estudios técnico-científicos bajo el esquema de la gestión integral de desastres;
2. Implementar mecanismos para que las autoridades puedan incorporar los estudios en materia de Protección Civil y análisis de riesgos como política para la toma de decisiones y realizar recomendaciones que permitan sustentar una sociedad resiliente a los desastres.

De ahí que el Gobierno del Estado de Campeche solicitara a la Secretaría de Gobernación, en el marco del Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (FOPREDEN), recursos para cofinanciar el *Atlas de Peligros Naturales del Estado de Campeche*, el cual es un sistema integral de información sobre los fenómenos perturbadores que puedan afectar un sitio en específico y en determinado momento. Resulta de realizar un análisis espacial y temporal de los efectos asociados a los fenómenos perturbadores en su interacción sobre las características físicas del medio que definen una cierta región.

El proyecto fue propuesto y ejecutado por el Gobierno del Estado de Campeche y

elaborado por la Universidad Autónoma de Campeche a través de su Instituto de Ecología, Pesquería y Oceanografía del Golfo de México quien contó con el apoyo del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México y de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Este sistema de información debe contener un conjunto de escenarios que representen la magnitud e intensidad con que los fenómenos puedan impactar en la entidad y que sean de una fácil consulta para la toma de decisiones de las autoridades de Protección Civil. En el caso de los *Atlas de Peligros Naturales* estos deben incluir escenarios planteados ante la presencia de fenómenos hidrometeorológicos y geológicos.

Conforme a ello, el *Atlas Estatal de Peligros Naturales de Campeche* contiene los elementos necesarios para poder estimar diversos escenarios de afectación por la incidencia de fenómenos tales como: ciclones tropicales, bajos inundables, oleaje y marea de tormenta, inundación fluvial, disolución kárstica, deslizamiento de laderas, sismos o dispersión de cenizas volcánicas, entre otros.

El *Atlas Estatal de Peligros Naturales* se elaboró siguiendo las metodologías desarrolladas por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) así como con técnicas innovadoras aplicadas por el Instituto EPOMEX. Cabe mencionar que a lo largo del desarrollo de este proyecto se contó con el apoyo y supervisión del CENAPRED en cumplimiento al compromiso de buscar que el *Atlas Estatal de Peligros Naturales de Campeche* pueda integrarse plenamente al Atlas Nacional de Riesgos que administra la Secretaría de Gobernación.

Este sistema de información, administrado por el Centro Estatal de Emergencias de Campeche, permitirá plantear y simular eventos generados por la incidencia de es-

tos fenómenos en diferentes intensidades y períodos de retorno con lo cual las autoridades del Sistema Estatal de Protección Civil podrán tomar las previsiones necesarias para establecer medidas de mitigación ante estos agentes perturbadores, o bien, las acciones de preparación necesarias ante una posible contingencia. Además, los resultados que se encuentran en este estudio permitirán encausar las estrategias definidas en el Plan Estatal de Desarrollo de esta administración las cuales están pensadas para que las futuras generaciones continúen fortaleciendo la cultura de la reducción de desastres en busca de tener comunidades más seguras.

La importancia del *Atlas Estatal de Peligros Naturales* se encuentra inmersa en la Ley de Protección Civil, Prevención y Atención de Desastres del Estado de Campeche, en donde se establece que los Atlas de Peligros y Riesgos son instrumento de consulta obliga-

toria para establecer medidas de mitigación y de prevención en los diversos sectores de desarrollo de nuestro Estado, incluso, definiendo sanciones administrativas o penales al omitir o evadir dicho precepto.

Es de suma importancia para los responsables de administrar el *Atlas de Peligros Naturales* el realizar una permanente actualización del análisis de los peligros en nuestro Estado. La dinámica de los peligros en nuestro entorno, obliga a las autoridades a encontrar los mecanismos que permitan mantener planamente identificado este factor.

El peligro y sus variaciones pueden analizarse en espacios y tiempos diversos. Por lo que las autoridades deberán, bajo el ámbito de sus responsabilidades y competencias, definir las condiciones y circunstancias del peligro y que originan las distintas problemáticas de riesgos en la entidad

## CONCEPTOS BÁSICOS DE PELIGROS Y RIESGOS NATURALES

El tema del riesgo dentro de la prevención de desastres ha sido tratado y desarrollado por diversas disciplinas que han conceptualizado sus componentes de manera diferente. Se acepta de manera común que los riesgos naturales están ligados a actividades humanas. La existencia de un riesgo implica la presencia de un agente perturbador (fenómeno natural o generado por el hombre) que tenga la probabilidad de ocasionar daños a un sistema afectable (asentamientos humanos, infraestructura, etc.) en un grado tal, que constituye un desastre (figura 1). Así, un movimiento del terreno provocado por un sismo no constituye un riesgo por sí mismo. Si se produjese en una zona deshabitada, no

afectaría ningún asentamiento humano y por tanto, no produciría un desastre.

En términos cualitativos, se entiende por Riesgo la probabilidad de ocurrencia de daños, pérdidas o efectos indeseables sobre sistemas constituidos por personas, comunidades o sus bienes, como consecuencia del impacto de eventos o fenómenos perturbadores. La probabilidad de ocurrencia de tales eventos en un cierto sitio o región constituye una amenaza, entendida como una condición latente de posible generación de eventos perturbadores.

En forma cuantitativa se ha adoptado una de las definiciones más aceptadas del riesgo, entendido como la función de tres factores:



Figura 1. Conceptualización de peligro, vulnerabilidad y riesgo natural, CENAPRED, 2006.

la probabilidad de que ocurra un fenómeno potencialmente dañino, es decir el peligro, la vulnerabilidad y el valor de los bienes expuestos. A continuación se analiza brevemente cada uno de estos conceptos y las características que deben tener el análisis de riesgos naturales.

El Peligro se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado. Para el estudio de los peligros, es importante definir los fenómenos perturbadores mediante parámetros cuantitativos con un significado físico preciso que pueda medirse numéricamente y ser asociado mediante relaciones físicas con los efectos del fenómeno sobre los bienes expuestos. En la mayoría de los fenómenos pueden distinguirse dos medidas, una de magnitud y otra de intensidad.

La magnitud es una medida del tamaño del fenómeno, de su potencial destructivo y de la energía que libera. La intensidad es una medida de la fuerza con que se manifiesta el fenómeno en un sitio dado. Por ello un fenómeno tiene una sola magnitud, pero tantas intensidades como son los sitios en que interese determinar sus efectos. Por ejemplo, en los sismos, la magnitud se define en términos de la energía liberada por el súbito movimiento de las placas tectónicas y se mide en la escala de Richter. La intensidad sísmica refleja, en cambio, el grado de movimiento que experimenta el terreno en un sitio dado, lo que dependerá fundamentalmente de la distancia del sitio al epicentro y de las características del terreno en el sitio. La intensidad se mide a través de la escala de Mercalli. Para algunos fenómenos, la distinción entre magnitud e intensidad no es tan clara, pero en términos generales el peligro

está más asociado a la intensidad del fenómeno que a su magnitud, o sea más a las manifestaciones o efectos que el fenómeno puede presentar en el sitio de interés, que a las características básicas del fenómeno mismo. En este sentido, el estudio del peligro lleva a la construcción de escenarios, es decir, a la representación de los efectos del fenómeno en la región de interés.

La forma más común de representar el carácter probabilístico del fenómeno es en términos de un periodo de retorno (o de recurrencia), que es el lapso que en promedio transcurre entre la ocurrencia de fenómenos de cierta intensidad. El concepto de periodo de retorno, en términos probabilísticos, no implica que el proceso sea cíclico, o sea que deba siempre transcurrir cierto tiempo para que el evento se repita. En ocasiones se utiliza también el inverso del periodo de retorno llamada tasa de excedencia, definida como el número medio de veces, en que por unidad de tiempo, ocurre un evento que exceda cierta intensidad. Para muchos de los fenómenos no es posible representar el peligro en términos de periodos de retorno, porque no ha sido posible contar con la información suficiente para este tipo de representación. En estos casos se recurre a escalas cualitativas, buscando las representaciones de uso más común y de más utilidad para las aplicaciones en el tema específico.

La Vulnerabilidad se define como la susceptibilidad o propensión de los sistemas expuestos a ser afectados o dañados por el efecto de un fenómeno perturbador, es decir el grado de pérdidas esperadas. Se pueden distinguir dos tipos: la vulnerabilidad física y la vulnerabilidad social. La primera es más factible de cuantificarse en términos físicos, por ejemplo la resistencia que ofrece una construcción ante las fuerzas de los vientos producidos por un huracán diferencia a de

la segunda, que puede valorarse cualitativamente y es relativa, ya que está relacionada con aspectos económicos, educativos, culturales, así como el grado de preparación de las personas. Por ejemplo, una ciudad cuyas edificaciones fueron diseñadas y construidas respetando un reglamento de construcción que tiene requisitos severos para proporcionar seguridad ante efectos sísmicos, es mucho menos vulnerable ante la ocurrencia de un terremoto, que otra que no están preparadas para resistir dicho fenómeno. En otro aspecto, una población que cuenta con una organización y preparación para responder de manera adecuada ante la inminencia de una erupción volcánica o de la llegada de un ciclón tropical, por ejemplo mediante sistemas de alerta y planes operativos de evacuación, presenta menor vulnerabilidad que otra que no está preparada de esa forma.

La vulnerabilidad física se expresa como una probabilidad de daño de un sistema expuesto y es normal expresarla a través de una función matemática o matriz de vulnerabilidad con valores entre cero y uno. Cero implica que el daño sufrido ante un evento de cierta intensidad es nulo, y uno, implica que este daño es igual al valor del bien expuesto. De dos bienes expuestos uno es más vulnerable si, ante la ocurrencia de fenómenos perturbadores con la misma intensidad, sufre mayores daños.

La Exposición o Grado de Exposición se refiere a la cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio y que son factibles de ser dañados. Por lo general se le asignan unidades monetarias puesto que es común que así se exprese el valor de los daños, aunque no siempre es traducible a dinero. En ocasiones pueden emplearse valores como porcentajes de determinados tipos de construcción o inclusive el número de personas que son susceptibles a verse afectadas.



El grado de exposición es un parámetro que varía con el tiempo, el cual está íntimamente ligado al crecimiento y desarrollo de la población y su infraestructura. En cuanto mayor sea el valor de lo expuesto, mayor será el riesgo que se enfrenta. Si el valor de lo expuesto es nulo, el riesgo también será nulo, independientemente del valor del peligro. La exposición puede disminuir con el alertamiento anticipado de la ocurrencia de un fenómeno, ya sea a través de una evacuación o inclusive evitando el asentamiento en el sitio.

Una vez que se han identificado y cuantificado el peligro, la vulnerabilidad y el grado de exposición para los diferentes fenómenos perturbadores y sus diferentes manifestaciones, es necesario completar el análisis a través de escenarios de riesgo, o sea, representaciones geográficas de las intensidades o de los efectos de eventos extremos. Esto resulta de gran utilidad para el establecimiento y priorización de acciones de mitigación y prevención de desastres. Ejemplos de escenarios de peligro son la representación de los alcances de una inundación con los tirantes máximos de agua que puede tener una zona; distribución de caída de ceniza consecuencia de una erupción volcánica; la intensidad máxima del movimiento del terreno en distintos sitios debido a un sismo. Ejemplos de escenarios de riesgos serían el porcentaje de viviendas de adobe dañadas para un sismo de determinada magnitud y epicentro, el costo de reparación de la infraestructura hotelera

por el paso de un huracán, el número de personas que podrían verse afectadas por el deslizamiento de una ladera inestable, etc.

Partiendo de los conceptos fundamentales de riesgo expresados en la sección anterior, se advierte que la base fundamental para un diagnóstico adecuado de riesgo es el conocimiento científico de los fenómenos (peligros o amenazas) que afectan a una región determinada, además de una estimación de las posibles consecuencias del fenómeno; éstas dependen de las características físicas de la infraestructura existente en la zona, así como de las características socioeconómicas de los asentamientos humanos en el área de análisis. Así, es posible plantear un procedimiento general para la elaboración de un *Atlas de Riesgo* el cual puede resumirse en los siguientes pasos (CENAPRED, 2006):

- Identificación de los fenómenos naturales y antrópicos que pueden afectar una zona en estudio;
- Determinación del peligro asociado a los fenómenos identificados;
- Identificación de los sistemas expuestos y su vulnerabilidad;
- Evaluación de los diferentes niveles de riesgo asociado a cada tipo de fenómeno, tanto natural como antropogénico;
- Integración sistemática de la información sobre los fenómenos naturales y antropogénicos, peligro, vulnerabilidad y riesgo considerando los recursos técnicos y humanos.

## CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ESTADO DE CAMPECHE

### LOCALIZACIÓN Y LÍMITES GEOGRÁFICOS

El estado de Campeche se localiza en el suroeste de la República Mexicana, formando parte de la península de Yucatán. Sus coordenadas geográficas extremas son: latitud norte  $20^{\circ} 52'$  y  $17^{\circ} 48'$ ; longitud oeste  $89^{\circ} 06'$  y  $92^{\circ} 27'$ . Limita al norte y nordeste con el estado de Yucatán, al sur con la República de Guatemala y el estado de Tabasco; al este con el estado de Quintana Roo y la República de Belice, y al oeste con el Golfo de México (figura 2).

### DIVISIÓN POLÍTICA

El Estado tiene una extensión territorial de  $56\,858.82\text{ km}^2$  y una población proxima da de 822 441 habitantes según el II Censo General de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2010). La población y superficie por municipio se detalla en la tabla 1.

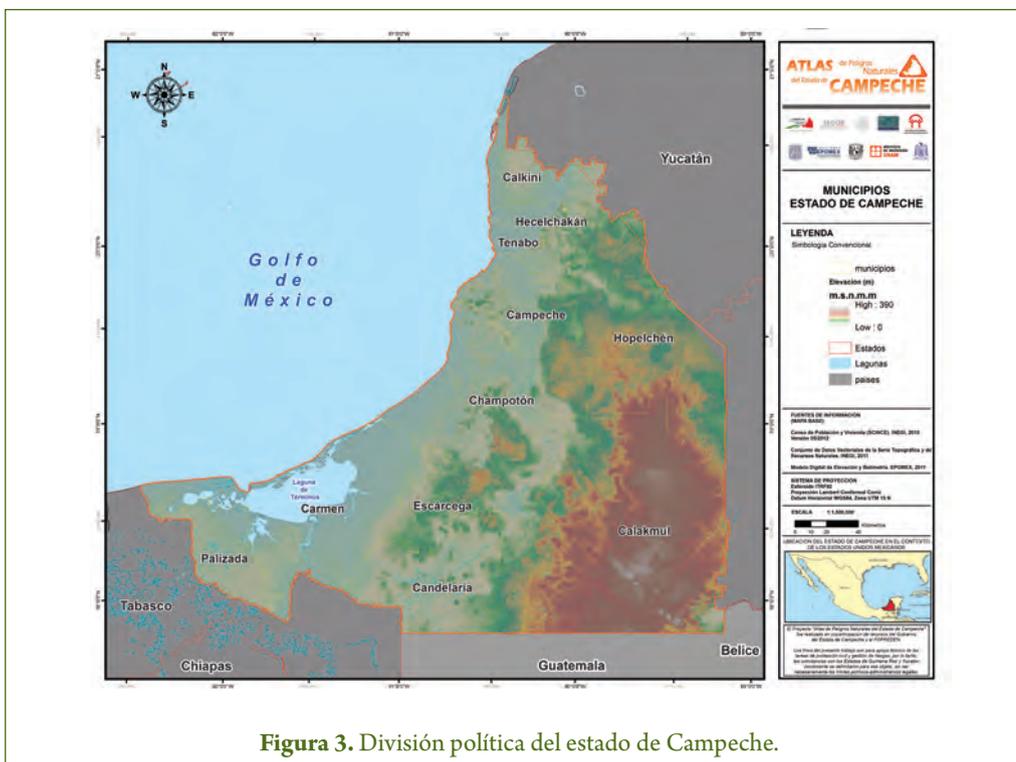
En la figura 3 se presenta la división política el estado de Campeche.



Figura 2. Localización del estado de Campeche.

**Tabla 1.** Población por Municipios del estado de Campeche, INEGI 2010.

Municipio	Población	Porcentaje con respecto al total del Estado	Superficie (km <sup>2</sup> )	Densidad (hab/km <sup>2</sup> )
Calakmul	26 822	3.27	1 966.57	13.67
Calkiní	52 890	6.43	3 410.64	15.51
Campeche	259 005	31.49	8 458.29	30.62
Candelaria	41 194	5.01	6 088.28	6.77
Carmen	221 094	26.88	3 706.70	59.65
Champotón	83 021	10.09	1 331.99	62.33
Escárcega	54 184	6.59	7 460.27	7.26
Hecelchakán	28 306	3.44	2 071.70	13.66
Hopelchén	37 777	4.59	822.00	42.83
Palizada	8 352	1.02	15 963.85	0.52
Tenabo	9 736	1.18	5 518.53	1.76
Total	822 441	100.0	56 858.82	14.46



## CLIMA

El estado de Campeche se encuentra ubicado en la zona tropical, por lo que presenta un clima cálido húmedo, con lluvias, sobre todo en verano, que alcanzan niveles variables de precipitación entre 900 y 2 000 mm anuales; los valores mínimos se presentan a finales de invierno y principios del verano. Se reporta la presencia de canícula en una franja que bordea la zona noreste de la laguna de Términos y en una porción del norte de la entidad. La temperatura media anual es de 27°C, con valores máximos medios de 36°C en verano y mínimos de 17°C en invierno, aunque se registran valores históricos máximos de 46°C y mínimos de 10°C. (<http://www.e-local.gob.mx/work/templatess/enciclo/EMM04campeche/mediofisico.html>).

Acorde con la clasificación de Köepen modificada por García, el estado de Campeche exhibe cuatro tipos de clima, todos ellos de tipos cálidos y distribuidos en franjas concéntricas con incrementos de humedad en

el sentido noreste-suroeste (figura 4). Estos tipos climáticos se aprecian en la tabla 2.

## SUELOS

La acción de las altas temperaturas y abundantes precipitaciones sobre la roca caliza, han generado, en la entidad, suelos genéticamente jóvenes, poco profundos y de fertilización media, clasificados según la FAO-UNESCO, como Rendzinas. Regionalmente se conocen como Chacluum-Pusluum y se localizan principalmente en la zona centro y norte, abarcando el 52% del territorio estatal; se considera que son suelos aptos para frutales y hortalizas, pero se utilizan mayoritariamente para cultivos tradicionales de bajo rendimiento.

Otra unidad de suelos que domina en la porción centro y norte del Estado, ubicándose en la franja paralela a la costa, son los suelos clasificados como Litosoles y que en la terminología maya se asocian con Tzekel. Son suelos de escasa profundidad con presencia de rocas en el perfil, de vocación

**Tabla 2.** Tipos de clima en el Estado de Campeche (Köeppen, modificado de E. García).

Tipo de clima	Características	Municipios
Aw <sub>0</sub>	El más seco de los Cálidos Subhúmedos	Calkiní, Hecelchakán, Tenabo, Campeche y norte de Hopelchén
Aw <sub>1</sub>	Cálido Subhúmedo intermedio	Parte de Champotón, Hopelchén, Escárcega y Carmen
Aw <sub>2</sub>	El más húmedo de los Cálidos Subhúmedos	Parte de Escárcega y Carmen, porción sur de Champotón, Hopelchén. Calakmul y Candelaria
A <sub>m</sub>	Cálido Húmedo con influencia de Monzón	Parte de Carmen y todo Palizada

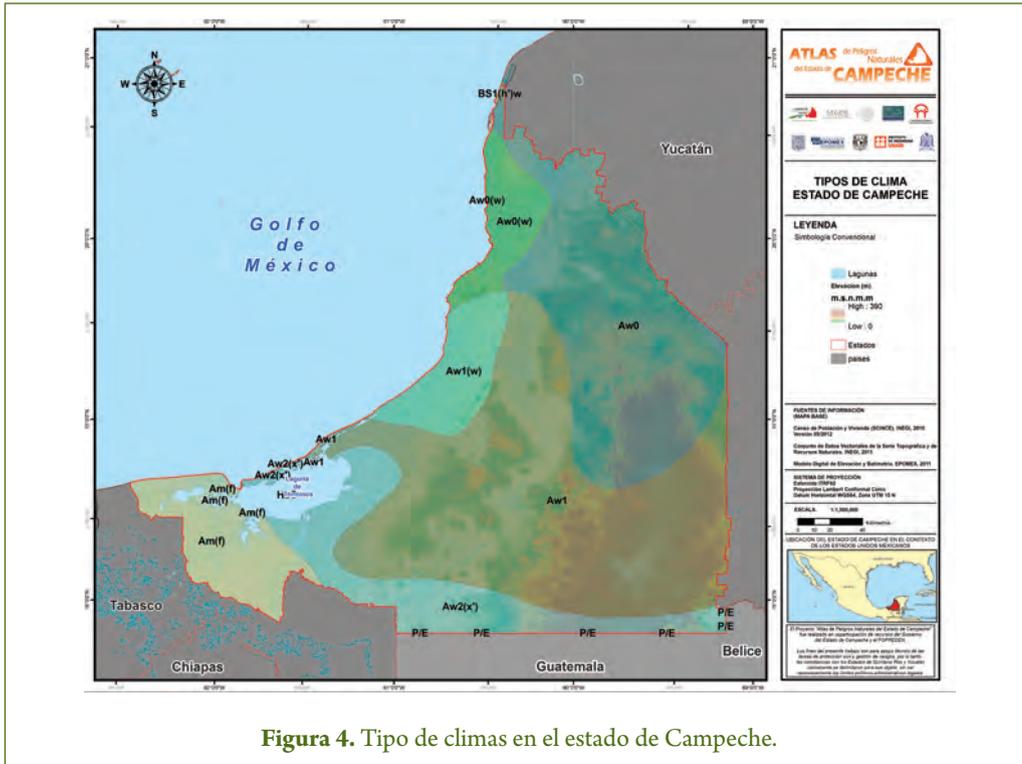


Figura 4. Tipo de climas en el estado de Campeche.

forestal, pero que la práctica de la agricultura nómada de roza, tumba y quema ha provocado que sean utilizados para la siembra de maíz, chile y frijol, induciendo la erosión severa, debido a su escasa profundidad y ubicación sobre topografía ondulada. Estos suelos cubren una superficie del 21% del territorio estatal.

En las zonas planas con escasa y nula pendiente, se encuentran los suelos clasificados como Vertisoles Pélicos, regionalmente conocidos como Akalché, de coloración oscura con alto contenido de arcilla expansible que presentan una capa de 5 a 20 cm. de materia orgánica, su drenaje superficial e interno son lentos, por lo que se consideran aptos para cultivos como el arroz, la caña de azúcar y el sorgo. Estos suelos se localizan hacia el sur y suroeste del Estado, cubriendo una superficie del 8% del total estatal.

Al suroeste de la Entidad se encuentran suelos de aluvión, conocidos regionalmente como Akalché y en la clasificación FAO-UNESCO se conocen como Gleysoles; tienen textura arcillosa y escasa pendiente, siendo deficiente su drenaje superficial e interior, soportan largos períodos de inundación, por lo que no son aptos para cultivos agrícolas, limitándose su uso a silvicultura y vida silvestre; cubren un área equivalente al 8% de la superficie total estatal.

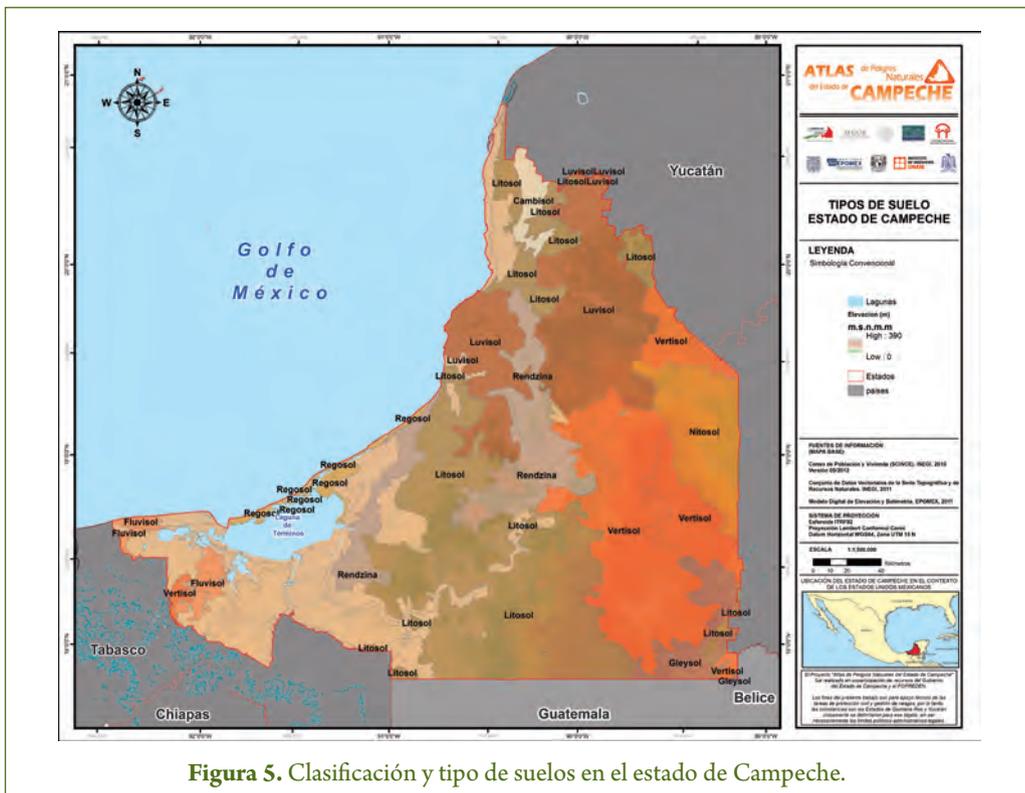
En las márgenes del río Chumpán y Palizada, se encuentran los suelos clasificados como Acrisoles, los cuales en condiciones naturales tienen vegetación de selva y sabana, no tienen vocación agrícola, pero soportan cultivos especiales como arroz, caña de azúcar, pastos y sorgo, cubren una superficie del 3% del total del Estado.

En el litoral marino del Estado, los suelos se ven demeritados por las altas concentraciones de sal sódica, siendo característicos de marismas, pantanos costeros y manglares que permiten una limitada explotación de la vegetación natural que soportan; estos suelos se localizan en la franja costera, son salinos y arenosos. Se clasifican como Regosoles y se consideran que solo son aptos para plantaciones de coco, cubren una superficie del 2% del total de la Entidad.

En los municipios de Campeche, el norte de Hopelchén y oriente de los municipios de Calkiní, Hecelchakán y Tenabo, se localizan suelos de deslave, conocidos en la región

como Kankab-Yaxhom, clasificados como Luvisoles Crómicos. Son suelos profundos, aptos para cultivos de maíz, cucurbitáceas, algodón y son adecuados para el desarrollo de huertos frutícolas. El área que cubren es de aproximadamente el 1% del total del Estado.

Una mínima proporción de la superficie estatal, cercana al 0.3% del total del Estado está cubierta por suelos clasificados como Fluvisoles y Arenosoles. La vocación de estos suelos es ganadera y se localizan en el municipio de Palizada en los límites con el estado de Tabasco.





## PATRONES DE VIENTOS DOMINANTES

Los vientos que soplan sobre Campeche tienen el siguiente comportamiento durante el año: los vientos procedentes del noroeste se presentan fundamentalmente en los meses de noviembre a marzo. Para los meses de septiembre y octubre el viento que viene del norte tiende a alinearse de dirección este-oeste. Durante los meses de junio a agosto los vientos que afectan esta región proceden del sureste; en mayo y abril estos vientos tienden poco a poco a orientarse en dirección sur-norte (Gío-Argáez, 1996).

En general las brisas marinas que soplan del nordeste durante gran parte del año son los vientos dominantes. En invierno los “Nortes” o tormentas de invierno, que son masas de aire frío y seco que se desplazan del noreste, originándose en el norte de Estados Unidos y sur de Canadá, al cruzar el Golfo de México recogen humedad, la cual precipitan en esta zona causando lluvias de noviembre a enero. En los meses de verano la región es visitada por ciclones tropicales.

## OROGRAFÍA

Hacia el sureste tenemos una zona prácticamente libre de accidentes naturales en donde se ha desarrollado una llanura debido a la acción de varios agentes: por un lado, los grandes depósitos de sedimentos que aportan los ríos Usumacinta y San Pedro que, combinados con los acarreados por el mar, han ido rellenando los valles de fondo plano desde hace un millón de años; por otro lado, los múltiples brazos y tributarios de estos ríos se entrelazan entre sí, combinándose con las lluvias abundantes y el drenaje deficiente del terreno, para formar entre ellos terrenos pantanosos y depresiones ocupadas por un conjunto de lagunas paralelas a la costa y separadas de ella por barreras arenosas.

En las zonas pantanosas los procesos de acumulación de sedimentos son continuos debido a las frecuentes inundaciones, con lo que se aumenta el volumen de estos depósitos. Además de los agentes anteriores, las corrientes marinas, las olas, así como la influencia de los “Nortes” y los ciclones

tropicales, que en los últimos años han sido más frecuentes, hacen que esta zona sufra un continuo cambio en los cauces de los ríos, el avance o retroceso de terrenos firmes y el cubrimiento total o parcial de los cuerpos de agua por el aporte de sedimentos.

La observación de los numerosos brazos del Usumacinta, desde el Palizada hacia el San Pedro, nos lleva a pensar que las llanuras han crecido de este a oeste formando un abanico deltáico, siendo el actual cauce del Palizada el primero que tuvo el Usumacinta, el cual por su divagación tan marcada ha llegado con el paso del tiempo hasta su trayectoria actual, y que las lagunas de Pom, Atasta y Puerto Rico fueron hace miles de años la zona hasta donde llegaba la costa, en la que se desarrollaron una serie de cordones arenosos que marcan actualmente el nuevo límite costero.

El resto del territorio de Campeche pertenece a la gran plataforma de la península de Yucatán, compuesta de roca caliza y que se

viene levantando por encima del mar desde hace 60 millones de años. En general el relieve se presenta en esta zona como un terreno rocoso ligeramente ondulado de escasa elevación, representada por numerosas colinas separadas entre sí por extensas zonas bajas.

Hacia los extremos norte y suroeste de esta zona, el terreno presenta una inclinación muy pequeña en dirección a la costa; en el norte es de 26 cm por km y en el suroeste aproximadamente de 60 cm por km. Esto hace que ambas zonas aparezcan como extensas planicies cuando se les mira a cierta distancia.

En el sur de Seybaplaya se inician una serie de lomeríos conocidos como Sierra Alta o Puuc, que se dirigen al noreste, hasta Bolonchén y ahí penetran en el estado de Yucatán. Tienen una altitud media entre 40 y 60 metros llegando a alcanzar en algunos puntos más de 100 metros. En su recorrido por la costa cercana a la ciudad de Campeche estos lomeríos forman acantilados con puntas conocidas con el nombre de Mactum, Boxol y el Morro. Por el otro lado de Seybaplaya hacia el sur, hay una derivación de estas lomas que se conoce como Sierra Seybaplaya. Estos cerros se extienden por el centro del Estado perdiendo altitud al sur del río Champotón en dirección a Escárcega. En el sureste se encuentra la parte más elevada del relieve, cerca de los límites con Guatemala y Quintana Roo; las máximas elevaciones están cerca de Zoh Laguna.

Esta zona es muy extensa y su superficie es casi plana, ya que también se presentan

lomas separadas por extensas zonas bajas. Al descender de las partes más altas hacia las bajas del centro y oeste de Campeche, el terreno aparenta formar una especie de escalones, lo que le da a la región características de meseta baja. Estas lomas son estructuras dómicas (de forma semiesférica) producto de la intensa disolución de las rocas calcáreas de que están formadas.

El origen de las depresiones puede ser muy diverso. Así, en el centro del Estado son resultado del relajamiento de zonas bajas por la acumulación de sedimentos siendo un ejemplo de esto el valle de Edzná. En otros casos, como sucede en el norte, existen algunas que se formaron debido a la ampliación o unión de antiguos cenotes.

Los cenotes son efecto de circulación subterránea de aguas, ya que en su recorrido forman profundas grutas y por mismo, el desgaste que efectúan sobre la roca, provocan el hundimiento parcial o total de estas cavernas, quedando a la vista la corriente del fondo. Estos abundan en la región norteña de los Chenes.

Los cenotes viejos pierden la verticalidad de sus paredes por la misma erosión y su fondo se va rellenando, resultando un lago que comúnmente es de tamaño pequeño y que es conocido como aguada. A este conjunto de rasgos característicos del relieve presente en esta zona, así como en el resto de la península de Yucatán, se le conoce como paisaje cárstico.

## LITORAL Y RELIEVE SUBMARINO

El litoral del estado de Campeche tiene una extensión de 523.3 km. En general es are-

noso y bajo; es tan bajo en algunos lugares como Seybaplaya y Champotón, que por las



tardes se retira el mar a más de 500 metros de la orilla. La única porción de costa alta, con salientes y ensenadas rocosas, se encuentra entre la ciudad de Campeche y Seybaplaya, debido a que aquí entran en contacto la línea de costa con partes elevadas de la sierra Alta.

Los rasgos más característicos del litoral campechano son de norte a sur: la península del Ubero, la entrada del estero Celestún, la Punta Desconocida, las pequeñas islas de Piedra y Jaina, la punta del Morro, la península e Isla Aguada, la entrada al estero Sabancuy, el estrecho llamado barra de Puerto Real, la isla del Carmen y la península de Atasta; además están las islas de Triángulo, Arcas, Obispo y Bermejo (Rivera-Arriaga *et al.*, 2004).

Dentro del Golfo de México tenemos la zona conocida como banco de Campeche, que presenta una plataforma continental cuya amplitud varía de 216 km frente a Yucatán, entre 30 y 55 km frente a las costas de Campeche y de 5 y 30 km hacia el oeste del Estado; su profundidad varía de los 70 a 220 m y cuenta con una superficie de 66 770

km<sup>2</sup>. El talud continental conocido como cañón de Campeche se extiende desde el borde de la plataforma hasta profundidades que van desde 2 000 a 3 500 m.

Los sedimentos depositados en el área son muy finos (arcillosos) en su porción norte y oeste; aumentan su espesor (limosos, arenosos y gravilentos) en el este, para volver a reducirlo a muy fino en el sur. Todos estos sedimentos son de composición calcárea y margosa.

En el banco de Campeche se manifiestan una serie de fenómenos en la circulación de las aguas condicionados por sus características físicas y los factores climáticos de la región. Dentro de los más importantes está la formación de giros en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj que se desplazan hacia el oeste, las mareas internas, la formación de termoclinas (descenso brusco de la temperatura del agua conforme aumenta la profundidad) y la entrada de la corriente marina conocida como corriente del Lazo, la cual se deriva de la corriente del Golfo.

## RECURSOS HÍDRICOS

El estado de Campeche forma parte de la plataforma de la península de Yucatán la cual, a su vez, es parte de la placa norteamericana. La evolución geológica y tectónica de la península está estrechamente ligada a la evolución del Golfo de México y el Caribe. En la actualidad la geología superficial de la península de Yucatán está formada, principalmente, por sedimentos pertenecientes al Cenozoico, predominando los sedimentos de origen calcáreo que le han otorgado el carácter Kárstico (entendiendo como Kárstico a la forma de terreno calcáreo altamente

fracturado conformado por un gran número de cavidades formadas por disolución: cavernas y cenotes) que controla la hidrogeología de la península.

El territorio de Campeche forma parte de 4 regiones hidrológicas de las cuales, las número 31 (Yucatán Oeste) y 30D (Grijalva-Usumacinta) son las más importantes. Cuenta con 7 cuencas hidrológicas siendo las principales las correspondientes a los ríos Palizada, Candelaria y Champotón por su magnitud y caudal aportado, así como también tiene 2 200 km<sup>2</sup> de lagunas costeras.

Forma parte de la Región Hidrológica XII, Península de Yucatán (CONAGUA) en la cual el 98% del territorio de Campeche ha sido dividido en dos sub-regiones: Poniente y Candelaria, esta última es la de mayor precipitación de la zona y es una de las que presenta valores más altos en el país, del orden de 1 700 a 1 800 mm anuales; el promedio de precipitación para el estado de Campeche es de 1 169 mm al año (CONAGUA, 2006b).

Las anteriores características han permitido que en esta zona de la Península y particularmente en el sur-suroeste del territorio del Estado se concentre el mayor número de corrientes superficiales, como son ríos, lagos, lagunas y esteros. Las corrientes superficiales pertenecen a distintas cuencas, siendo la de mayor extensión la del sistema Grijalva-Usumacinta (a la cual pertenece el río Palizada), seguida por las cuencas de los ríos Candelaria, Chumpán y Mamantel (Rebollo, 2010).

El río Palizada es el brazo más caudaloso del Usumacinta, cuya planicie aluvial es baja y pantanosa, recibe las aguas del arroyo Blanco, en el municipio de Palizada el río Viejo se une al Palizada, desembocando en la laguna del Este, finalmente llega a la laguna de términos en Boca Chica. El río Chumpán se forma por la unión de varios arroyos, dentro de los que destacan, Salsipuedes, San Joaquín y Piedad, corre en dirección suroeste y desemboca en la laguna de Términos por la boca de Balchacah.

El río Candelaria se forma en la región del Petén, dentro de territorio guatemalteco, con una trayectoria general de sur a norte. Ya en Campeche recibe por su margen derecho al río Caribe, y desemboca en la laguna de Pargos, la que más abajo desagua de la laguna de Términos

La última cuenca importante del estado de Campeche es la del río Champotón que se encuentra al norte de la laguna de Térmi-

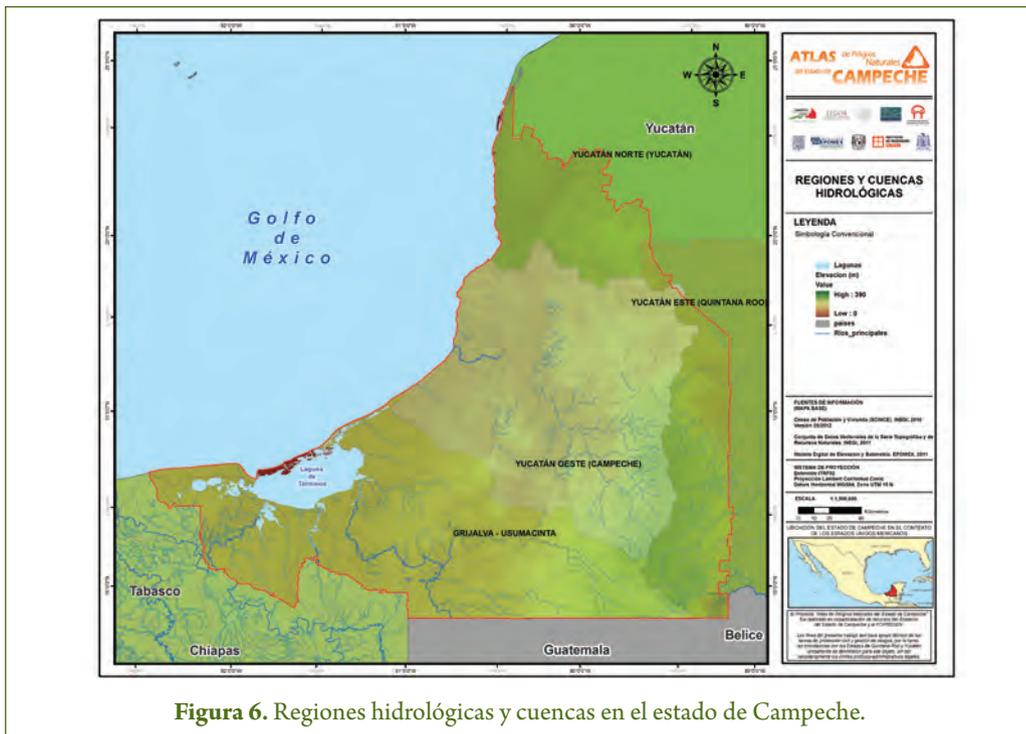


Figura 6. Regiones hidrológicas y cuencas en el estado de Campeche.

nos, prácticamente en el centro del Estado. Al igual que el Mamantel fluye sobre suelo calcáreo, con un curso corto y sin afluentes, desembocando en el Golfo de México.

El resto de las corrientes situadas en el centro y sureste del Estado son temporales, pues sólo llevan agua en los períodos de lluvias.

Otro rasgo importante es el que conforman las Lagunas que rodean a la laguna de Términos, formando en conjunto el sistema lagunar más importante del país; de oeste a este, tenemos el siguiente orden: de Atasta, Pom, Puerto Rico, del Este, del Vapor, del Corte, Pargos y Panlau. La formación de estas lagunas ha ocurrido durante los últimos 5 mil años, sobre todo por la acumulación de sedimentos acarreados por los ríos, lo que ha provocado la formación de barreras are-

nosas alrededor de las depresiones del terreno. Hacia el noreste de este sistema tenemos el estero de Sabancuy formado por barreras de arena y manglar (Rendón-von Osten *et. al.*, 2008).

Finalmente tenemos en el sur de Campeche una serie de depósitos de agua que se originan durante la temporada de lluvias y son conocidos en la región como aguadas, akalchés o lagos. Estos depósitos ocupan las partes bajas del terreno, alimentados por los arroyos que aparecen en la misma temporada húmeda y que ahí desaguan. La mayor parte de las aguadas desaparecen cuando pasan las lluvias. Los que mantienen sus aguas permanentemente son el lago Noh (Silvituc), el lago Noha y el Chama-ha.

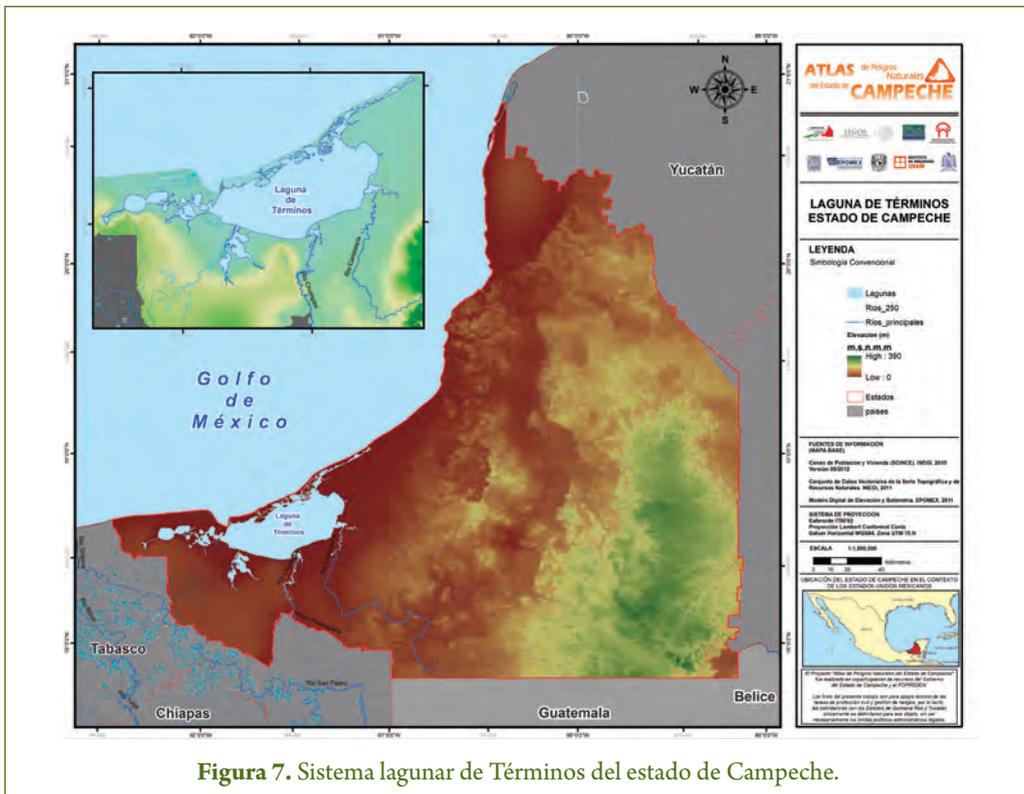


Figura 7. Sistema lagunar de Términos del estado de Campeche.

## LITERATURA CITADA

- CENAPRED, 2006.** Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Conceptos Básicos sobre Peligros, Riesgos y su Representación Geográfica. Noviembre 2006. CENAPRED.
- CONAGUA, 2006.** Programa Hidráulico Regional 2002-2006, Península de Yucatán, Región xii. seMarnat-cna.
- CONAGUA, 2006b.** Estadísticas del Agua en México- Semarnat-CNA. 233 p.
- Gío-Argáez F.R., 1996.** Campeche y sus recursos naturales. Revista Mexicana de Historia Natural, A.C. Vol. Esp. 247 p.
- Gobierno del Estado de Campeche, 2009.** Plan Estatal de Desarrollo 2009 – 2015.
- INEGI, 2010.** Censo de Población y Vivienda 2010.
- Rendón-von Osten, J., G. Vargas, J. Benítez, M. Memije, y V. Acevedo, 2008.** Fuentes de abastecimiento y cuerpos de agua del estado de Campeche. *Jaina Boletín Informativo*, 19(1): 48-53.
- Rivera-Arriaga, E., G. Palacio Aponte, G. Guillermo Villalobos Zapata, R. Silva Casarín y P. Salles Afonso de Almeida, 2004.** Evaluación de Daños en las Zonas Costeras de la Península de Yucatán por el Huracán “Isidoro”. Desarrollo de Propuestas de Investigación y Mitigación en Manejo Integrado de Recursos Costeros. Sección Campeche. Universidad Autónoma de Campeche. 158 p.
- Rebolledo Vieyra, M., 2010.** Hidrología. p. 27. En: G. J. Villalobos-Zapata y J. Mendoza Vega (Coord.), 2010. La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur. México. 730 p.
- <http://www.cenecam.gob.mx/antecedentes.php>
- <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM04campeche/mediofisico.html>
- Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México. Estado de Campeche



---

# Inundaciones por Desbordamiento de Ríos

*Beatriz Edith Vega Serratos, Gregorio Posada Vanegas, Ramón Domínguez Mora,  
Gabriela Esquivel Garduño, Areli Assenett Martínez Reyes, Débora Ramírez Vargas,  
Ángel Gabriel Kuc Castilla y Gabriel Ruíz Martínez*

---

## RESUMEN

Los ríos son corrientes naturales de agua que fluyen con continuidad, poseen un caudal determinado que rara vez es constante a lo largo del año y pueden desembocar en el mar, un lago o en otro río. Son indudables los beneficios que traen los ríos para la población, como pueden ser fuente de agua para acueductos o riego, alimentación a partir de los peces que en el son capturados o cultivados, recreación, transporte y disposición de aguas residuales, por todas estas características las ciudades y poblados tienden a ubicarse cerca de los ríos, lo que conlleva a que cuando el río aumenta su caudal, ya sea durante la época de lluvias o por un evento meteorológico extremo, y se produce el desbordamiento de sus aguas, la población que se encuentra dentro del área de inundación puede verse sometida a afectaciones directas (daños en sus inmuebles o enfermedades) o indirectas como puede ser destrucción de las fuentes de trabajo o vías de comunicación. El estado de Campeche cuenta con tres ríos principales, Champotón, Candelaria y Palizada, los cuales se caracterizan por ser ríos de planicie que en épocas de lluvia pueden cuatriplicar su caudal con respecto a la época de secas. Por medio del mejo-

### Objetivo general

- Construir mapas de peligro asociados a inundaciones por desbordamiento de los ríos Champotón, Candelaria y Palizada en el estado de Campeche.

### Objetivos específicos

- Describir la metodología desarrollada para calcular los escenarios de desbordamiento de ríos en el estado de Campeche.
- Enunciar las áreas inundables en cada una de las zonas urbanas de los municipios de Champotón, Candelaria y Palizada.



ramiento a la metodología propuesta por Eslava (2006) dentro del proyecto *Atlas de Peligros Naturales del Estado de Campeche* se realizó el análisis cuantitativo de las zonas de inundación de cada uno de estos ríos, a partir de estudios hidrológicos e hidráulicos, así como de campañas batimétricas cuyo objetivo fue recabar los datos necesarios para construir un modelo digital de elevaciones que tuviera el cauce del río correctamente definido. Los mapas se encuentran tanto en formato impreso como integrados en un sistema de información geográfica de tal manera que el CENECAM pueda evaluar los niveles de inundación, de los puntos ubicados en el modelo digital de elevaciones, para diversos escenarios de desbordamiento de ríos.

## INTRODUCCIÓN

La península de Yucatán, al igual que otras zonas costeras del país, es afectada regularmente por diversos fenómenos naturales dentro de los que destacan los hidrometeorológicos; asociados a estas amenazas se presentan diversos peligros naturales como son vientos, oleaje, marea de tormenta, deslaves, inundaciones por acumulación de lluvia y desbordamiento de ríos o inundaciones fluviales, entre otros.

Las inundaciones son parte de la naturaleza, se presentan en todo el mundo y en cualquier momento. A lo largo de la historia, la humanidad ha vivido con este fenómeno y ha trabajado permanentemente en entender, predecir y manejar las inundaciones, sobre todo las poblaciones asentadas en las cercanías a cuerpos de agua tales como los ríos y costas en donde las afectaciones han sido devastadoras generando destrucción y en algunos casos fallecimientos (Zevenbergen *et al.*, 2011).

Los efectos de las inundaciones fluviales van desde una escala local, afectando colonias o comunidades, hasta una gran escala, donde se consideran regiones enteras, cuencas e incluso múltiples estados o países (cuencas transfronterizas). Es en función de las causas de la inundación el comportamiento de éstas y por consecuencia el tipo de afectación, algunas se desarrollan de manera muy lenta, durante días y otras inundaciones son

súbitas que se presentan minutos después de llover e inclusive sin lluvia aparente.

Cuando se presenta una inundación se pueden alterar varios aspectos, debido a que existe gran concentración de personas y sus posesiones y actividades económicas son expuestas. Las afectaciones pueden ser en alguna o en todas las siguientes maneras:

- Población: en la seguridad, salud y medios de subsistencia.
- Sectores económicos: alteración en la capacidad productiva debido al cambio en la demanda de la materia prima que se produce.
- Infraestructura física: daño en edificios de vivienda, servicios urbanos (agua, luz, drenaje, etc.) e industrias específicas.

Así pues, la escala de devastación producida por una inundación depende tanto de la magnitud de ésta como del grado de preparación que tiene la población afectada, es decir de su vulnerabilidad. Es por esto que en últimos años, a nivel mundial se ha hecho un esfuerzo enorme por identificar las causas que generan una inundación, así como los niveles máximos que pueden presentarse y el grado de afectación que pueden generar en las poblaciones cercanas a ríos y mares, todo lo anterior enmarcado en el manejo integral del riesgo, apoyándose en los sistemas de información geográfica, SIG, (van Westen, 2010).

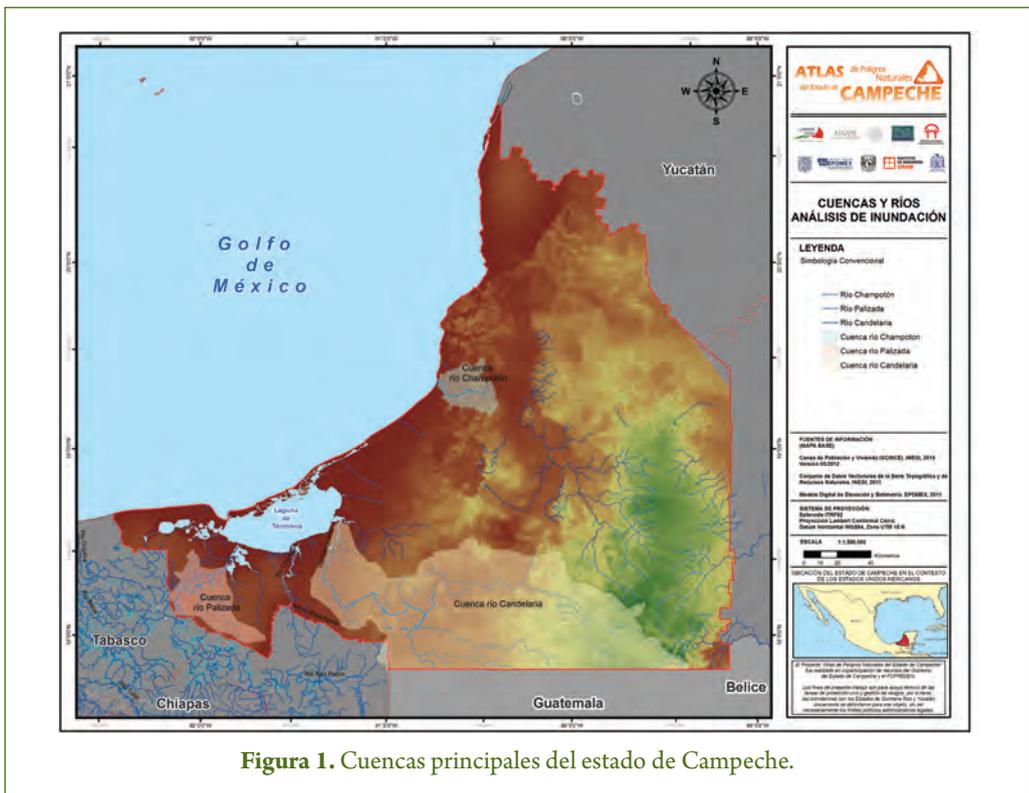
En el estado de Campeche los ríos principales son Champotón, Candelaria y Palizada (figura 1), los cuales son ríos de planicie que se caracterizan por sus desbordamientos lentos, de grandes dimensiones y con una duración temporal alta, presentan características hidráulicas específicas que los hacen diferentes.

El presente trabajo pretende obtener, a partir de los estudios hidrológicos e hidráulicos, los mapas de peligro asociado al desbordamiento de los ríos del estado de Campeche para diferentes periodos de retorno, desde 2 hasta 500 años, así como su integración en un Sistema de Información Geográfica, SIG, herramienta útil para los organismos de Protección Civil y planeación urbana.

## METODOLOGÍA

La metodología desarrollada y adaptada para el análisis e identificación del peligro por inundaciones de ríos en el estado de Campeche se basa en las propuestas por el

departamento de Riesgos Hidrometeorológicos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (Salas, 2011); para cada río fue necesario realizar la batimetría de detalle del





cauce (Martínez Reyes, 2011, Kuc, 2013), crear un modelo topobatimétrico que permitiese utilizar el programa HecRas (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>) y definir sus condiciones de frontera específicas ya que cada río presenta singularidades que lo diferencian de los otros, las cuales son enunciadas a continuación.

### CONDICIONES DE FRONTERA

El río Champotón desemboca directamente al Golfo de México, por lo tanto para esta frontera fue necesario definir la marea astronómica por medio del sistema de monitoreo implementado por Ruíz *et al.*, 2010 y la marea de tormenta (Posada *et al.*, 2010) ya que estos dos factores condicionan el desbordamiento del río; para la parte inicial del río se definieron los caudales utilizando un modelo lluvia escurrimiento, considerando la regionalización de la precipitación y, calibrando los resultados con los datos de la estación hidrométrica Canasayab.

Para el río Candelaria se realizó un análisis extremal de los caudales históricos de la estación hidrométrica Candelaria, correspondiente al escurrimiento de la cuenca alta que tiene sus límites en Guatemala; el análisis considera eventos específicos como los huracanes “Opal” y “Roxanne” que se presentaron en 1995 causando grandes inundaciones en esta cuenca. Para la frontera aguas abajo del río o salida de la cuenca se utilizó como condición de frontera el flujo crítico ya que este río aproximadamente a 8 km de la cabecera municipal de Candelaria, presenta un desnivel en su cauce del orden de 3 m que obliga al flujo a convertirse de subcrítico a supercrítico con lo que se alcanza esta condición.

El río Palizada es un brazo del río Usumacinta, tiene una extensión de 120 kilómetros. Se origina en la boca de Amatitán,

la cual está a 9.6 kilómetros al este de Jonuta, Tabasco, desembocando en la laguna de Términos a través de un sistema lagunar muy amplio, lo cual obligó a definir como frontera abierta la localidad de canales, último lugar donde el río Palizada tiene un solo cauce ya que a partir de este se ramifica en dos brazos, uno de los cuales forma la laguna el Vapor para después volverse a unir en boca Chica, como condición de frontera desfavorable se utilizó la pleamar máxima registrada en Ciudad del Carmen (Ruíz *et al.*, 2010). Al ser el río Palizada una derivación del río Usumacinta, que desde el inicio tiene entre 70 y 100 m de ancho y 6 m de profundidad, para definir los caudales de entrada se utilizó la información de la estación hidrométrica de la CONAGUA, con la cual se construyó la curva elevaciones gasto asociada a diferentes periodos de retorno (Kuc, 2013). Este río tiene como característica adicional que sus márgenes están confinados por la construcción de bordos perimetrales, por lo que fue necesario obtener su elevación ya que estos datos se incluyeron en las secciones transversales, datos necesarios para la modelación hidráulica con el programa HECRAS.

### LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO

Para el levantamiento batimétrico de los ríos Champotón, Candelaria y Palizada se utilizó una ecosonda Valeport de 210 kHz con GPS integrado, este equipo se programó para que tomara registros de latitud, longitud y profundidad con una frecuencia de 4 Hz, igualmente se utilizó un computadora portátil de uso rudo, (Panasonic Toughbook) para recolectar de manera inmediata los datos, la navegación se realizó por medio del programa Hypack. En la figura 2 se observa el equipo utilizado instalado en una embarcación menor, apropiada para la navegación en aguas poco profundas.



**Figura 2.** Equipo batimétrico.

La metodología diseñada para obtener la batimetría detallada de los ríos, se dividió en dos partes, primero se navegó río arriba por un margen del río (aproximadamente a 5 m de la orilla, de tal manera de que las raíces de los manglares u árboles caídos no golpearan ni la lancha ni el transductor de la ecosonda), cada determinada distancia se realizó un transecto perpendicular a la orilla hasta la otra margen, por la que se continuó viajando hasta cubrir una distancia de 400 m o encontrar una curva en el trazo del río, para luego hacer otro levantamiento de la sección transversal; al llegar al punto de final del río se hizo el levantamiento de aguas arriba hacia aguas abajo navegando por aquellas márgenes que aún no se habían levantado; al llegar a la desembocadura o parte final de cada río nuevamente se hizo un transecto viajando por todo el centro del río. La navegación se hizo con una velocidad media de 9 km/h.

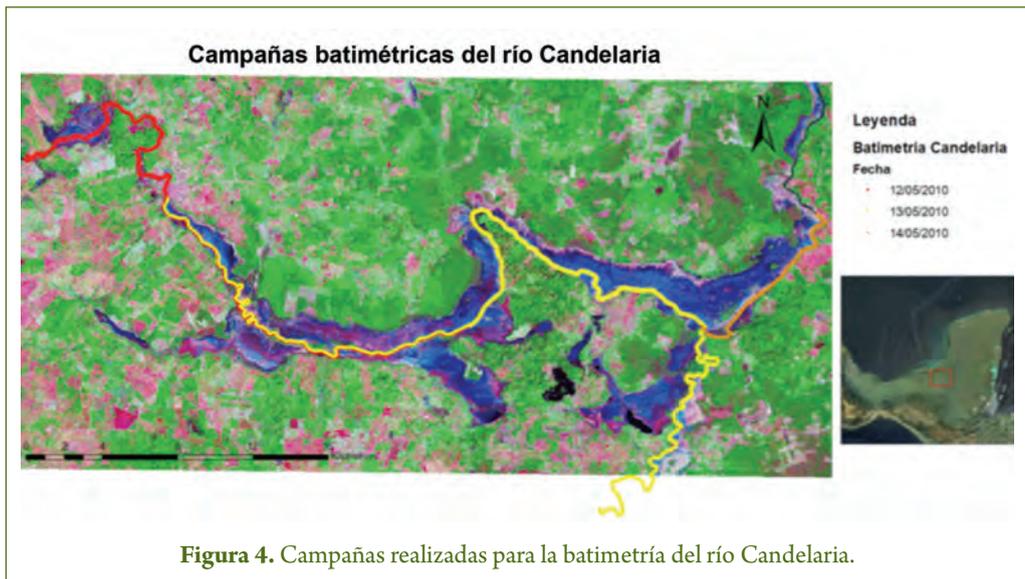
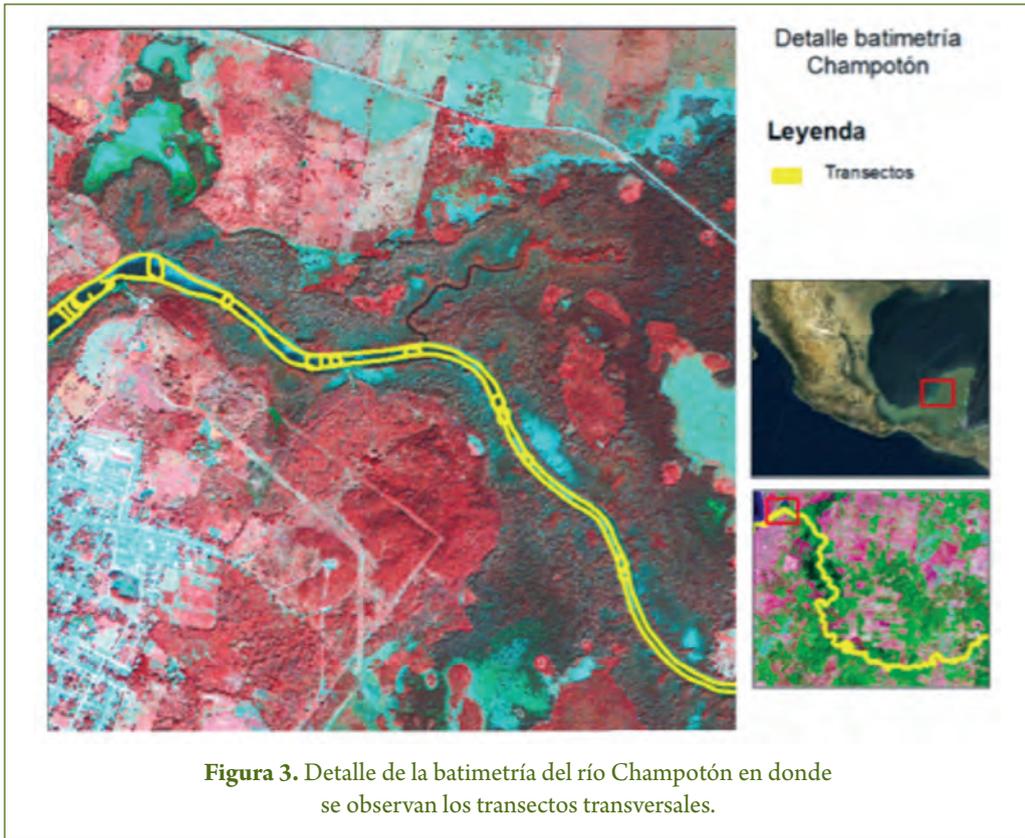
El 21 de mayo del 2010 se realizó la batimetría del río Champotón. El levantamiento inició en la desembocadura del río, en el Golfo de México, hasta la parte más angosta del mismo en donde se permitía la navegación; específicamente es donde se encuentra

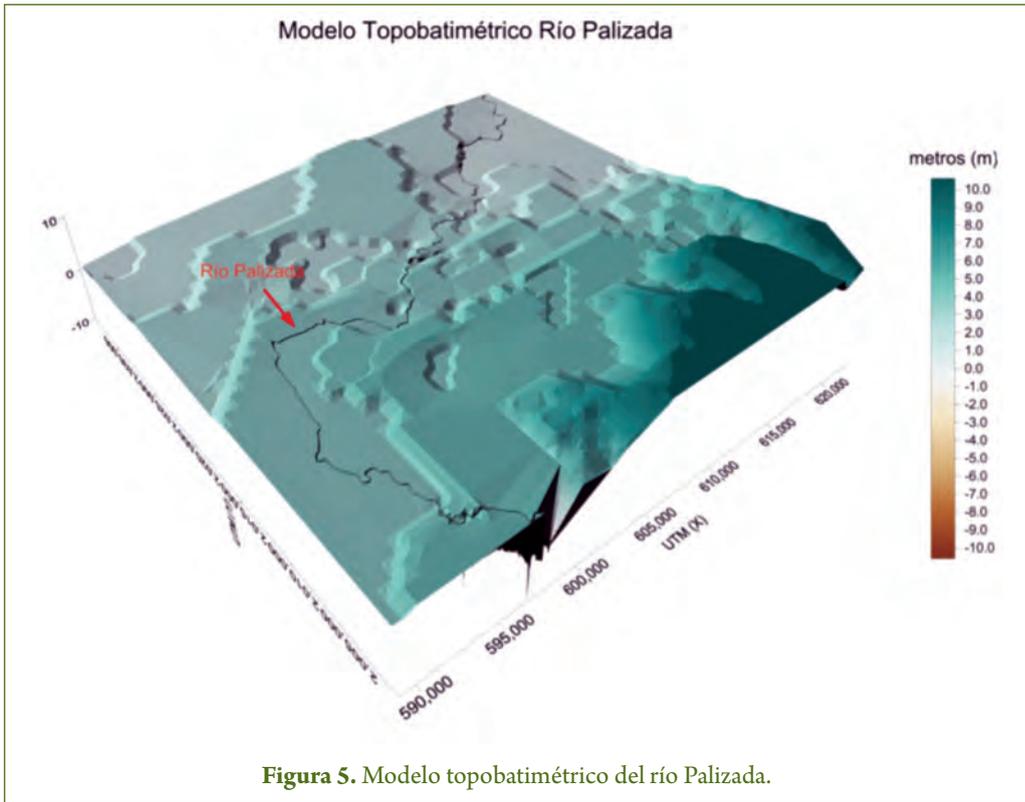
la estación hidrométrica de la CONAGUA en Canasayab. El tramo del río navegado fue de 32.87 km lineales (figura 3).

El levantamiento batimétrico del río Candelaria fue realizado entre los días 12 al 14 de mayo de 2010, se navegaron 91 km lineales, desde Salto Grande, ubicado a 16 km aguas abajo de la cabecera municipal de Candelaria, hasta el poblado el Pedregal en el afluente San Pedro y la localidad Monclova en el río Candelaria, la máxima profundidad registrada fue de 18.0 m (figura 4).

La batimetría del río Palizada se realizó desde la boca de Amatitán hasta la desembocadura en la laguna de Términos, en total se navegaron 197 km, la máxima profundidad medida fue de 14.6 m, la profundidad media del río es cercana a 4.0 m, (Posada y Vega, 2012), Kuc (2013) (figura 5).

Los datos batimétricos anteriores fueron corregidos con la elevación de la margen derecha de los ríos Champotón y Palizada e izquierda para Candelaria. Posteriormente esta información fue incluida dentro del modelo digital de 20 por 20 m con que cuenta el Instituto EPOMEX para obtener los mapas topobatimétricos de los ríos Champotón, Candelaria y Palizada.





### ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

En las tabla 1 y 2 se presentan los escenarios de simulación para los ríos Champotón y Candelaria, respectivamente, en la figura 6 se presenta para el río Palizada la curva elevaciones gastos obtenida a partir de la información de la estación hidrométrica de la CONAGUA ubicada debajo del puente que une la ciudad de Palizada con la carretera Escárcega-Villahermosa, esta estación reporta nivel del río y caudal, con los datos máximos anuales se obtuvo la curva elevación-gasto

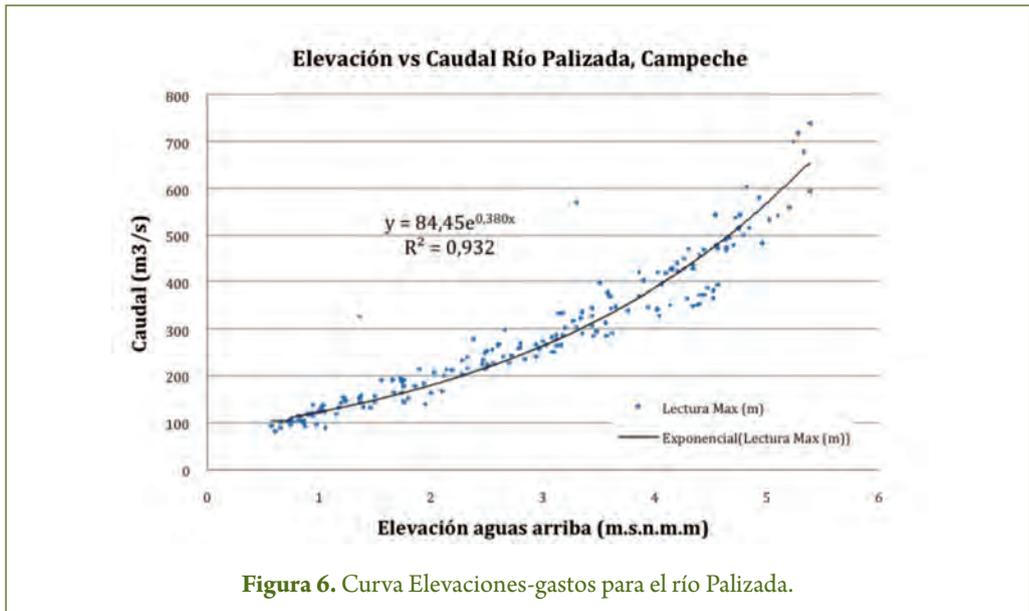
que permitió calcular los gastos asociados a diferentes elevaciones. En la tabla 3 se presentan los escenarios modelados para el río Palizada, es importante mencionar que de los tres ríos principales del estado de Campeche, el Palizada es el más complejo desde todos los puntos de vista, principalmente porque su cuenca está siempre por debajo de los 10.0 m.s.n.m, lo cual condiciona en gran medida la calidad y cantidad de la información topográfica disponible.

**Tabla 1.** Condiciones de frontera con marea combinada para el río Champotón.

Caso No.	Periodo de retorno Tr (años)	Gastos de diseño Qp (m <sup>3</sup> /s)	Marea astronómica M.A. (m)	Marea de tormenta M.T. (m)	Elevación total H (m)
1	2	180.36	0.66	0.206	4.866
2	5	264.25	0.66	0.778	5.438
3	10	346.04	0.66	1.126	5.786
4	20	421.54	0.66	1.439	6.099
5	50	513.81	0.66	1.816	6.476
6	100	580.92	0.66	2.079	6.739
7	500	734.02	0.66	2.628	7.288

**Tabla 2.** Condiciones de frontera con flujo crítico para el río Candelaria.

Caso No.	Periodo de retorno Tr (años)	Gastos de diseño Qp (m <sup>3</sup> /s)	Condición aguas abajo
1	2	136.72	F. Crítico
2	5	216.61	F. Crítico
3	10	311.09	F. Crítico
4	20	512.74	F. Crítico
5	50	801.43	F. Crítico
6	100	1 004.83	F. Crítico
7	200	1 203.31	F. Crítico
8	500	1 461.73	F. Crítico



**Tabla 3.** Condiciones de frontera para el río Palizada.

Caso No.	Aguas arriba		Aguas abajo
	Elevación (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Elevación (m)
1	4.48	465.06	0.5
2	4.75	515.42	0.5
3	5.00	566.90	0.5
4	5.20	611.76	0.5
5	5.50	685.80	0.5
6	5.60	712.42	0.5
7	5.70	740.07	0.5
8	5.76	757.17	0.5
9	5.80	768.79	0.5
10	5.90	798.63	0.5



## RESULTADOS

Las figuras 7 a 13 representan el comportamiento hidráulico del río Champotón de acuerdo a los escenarios de la tabla 1, las figuras 14 a 20 esquematizan las zonas de

inundación del río Candelaria, finalmente en las figura 21 a 31 pueden ubicarse las zonas inundables por el desbordamiento del río Palizada.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### RÍO CHAMPOTÓN

#### Análisis a nivel cuenca

El primer análisis se realizó a nivel de toda la cuenca determinando, para cada escenario de peligro, el área total inundada, las localidades y rancherías afectadas, las áreas de cultivo y vegetación inundadas. Los resultados mostrados en la tabla 4 son un indicador de la magnitud de la afectación, la cual debe complementarse con datos más concretos como el número de habitantes y su distribución espacial en las poblaciones (delimitación de colonias); con respecto a las áreas de cultivo y vegetación inundadas no se consideraron los costos que implica la afectación pues esto requiere de un análisis más detallado que considera el tipo de cultivo y la permanencia de la inundación, es decir, un análisis de vulnerabilidad.

#### Análisis a nivel ciudad de Champotón

El segundo análisis considera solamente el área urbana de la ciudad de Champotón, pues por ser cabecera municipal se contó con la información de las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEBS), INEGI (2005) la cual contiene el número de habitantes y cuáles son las colonias afectadas (tabla 5).

### RÍO CANDELARIA

El análisis básico de las inundaciones del río Candelaria se indica en la figura 32, en él se observa que para un periodo de retorno de 2 años, el área de inundación es de 30 km<sup>2</sup> (incluyendo el cauce del río), esta área, de acuerdo a la figura 14 está dentro de la llanura de inundación natural, no afecta ninguna población. Para los periodos de retorno de 5, 10, 20, 50 y 100 años la inundación es de 43.33, 56.19, 82.61, 107.22 y 136.67 km<sup>2</sup>, se observa que a medida que aumenta el periodo de retorno el área inundable crece considerablemente, para los periodos de retorno de 200 y 500 años, la inundación abarca un área de 138.37 y 139.43 km<sup>2</sup>, similar a la del periodo de retorno de 100 años. La diferencia radica en el tirante de inundación, a mayor  $T_r$ , mayor será la inundación.

La cabecera municipal de Candelaria resulta afectada a partir de un periodo de retorno de 20 años.

### RÍO PALIZADA

La cuenca del río Palizada se dividió en dos subcuencas para su análisis, parte baja y parte media-alta, esto ya que la cuenca baja, no presenta bordos perimetrales que permitan contener el caudal del río Palizada, por lo

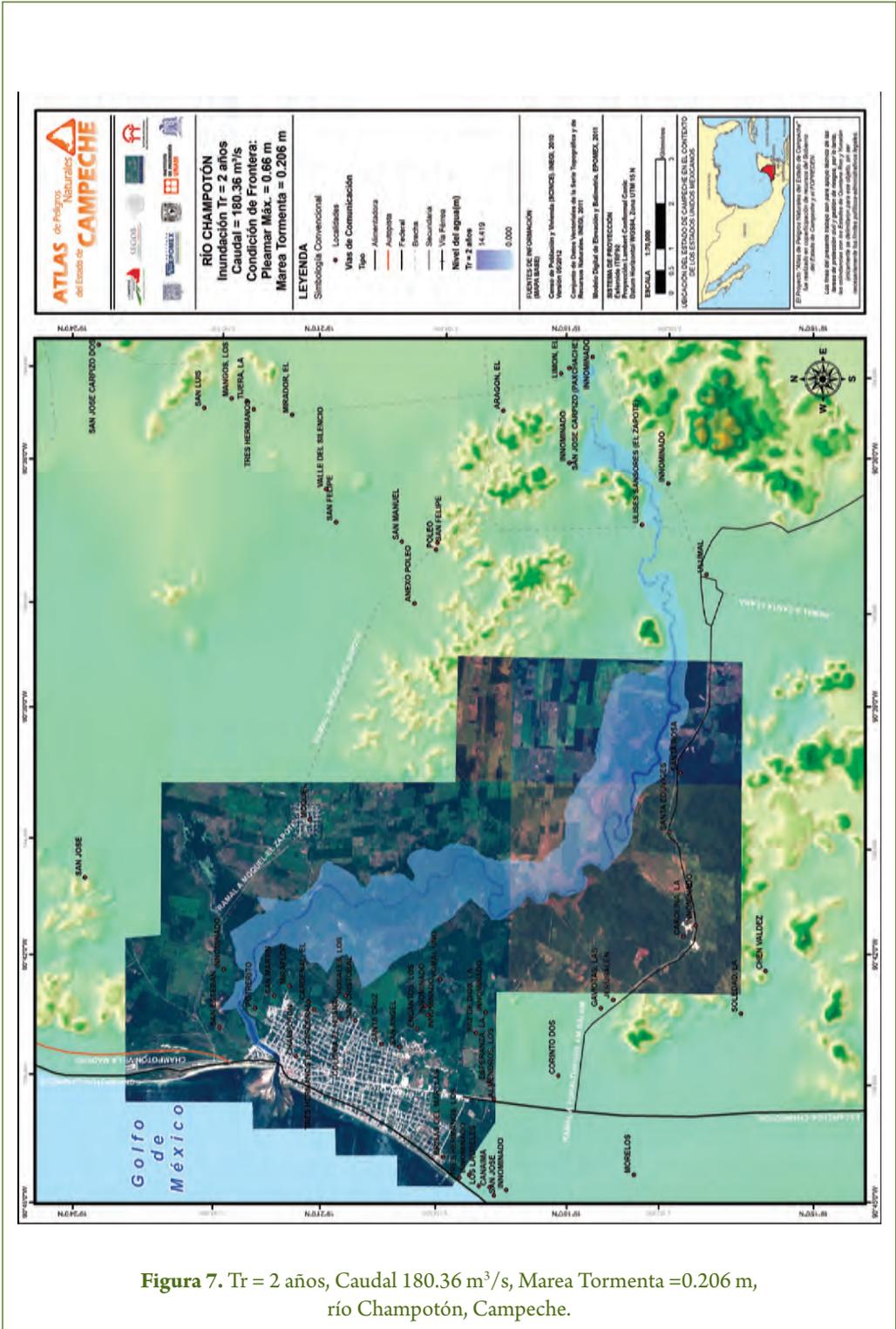


Figura 7. Tr = 2 años, Caudal 180.36 m<sup>3</sup>/s, Marea Tormenta = 0.206 m, río Champotón, Campeche.

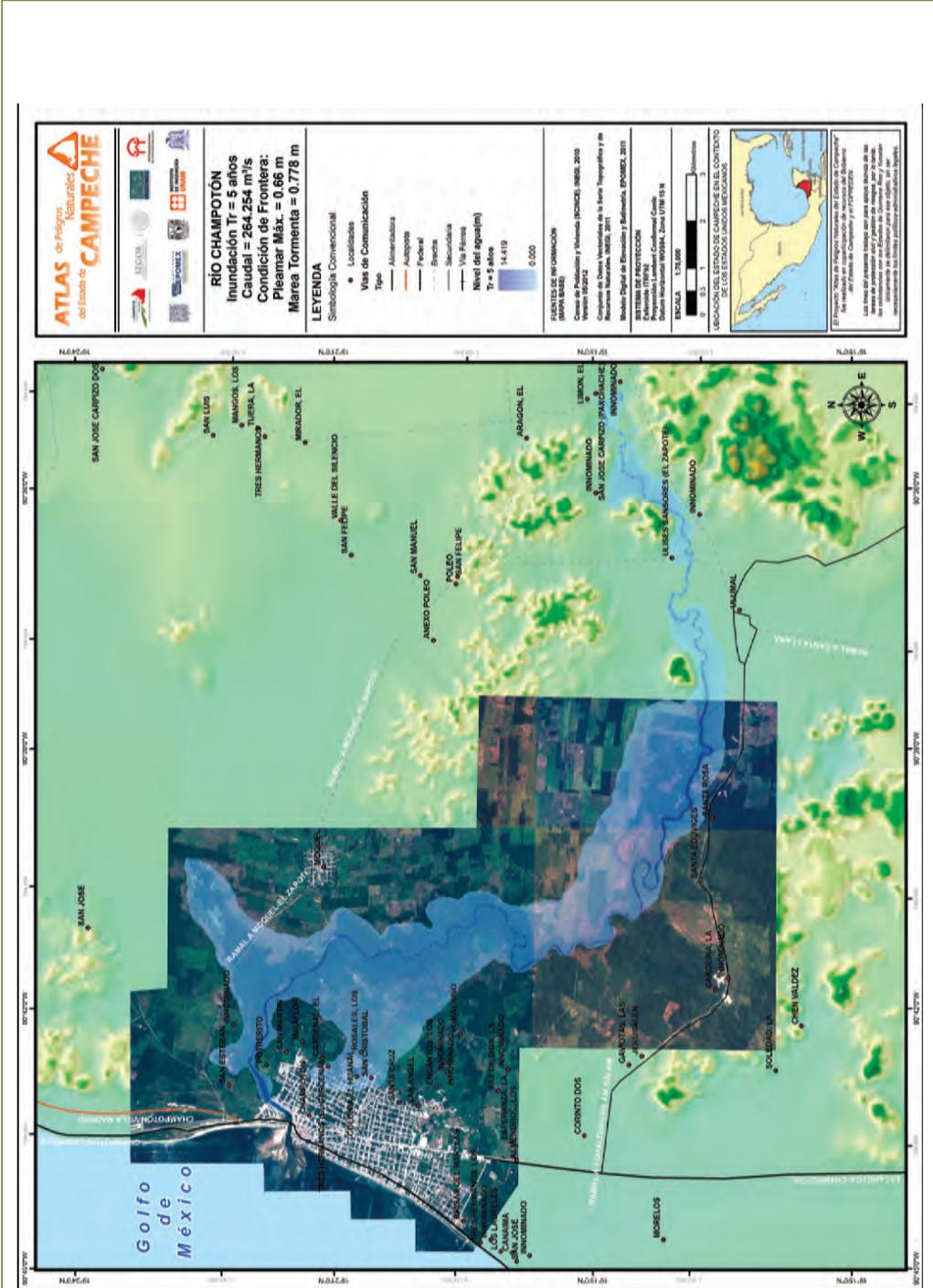
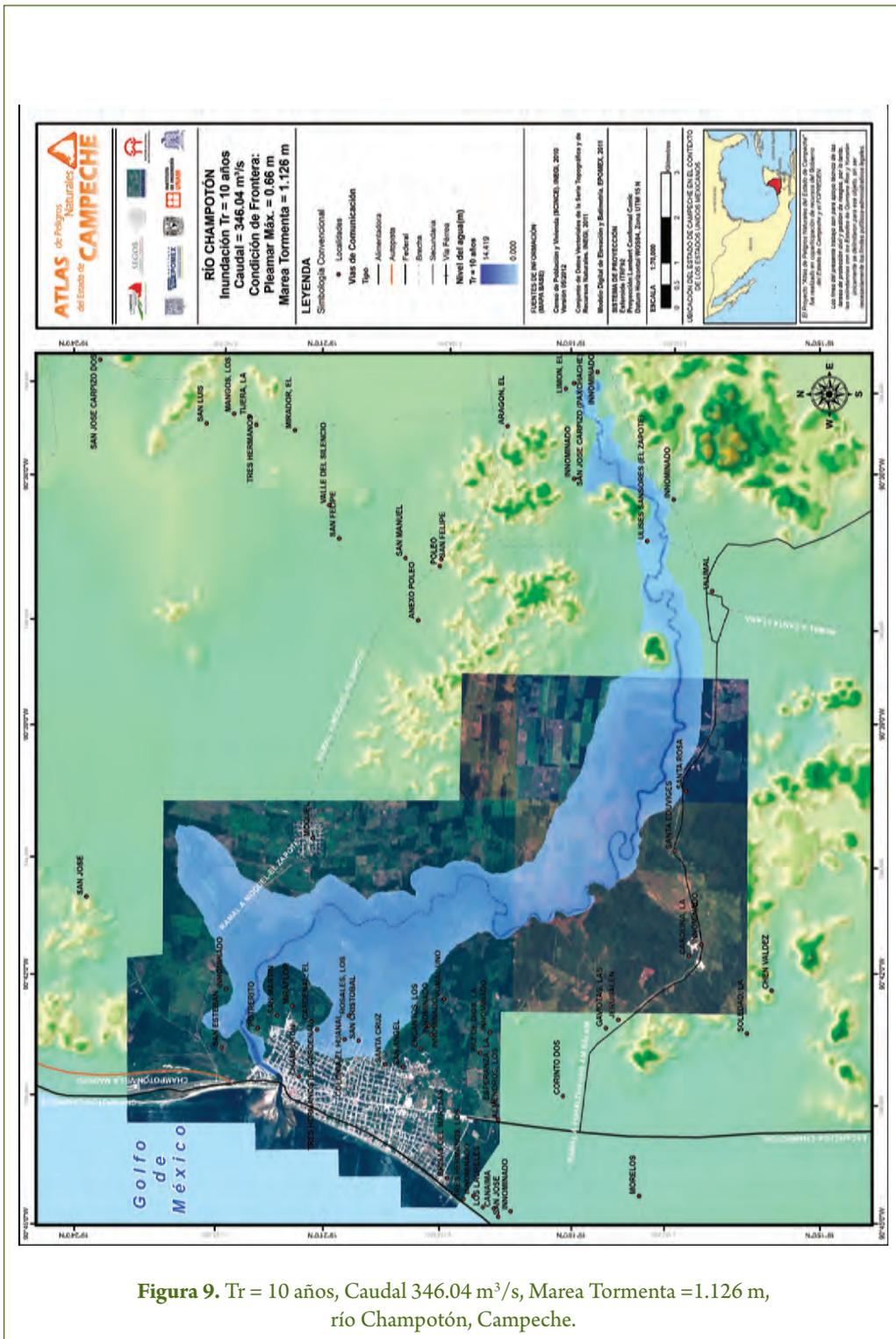


Figura 8. Tr = 5 años, Caudal 264.25 m<sup>3</sup>/s, Marea Tormenta = 0.0.778 m, río Champotón, Campeche.



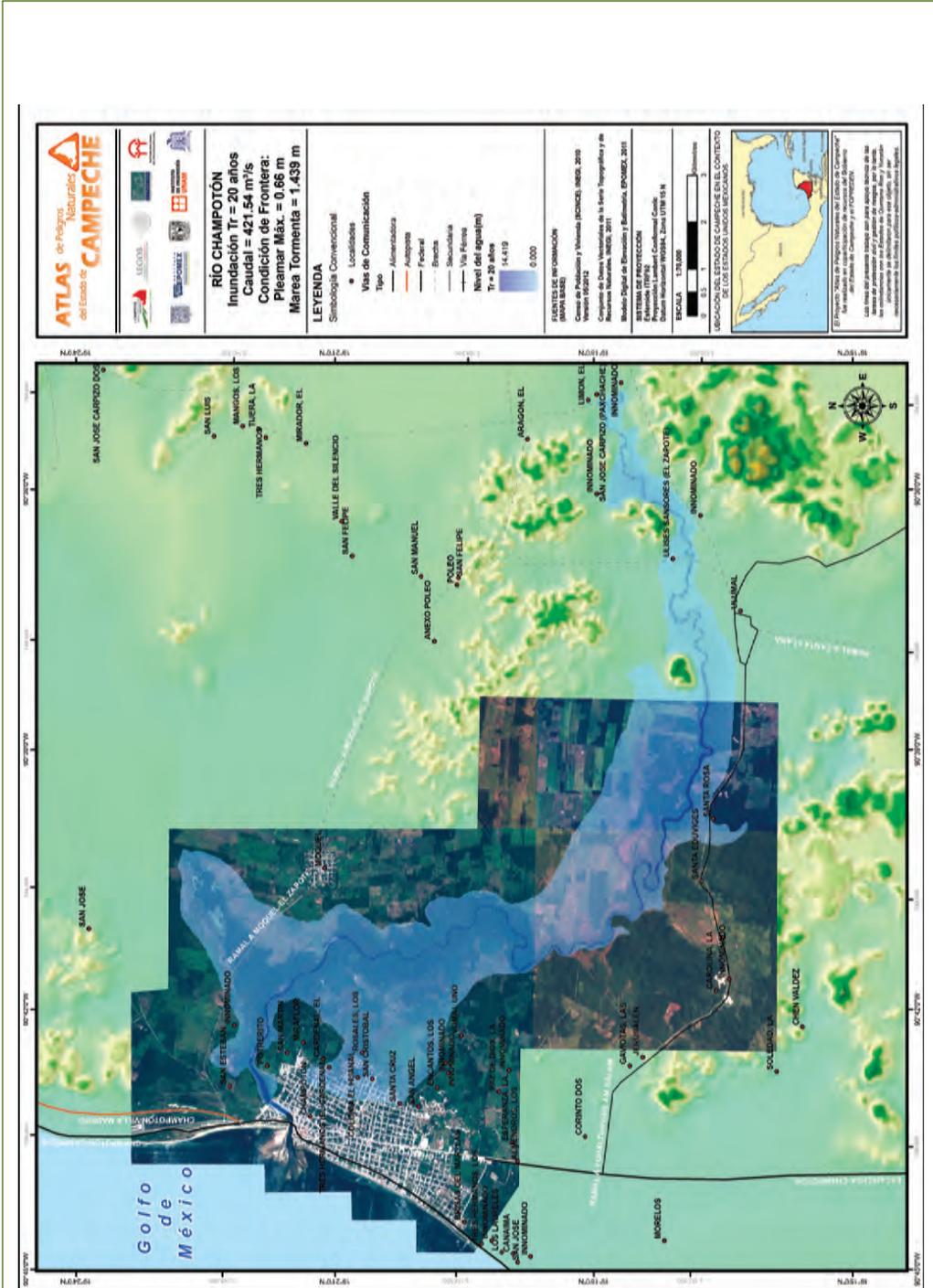


Figura 10. Tr = 20 años, Caudal 421.54 m<sup>3</sup>/s, Marea Tormenta = 1.439 m, río Champotón, Campeche.



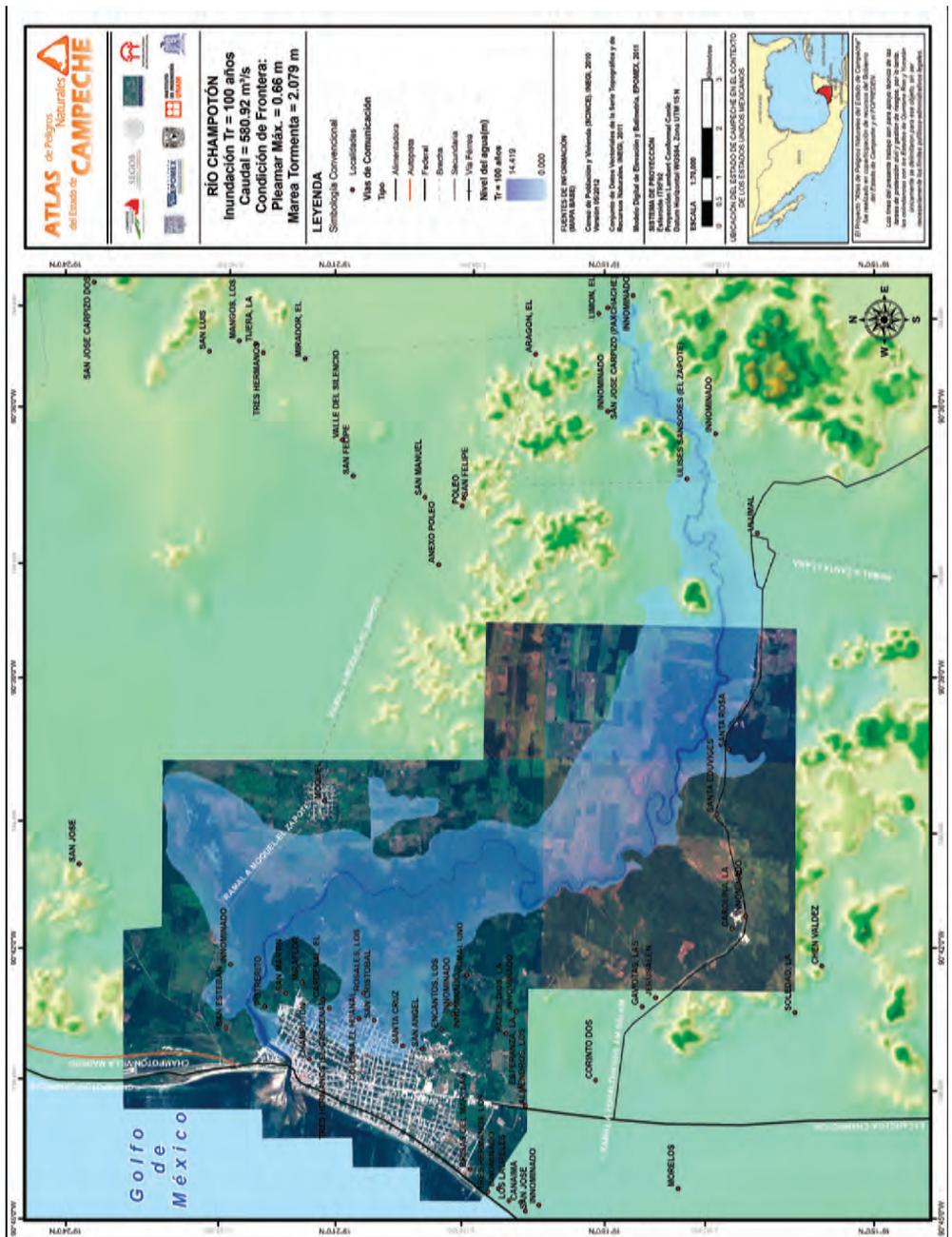
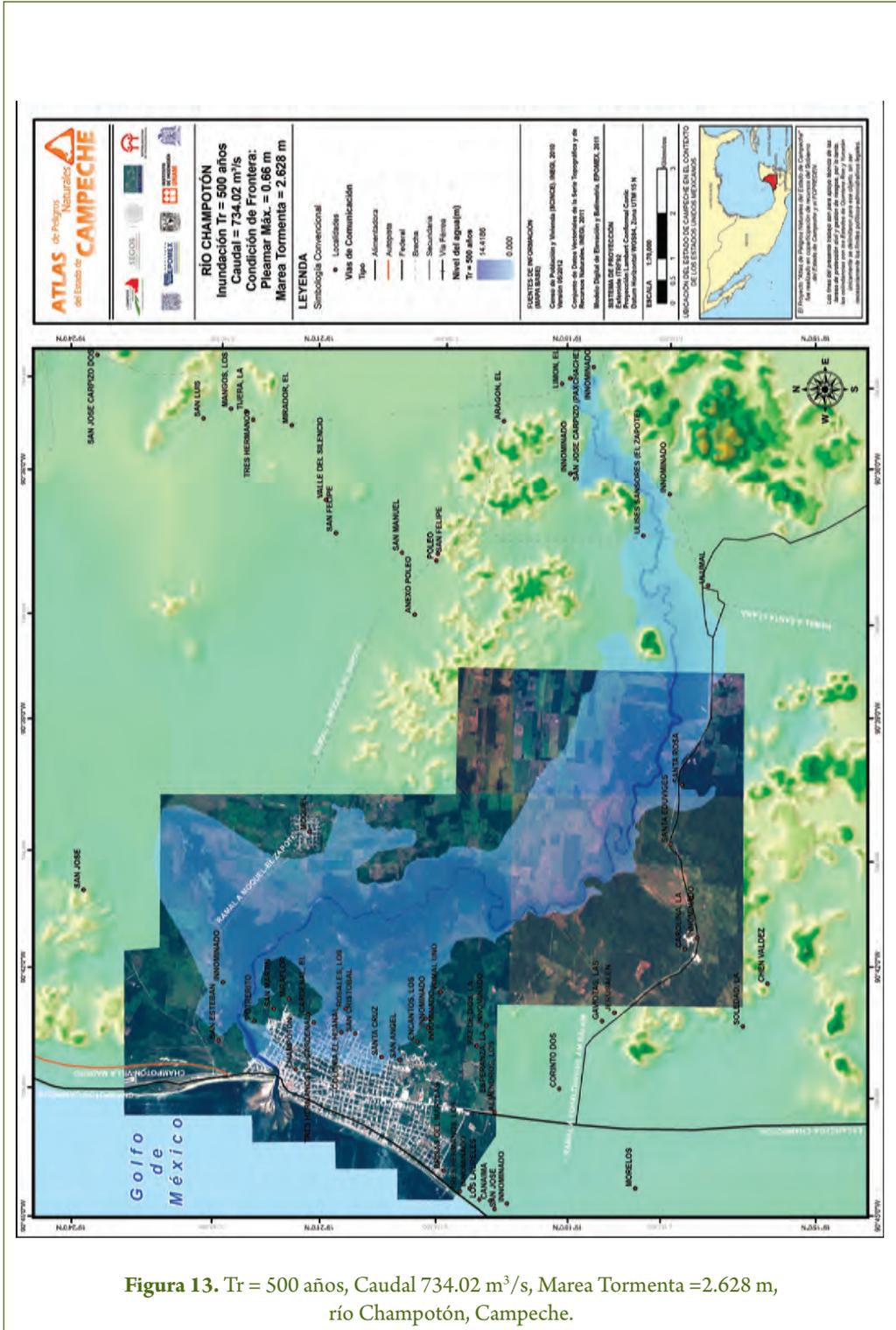


Figura 12. Tr = 100 años, Caudal 580.92 m<sup>3</sup>/s, Marea Tormenta =2.079 m, río Champotón, Campeche.



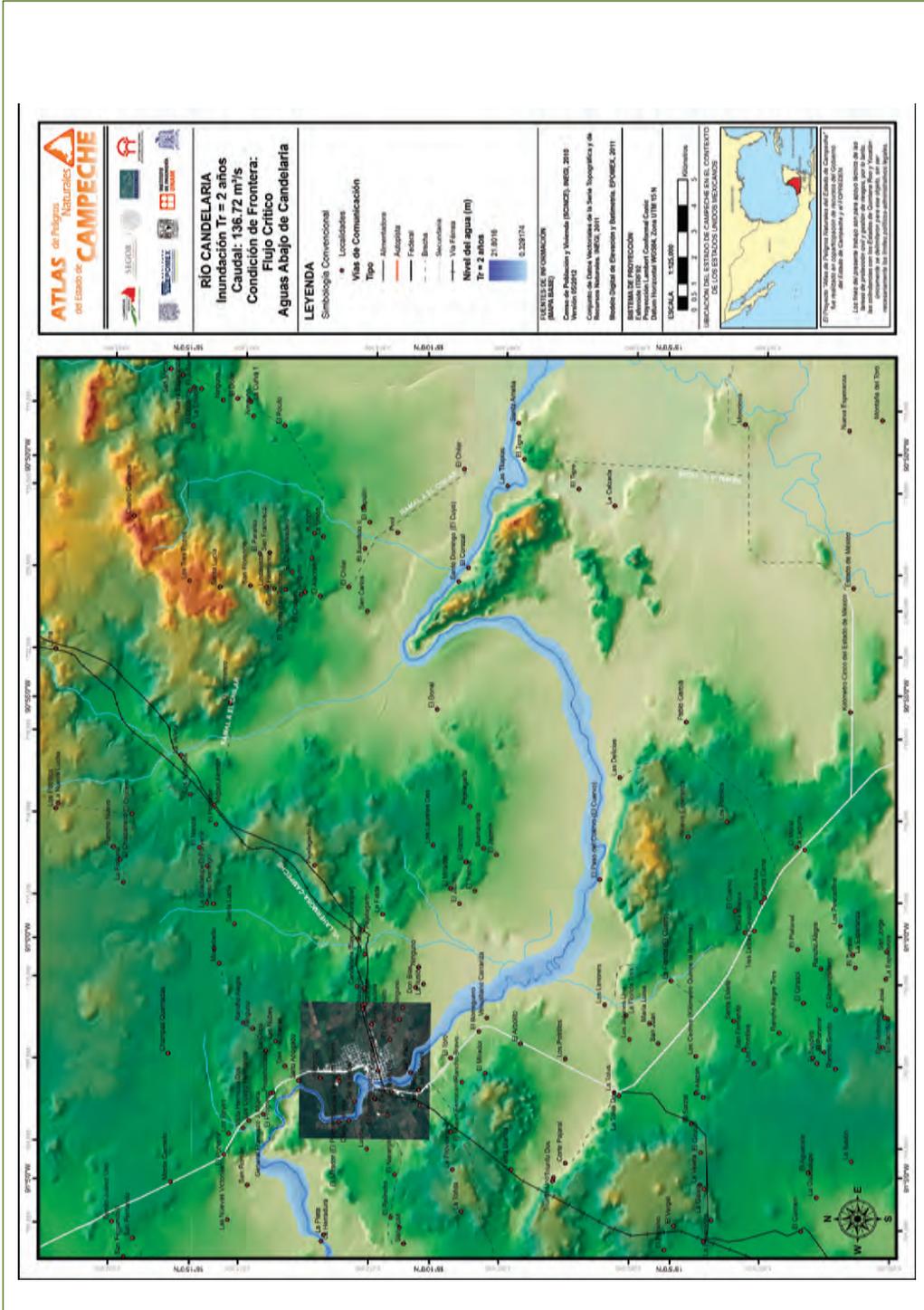


Figura 14. Tr = 2 años, Caudal 136.72 m<sup>3</sup>/s, río Candelaria, Campeche.

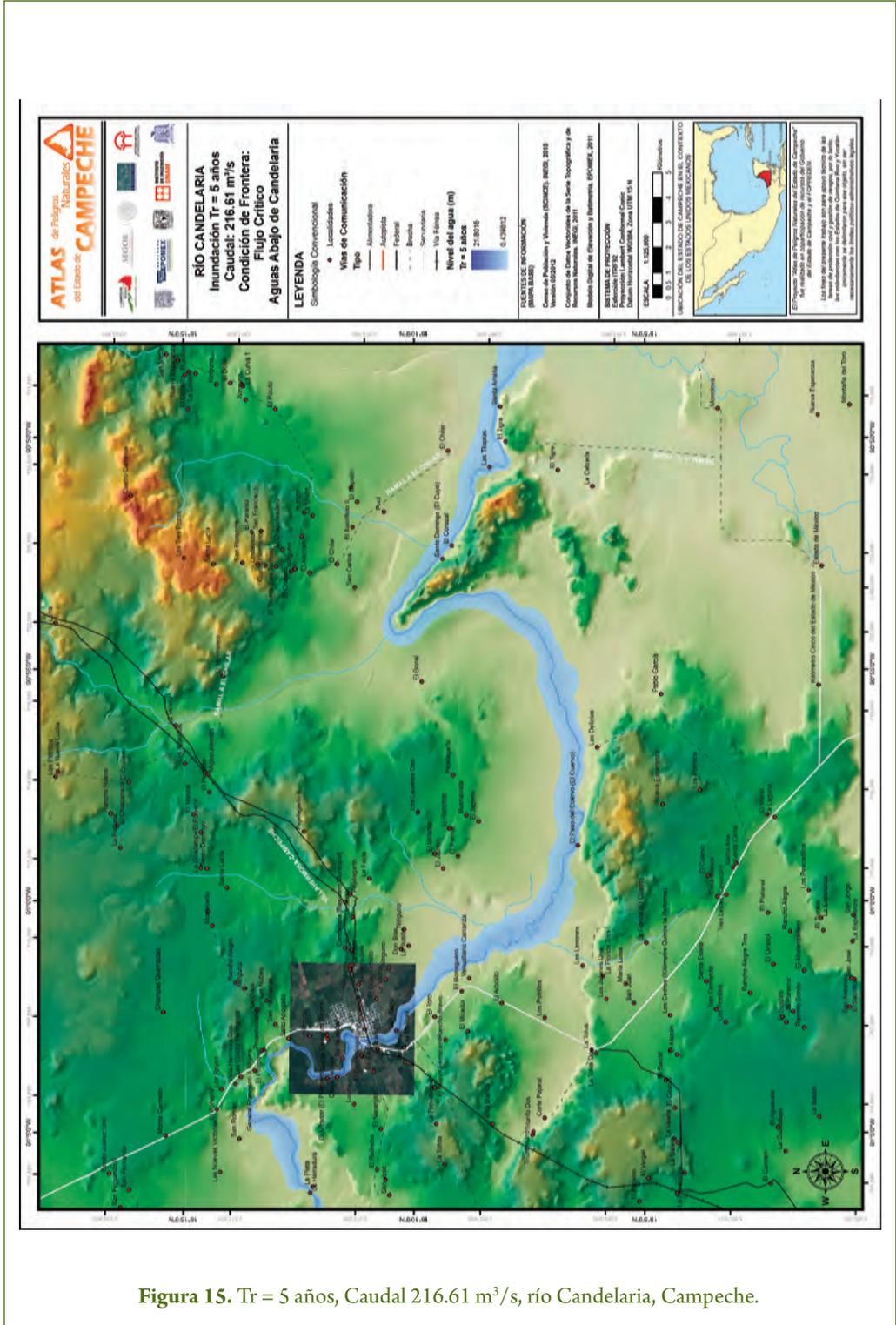


Figura 15. Tr = 5 años, Caudal 216.61 m<sup>3</sup>/s, río Candelaria, Campeche.

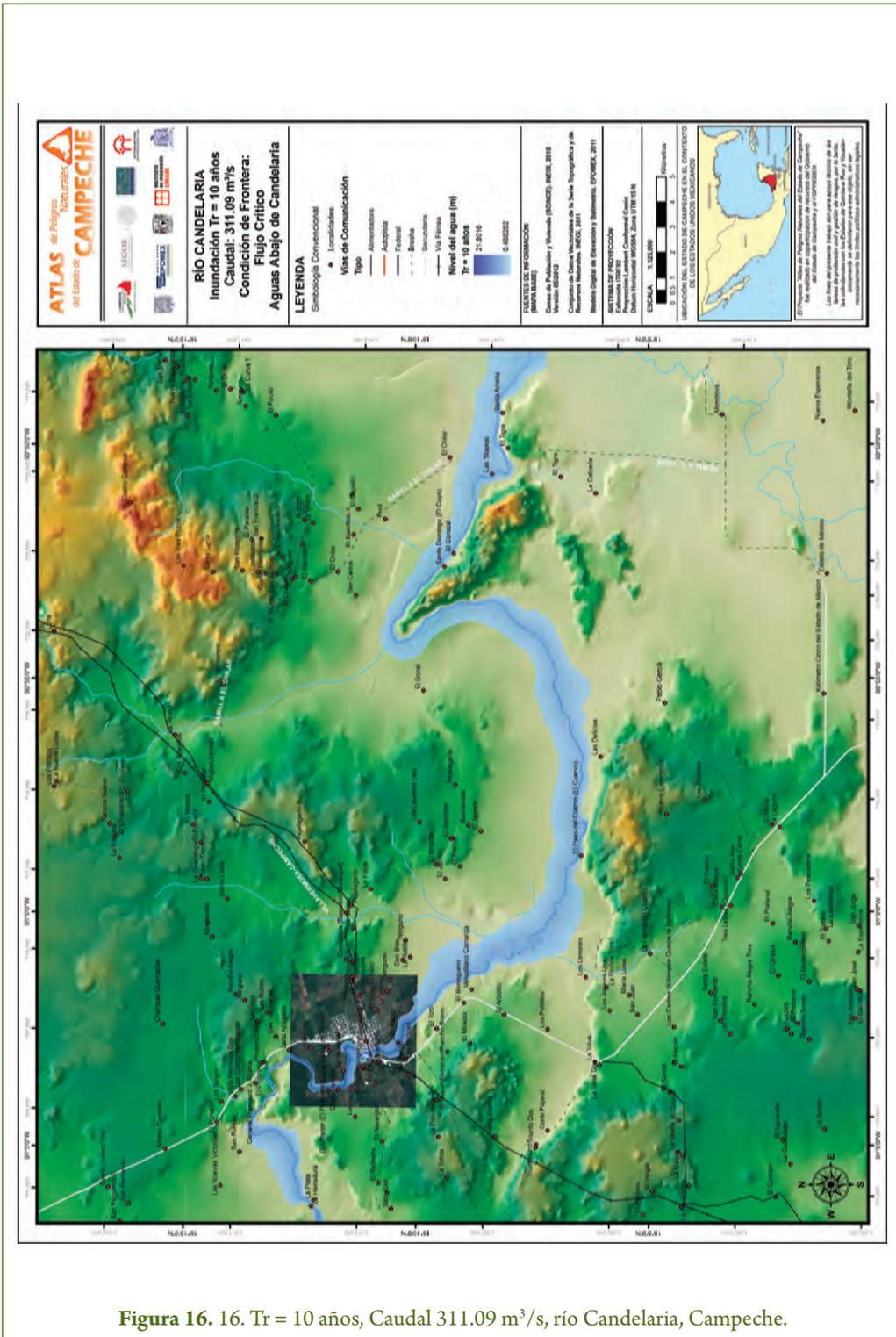
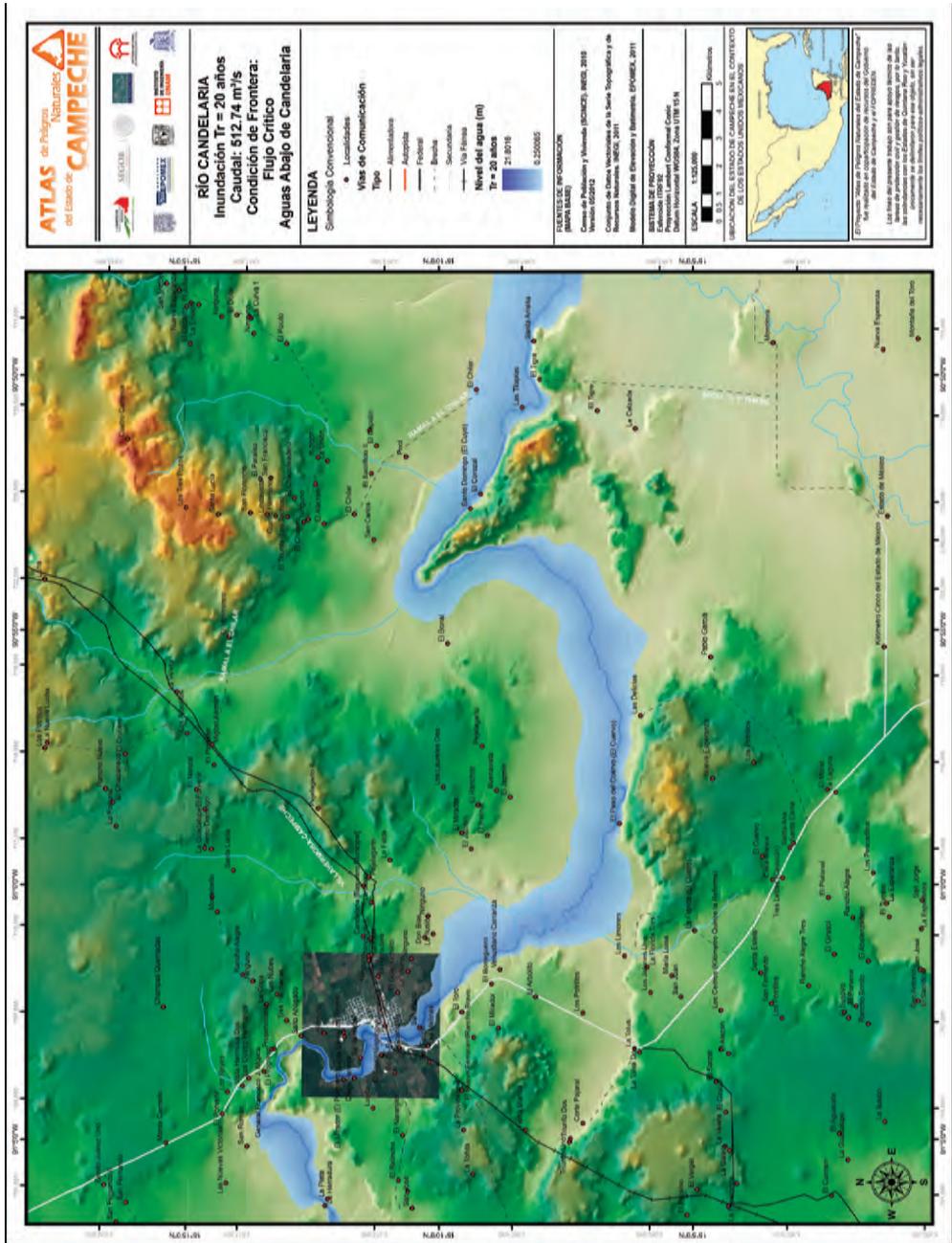


Figura 16. 16. Tr = 10 años, Caudal 311.09 m<sup>3</sup>/s, río Candelaria, Campeche.



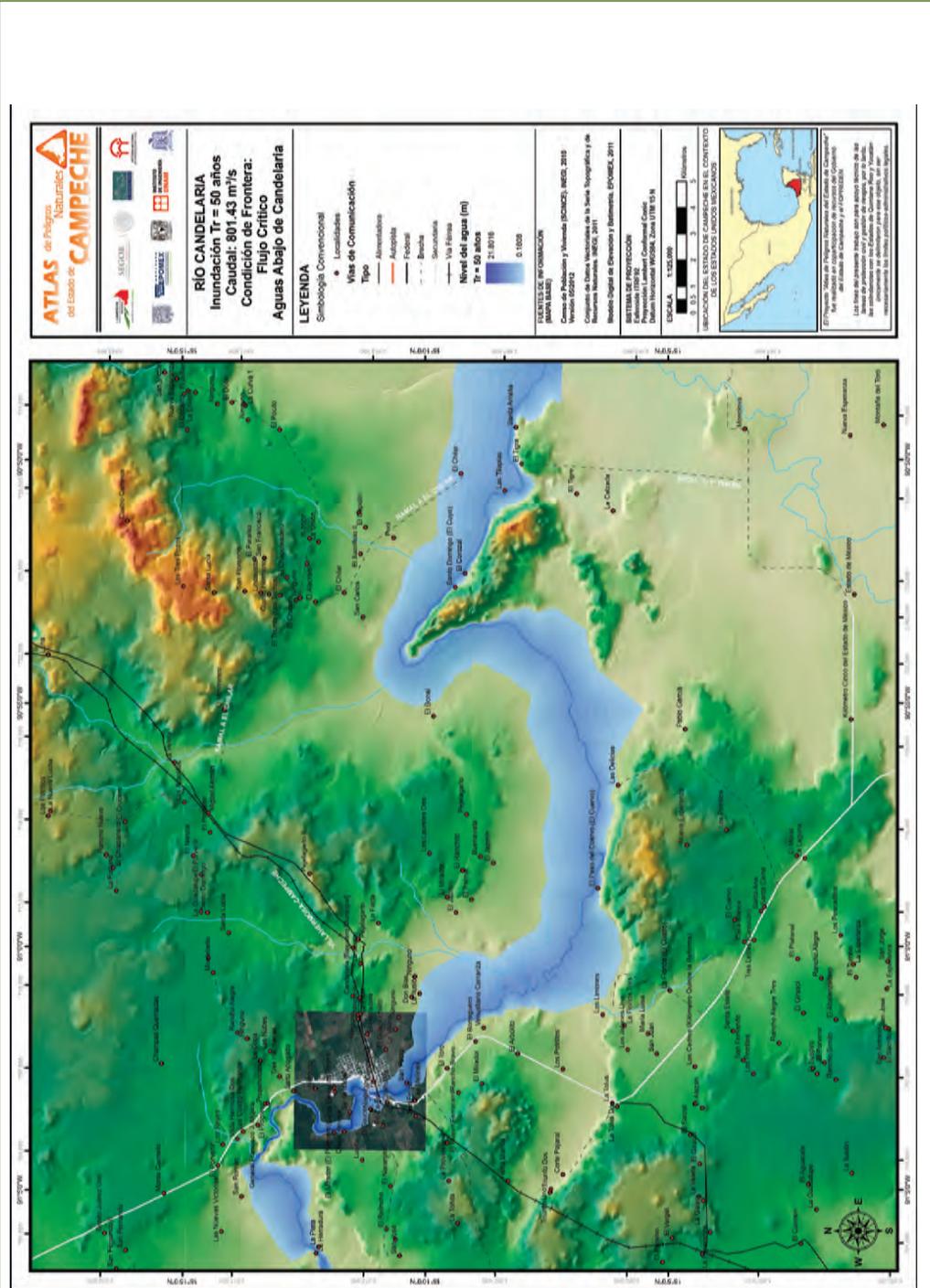


Figura 18. Tr = 50 años, Caudal 801.43 m<sup>3</sup>/s, río Candelaria, Campeche.

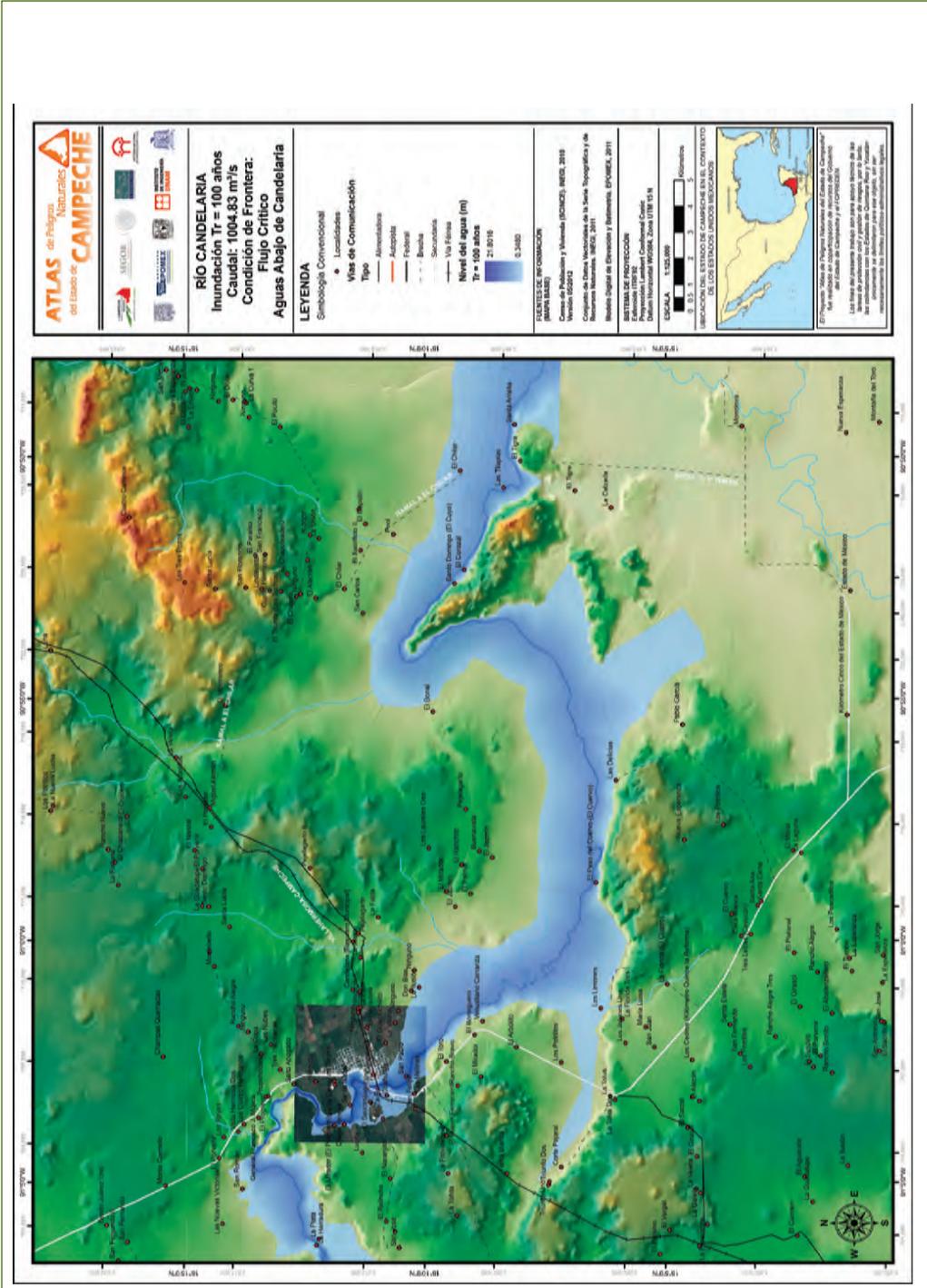


Figura 19. Tr = 100 años, Caudal 1004.83 m<sup>3</sup>/s, río Candelaria, Campeche.

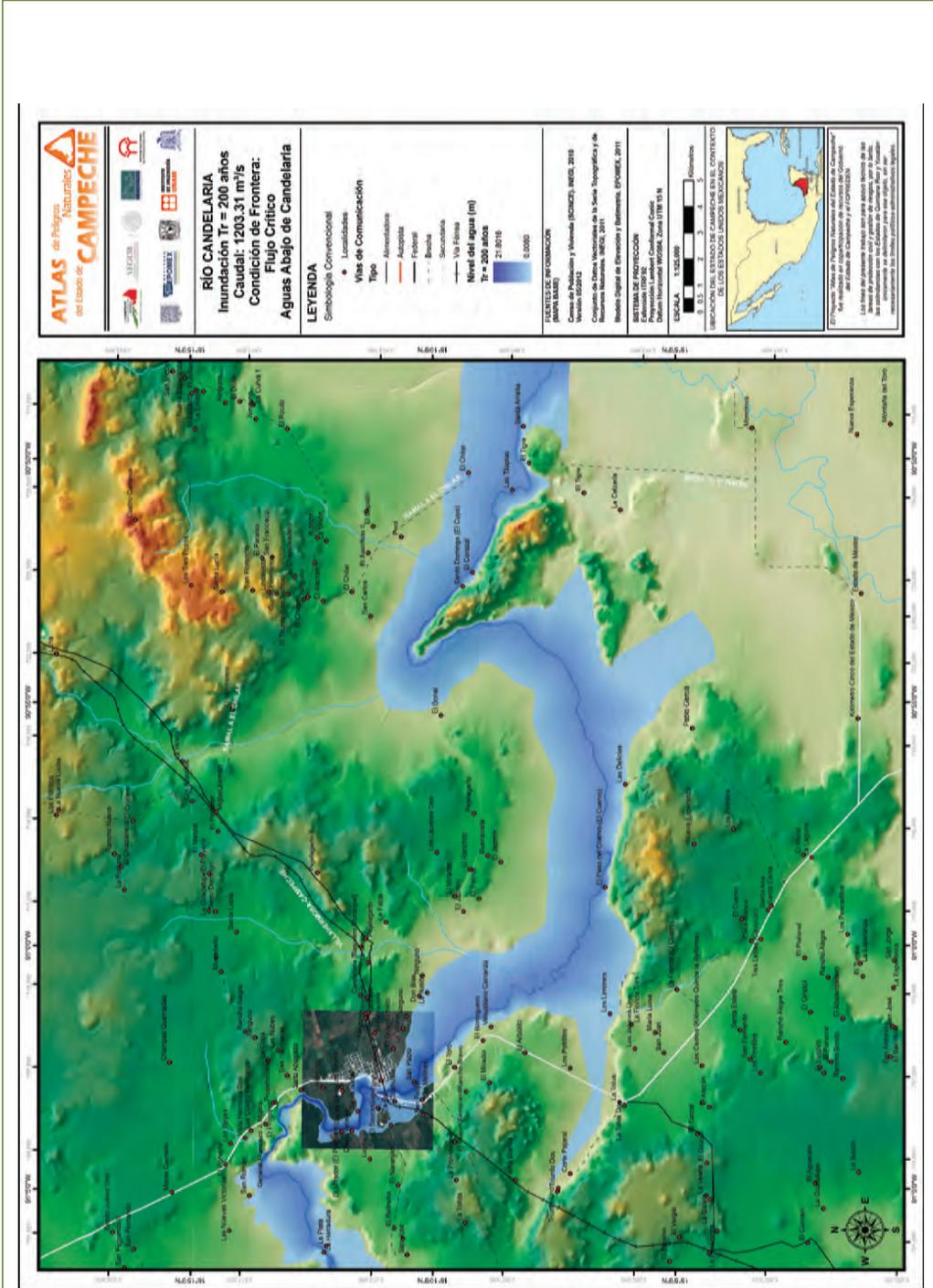


Figura 20. Tr = 200 años, Caudal 1203.31 m<sup>3</sup>/s, río Candelaria, Campeche.

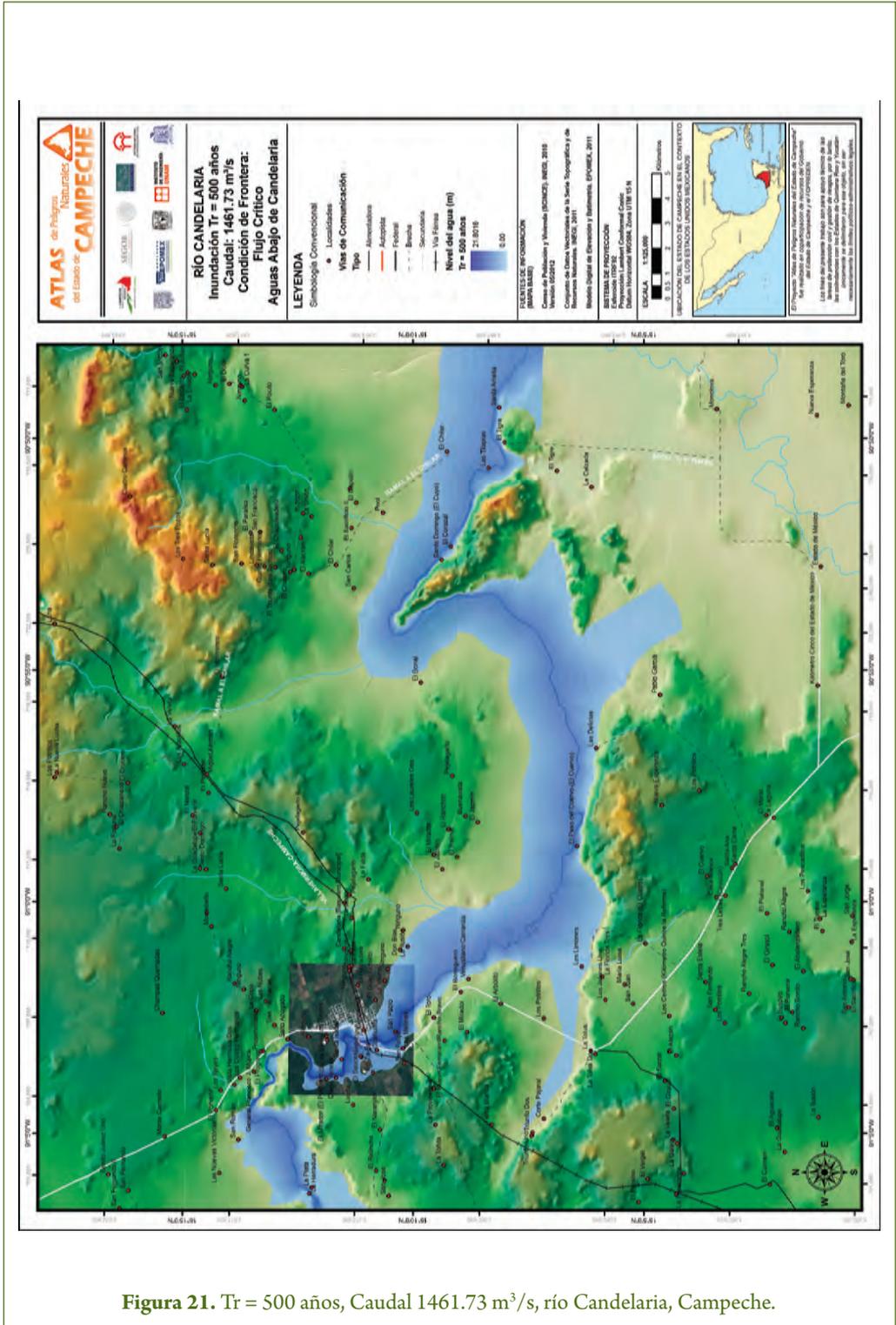


Figura 21. Tr = 500 años, Caudal 1461.73 m<sup>3</sup>/s, río Candelaria, Campeche.

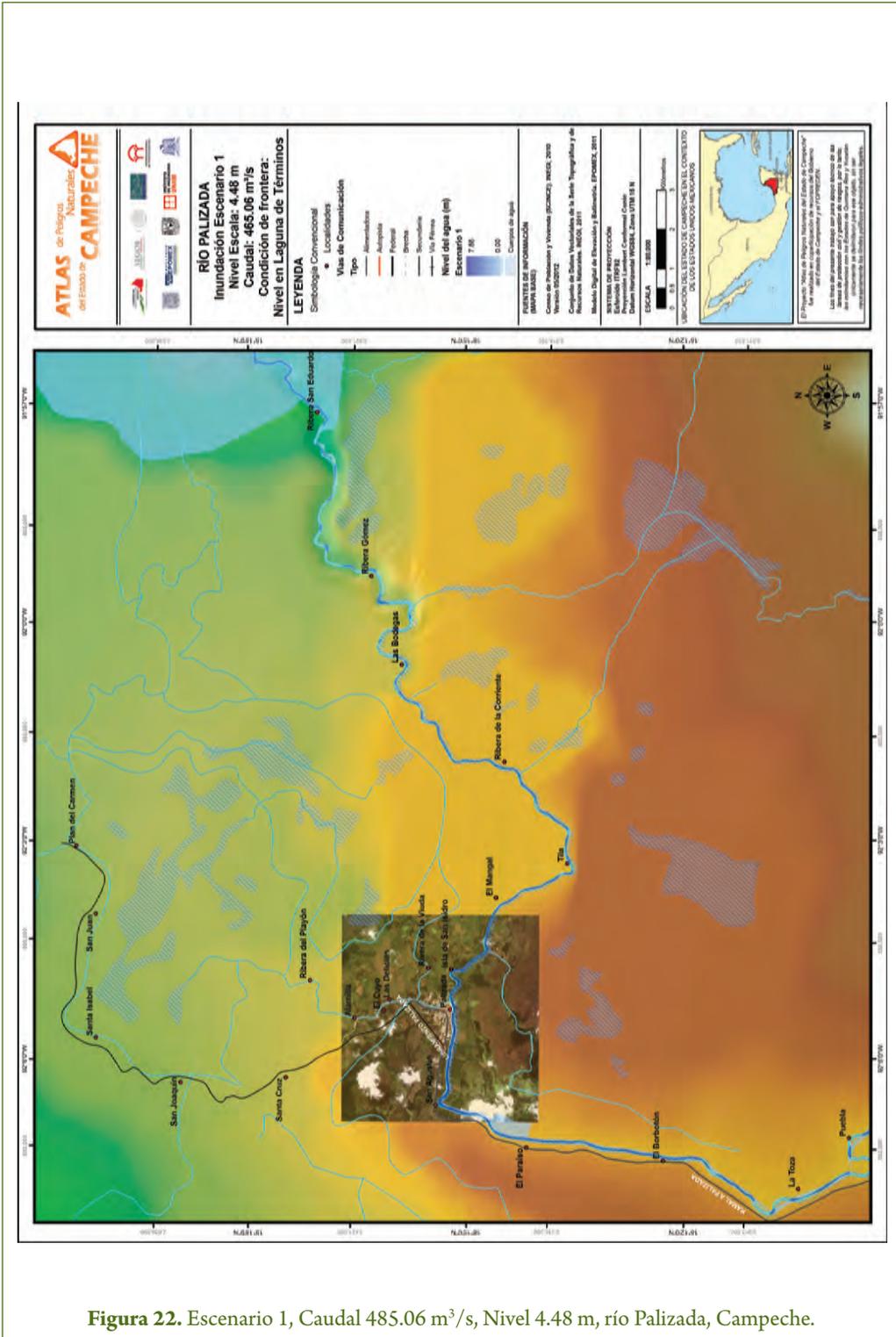
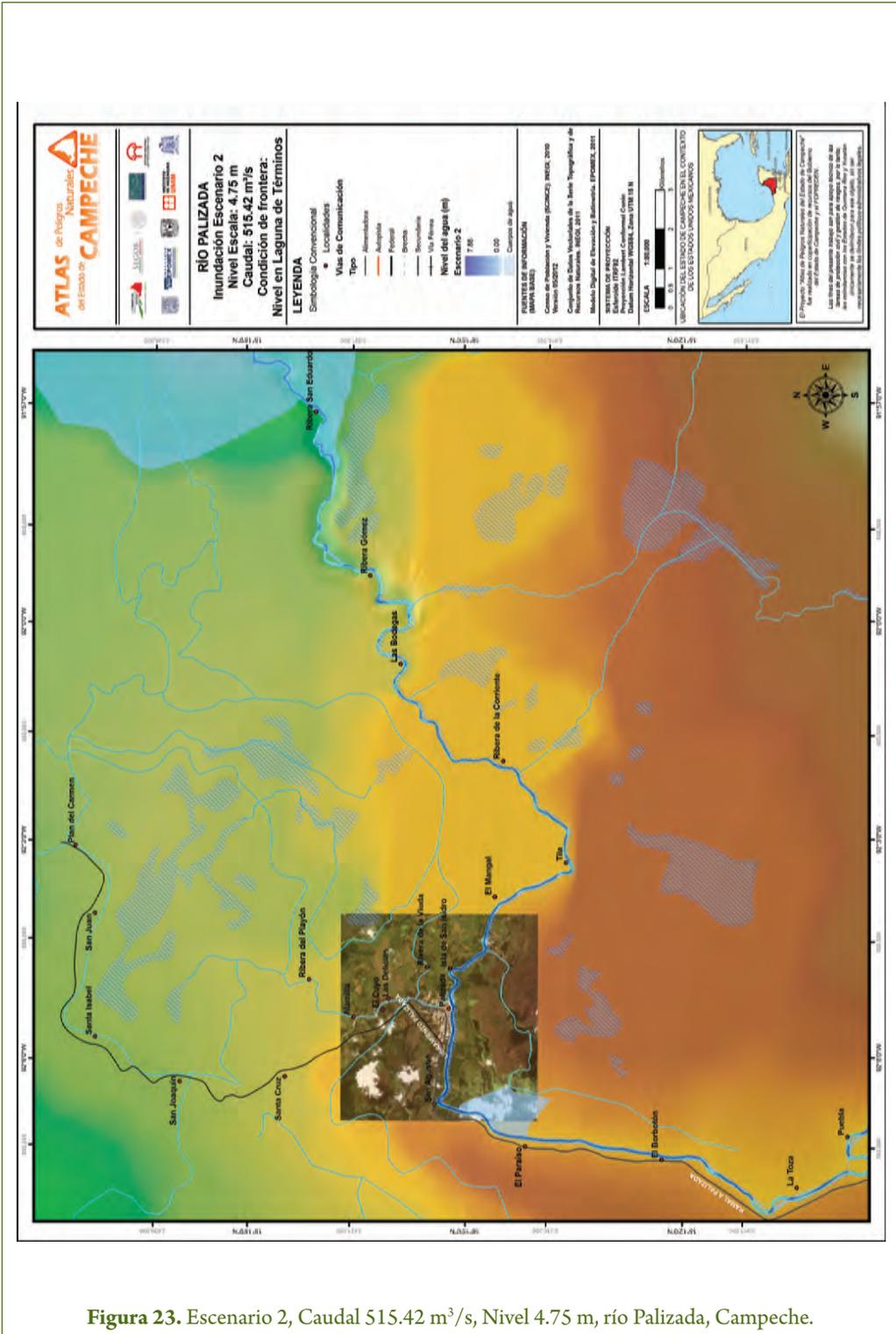


Figura 22. Escenario 1, Caudal 485.06 m<sup>3</sup>/s, Nivel 4.48 m, río Palizada, Campeche.



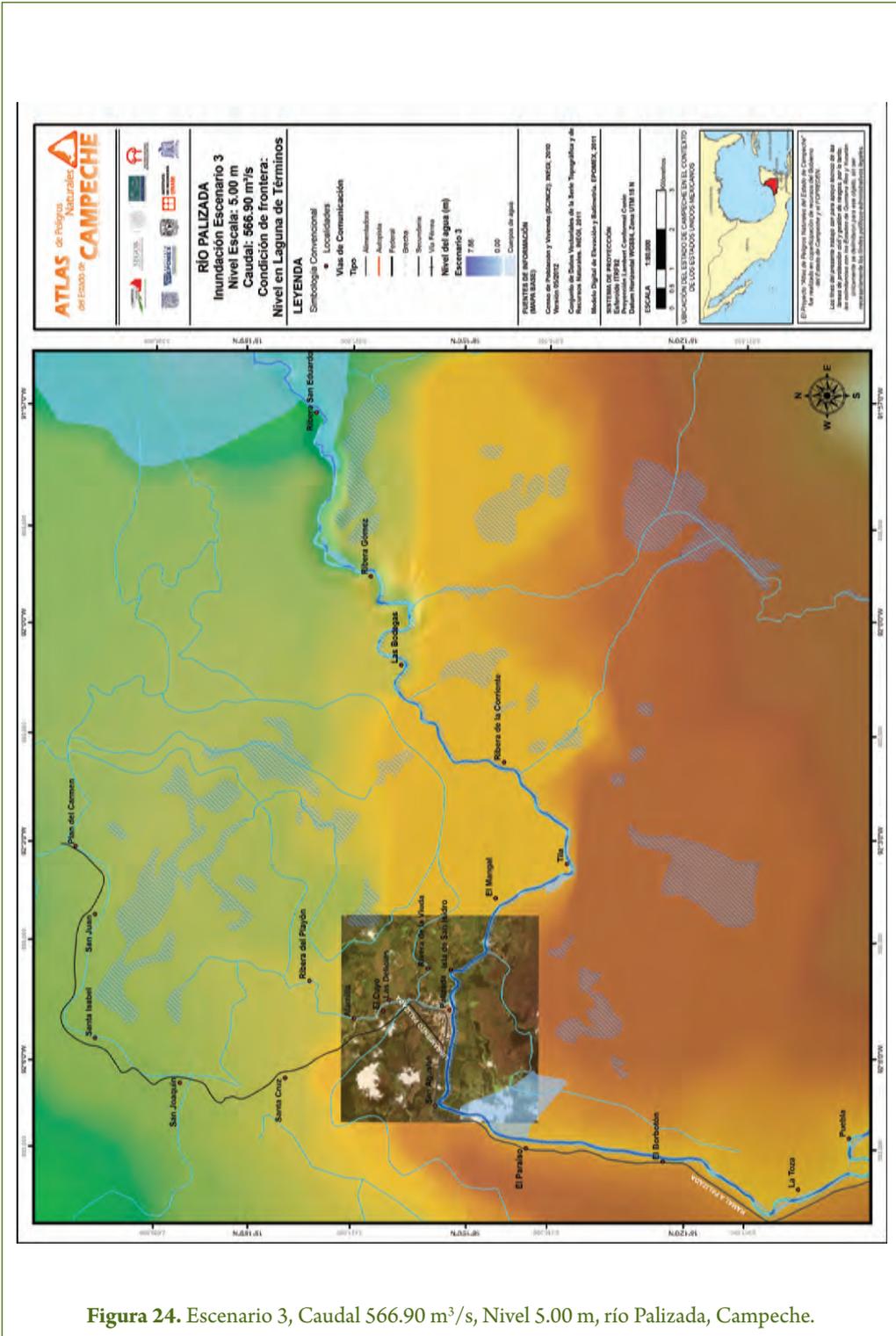


Figura 24. Escenario 3, Caudal 566.90 m<sup>3</sup>/s, Nivel 5.00 m, río Palizada, Campeche.

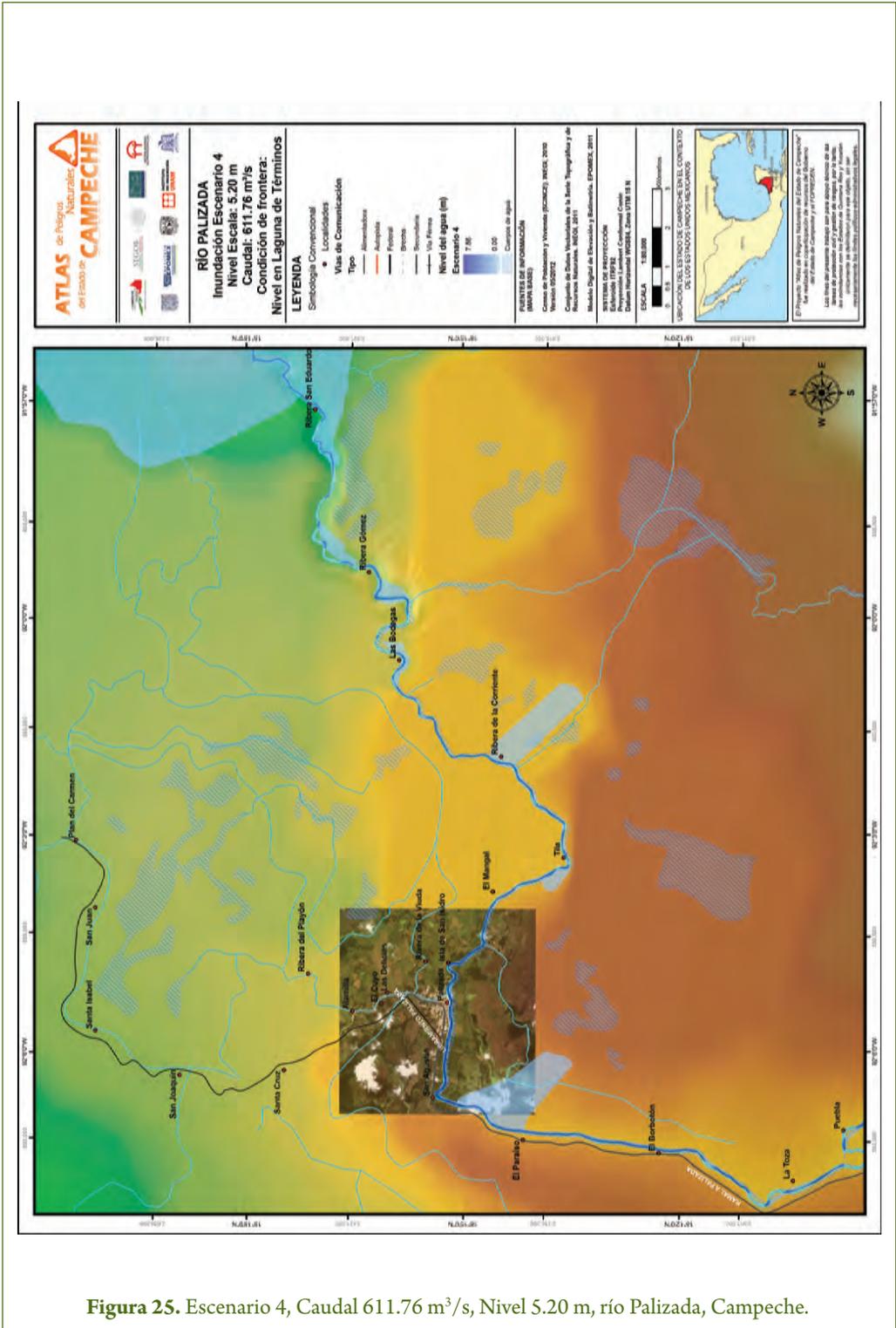


Figura 25. Escenario 4, Caudal 611.76 m<sup>3</sup>/s, Nivel 5.20 m, río Palizada, Campeche.

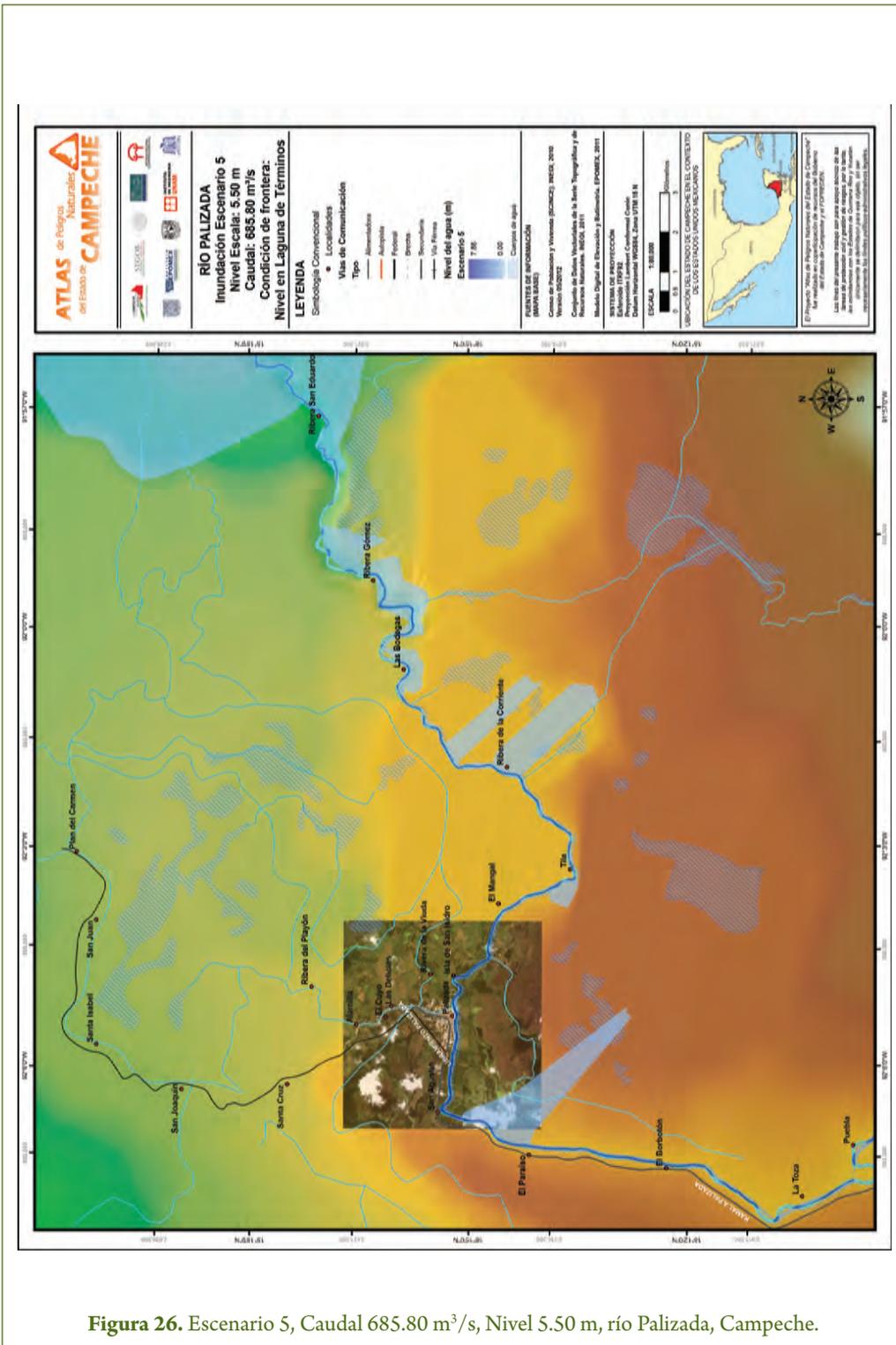
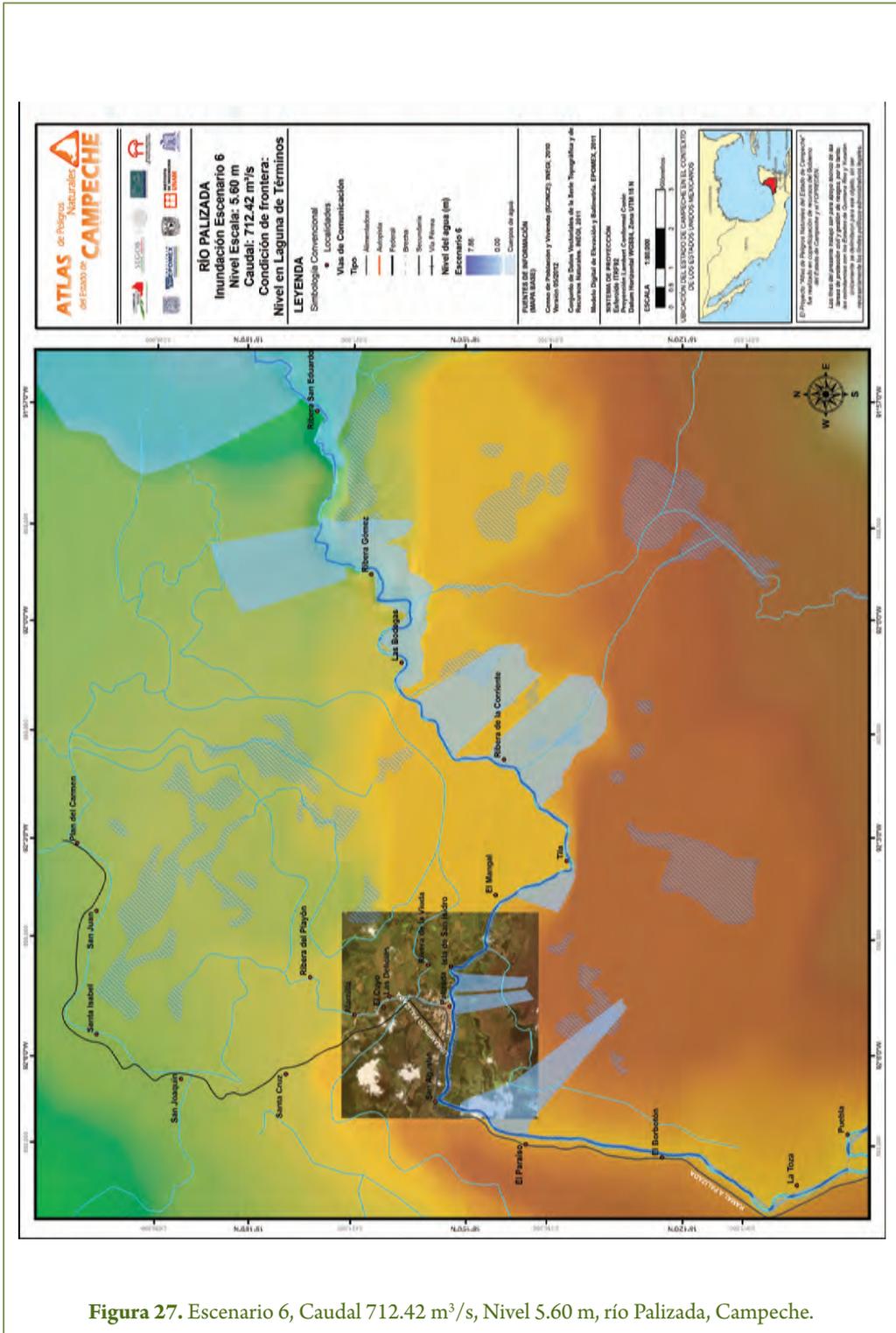


Figura 26. Escenario 5, Caudal 685.80 m<sup>3</sup>/s, Nivel 5.50 m, río Palizada, Campeche.



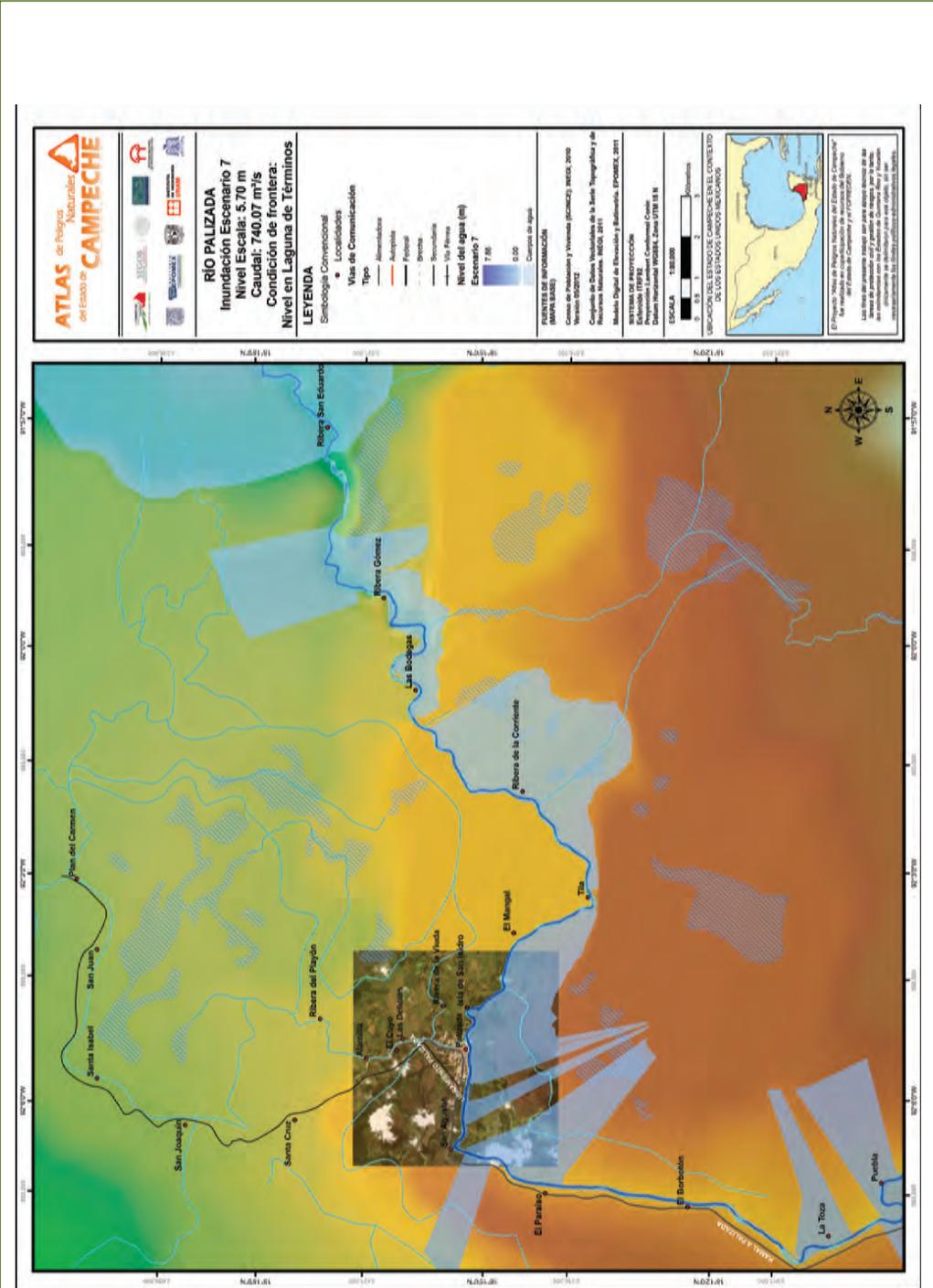


Figura 28. Escenario 7, Caudal 740.07m<sup>3</sup>/s, Nivel 5.70 m, río Palizada, Campeche.

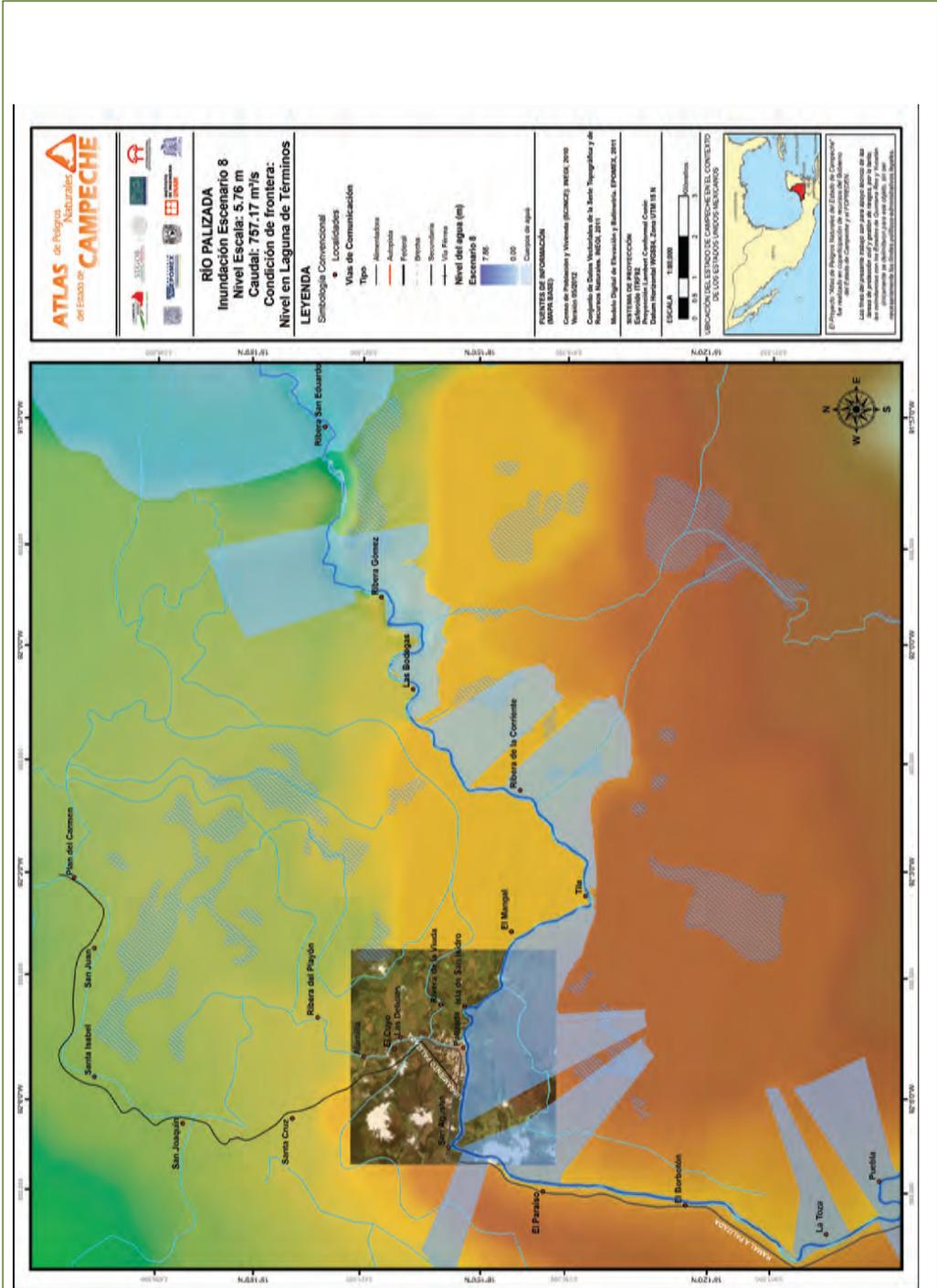
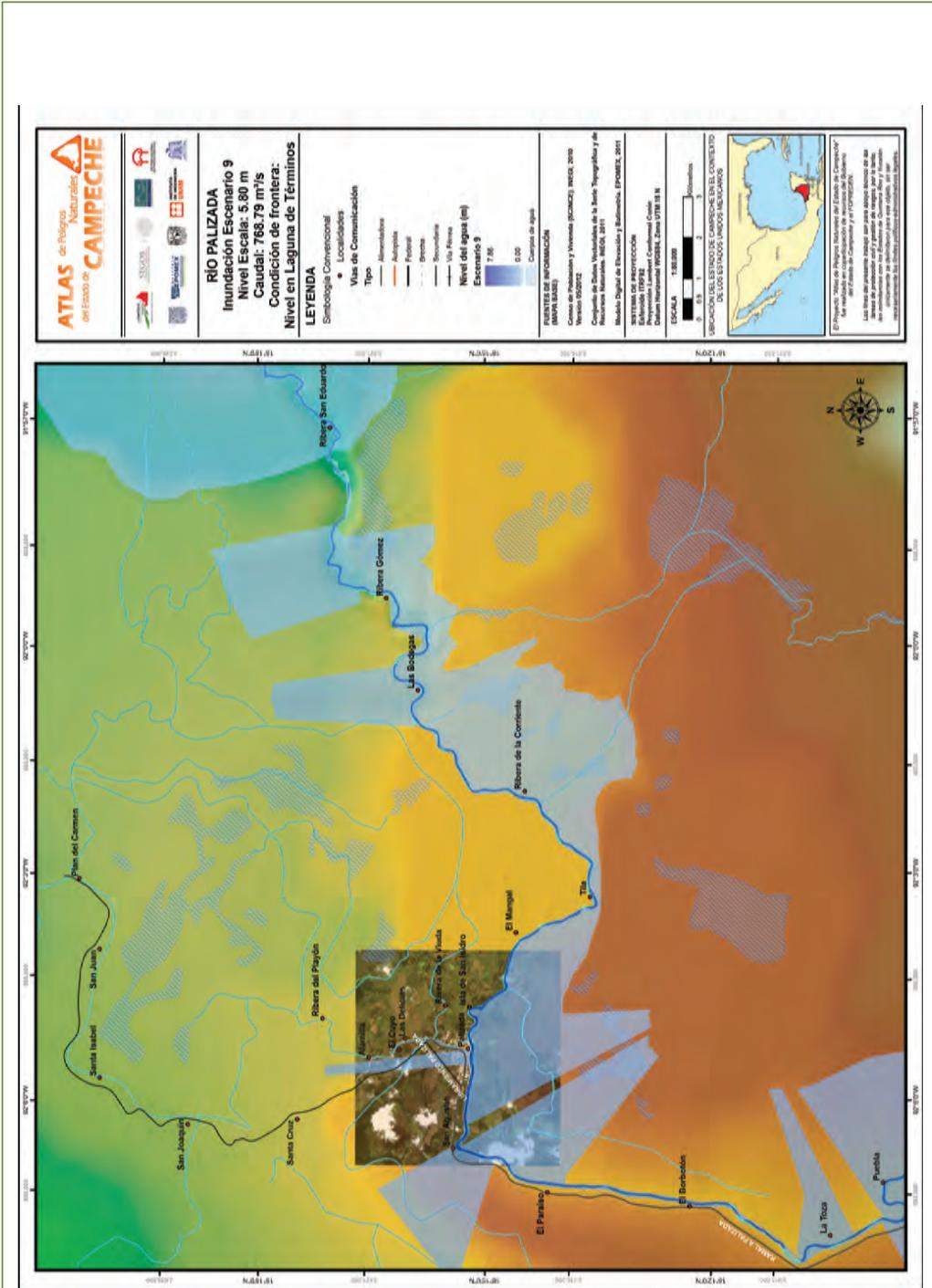


Figura 29. Escenario 8, Caudal 751.17 m<sup>3</sup>/s, Nivel 5.76 m, río Palizada, Campeche.



**Figura 30.** Escenario 9, Caudal 768.79 m<sup>3</sup>/s, Nivel 5.80 m, río Palizada, Campeche.

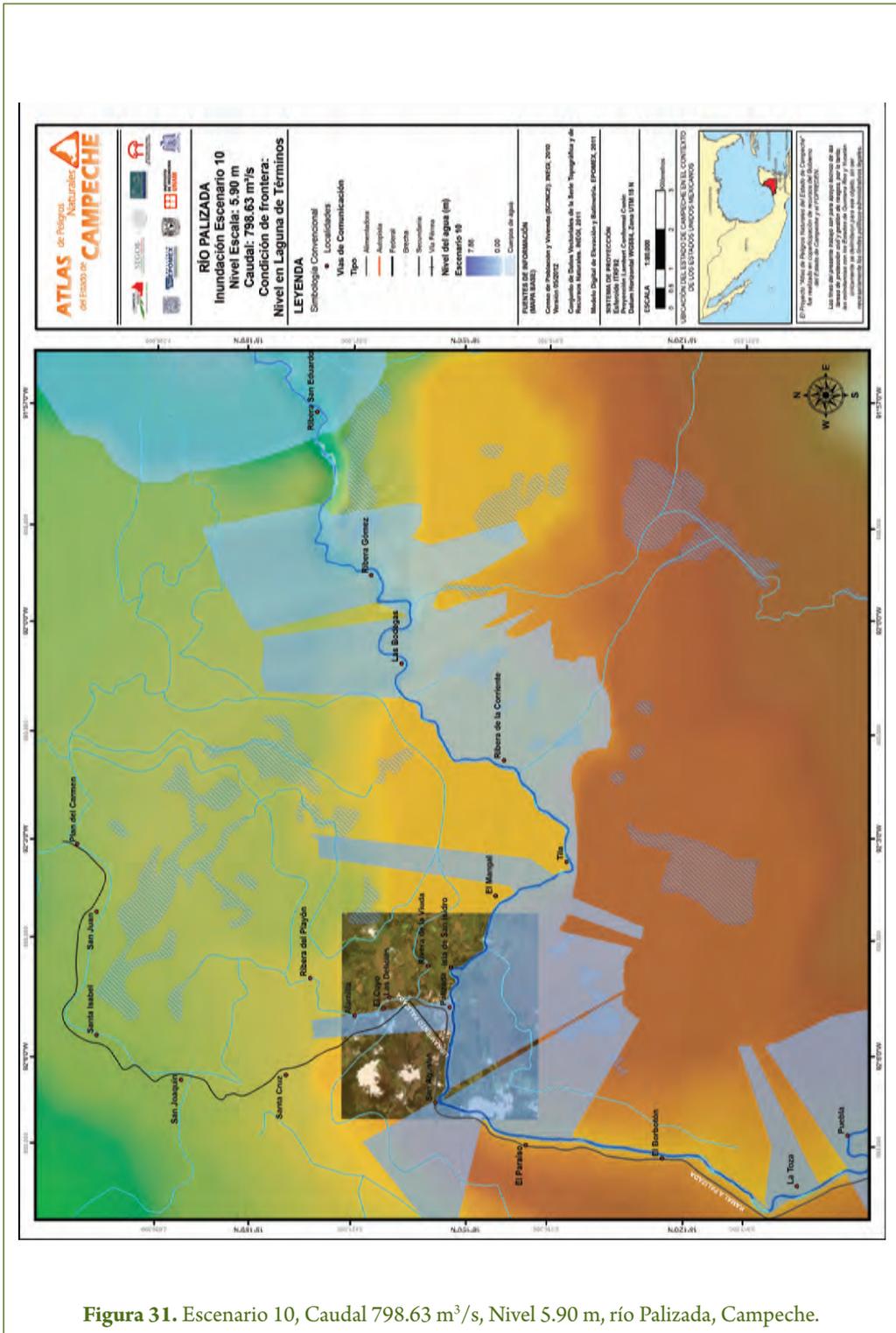


Figura 31. Escenario 10, Caudal 798.63 m<sup>3</sup>/s, Nivel 5.90 m, río Palizada, Campeche.

**Tabla 4.** Zonas de la cuenca inundadas (Escenario marea de combinada).

Escenario 2Tr (años)	Área total inundada (km <sup>2</sup> )	Localidades y rancherías afectadas	Área de cultivos inundadas (km <sup>2</sup> )	Área de vegetación inundadas (km <sup>2</sup> )
2	21	Potrerito, Sal si Puedes, La Bendición de Dios, El Zapote, Canasayab.	3.1144	15.8793
5	30	Potrerito, Los Naranjos, Moquel, Ninguno, Los Rosales, Las Carolinas, Sal si Puedes, La Bendición de Dios, Santa Rosa, Ulumal, El Zapote, Ninguno, Canasayab.	3.8922	19.7002
10	35	Potrerito, Los Naranjos, Moquel, Ninguno, Los Rosales, Las Carolinas, Sal si Puedes, La Bendición de Dios, Santa Rosa, Ulumal, El Zapote, Ninguno, Canasayab.	4.8068	23.0369
20	38	Potrerito, Los Naranjos, Moquel, Ninguno, Los Rosales, Las Carolinas, Sal si Puedes, La Bendición de Dios, Santa Rosa, Ulumal, El Zapote, Flor del Río, Canasayab, Ninguno.	5.4718	24.9596
50	42	Potrerito, Los Naranjos, Moquel, Ninguno, Los Rosales, Las Carolinas, El Platanal, San Pedro, Sal si Puedes, La Bendición de Dios, Santa Rosa, Ulumal, El Zapote, Flor del Río, Canasayab, Ninguno.	6.0340	27.2217
100	45	Potrerito, Los Naranjos, Moquel, Ninguno, Los Rosales, Las Carolinas, El Platanal, San Pedro, Sal si Puedes, La Bendición de Dios, Santa Rosa, Ulumal, El Zapote, Flor del Río, Canasayab, Ninguno.	6.4088	28.1175
500	49	Potrerito, Los Naranjos, Moquel, Ninguno, Los Rosales, Las Carolinas, El Platanal, San Pedro, Sal si Puedes, La Bendición de Dios, Santa Rosa, Ulumal, El Zapote, Flor del Río, Canasayab, Ninguno.	7.1232	30.0457

**Tabla 5.** Zonas de inundación para la ciudad de Champotón (Escenario marea combinada).

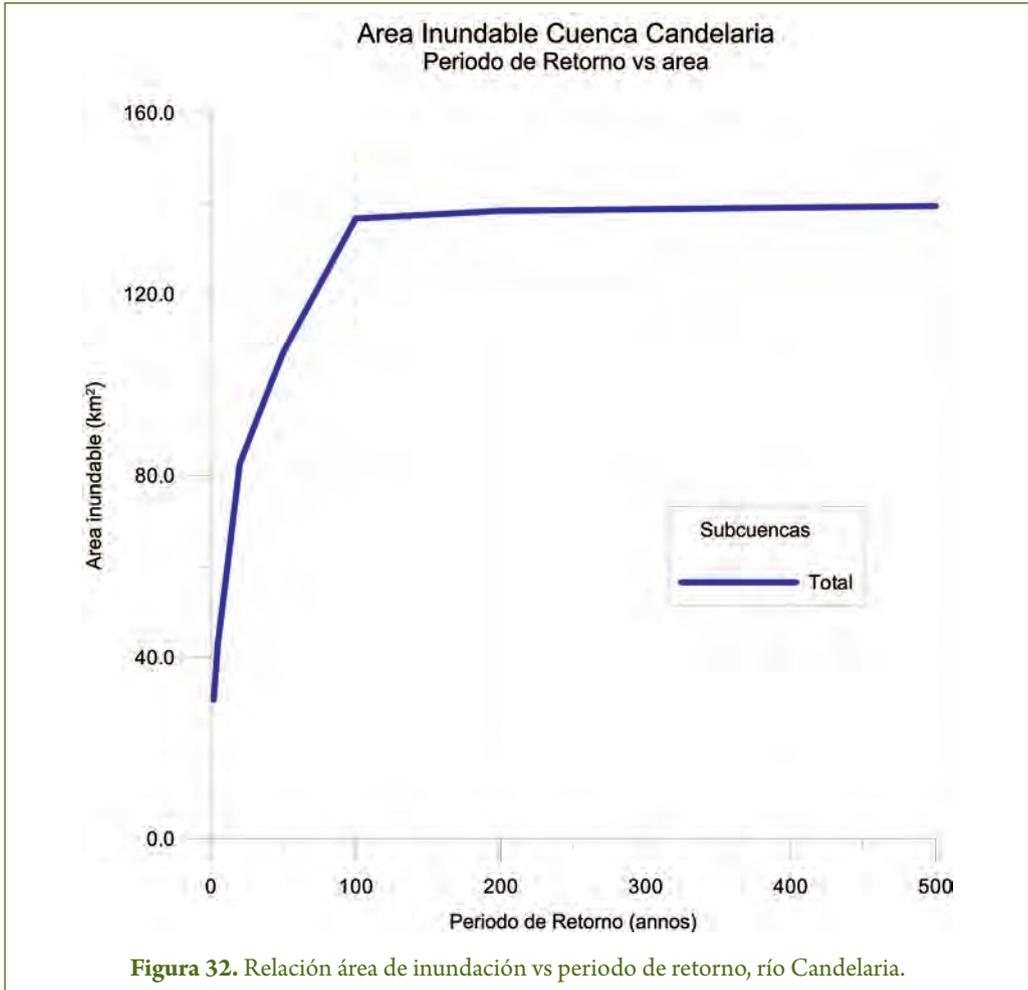
Escenario 2Tr (años)	Área inundada: Cd. de Champotón (km <sup>2</sup> )	Claves AGEBS inundados	Colonias inundadas (totalmente)	Colonias inundadas (parcialmente)	# Habitantes por AGEBS
2	0.0099	----	----	----	----
5	0.7077	400400011010	----		2 415
		400400012269	El Huanal	----	N/D
		400400012146	----	Cristóbal Colón, Cañaveral.	1 716
10	0.9097	400400011010	----	Moch Cohuo, Guadalupe, Las Palomas, Cadenal, Tejonal.	2 415
		400400012269	El Huanal	----	N/D
		400400012146	Cristobal Colón	Cañaveral.	1 716
		40040001215	----	La Cruz.	1 357
20	1.152572	400400011010	----	Moch Cohuo, Guadalupe, Las Palomas, Cadenal, Tejonal.	2 415
		400400012269	El Huanal	----	N/D
		400400012146	Cristobal Colón	Cañaveral.	1 716
		400400012150	----	La Cruz, Nueva Esperanza.	1 357
50	1.4815	400400011010	----	Moch Cohuo, Guadalupe, Las Palomas, Cadenal, Tejonal.	2 415
		400400012269	El Huanal	----	N/D
		400400012146	Cristobal Colón, Cañaveral	----	1 716
		400400012150	----	La Cruz, Nueva Esperanza.	1 357
		400400010012	----	Cocal, Pozo del Monte.	3 039

**Tabla 5 (continuación).** Zonas de inundación para la ciudad de Champotón (Escenario marea combinada).

Escenario 2Tr (años)	Área inundada: Cd. de Champotón (km <sup>2</sup> )	Claves AGEBS inundados	Colonias inundadas (totalmente)	Colonias inundadas (parcialmente)	# Habitantes por AGEBS
100	1.7195	400400011010	Guadalupe	Moch Cohuo, Guadalupe, Las Palomas, Cadenal, Tejonal.	2 415
		400400012269	El Huanal	-----	N/D
		400400012146	Cristobal Colón, Cañaveral	-----	1 716
		400400012150	-----	La Cruz, Nueva Esperanza.	1 357
		400400010012	-----	Cocal, Pozo del Monte, Puente Viejo, Mercedes, La Zanja.	3 039
500	1.9573	400400011010	Guadalupe	Moch Cohuo, Guadalupe, Las Palomas, Cadenal, Tejonal.	2 415
		400400012269	El Huanal	-----	N/D
		400400012146	Cristobal Colón, Cañaveral	-----	1 716
		400400012150	-----	La Cruz, Nueva Esperanza.	1 357
		400400010012	Puente Viejo	Cocal, Pozo del Monte, Puente Viejo, Mercedes, La Zanja.	3 039

que es de esperarse que para caudales asociados a periodos de retorno bajos se inunde fácilmente, por el contrario la parte media y alta del río Palizada presenta bordos que han sido construidos, no de manera integral, sino como medida temporal para que si en el próximo año el río lleva el mismo caudal no

se desborde, el problema radica en que si el río trae un caudal mayor el bordo construido servirá muy poco, es por esto que las área de inundación no son continuas, ya que la altura de los bordos, tal como se comprobó en las campañas de campo, varía de una sección a otra.



Se observa en la figura 21 que el río Palizada comienza a desbordarse ( $1.65 \text{ km}^2$ ) en la parte media-alta para un nivel de  $4.48 \text{ m.s.n.m}$  correspondiente un caudal de  $465 \text{ m}^3/\text{s}$ , para este mismo nivel, en la cuenca baja del río ya se encuentran inundados cerca de  $66 \text{ km}^2$ , a medida que aumenta el caudal las áreas de inundación en ambas subcuencas también aumentan pero no en el mismo porcentaje, por ejemplo para el

nivel de  $5.50 \text{ m.s.n.m}$  el área inundable en la parte alta es de  $16.00 \text{ km}^2$ , 10 veces más que para el nivel de  $4.48$ , mientras que el área inundable en la parte baja es de  $75.50 \text{ km}^2$ , un 16 % más. Para el máximo nivel registrado en el río Palizada ( $5.90 \text{ m.s.n.m}$ , figura 30) el área de inundación total es de  $195. \text{km}^2$ , de los cuales en la cuenca alta se encuentran  $109.93 \text{ km}^2$  y en la cuenca baja  $85.98 \text{ km}^2$ .

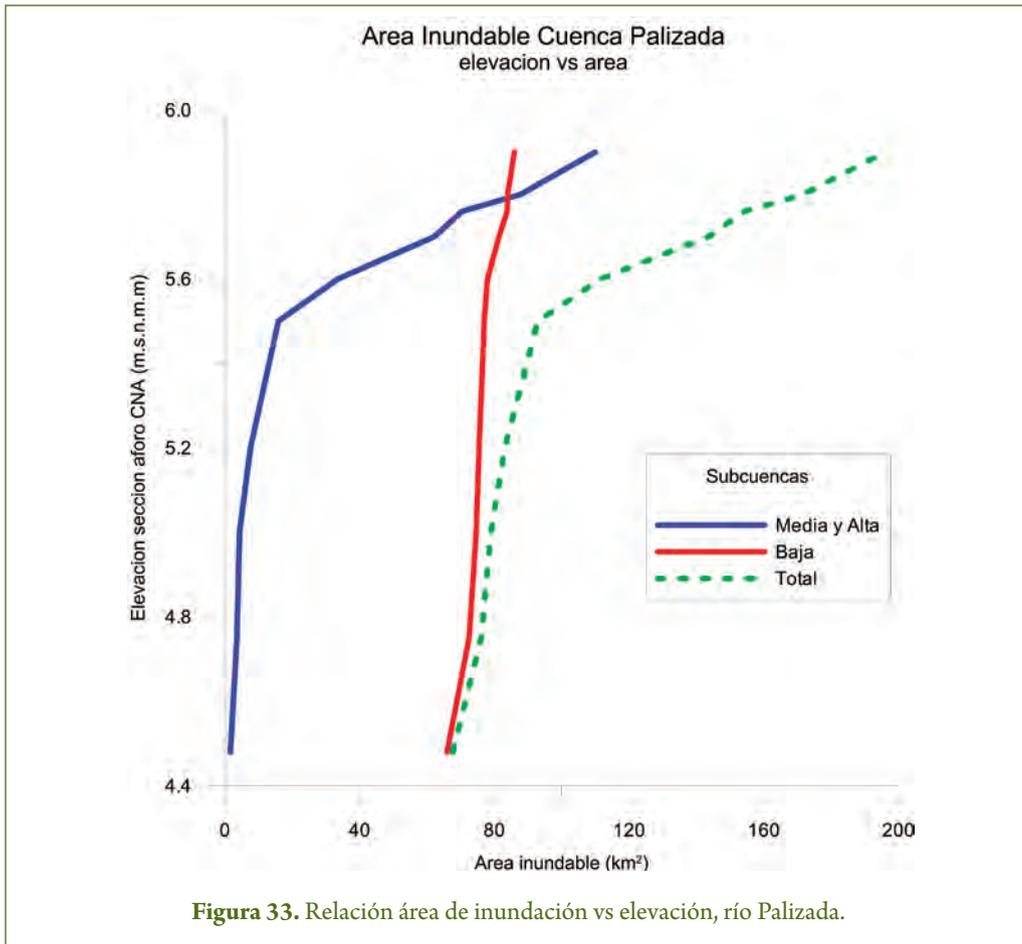


Figura 33. Relación área de inundación vs elevación, río Palizada.

## CONCLUSIONES

Por medio de la metodología desarrollada por los autores fue posible cuantificar el peligro por desbordamiento de ríos en el estado de Campeche para las cuencas de los ríos Champotón, Candelaria y Palizada, además de identificar el área de inundación asociada a diferentes periodos de retorno se calculó la profundidad del agua con una resolución de 20.0 m, este dato es fundamental para determinar el nivel de daños asociados a las inundaciones.

Es importante mencionar que el desbordamiento de los ríos del estado de Campeche se caracteriza por ser lento, es decir no se espera que el nivel del agua se incremente dramáticamente en pocas horas, esto es importante ya que permite la evacuación con lo cual se espera que solo ocurran pérdidas materiales.

El río Champotón está altamente condicionado por la marea de tormenta en su desembocadura, además se caracteriza por

que el desbordamiento de sus aguas ocurre primero en la parte este de la ciudad de Champotón no sobre la desembocadura. Es de suma importancia considerar las áreas de inundación generadas, tanto por las entidades municipales como todas aquellas que participan en la actualización del plan de ordenamiento territorial, pues el crecimiento acelerado de la población exige la construcción de nueva infraestructura de vivienda y servicios, este desarrollo de infraestructura deberá estar orientado hacia zonas ubicadas al sur del municipio. Por otro lado, se recomienda de igual manera, que en los planes de desarrollo urbano se considere la revisión del sistema de drenaje actual de la ciudad así como la construcción de obras de drenaje en aquellas colonias nuevas que no lo tienen; lo anterior debido a que cuando se presenta un desbordamiento del río existen colonias que por no tener la infraestructura de drenaje necesaria los efectos de la inundación se tornan en un desastre que implica elevadas pérdidas económicas.

Los desbordamientos del río Candelaria están asociados principalmente a lluvias por ciclones tropicales, el río se desborda en la cabecera municipal principalmente después del puente vehicular que comunica al municipio con las localidades de estado de México y El Tigre, igualmente la localidad del Huinal,

ubicada en frente de El Tigre, tiene una alta probabilidad de inundación para periodos de retorno mayores a 15 años.

El río Palizada, además de ser el más complejo desde el punto de vista hidráulico, presenta las mayores áreas inundables, de acuerdo a los escenarios modelados, a partir de una cota de 5.20 en la escala de la CONAGUA el río comienza a desbordarse, la cabecera municipal se inunda a partir de 5.80 m.s.n.m.m; para disminuir las áreas inundables en el municipio de Palizada es fundamental mantener el sistema de bordos perimetrales en buen estado y evitar cualquier tipo de obra de desvío en el inicio en la boca Amatitán sobre el río Usumacinta hacia Palizada, ya que el caudal que transita por el río Palizada está determinado por el nivel del río Usumacinta. Con respecto a las posibles acciones de dragado su impacto en la disminución del área de inundación es mínimo ya que debido a la alta carga de sedimentos que transporta el río Palizada rápidamente las zonas dragadas vuelven a sedimentarse.

Es altamente recomendable contar con un sistema de alerta temprana para los ríos Palizada, Candelaria y Champotón alimentado por datos de precipitación, viento y marea de tormenta, tomados en tiempo real, con este sistema serán más eficaces las acciones de protección civil.

## LITERATURA CITADA

**Eslava Morales, H., et al., 2006.** Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos: fenómenos hidrometeorológicos. México. CENAPRED.

**Guevara Ortiz, E., R. Quas Weppen, y G Fernández Villagómez, 2006.** Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. Conceptos básicos sobre peligros, riesgos y su representación geográfica. México. CENAPRED.



- Kuc Castilla, A. G., 2013.** Cuantificación del peligro de inundación por desbordamiento del Río Palizada, Campeche. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería; Universidad Autónoma de Campeche.
- Martínez Reyes, A. A., 2011.** Estudio hidrológico e hidráulico de la cuenca del Río Champotón: mapas de peligro y Sistemas de Información Geográfica. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Campeche
- Posada, G., B.E. Vega, G. Ruíz, R. Zetina, J. Nava, G. Villalobos, A. Martínez, A. J. Pellido, R. Cel, R. Domínguez, R. Silva, G. D. Rivillas, S. Maldonado, G. Durán, y A.G. Palacio, 2010.** Cuarto informe técnico de divulgación restringida: atlas de peligros naturales para el estado de Campeche: Peligros Hidrometeorológicos. Campeche.
- Ruiz, G., B.E. Vega, G. Posada, R. Silva, J.C. Nava, 2010.** Implementación de red mareográfica en el litoral del Estado de Campeche. *Jaina, Boletín Informativo*, 21(1).
- Salas, M. A. y M. Jiménez, 2004.** Mitigación De Daños por Inundaciones. 2004, Serie Fascículos, p. 27-37.
- Salas Salinas, M. A., 2011.** Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas. Serie: atlas nacional de riesgos, Fenómenos hidrometeorológicos. México. CENAPRED.
- Soldano, Á., 2009.** Conceptos sobre riesgo. Falda del Carmen, Provincia de Córdoba, Argentina. CONAE y OEA/DSS (Comisión Nacional de Actividades Espaciales y Departamento de Desarrollo Sostenible de la Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos). 2009. Foro Virtual de la RIMD Creado para la Capacitación en Teledetección Aplicada a la Reducción de Riesgo por Inundaciones. pág. 5.
- UNISDR, 2005.** HYOGO Framework for action 2005-2015: Building the resilience of nations and communities to disasters. Kobe, Japan : ISDR, 2005
- van Westen, C. J., 2010.** Geomorphological Hazards and Disaster Prevention. Cambridge : Cambridge University Press.
- Zevenbergen, C., et al., 2011.** Urban Flood Management. London, UK. CRC.

---

## Marea de Tormenta

*Gregorio Posada Vanegas, Rodolfo Silva Casarín, Edgar Mendoza Baldwin,  
Beatriz Edith Vega Serratos, Gabriel Ruiz Martínez y Claudia Pisté Pérez*

---

### RESUMEN

En las zonas litorales de México que presentan grandes zonas planas, como son las correspondientes a los estados de Quintana Roo, Yucatán, Campeche, Tabasco y Tamaulipas uno de los peligros naturales que debe caracterizarse con mayor precisión es el asociado a la marea de tormenta, ya que con un aumento de pocos decímetros pueden inundarse grandes extensiones de terreno, además al combinarse con marea alta y una gran precipitación el área inundable debido al desbordamiento de los ríos o arroyos se magnificará. Las tres principales ciudades del estado de Campeche, al encontrarse sobre la costa están sujetas a la afectación por este fenómeno natural, por lo que dentro del proyecto *Atlas de Peligros Naturales del Estado de Campeche* este peligro fue cuantificado con gran detalle. Se obtuvieron mapas de inundación para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años, tanto a nivel estatal como para la capital del Estado, igualmente, se cuantificó la marea de tormenta para toda la línea de costa del Estado con un resolución de 3 000 m, con lo cual, se pueden inferir

#### Objetivos

- Calcular los niveles de marea de tormenta asociada a huracanes para el Estado de Campeche para diferentes periodos de retorno.
- Describir la metodología implementada para calcular los niveles de marea de tormenta del Estado de Campeche.
- Describir el funcionamiento del sistema web de consulta de niveles de marea de tormenta.



los niveles de inundación para el diseño y desplante de obras civiles cada 3 km, esta información es útil para Protección Civil, Obras Públicas e iniciativa privada. La marea de tormenta se obtuvo a partir de la unión de los modelos numéricos Hurac y HD23, los resultados están, al igual que para los otros peligros naturales abordados en este proyecto, incluidos dentro de un sistema de información geográfica, para las funciones de marea de tormenta se elaboró un sistema web de consultad de datos para el CENECAM.

## INTRODUCCIÓN

Además si la marea de tormenta coincide con la pleamar de la marea astronómica, con una alta precipitación y una descarga extraordinaria de los ríos, el efecto de la inundación será mucho mayor en la línea de costa (Pedrozo-Acuna *et al.*, 2012).

El estado de Campeche ha sufrido grandes inundaciones por huracanes, dentro de las que se destacan “Gilberto”, 1988, “Opal” y “Roxanne” en 1995, “Isidoro” en 2002 y

“Alex” 2010 (Martínez, 2011). Este es un fenómeno a que a pesar de su importancia, debido a la falta de instrumentación en campo y de recursos humanos no ha sido estudiado con el detalle que se debe. El presente documento se indica la metodología original utilizada para el cálculo de marea de tormenta en el proyecto *Atlas de Peligros Naturales del Estado de Campeche*.

## METODOLOGÍA

Para cuantificar cualquier fenómeno natural existen dos vertientes, la primera está asociada al registro de dicho fenómeno por medio de instrumentos de medición, para el caso de marea de tormenta es necesario contar con mareógrafos o con sensores de presión que registren la variación temporal del nivel medio del mar cuando la zona costera está bajo los efectos de un huracán, la segunda opción está relacionada con la utilización de modelos numéricos que permitan calcular la evolución (ascenso y/o descenso) del nivel del mar cuando este es sometido a diversos patrones de viento y cambios en la presión barométrica.

Para el estado de Campeche, si bien se cuenta con dos estaciones del servicio ma-

reográfico Nacional (Lerma y Ciudad del Carmen), el acceso a los datos crudos recabados por estos instrumentos no es sencillo, aunado a la necesidad de conocer el nivel de marea de tormenta con el mayor detalle posible en la costa del Estado, obligó a la implementación de un modelo numérico que al solucionar las ecuaciones de aguas someras tomando como datos de entrada la batimetría y los patrones de viento y presión barométrica, permitiera cuantificar para todos los huracanes que han afectado el Estado en el periodo 1948-2010 los niveles de marea de tormenta, de tal manera que al tener una base de datos confiable permitiese elaborar, estadísticamente, curvas de marea de tormenta para diversos periodos de retorno.

## BATIMETRÍA

El primer insumo para el análisis de cualquier proceso costero es la batimetría, al ser la marea de tormenta un fenómeno meteorológico de gran escala asociado a huracanes y nortes, la batimetría utilizada debe cubrir una gran extensión de mar y costa. Para el estado de Campeche se utilizó una batimetría obtenida a través de la digitalización de las cartas náuticas de la Secretaría de Marina (figura 1).

El modelo HURAC, implementado por Ruiz *et al.* (2009) a partir de los trabajos de Bretschneider (1990) y Silva (2000), fue seleccionado para estimar los campos de viento, oleaje y presión en la superficie del mar que se encuentra bajo el efecto de un huracán en específico. Como insumo de en-

trada a este modelo se utilizó la base de datos recopilada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM de los boletines de la NOAA para el periodo 1948-2010, la cual cuenta con 659 y 860 huracanes que han afectado las vertientes Atlántica y Pacífica de México, respectivamente (figura 2). Los huracanes que se consideran relevantes son aquellos que han pasado al menos a 200 km de las costas de Campeche.

En la figura 3(a) se indica las variaciones de la presión barométrica en la isla de Cozumel calculada con el módulo de presión del modelo HURAC comparada con el registro del Servicio Meteorológico Nacional para la misma localidad al ser sometida bajo los efectos del huracán “Wilma”, 2005. La figura 3(b) presenta, para el mismo huracán, la velocidad del viento mediada por una boya

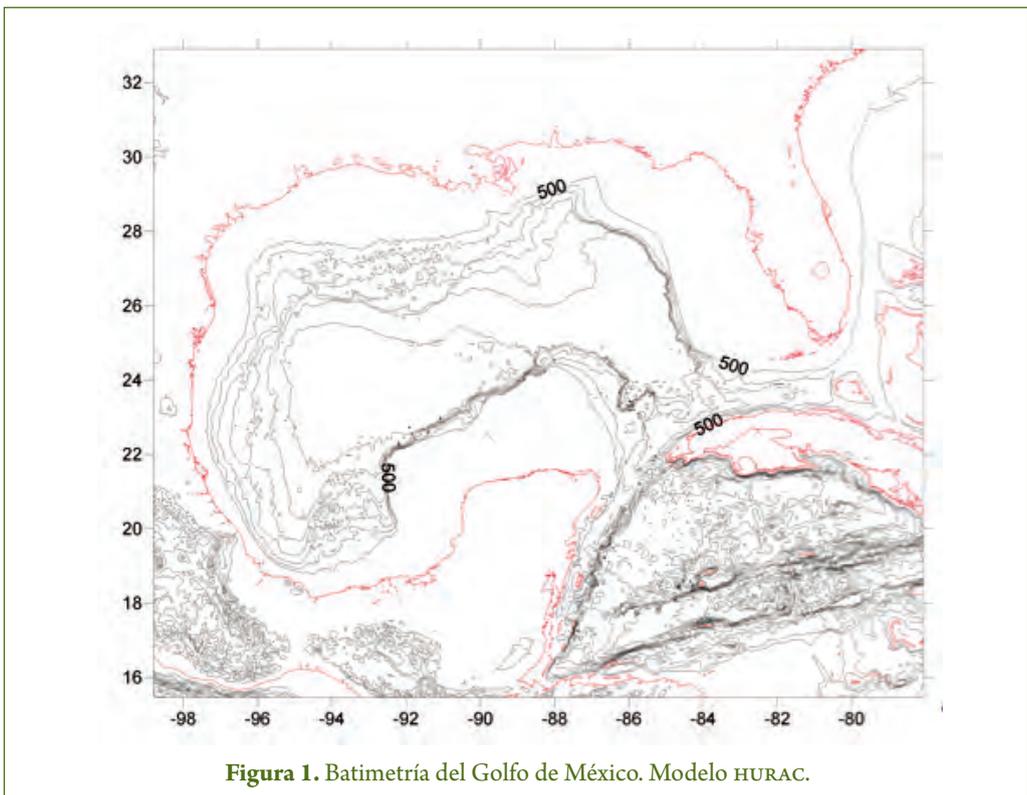
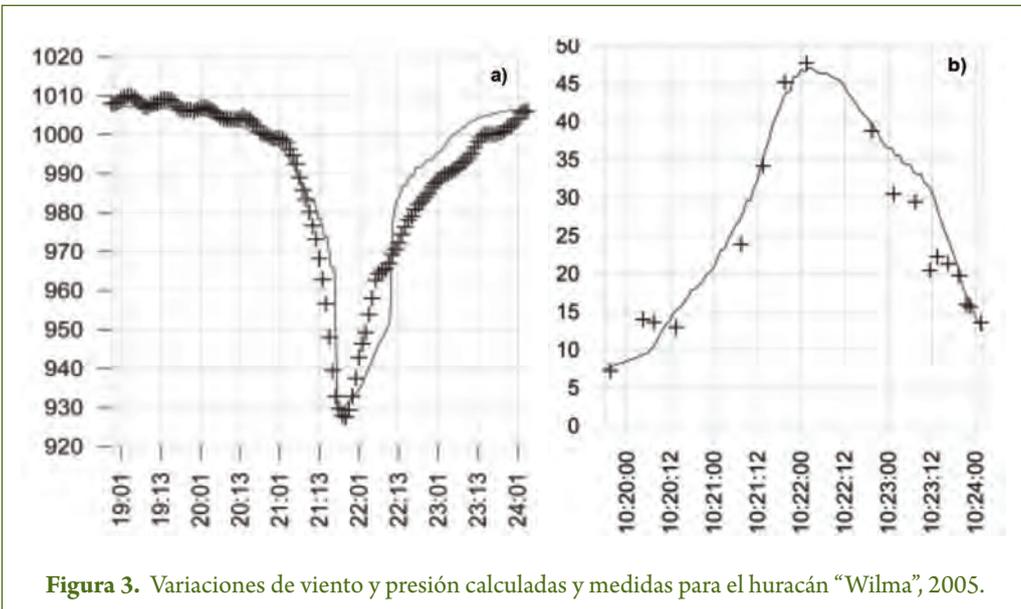
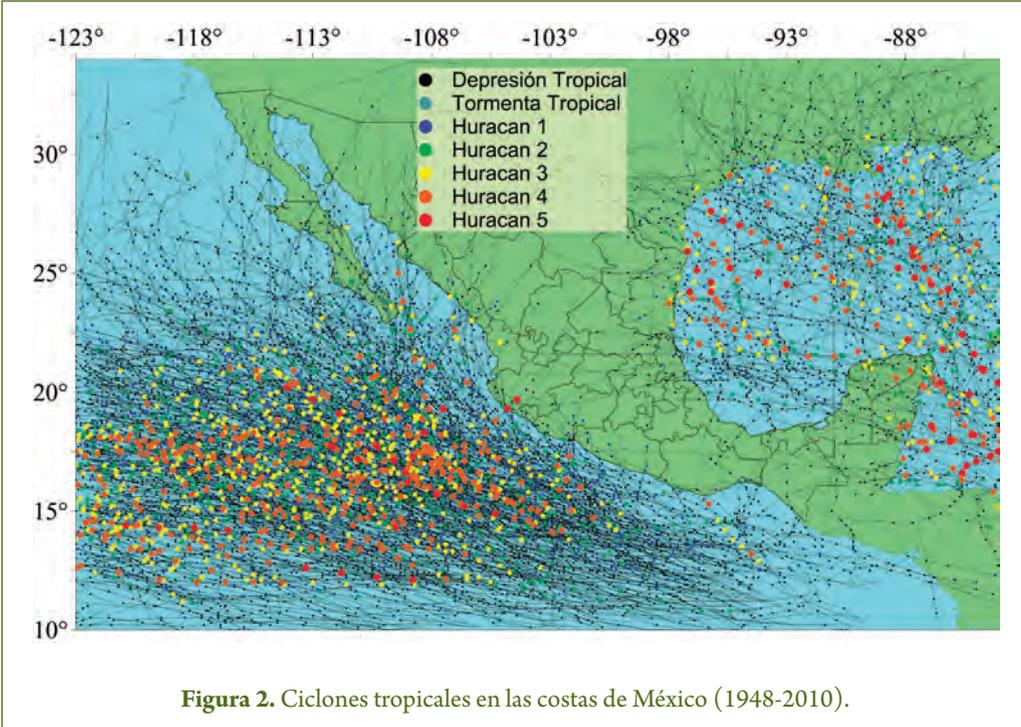


Figura 1. Batimetría del Golfo de México. Modelo HURAC.



de la NOAA y comparada con el resultado obtenido con el modelo HURAC. El buen ajuste entre las dos curvas puede ser observado claramente.

La figura 4 (a y b) representa los campos de velocidades y presiones calculados para el huracán “Emily” cuando se encontraba cerca de Puerto Progreso, Yucatán el 18 de julio de 2005 a las 20:00 h

### MODELO NUMÉRICO HD23

A partir de los campos de velocidad de viento y presión barométrica la marea de tormenta es calculada con el modelo numérico desarrollado por Posada *et al.* (2008a). Este modelo resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en la vertical en volumen finito bajo un esquema Gudonov sobre una malla jerárquica. Para resolver los flujos no viscosos se emplea el solucionador de Riemman calculado con la aproximación de Roe, de manera similar a lo reportado por

Bautista (2005). La integración en el tiempo se realiza bajo un esquema Adams-Bashfort de primer orden.

### MALLA JERÁRQUICA

El modelo HD23 trabaja sobre una malla Quadtree. Las ventajas y procedimiento de generación se explica a detalle en Posada *et al.* (2008b). La malla Quadtree es fácil y rápida de generar con la gran ventaja de que la resolución es alta en la zona de interés; la figura 5, muestra la malla Quadtree obtenida a partir de la batimetría del Golfo de México, la resolución máxima se tiene en la costa, donde el ancho de celda es de 3 150 m, en el centro del Golfo de México, donde para los alcances de este proyecto, no es necesario calcular la marea de tormenta con gran detalle, las celdas tiene 101 000 m. La malla consta de 79 537 celdas que cubren una extensión de 2 560 000km<sup>2</sup>.

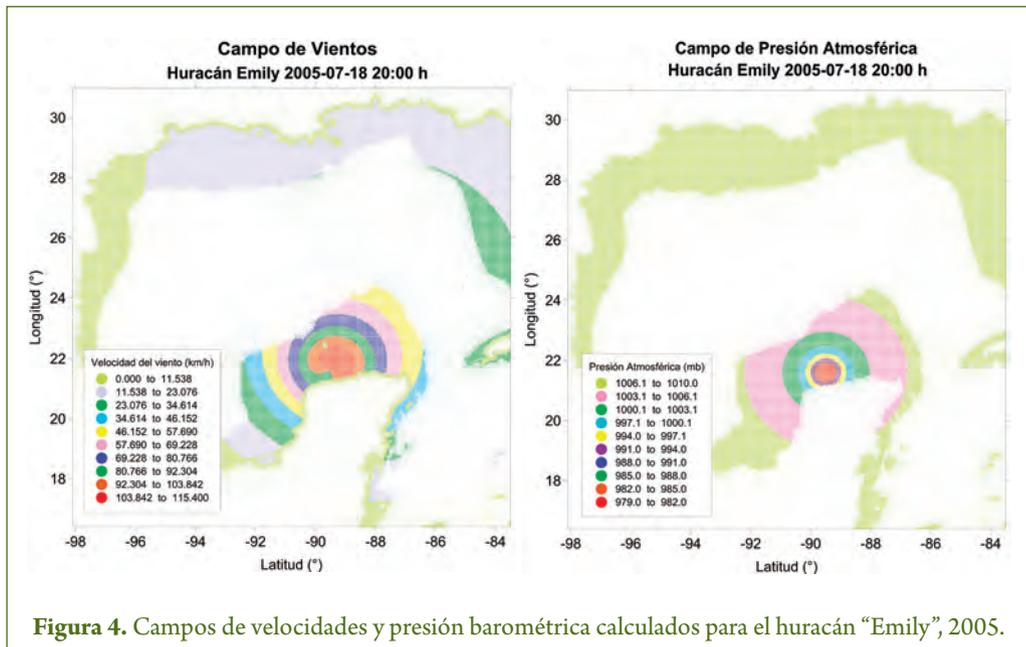


Figura 4. Campos de velocidades y presión barométrica calculados para el huracán “Emily”, 2005.

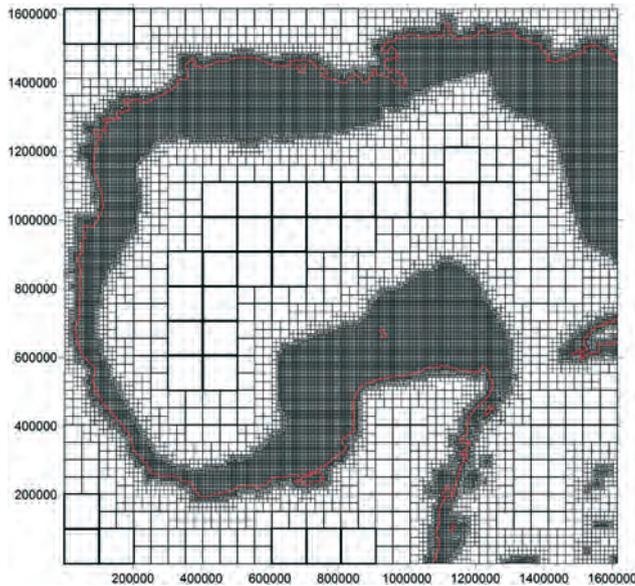


Figura 5. Malla Quadtree para el Golfo de México (Posada *et al.*, 2010).

## OBTENCIÓN DE NIVELES DE MAREA DE TORMENTA

El análisis de huracanes consistió en modelar todos los huracanes que han pasado al menos a 200 km de la costa del estado de Campeche para cada año, entre 1948-2010, obteniendo el máximo anual para cada celda del dominio de cálculo. Si en un año se presentaron dos o más huracanes, todos ellos fueron modelados, la máxima marea de tormenta para una celda específica es el máximo nivel de todas las simulaciones de este año. Posteriormente se realizó un análisis extremal por medio de la distribución Weibull a los máximos niveles anuales de cada celda. Con este análisis estadístico es posible obtener el peligro de inundación por marea de tormenta cada celda de 3 150 m en el litoral del estado de Campeche para los periodos de retorno comprendidos entre 2 y 1 000 años (Posada *et al.*, 2010).

Las figuras 6 (a,b,c) representan la marea de tormenta máxima en el estado de Campeche para los huracanes “Emily”, “Stan” y “Wilma” en 2005. La figura 6(d) representa el máximo nivel de marea de tormenta para cada celda calculado a partir de los máximos por huracán en ese mismo año. La figura 6(d) indica la distribución de Weibull para marea de tormenta asociada a diferentes periodos de retorno en la ciudad de San Francisco de Campeche.

## SISTEMA DE CONSULTA DE MAREA DE TORMENTA

Se construyó un sencillo sistema de consulta con el cual se puede conocer cada 3 150 m, en el litoral de Campeche, la función de marea de tormenta con relación al periodo de retorno o probabilidad de ocurrencia (figura 7).

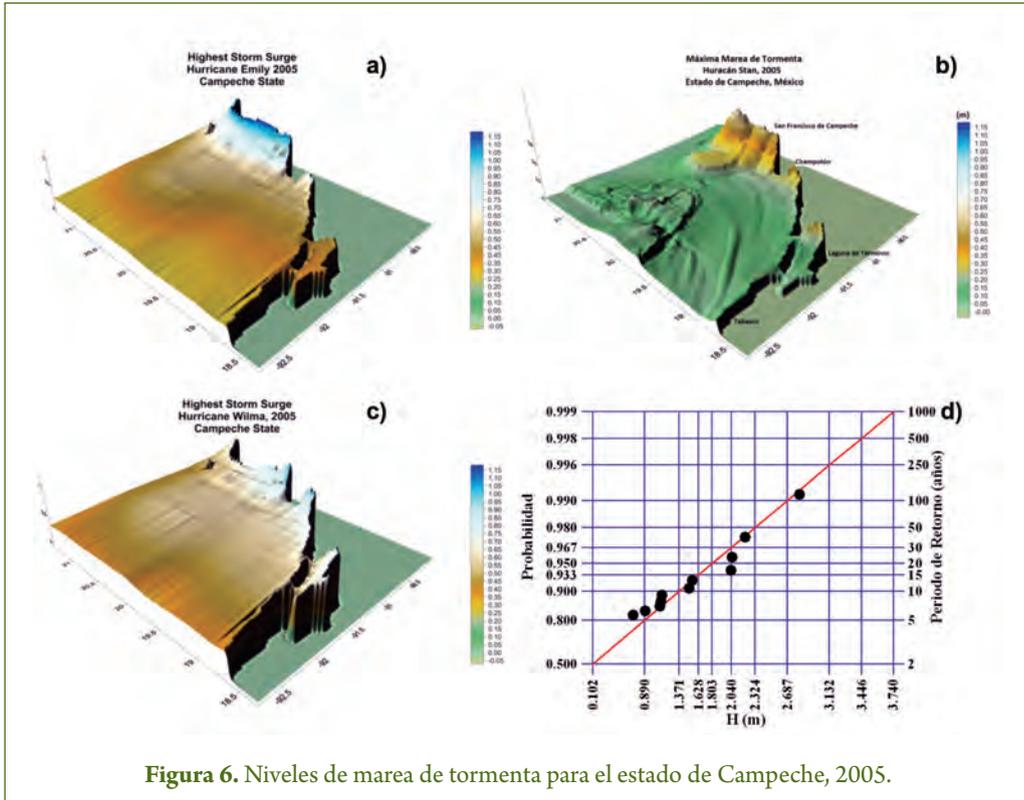


Figura 6. Niveles de marea de tormenta para el estado de Campeche, 2005.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las figuras 8 a la 11 se presenta el peligro de marea de tormenta para el estado de Campeche para periodos de retorno comprendidos entre 5 a 100 años, se observa que las regiones de San Francisco de Campeche, los Petenes y la parte este de la laguna de Términos presentan los mayores valores de marea de tormenta y por lo tanto de inundación.

Las figuras 12 a la 15 esquematizan una acercamiento al peligro de inundación por marea de tormenta en la ciudad de San Francisco de Campeche, para la construcción de estos mapas se utilizó un modelo digital de elevaciones de 3 m en el cual se consideró

que el nivel de inundación en el litoral inunda topográficamente todas las celdas que se encuentran por debajo de este valor.

Con los resultados anteriores se puede obtener, por parte de las autoridades de Protección Civil, diversos tipos de análisis, por ejemplo en la tabla 1 se presenta el análisis, para la ciudad de San Francisco de Campeche de las zonas susceptibles a inundarse para periodos de retorno de 5, 20, 50 y 100 años.

En la figura 16 se presentan las funciones de marea de tormenta para las Ciudad del Carmen, Champotón, Seybaplaya e Isla Arena obtenidas del sistema de consulta

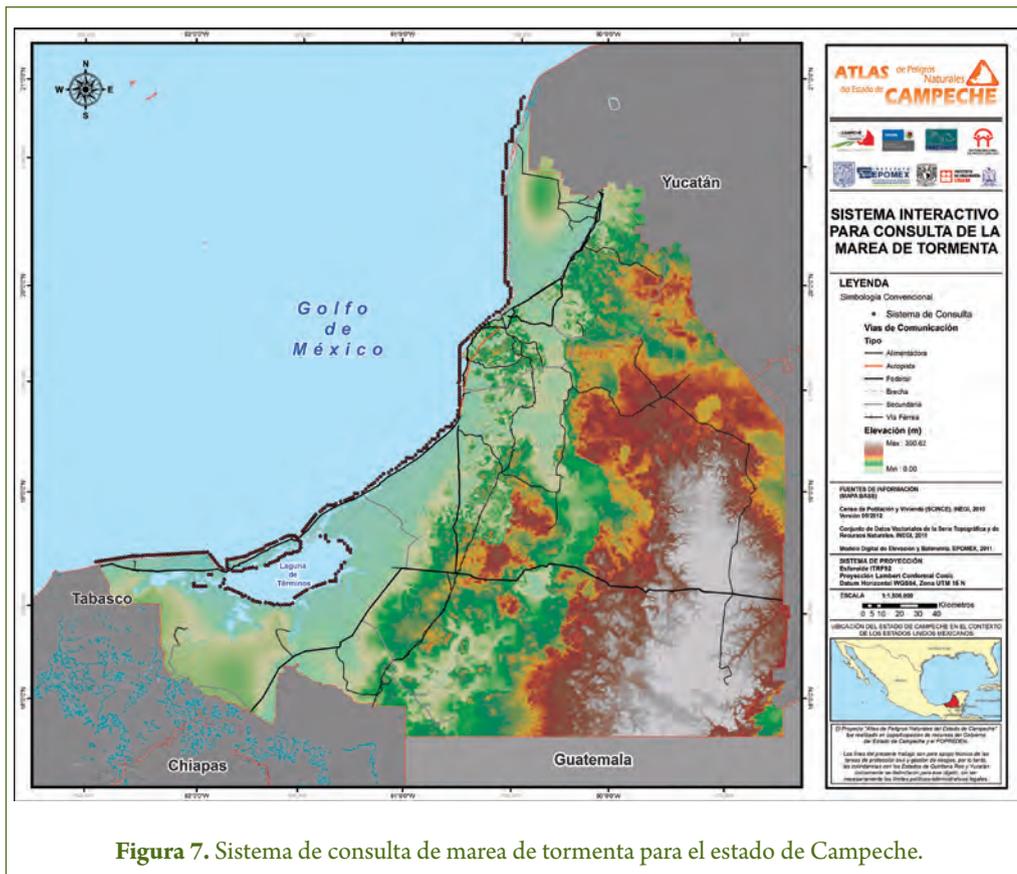


Figura 7. Sistema de consulta de marea de tormenta para el estado de Campeche.

interactivo creado para el proyecto *Atlas de Peligros Naturales del Estado de Campeche*, estas funciones son de suma utilidad para la

planeación de obras de desarrollo (hoteles, fraccionamientos, carreteras, etc) en la zona costera del Estado.

## CONCLUSIONES

Se presentaron los principales resultados obtenidos durante la caracterización del peligro de marea de tormenta en el estado de Campeche, los cuales pueden resumirse en un conjunto de mapas impresos útiles para consulta de los organismos de Protección Civil del estado de Campeche, así como un

sistema de consulta interactivo con el cual se puede obtener las funciones de marea de tormenta con una resolución de 3 150 m en el litoral del Estado, finalmente los mapas de peligro, al estar en formato Shape, pueden ser incluidos dentro de un sistema de Información Geográfica que junto con otras

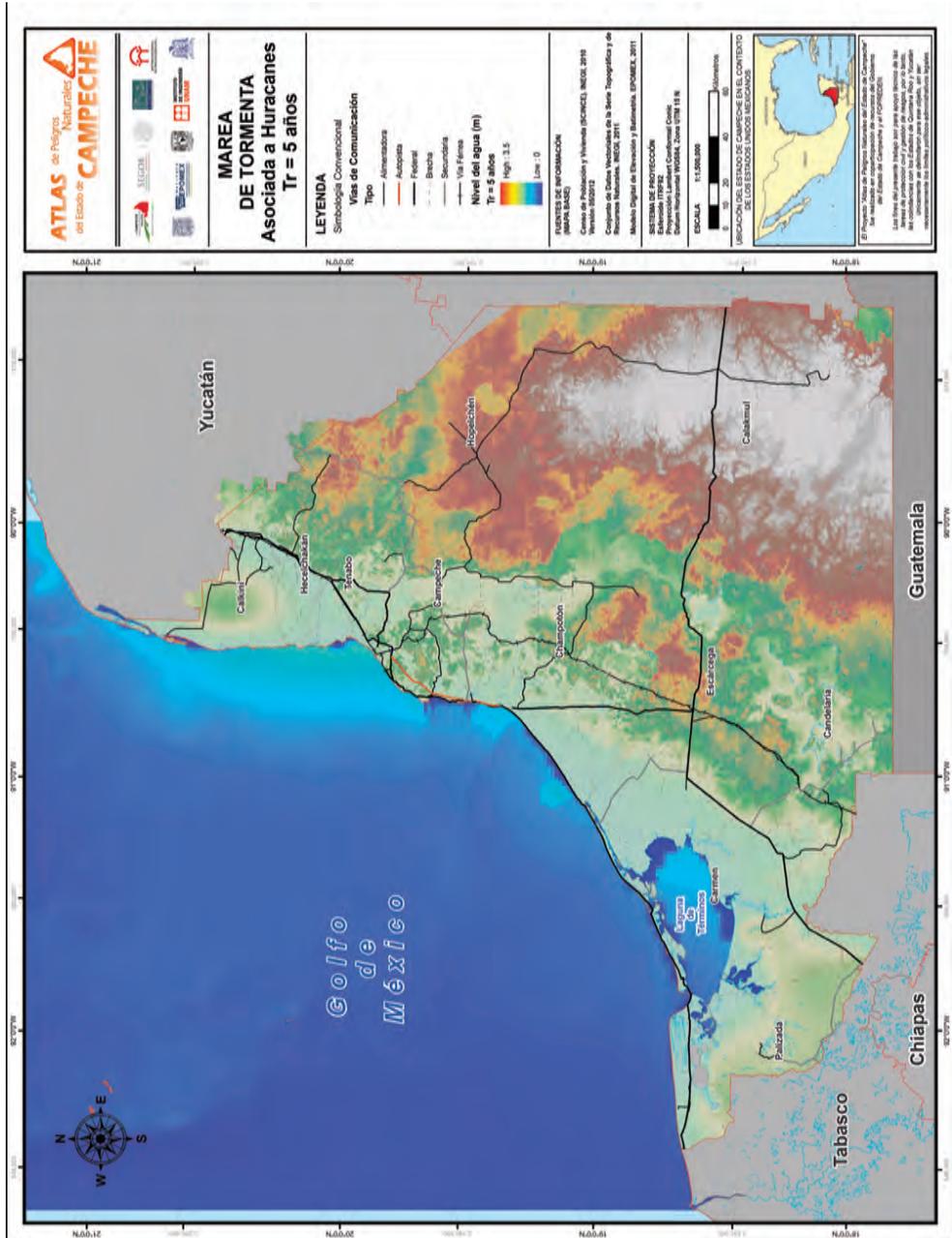


Figura 8. Marea de tormenta para el estado de Campeche, Tr= 5 años.

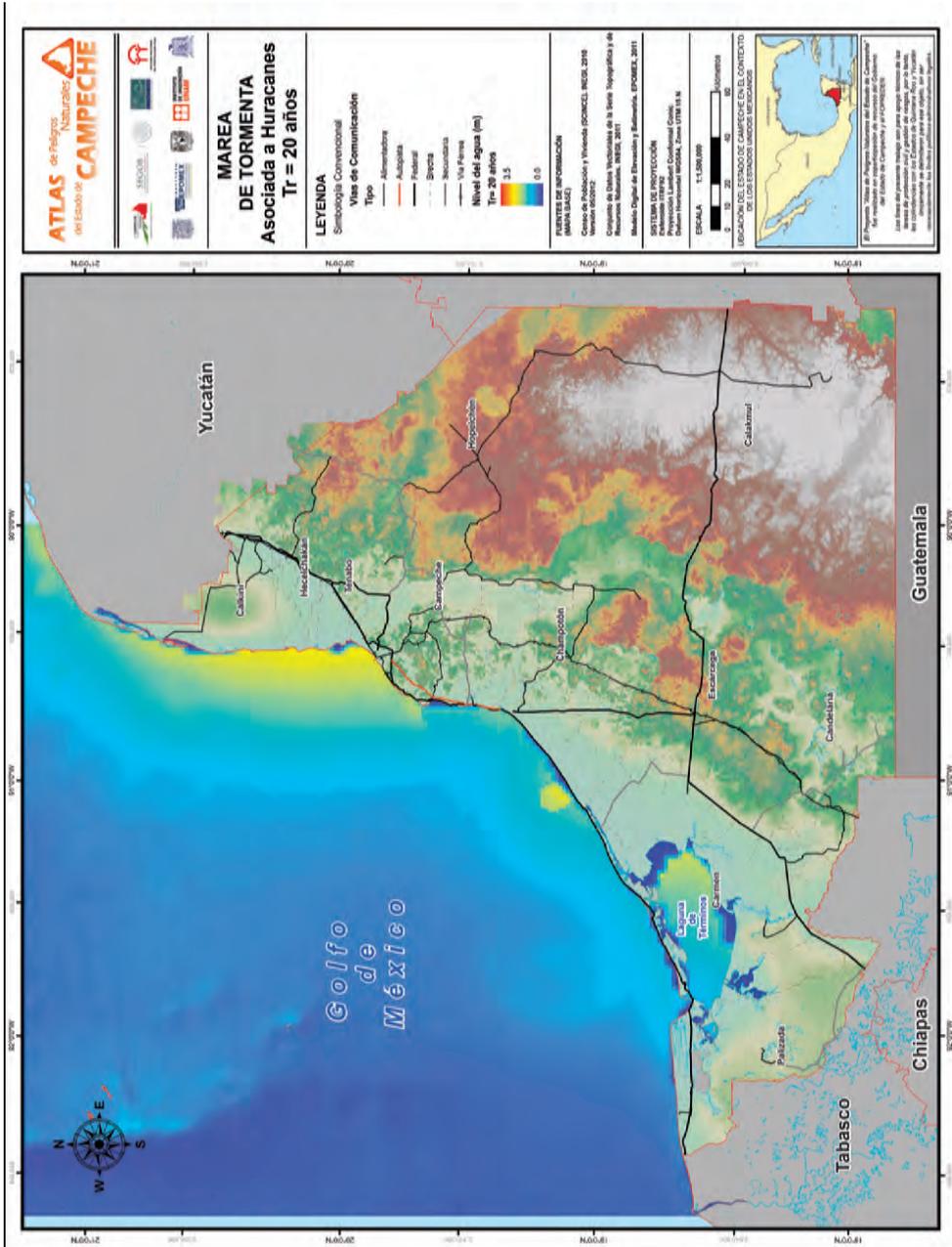


Figura 9. Marea de tormenta para el estado de Campeche, Tr= 20 años.

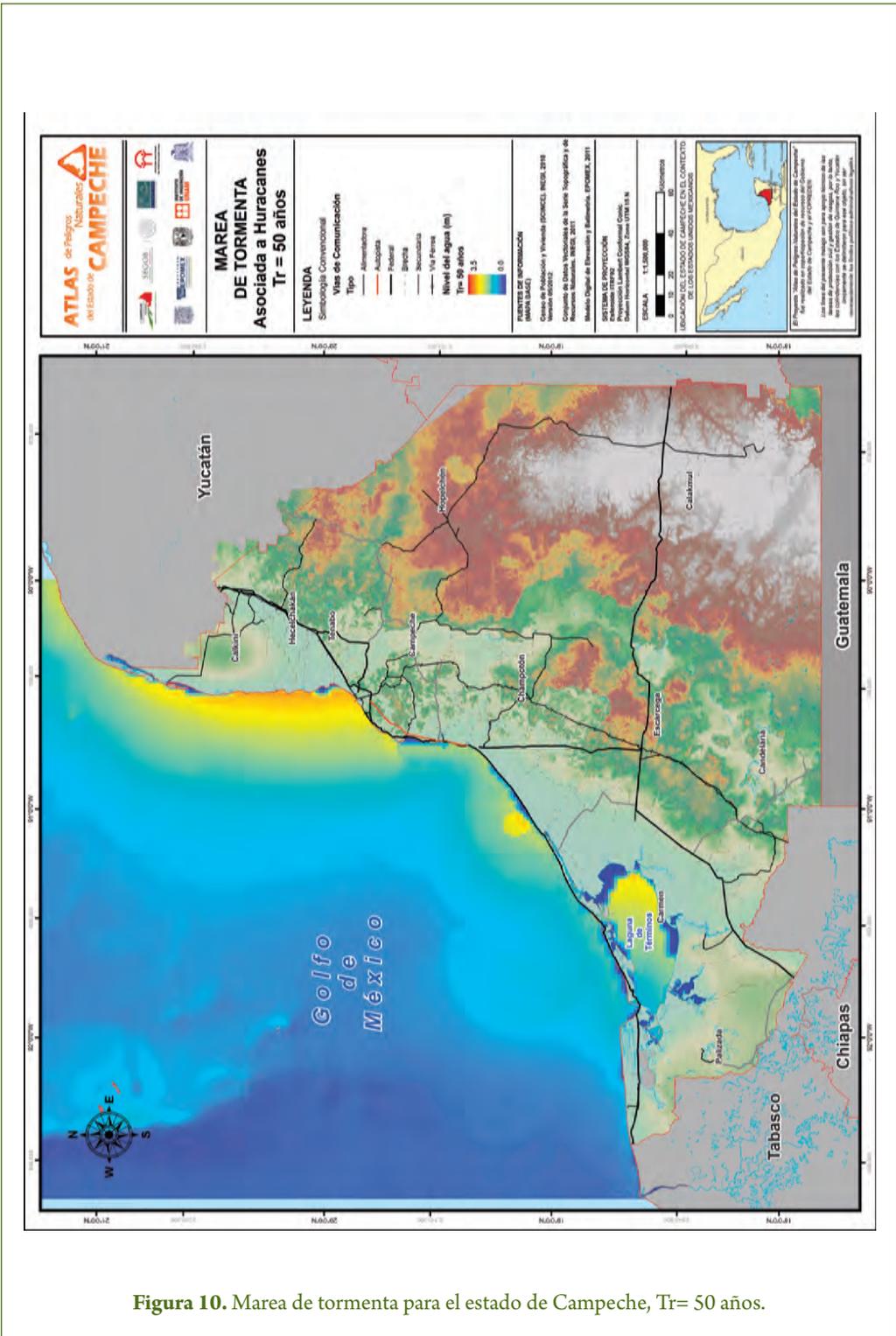


Figura 10. Marea de tormenta para el estado de Campeche, Tr= 50 años.

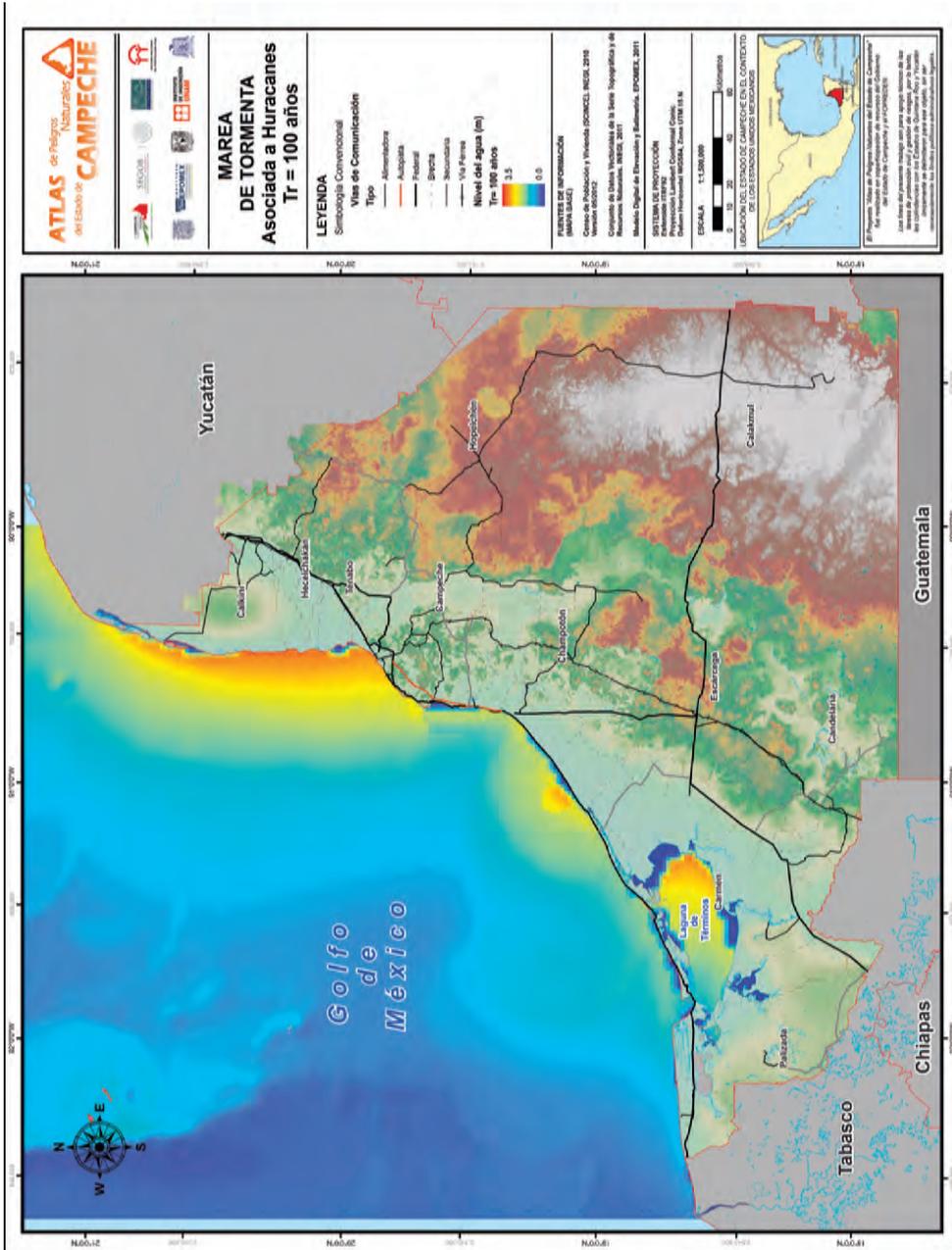


Figura 11. Marea de tormenta para el estado de Campeche, Tr= 100 años.

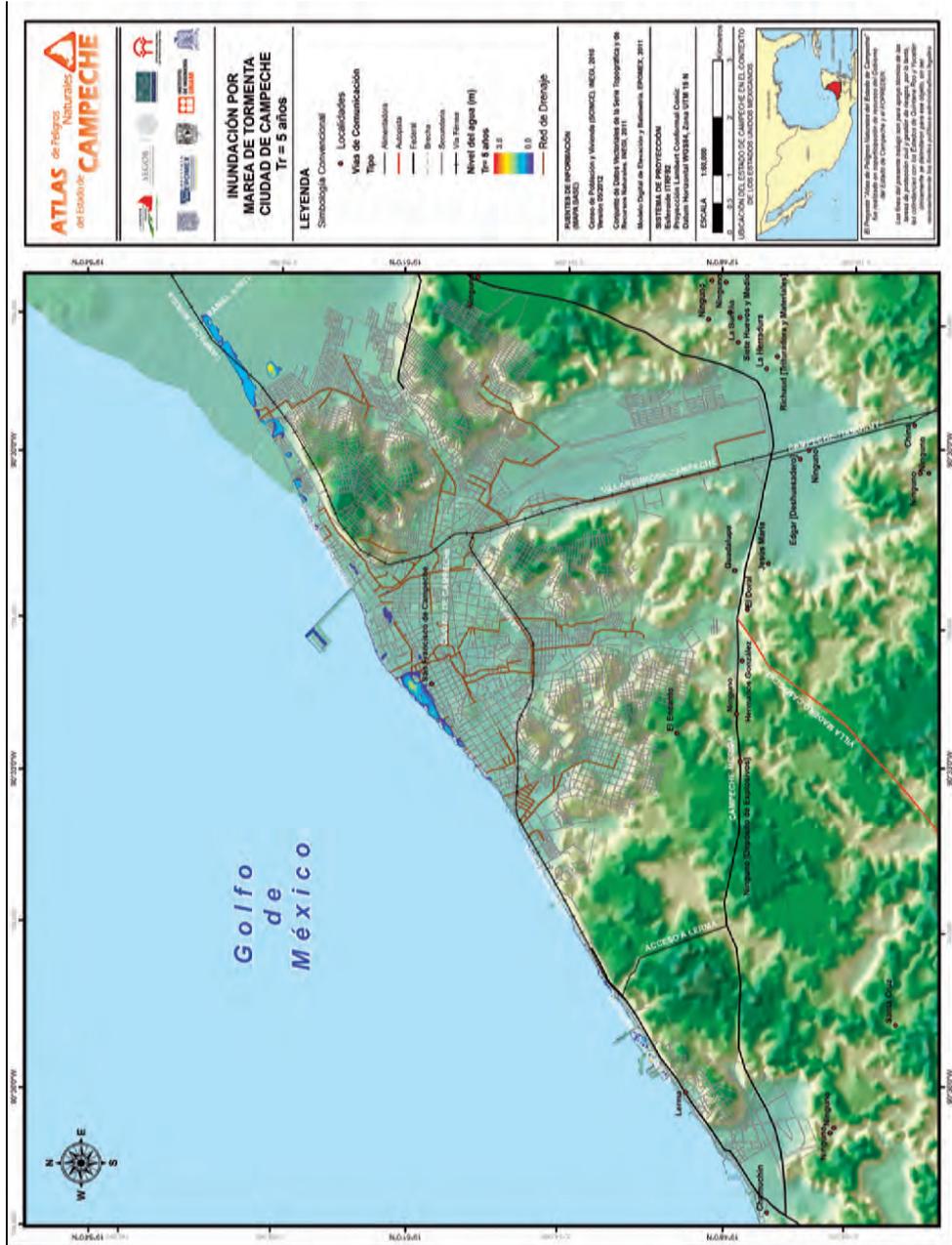


Figura 12. Marea de tormenta para San Francisco de Campeche, Tr= 5 años.

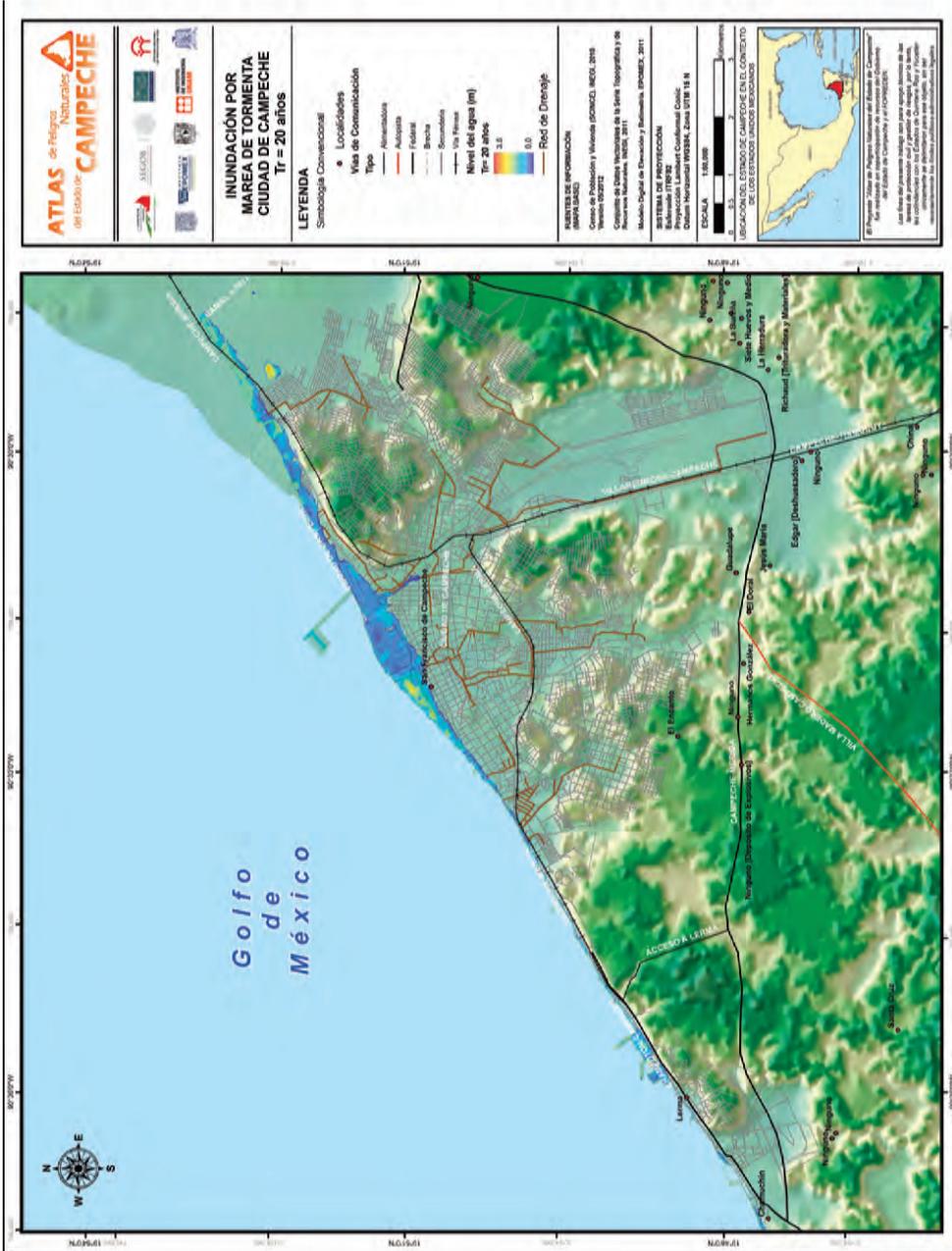


Figura 13. Marea de tormenta para San Francisco de Campeche, Tr= 20 años.

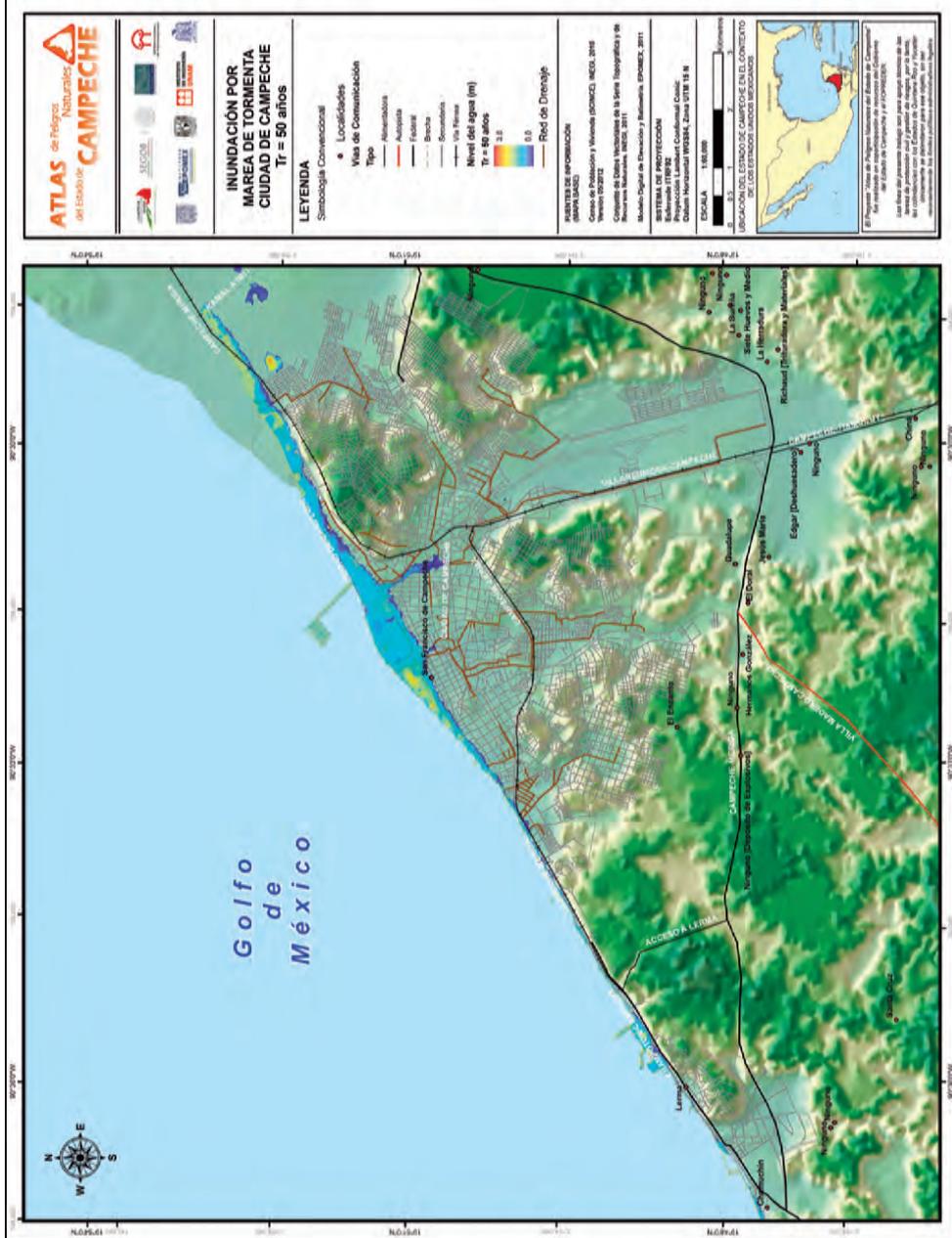


Figura 14. Marea de tormenta para San Francisco de Campeche, Tr= 50 años.

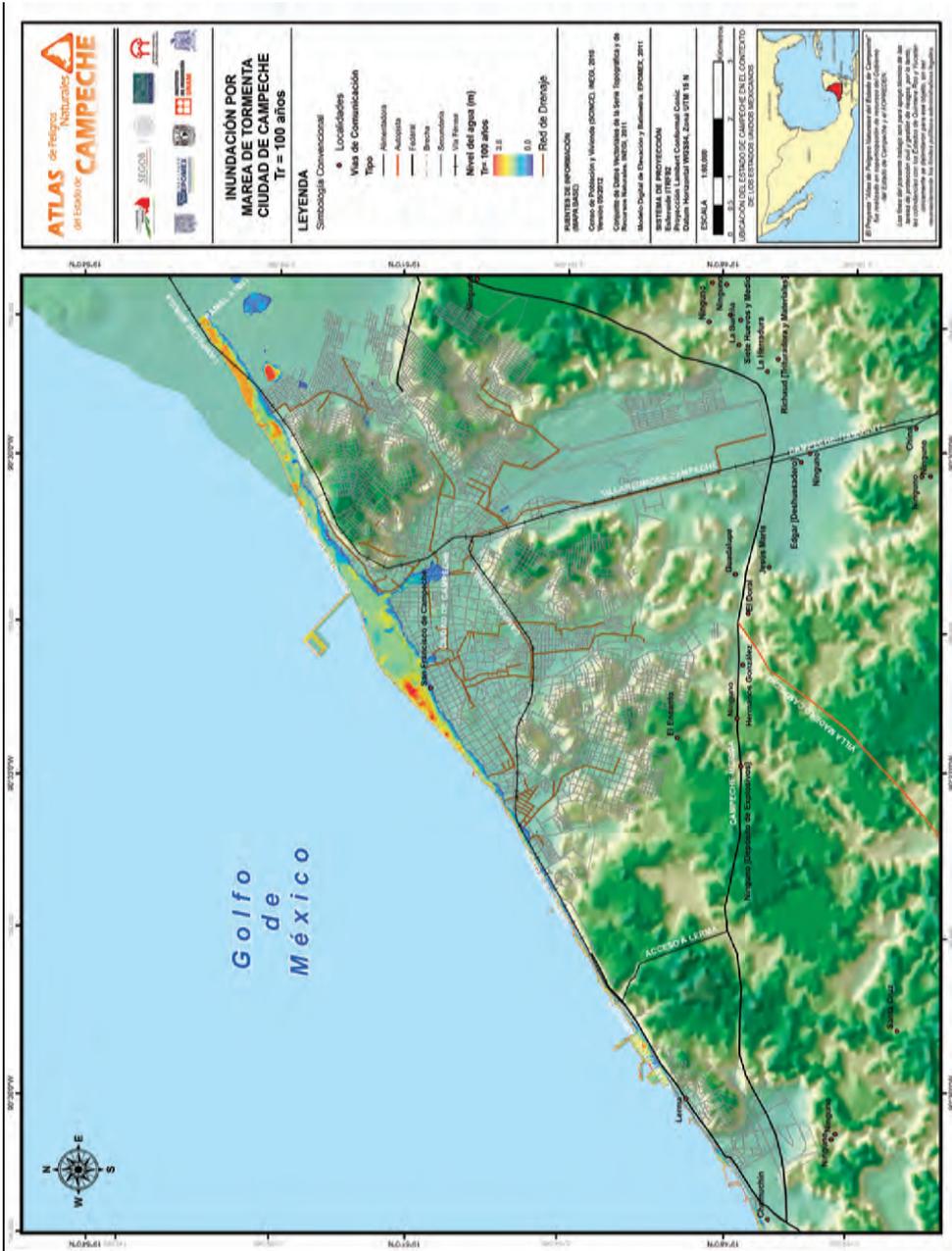
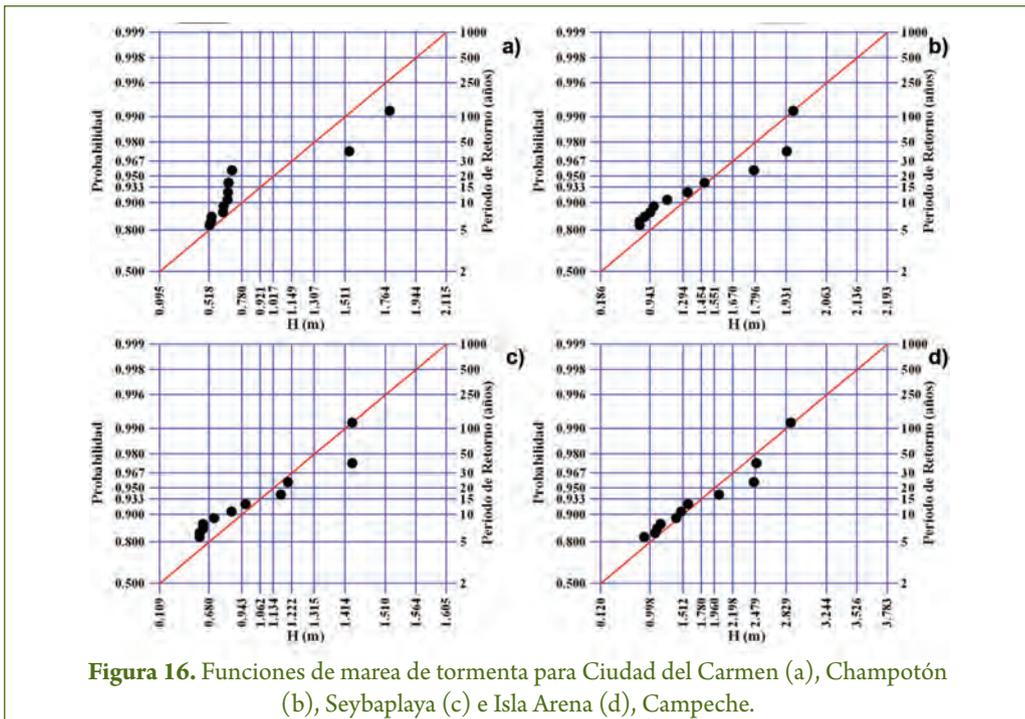


Figura 15. Marea de tormenta para San Francisco de Campeche, Tr= 100 años.

**Tabla 1.** Áreas de inundación por marea de tormenta y marea astronómica para Tr 2 a 1 000 años.

Escenario no.	Tr	Marea de tormenta (cm)	Tirante total (cm)	Áreas inundadas (ha)
2	5	89	164	110
Colonias inundadas parcialmente: Col. Centro, Solidaridad Nacional, Zona sin asignación de nombre, Palmas I, II, III.				
5	20	180	255	321.3
Colonias inundadas parcialmente: Col. Lazareto, Col. San Bartolo, San Román, Col. Centro, Barrio de San Francisco, Barrio Guadalupe. Colonias inundadas totalmente: Zona de asignación sin nombre, 7 de agosto, Zona pesquera, Solidaridad Nacional, Palmas I, II, III, Ah Kim Pech, Villas de Ah Kim Pech.				
7	50	232	307	383.0
Colonias inundadas parcialmente: Col. Miramar, Bosques de Campeche, Col. Lazareto, Col. San Bartolo, San Román, Col. Centro, Barrio de San Francisco, Barrio Guadalupe, Barrio de la Ermita. Colonias inundadas totalmente: Zona de asignación sin nombre, 7 de agosto, Zona pesquera, Solidaridad Nacional, Palmas I, II, III, Ah Kim Pech, Villas de Ah Kim Pech.				
8	100	268	343	421.1
Colonias inundadas parcialmente: Villas del Río, Col. Miramar, Bosques de Campeche, Col. Lazareto, Col. San Bartolo, San Román, Col. centro, Barrio de San Francisco, Barrio Guadalupe, Barrio de la Ermita. Colonias inundadas totalmente: Zona de asignación sin nombre, 7 de agosto, Zona pesquera, Solidaridad Nacional, Palmas I, II, III, Ah Kim Pech, Villas de Ah Kim Pech.				



capas permita la obtención de mayor información.

Con respecto a las localidades del estado de Campeche con mayor predisposición a sufrir este peligro se destacan, San Francisco de Campeche, Los Petenes y Champotón, está última debido a que la marea de tormenta dificultará el libre flujo a través de la desembocadura del río Champotón, lo cual ocasionará un mayor nivel de inundación al desbordarse en la parte este de la ciudad de Champotón.

Los mayores niveles de marea de tormenta se presentan en la parte oriental de la laguna de Términos, pero al ser esta una zona despoblada, el riesgo de inundación es despreciable; en Ciudad del Carmen la marea de tormenta es menor, comparada con San Francisco de Campeche y Champotón, pero al ser una zona tan plana sus efectos pueden llegar a ser considerables.

Se recomienda actualizar este peligro cada cinco años, con el fin de incluir el efecto de los últimos huracanes que afecten al estado de Campeche

## LITERATURA CITADA

- Bretschneider, C.L., 1990.** Tropical cyclones. Handbook of Coastal and Ocean Engineering, Gulf Publishing Co.
- Pedrozo-Acuña A., A. Ruiz de Alegría-Arzaburu, I. Mariño-Tapia, C. Enriquez, y F.J. Gonzalez Villareal, 2012.** Factors controlling flooding at the Tonalá river mouth (Mexico). *Journal of Flood Risk Management*. doi: 10.1111/j.1753-318X.2012.01142.x
- Ruiz, G., Mendoza, E., Silva, R., Posada, G., Pérez, D., Rivillas, G., Escalante, y E. Ruíz, 2009.** Caracterización del régimen de oleaje y viento de 1948-2007 en el litoral mexicano. *Revista de Ingeniería del Agua*, 16(1).
- Silva R, Díaz G., A. Contreras, G. Bautista y C. Sánchez, 2000.** Determination of oceanographic risk for hurricanes on the Mexican coast, 6th international Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting. p 137-160.
- Martínez A., 2011.** Estudio Hidrológico e Hidráulico de la cuenca del río Champotón: mapas de peligro y sistema de información geográfico. Tesis Biología, Facultad de Ciencias Químico Biológicas, Universidad Autónoma de Campeche
- Pisté, C., 2012.** Evaluación de la amenaza de inundaciones a nivel paisaje en la Ciudad de Campeche, ante la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos (huracanes), Tesis Biología, Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad Autónoma de Campeche .
- Posada, G., R. Silva, y S. de Brye, 2008.** Three dimensional hydrodynamic model with multiquadtree meshes. *American Journal of Environmental Sciences*, 4(3): 209-222.
- Posada, G., D. Simmonds, R. Silva, y A. Pedrozo, 2008.** A 2D Hydrodynamic Model with Multi-Quadtree Mesh. Chapter 8, p. 205-241. In: Alan I. Prescott.(ed.). Ocean Engineering Research Advances. ISBN 978-1-60021-777-7,1-60021-777-X.
- Posada, G., G. Durán, R. Silva, M.E. Maya, y J. Salinas, 2010.** Vulnerability to Coastal Flooding Induced by Tropical Cyclones, 2010. International Conference on Coastal Engineering, Shanghai, China. julio. ISSN: 2156-1028.

---

# Oleaje

*Mireille Escudero Castillo, Rodolfo Silva Casarín,  
Edgar Mendoza Baldwin y Gregorio Posada Vanegas*

---

## RESUMEN

Las costas campechanas son afectadas anualmente por fuertes vientos de origen polar (localmente conocidos como “Nortes”) y la gran mayoría de los huracanes que cruzan el Atlántico (entre los registrados con mayor severidad destacan “Gilberto”, en Septiembre de 1988; “Roxanne”, en octubre de 1995; o “Isidoro”, en septiembre de 2002). Estos fenómenos provocan graves problemas de erosión en las playas e inundaciones, que se extienden tierra adentro y afectan los asentamientos humanos y hábitats naturales próximos a la playa. La importancia de llevar a cabo una evaluación integrada del riesgo hidrometeorológico en la zona costera de Campeche radica en la posibilidad de prevenir o reducir los daños que producen estos fenómenos. Un peligro es generalmente definido como la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente dañino y constituye uno de los elementos fundamentales en la definición y evaluación del riesgo. El presente estudio se centra en el análisis de los peligros hidrometeorológicos en la costa situada frente a tres de las ciudades principales del Estado: San Francisco de Campeche, Champotón y Ciudad del Carmen. Estos peligros están representados por el efecto combinado del oleaje y la sobrelevación del nivel medio del mar en condiciones

### Objetivo general

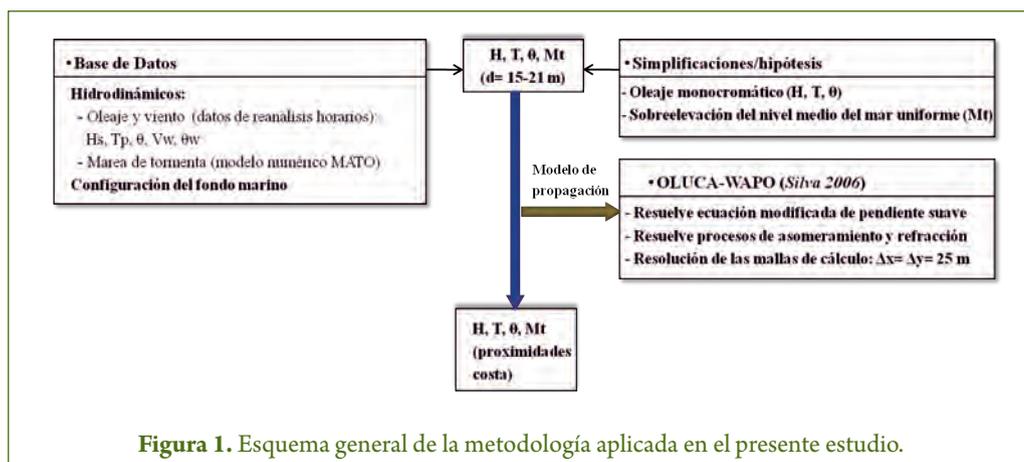
- Calcular mapas de altura de ola para las ciudades de Campeche, Carmen y Champotón que sirvan como datos para modelos de propagación de oleaje.

### Objetivos específicos

- Describir la metodología implementada para propagar el oleaje hasta el límite de aguas profundas.
- Obtener máximos niveles de oleaje en las costas de las principales ciudades del estado de Campeche.

de tormenta (marea de tormenta) asociada solo a los efectos del viento generados tanto por frentes fríos (“Nortes”) como ciclones tropicales. Las características de los cuales, en las proximidades de la costa, se obtuvieron a partir de la aplicación de los modelos numéricos OLUCA-WAPO para propagación de oleaje y MATO para la estimación de la marea de tormenta. Con estos modelos se construyeron mapas asociados a varios periodos de retorno. Por tanto, el objetivo del estudio es el conocimiento general de los peligros por oleaje y marea de tormenta que se pueden presentar en las inmediaciones de la costa frente a tres ciudades seleccionadas por su relevancia en el estado de Campeche, que sirva como base para una posterior evaluación del riesgo de erosión e inundación ante la presencia de los mismos.

## METODOLOGÍA



## BASE DE DATOS

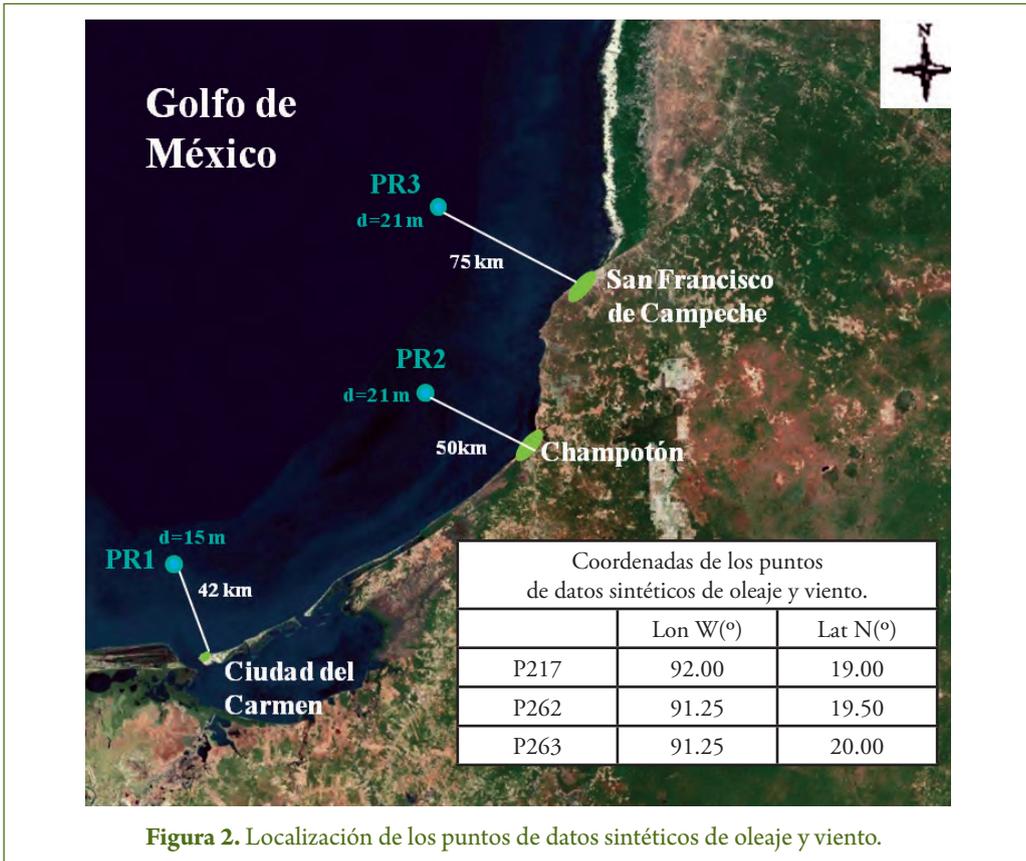
### OLEAJE Y VIENTO

La base de datos de oleaje y viento se compone de una serie sintética de estados de mar horarios, que cubre desde 1948 a 2010 y es resultado de la aplicación de los modelos numéricos de predicción HURAC (Silva *et al.*, 2008) y WAM (Monbaliu & Padilla, 2000). El modelo HURAC ofrece resultados adecuados en la caracterización extremal, mientras que el WAM es de mayor utilidad en la obtención de las características medias de oleaje y viento. Los parámetros que definen cada

estado de mar son la altura de ola significativa ( $H_s$ ), el periodo pico ( $T_p$ ), la dirección de oleaje ( $\theta$ ), la velocidad del viento ( $V_w$ ) y la dirección del viento ( $\theta_w$ ).

La figura 2 muestra la ubicación de los puntos sobre los que se realizaron las predicciones de oleaje y viento (PR1, PR2, PR3), cada uno situado frente a la población correspondiente.

Los casos de oleaje a propagar se seleccionan de acuerdo con su representatividad en cada sitio de estudio, la cual es determinada con base en el análisis de rosas de oleaje



y regímenes extremales de oleaje. Las rosas de oleaje muestran la frecuencia de oleaje, de una determinada intensidad, que se presenta en cada dirección (en este estudio la dirección indica la procedencia del oleaje); mientras que el régimen extremal de oleaje permite conocer la distribución de los valores extremos de la serie de datos, y asociar la altura de ola de una determinada intensidad con su probabilidad de excedencia en un año y, en función de ésta, con su periodo medio de ocurrencia (periodo de retorno).

Por otro lado, las rosas de viento indican las direcciones hacia dónde se dirige el viento con una determinada intensidad; y mediante la caracterización extremal de viento se obtienen las velocidades de viento asociadas a los periodos de retorno de interés.

En el área de estudio la condición de tormenta se determinó como un estado de mar con altura de ola superior o igual a un metro. A continuación se presentan en las figura 3 a la 8, las rosas de oleaje y de viento anuales y estacionales, así como las curvas de periodo de retorno para los puntos de interés.

## MAREA DE TORMENTA

A diferencia de la metodología utilizada en el capítulo anterior, en la cual se tomó en cuenta el efecto combinado del viento como del gradiente de presiones de los huracanes, para poder determinar la inundación también asociada a los “Nortes” no se tomó en cuenta el efecto de barómetro inverso.

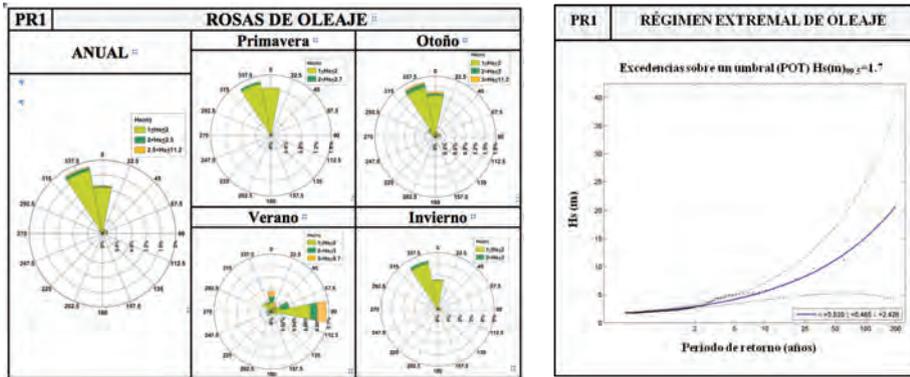


Figura 3. (a) Rosas de oleaje correspondientes a la serie sintética de oleaje en PR1.  
 (b) Régimen extremal anual de oleaje en PR1.

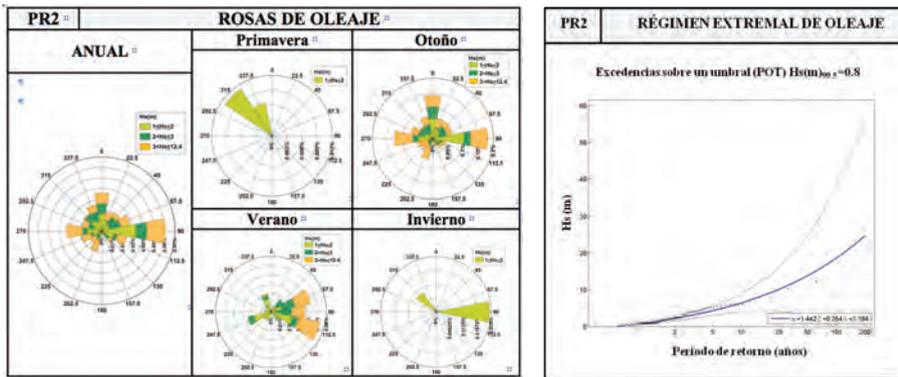


Figura 4. (a) Rosas de oleaje correspondientes a la serie sintética de oleaje en PR2.  
 (b) Régimen extremal anual de oleaje en PR2.

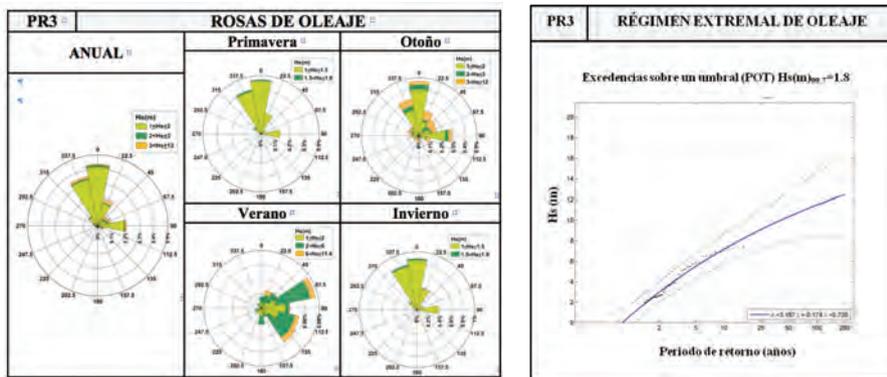


Figura 5. (a) Rosas de oleaje correspondientes a la serie sintética de oleaje en PR3.  
 (b) Régimen extremal anual de oleaje en PR3.

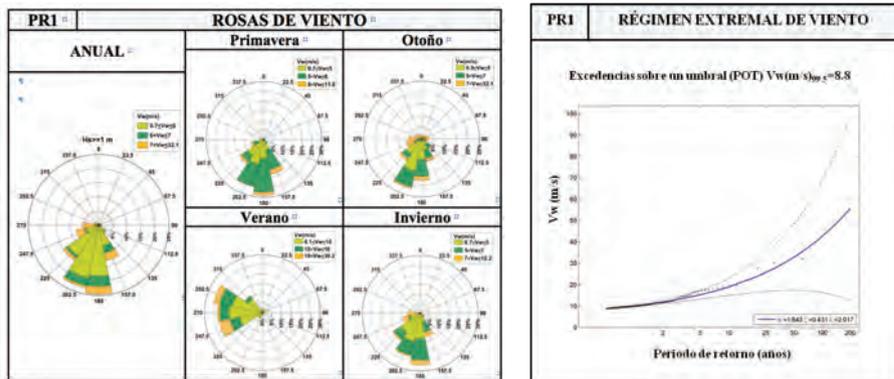


Figura 6. (a) Rosas de viento correspondientes a la serie sintética de oleaje en PR1. (b) Régimen extremal anual de viento en PR1.

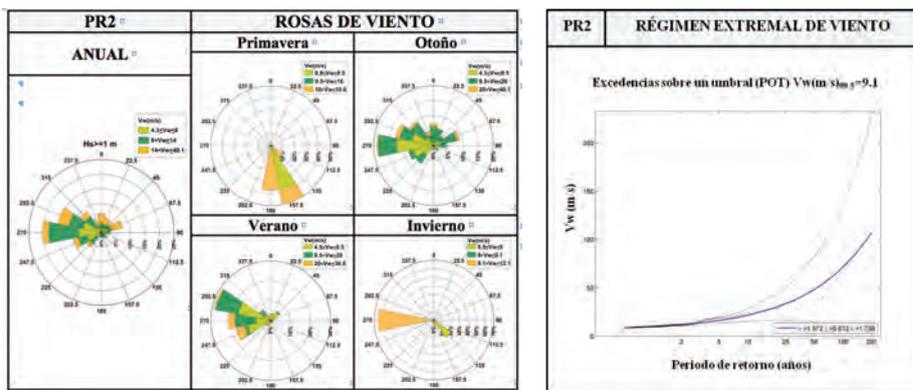


Figura 7. (a) Rosas de viento correspondientes a la serie sintética de oleaje en PR2. (b) Régimen extremal anual de viento en PR2.

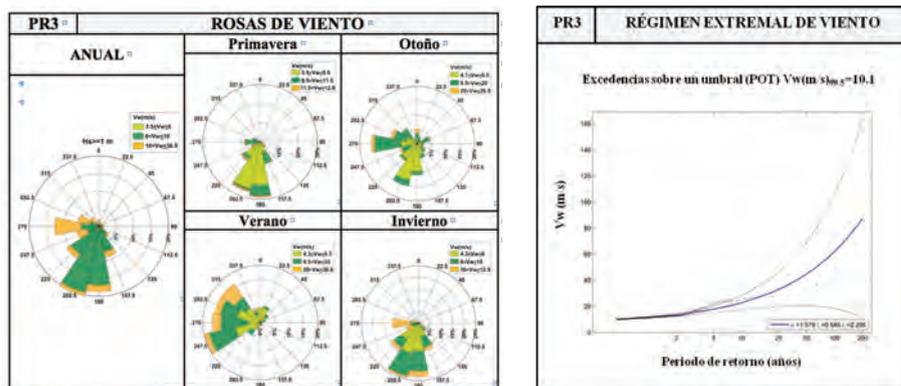


Figura 8. (a) Rosas de viento correspondientes a la serie sintética de oleaje en PR3. (b) Régimen extremal anual de viento en PR3.

La sobreelevación del nivel medio del mar se estimó mediante el modelo numérico MATO (Posada, 2007; Durán, 2010) a partir de la velocidad y dirección del viento, en celdas situadas a 6-8 kilómetros de la línea de costa. El resultado del modelo es la sobreelevación del nivel medio por marea de tormenta en el tiempo, como se observa en la figura 9a, donde se muestran los resultados para viento procedente de dirección ENE y diferentes intensidades. El valor que se toma como de marea de tormenta es el correspondiente al final de la simulación cuando se considera que el modelo es numéricamente estable y que el flujo representado también lo es. La relación entre marea de tormenta y velocidad del viento es encontrada mediante un ajuste de regresión a los resultados del modelo. Se encontró que la curva de mejor ajuste es una parábola (figura 9b).

A fin de considerar los posibles efectos regionales, se analizaron varias celdas vecinas a las de interés. Se halló que los resultados son similares con diferencia solo de pocos centímetros; aun así se eligió el mayor valor en todos los casos. Dicho valor es considerado constante en toda la malla de cálculo que se utiliza para la propagación del oleaje, simpli-

ficación válida debido a la uniformidad del fondo marino desde la profundidad donde es obtenida la marea de tormenta hasta la costa.

La marea de tormenta correspondiente a un determinado periodo de retorno se estimó como función de la velocidad del viento para ese mismo periodo de retorno, considerando la dirección más frecuente del viento y aplicando la parábola correspondiente para calcular la sobreelevación.

### BATIMETRÍA

Como se ha comentado anteriormente, la configuración del fondo marino en el estado de Campeche se caracteriza por su uniformidad y poca profundidad hasta varios kilómetros de la línea de costa. Frente a las zonas de estudio, la batimétrica de 5 m de profundidad se encuentra a una distancia de 4-14 km de la costa, y para alcanzar los 20 m de profundidad se tienen que recorrer en torno a 40 km.

La construcción de la batimetría es importante como dato base de entrada en la aplicación del modelo numérico de propagación de oleaje y la calidad de ésta condiciona en gran medida la validez del análisis. Por tan-

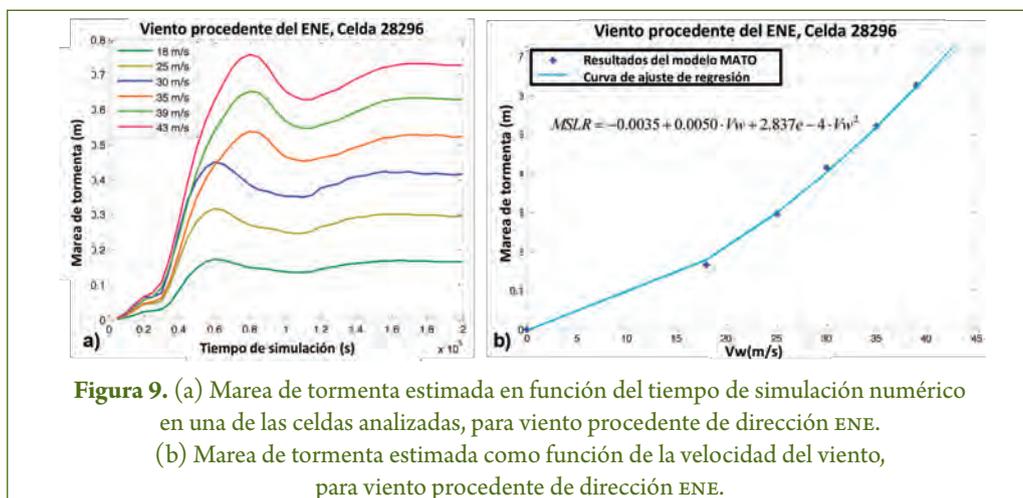


Figura 9. (a) Marea de tormenta estimada en función del tiempo de simulación numérico en una de las celdas analizadas, para viento procedente de dirección ENE. (b) Marea de tormenta estimada como función de la velocidad del viento, para viento procedente de dirección ENE.

to, se ha realizado una cuidadosa reconstrucción a partir de: a) datos medidos in situ, b) la digitalización de una batimetría regional, que cubre hasta 6 m de profundidad, realizada por la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, en julio de 2008 (Már-

quez *et al.*, 2008) y c) la digitalización de la *Carta Náutica 28260 correspondiente al Golfo de México-Barra Tupilco a Isla Piedra, año 1981*, para reproducir las profundidades superiores a 6 m. El resultado se presenta en las figuras 10 a al 12.

## MODELO DE PROPAGACIÓN DE OLAJE

### DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO DE PROPAGACIÓN

El modelo numérico que se utiliza para conocer las características del oleaje en las

proximidades de la costa es el OLUCA-WAPO, que permite ejecutar una versión del Ref-Dif (Kirby & Dalrymple, 1994) y resuelve la ecuación modificada de la pendiente suave (Modified Mild Slope) mediante una

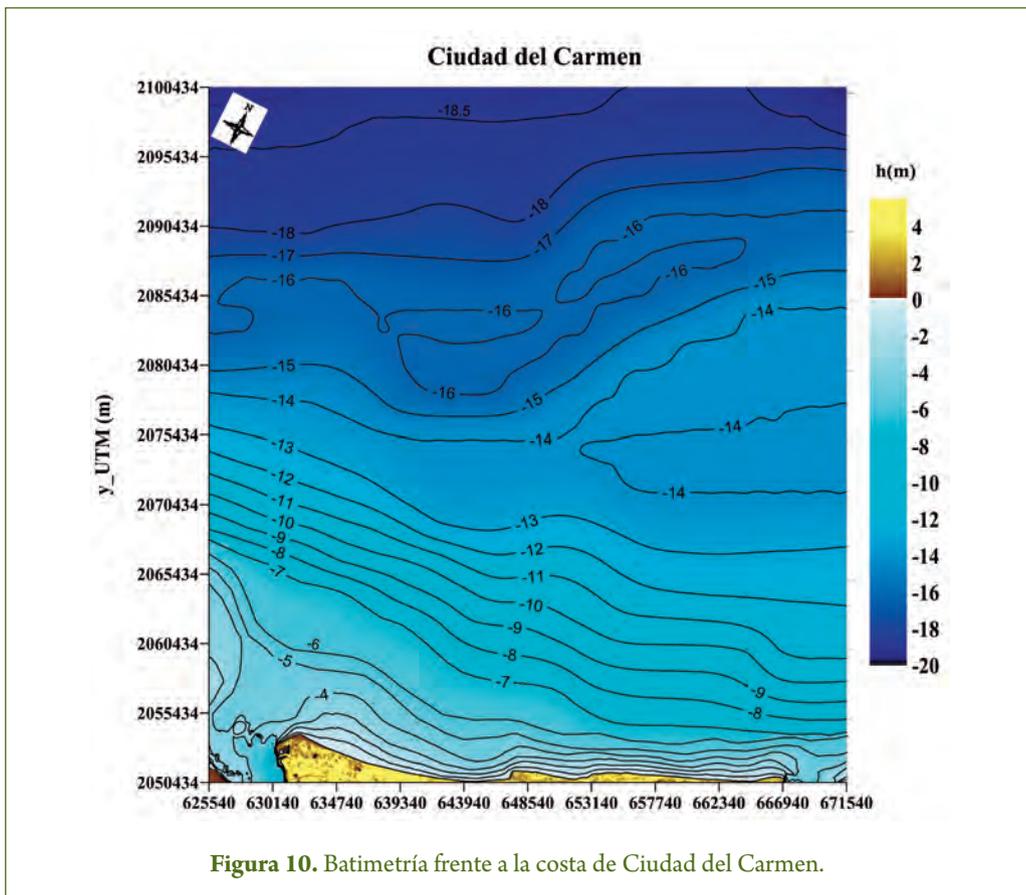


Figura 10. Batimetría frente a la costa de Ciudad del Carmen.

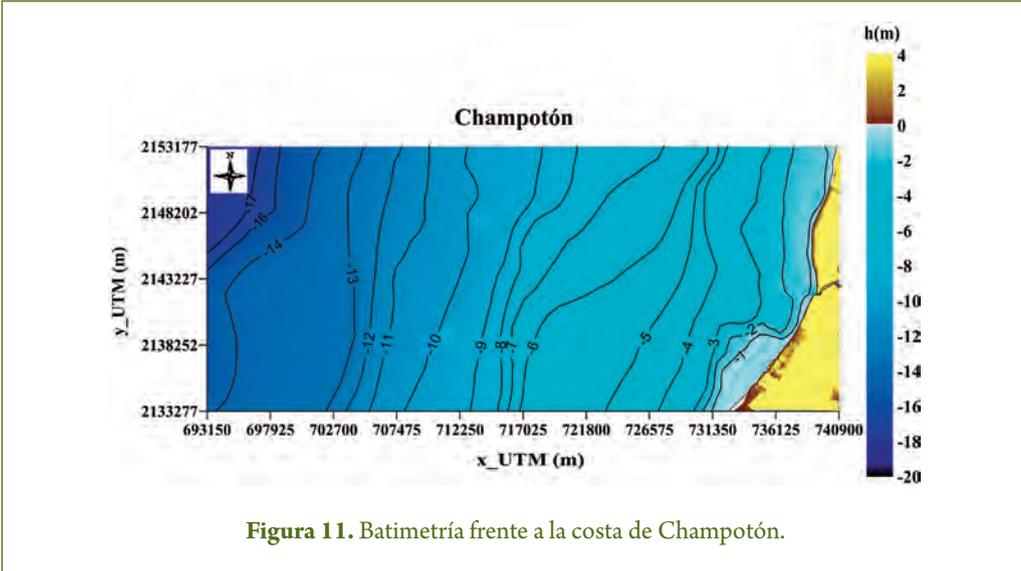


Figura 11. Batimetría frente a la costa de Champtón.

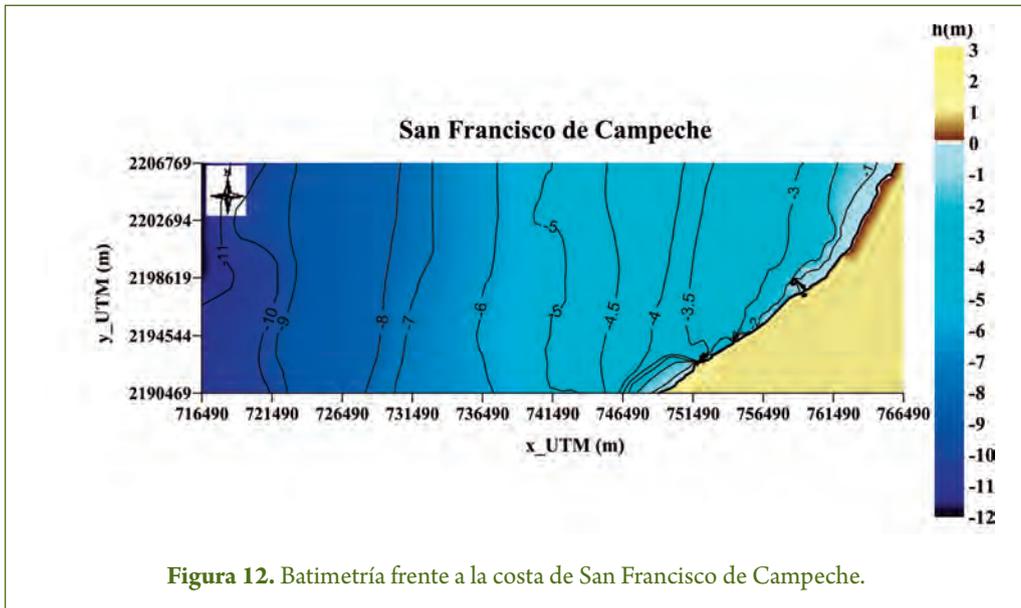


Figura 12. Batimetría frente a la costa de San Francisco de Campeche.

aproximación parabólica (Silva, 2006). Este modelo reproduce adecuadamente los procesos de transformación del oleaje que tienen lugar de acuerdo con las características locales de la zona de estudio, los cuales vienen principalmente representados por los

fenómenos de someramiento y refracción.

Las simplificaciones/hipótesis de la propagación son: oleaje monocromático, definido por  $H$  (altura de ola),  $T$  (periodo de oleaje) y  $\theta$  (dirección de oleaje) y sobreelevación del nivel medio del mar uniforme ( $M_t$ ).

## DATOS DE ENTRADA AL MODELO DE PROPAGACIÓN

Los datos de entrada al modelo numérico son:

1. Batimetría: con una resolución de 25 m (tanto en x como en y) de acuerdo al funcionamiento adecuado del modelo y el tamaño máximo admisible de las mallas de cálculo.
2. Datos de oleaje: H, T y  $\theta$  (obtenidos de la predicción de oleaje en los puntos PR1, PR2 y PR3 de la figura 1).

3. Marea de tormenta: Mt. En este caso solo fueron considerados los efectos de viento para poder integrar toda la base de datos de vientos

## DATOS DE SALIDA DEL MODELO DE PROPAGACIÓN

El dato principal de salida que se utiliza es la altura de ola en cada nodo de la malla de cálculo.

## ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Las tablas 1 y 2 muestran los casos de oleaje representativos, de acuerdo a la construcción y contorno de entrada del oleaje en cada ma-

lla de cálculo. Algunos de los resultados son presentados en el siguiente apartado.

**Tabla 1.** Casos de oleaje representativos. Anual.

Anual	Ciudad del Carmen				Champotón				San Francisco Campeche				
	Tr 10 años	H (m)	T (s)	Dirección (°)	Mt (m)	H (m)	T (s)	Dirección (°)	Mt (m)	H (m)	T (s)	Dirección (°)	Mt (m)
2	2.5	7	10	0; 292.5 315; 337.5	0.1	2	9	202.5-337.5	0.2	3	7.5 10	225-337.5	0.2
5	4	7	10	0; 337.5 315	0.5	5	9	202.5- 337.5	0.8	5.5	7.5 10	225-337.5	1.3
10	6.5	7	10	0; 337.5 315	0.7	6.5	9	202.5- 337.5	1.2	7	7.5 10	225-337.5	1.8
20	8	7	10	0; 337.5 315	0.9	8	9	202.5- 337.5	1.5	8	7.5 10	225-337.5	2
50	11.4	7	10	0; 337.5 315	1.2	14	9	202.5- 337.5	1.8	10	7.5 10	225-337.5	2.6

**Tabla 2.** Casos de oleaje representativos. Estacional.

Anual	Ciudad del Carmen				Chamotón				San Francisco Campeche				
	Tr 10 años	H (m)	T (s)	Dirección (o)	Mt (m)	H (m)	T (s)	Dirección (o)	Mt (m)	H (m)	T (s)	Dirección (o)	Mt (m)
Primavera	1.6	8	8	337.5 0; 292.5	0.7	1.2	6.2	315- 337.5	1.2	1.5	8	292.5-337.5	1.8
Verano	5	8	8	292.5-0 0-67.5	0.7	6	7	202.5-337.5	1.2	6	8	202.5-337.5	1.8
Otoño	4	8 11	8 11	315-337.5 0-67.5	0.7	5	6.5 10	202.5-337.5	1.2	4.5	8	202.5-337.5	1.8
Invierno	2.5	8 11	8 11	337.5 0; 292.5	0.7	1.2	10	202.5-337.5	1.2	1.1	8.5	292.5-337.5	1.8

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las figuras 13 a 17 muestra los resultados de la propagación de oleaje para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20 y 50 años en Ciudad del Carmen.

La tabla 3 muestra los resultados de altura de ola obtenidos en las coordenadas identificadas por los puntos P1-P4 en los mapas de oleaje (figuras 13 a 17), a una distancia de 1 km de la línea de costa.

Las figuras 18 a 21 a muestran escenarios de oleaje seleccionados por estación para periodo de retorno de 10 años, la tabla 4 resume los valores en los puntos P1 a P4.

Los resultados de altura de ola en Chamotón se presentan en la figuras 22 a 27, mientras que la tabla 5 resume los puntos P1 a P4 que se señalan en las mismas figuras.

En las figuras 28 a 31 se muestran algunos casos seleccionados de oleaje para periodo de retorno de 10 años, por estaciones; la tabla 6 presenta los valores específicos de los puntos P1 a P4 de la figura antes mencionadas.

Finalmente, las figuras 32 a 37 presenta los mapas de oleaje para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20 y 50 años para San Francisco de Campeche y la tabla 7 el resumen correspondiente.

Al igual que en los casos anteriores, se ha seleccionado el periodo de retorno de 10 años para mostrar la variabilidad estacional del campo de oleaje, esto se muestra en las figuras 38 a 41 y los valores resumen se enlistan en la tabla 8.

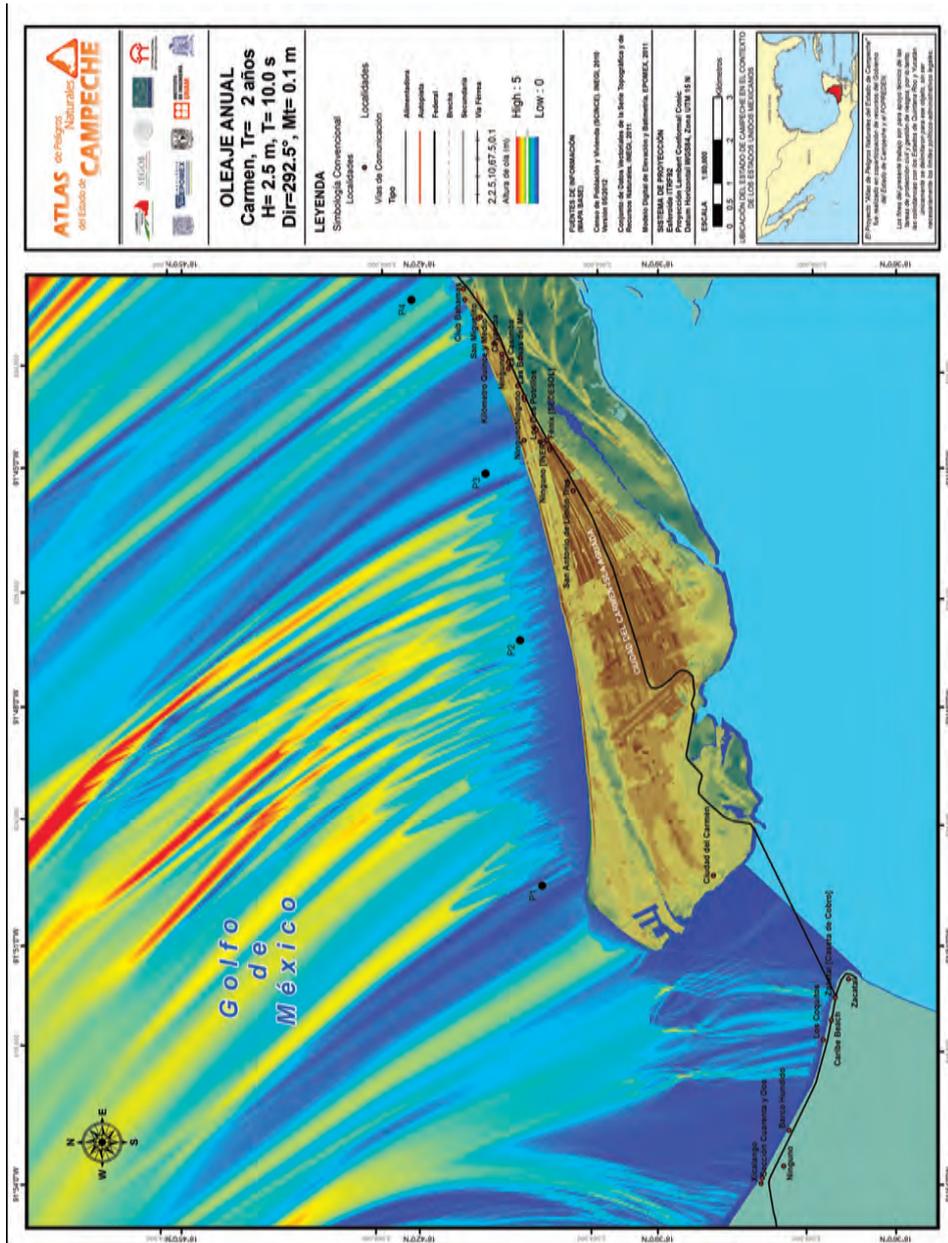


Figura 13. Altura de ola asociada a  $Tr=2$  años en la costa de Ciudad del Carmen, Campeche.



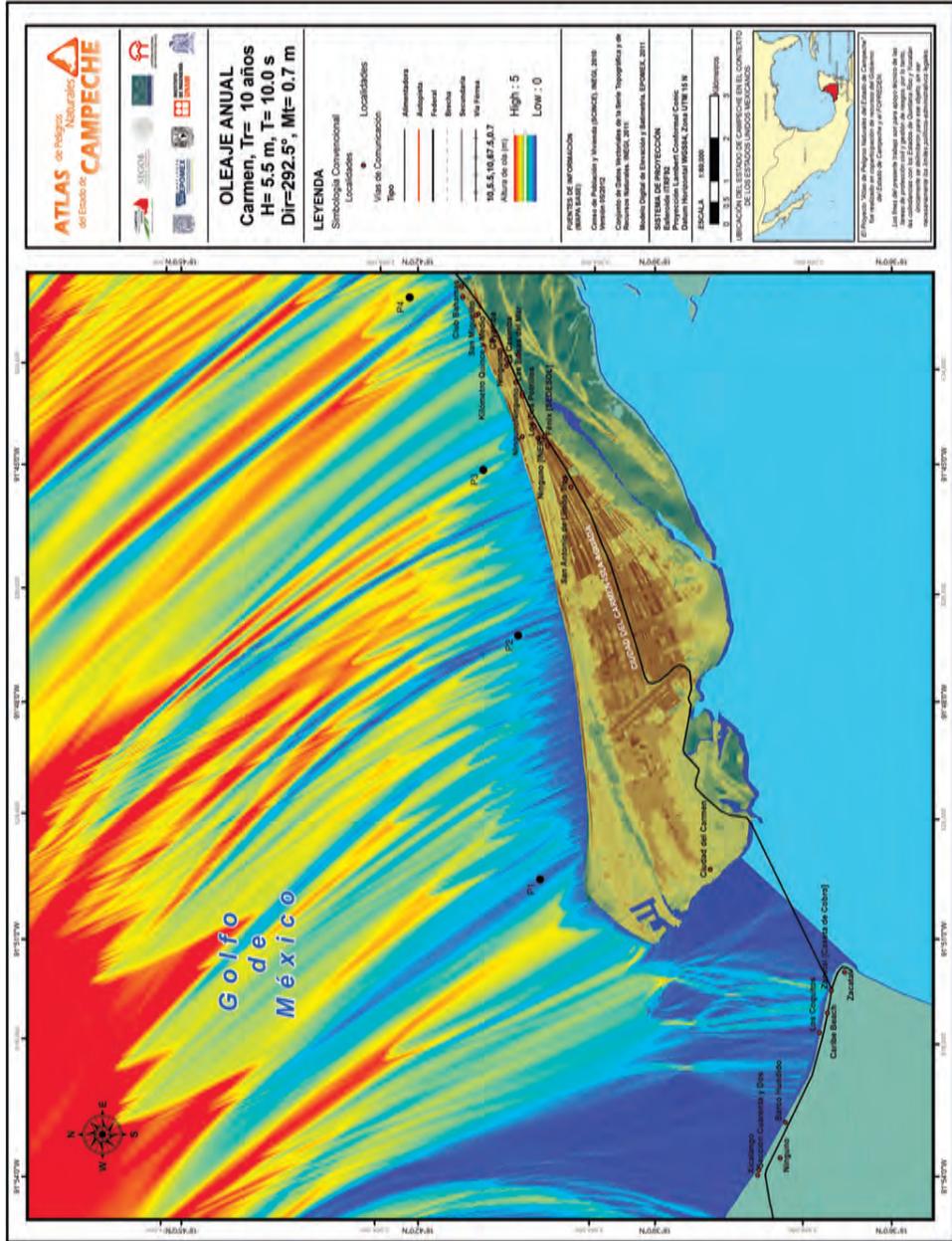


Figura 15. Altura de ola asociada a Tr=10 años en la costa de Ciudad del Carmen, Campeche.

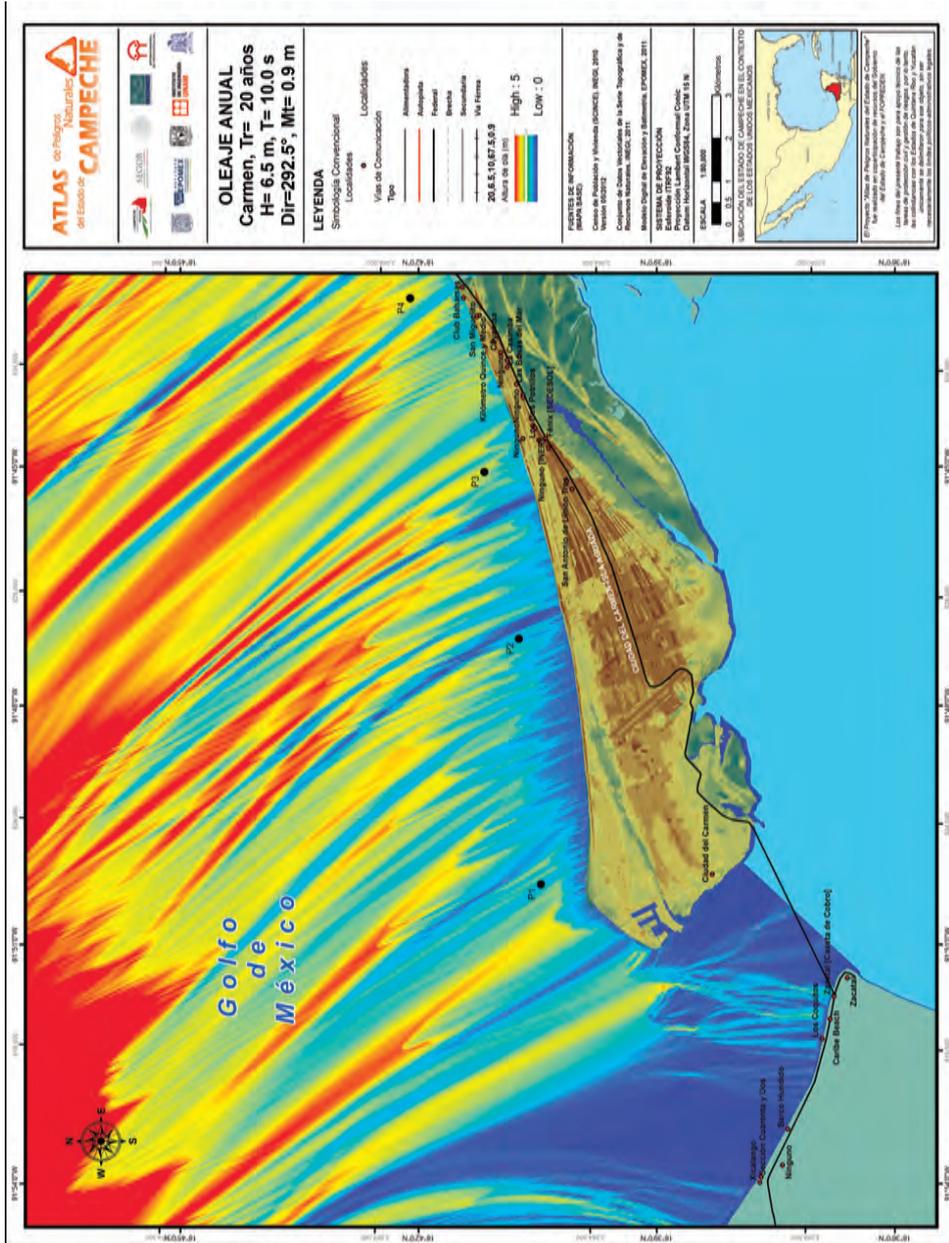


Figura 16. Altura de ola asociada a  $T_r=20$  años en la costa de Ciudad del Carmen, Campeche.

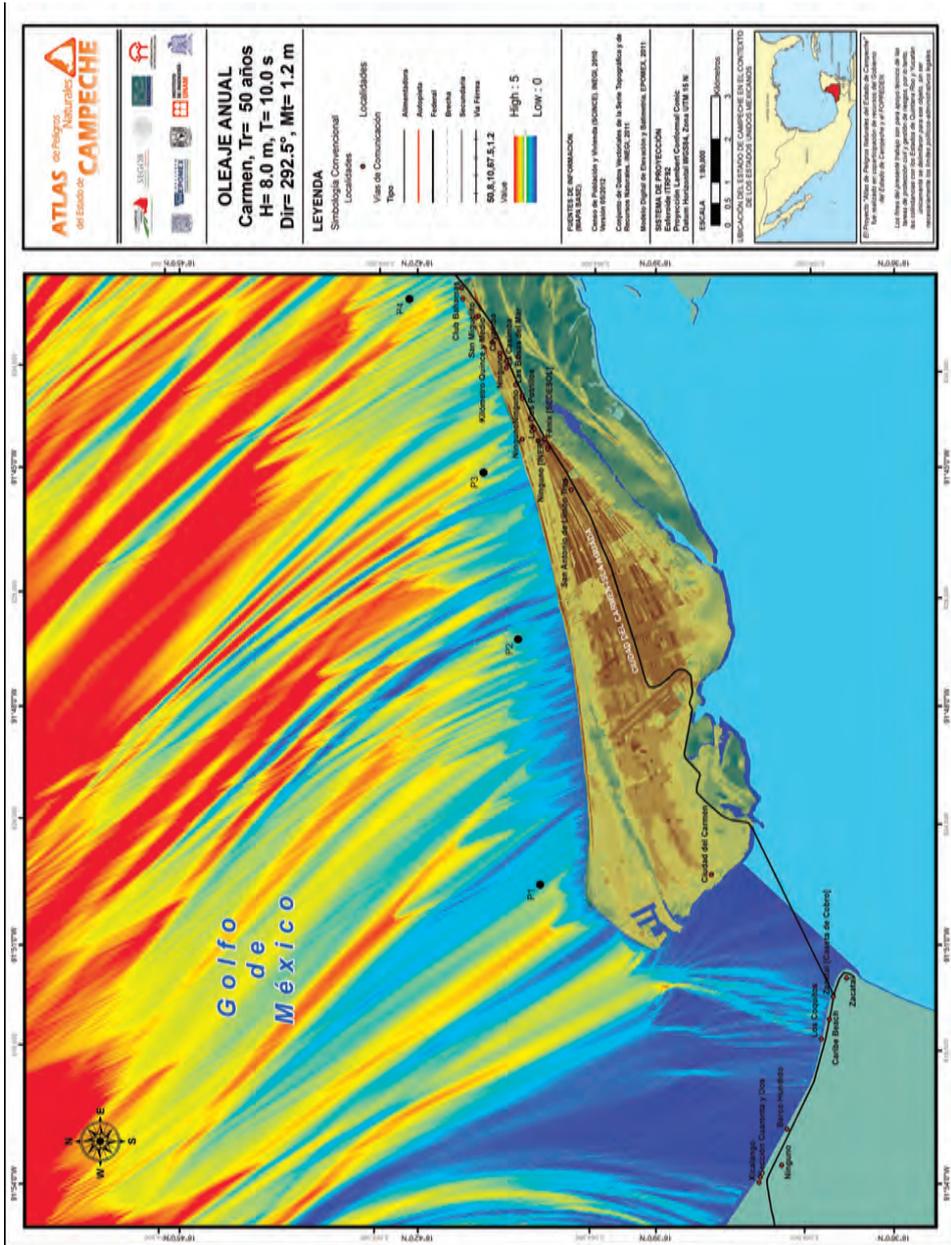


Figura 17. Altura de ola asociada a  $Tr=50$  años en la costa de Ciudad del Carmen, Campeche..

**Tabla 3.** Altura de ola en los puntos P1, P2, P3 y P4, en la costa de Ciudad del Carmen. Anual.

	Tr=2 años	Tr=5 años	Tr=10 años	Tr=20 años	Tr=50 años	Tr=50 años
	H=2.5 m T=10s Dir= 292.5° Mt=0.1 m	H=4 m T=10s Dir= 292.5° Mt=0.5 m	H=5.5 m T=10s Dir= 292.5° Mt=0.7 m	H=6.5 m T=10s Dir= 292.5° Mt=0.9 m	H=8.0 m T=10s Dir= 292.5° Mt=1.2 m	H=8.0 m T=10s Dir= 225.0° Mt=1.2 m
P1 X=622608; Y=2065186 (UTM)	1.2 m	1.1 m	0.7 m	1.7 m	1.5 m	2.5 m
P2 X=628022; Y=2065733 (UTM)	0.8 m	1.0 m	1.8 m	1.2 m	1.7 m	2.1 m
P3 X=631699; Y=2066563 (UTM)	1.4 m	1.0 m	2.0 m	1.8 m	1.9 m	2.0 m
P4 X=635521; Y=2068314 (UTM)	2.0 m	1.7 m	2.5 m	2.6 m	2.5 m	2.0 m

**Tabla 4.** Altura de ola en los puntos P1, P2, P3 y P4, en la costa de Ciudad del Carmen. Estacional.

	Tr= 10 años			
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
	H=1.6 m T=8s Dir= 292.5° Mt=0.7 m	H=5 m T=8s Dir= 292.5° Mt=0.7 m	H=4 m T=8s Dir= 292.5° Mt=0.7 m	H=2.5 m T=8s Dir= 292.5° Mt=0.7 m
P1 X=622608; Y=2065186 (UTM)	0.5 m	2.2 m	2.5 m	1.0 m
P2 X=628022; Y=2065733 (UTM)	1.4 m	1.6 m	1.0	1.4 m
P3 X=631699; Y=2066563 (UTM)	1.4 m	1.6 m	1.0	1.9 m
P4 X=635521; Y=2068314 (UTM)	0.3 m	2.9 m	1.8 m	1.2 m

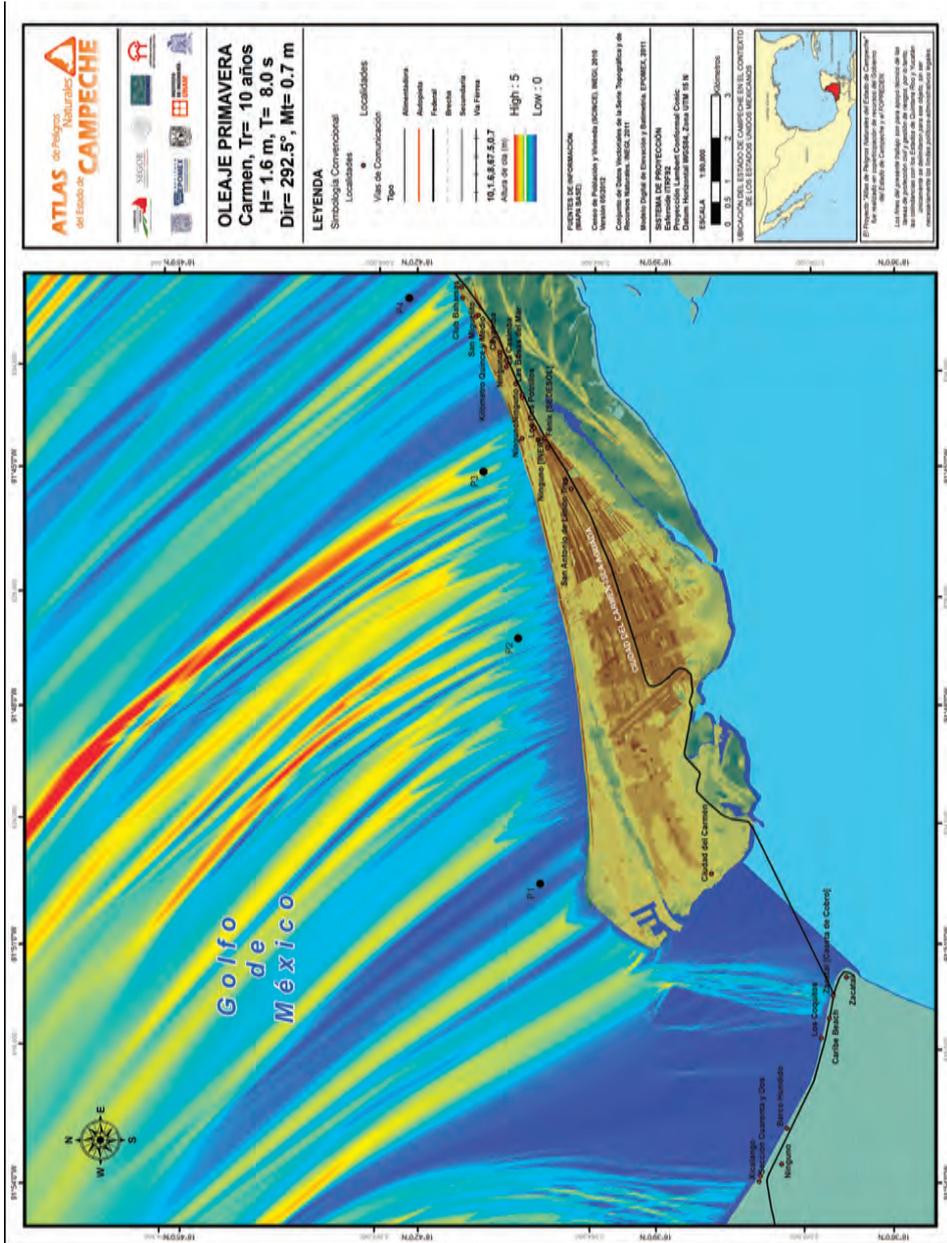


Figura 18. Altura de ola asociada a  $T_r=10$  años en la costa de Ciudad del Carmen-Primavera.

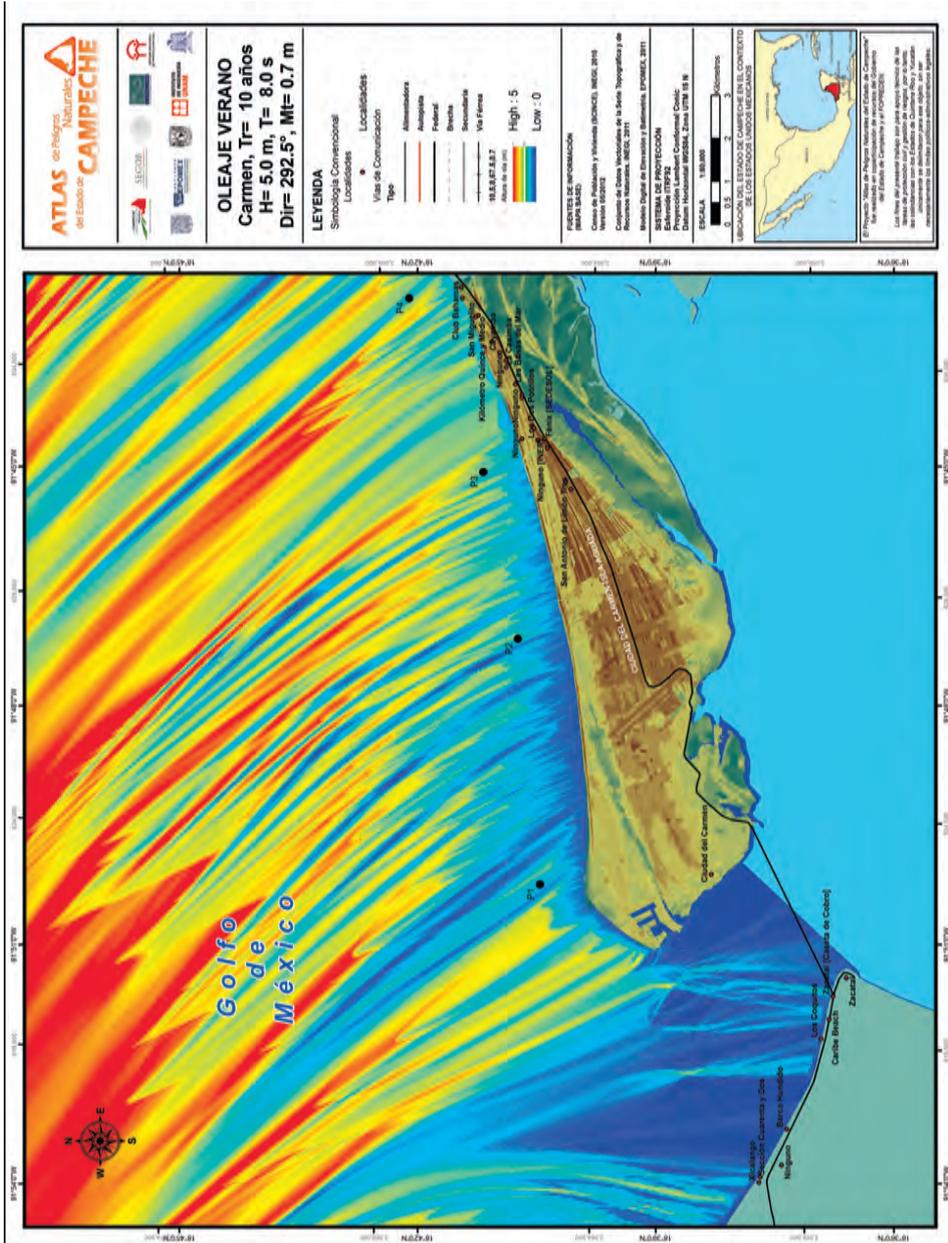


Figura 19. Altura de ola asociada a Tr=10 años en la costa de Ciudad del Carmen-Verano.

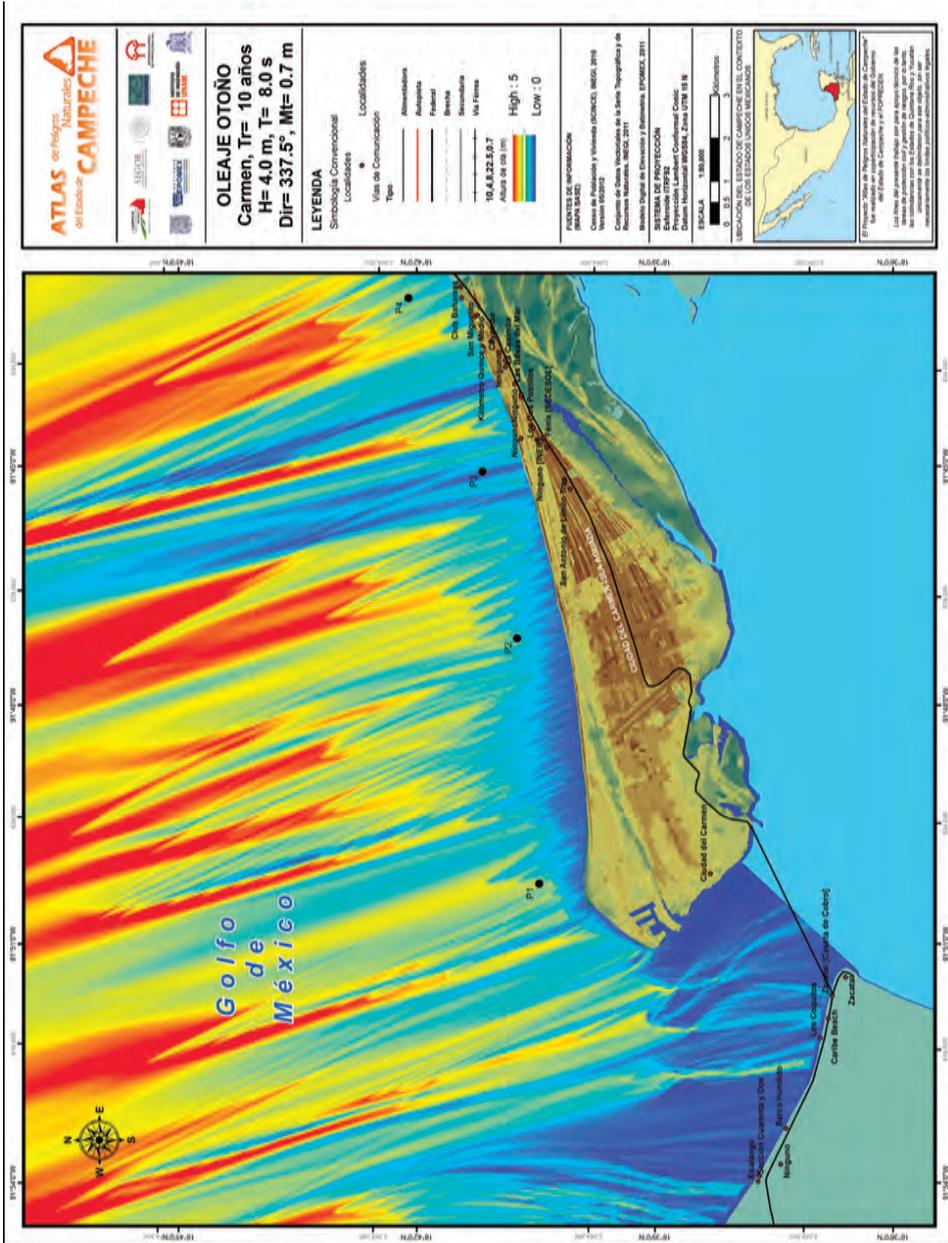


Figura 20. Altura de ola asociada a Tr=10 años en la costa de Ciudad del Carmen-Otoño.

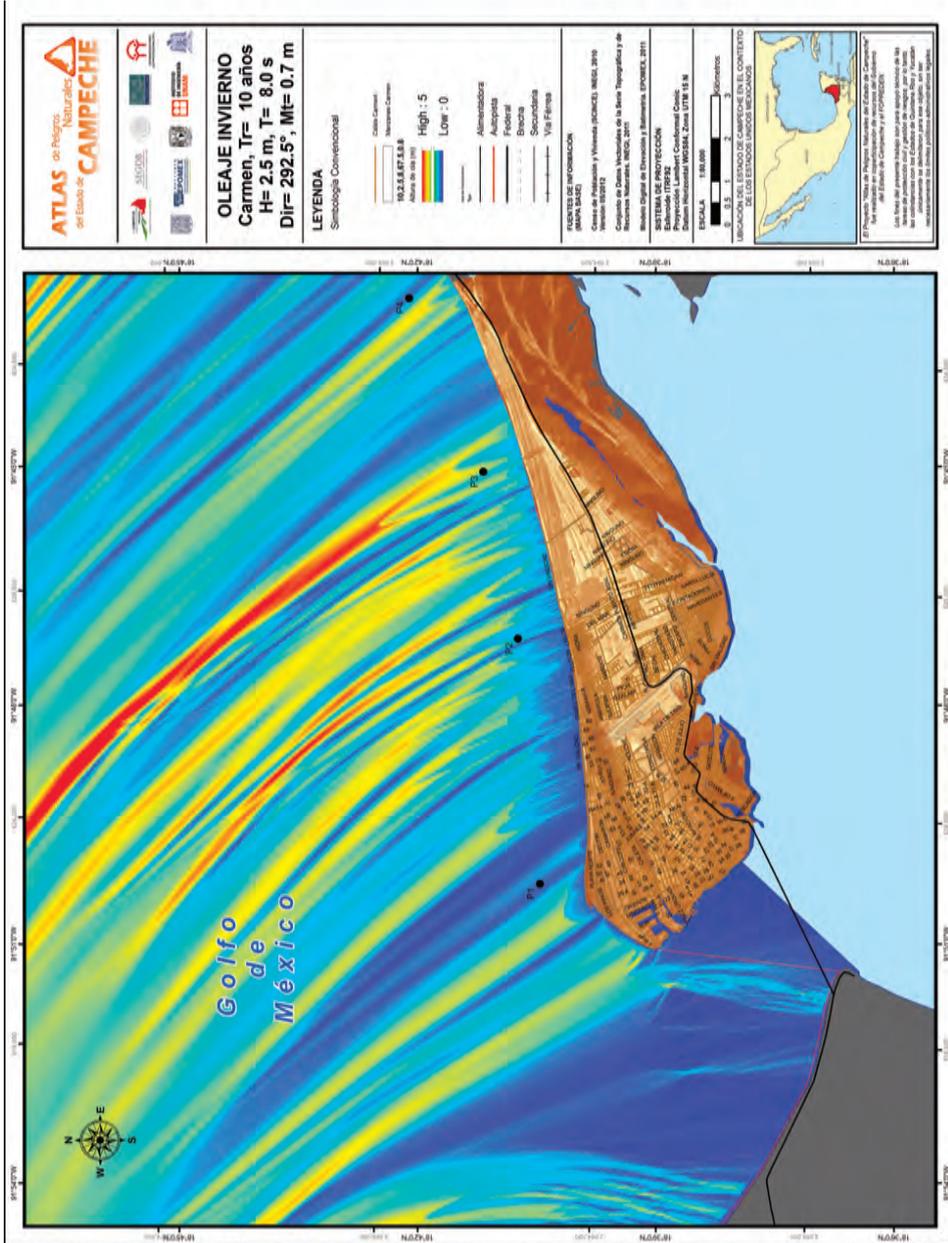


Figura 21. Altura de ola asociada a Tr=10 años en la costa de Ciudad del Carmen-Invierno.

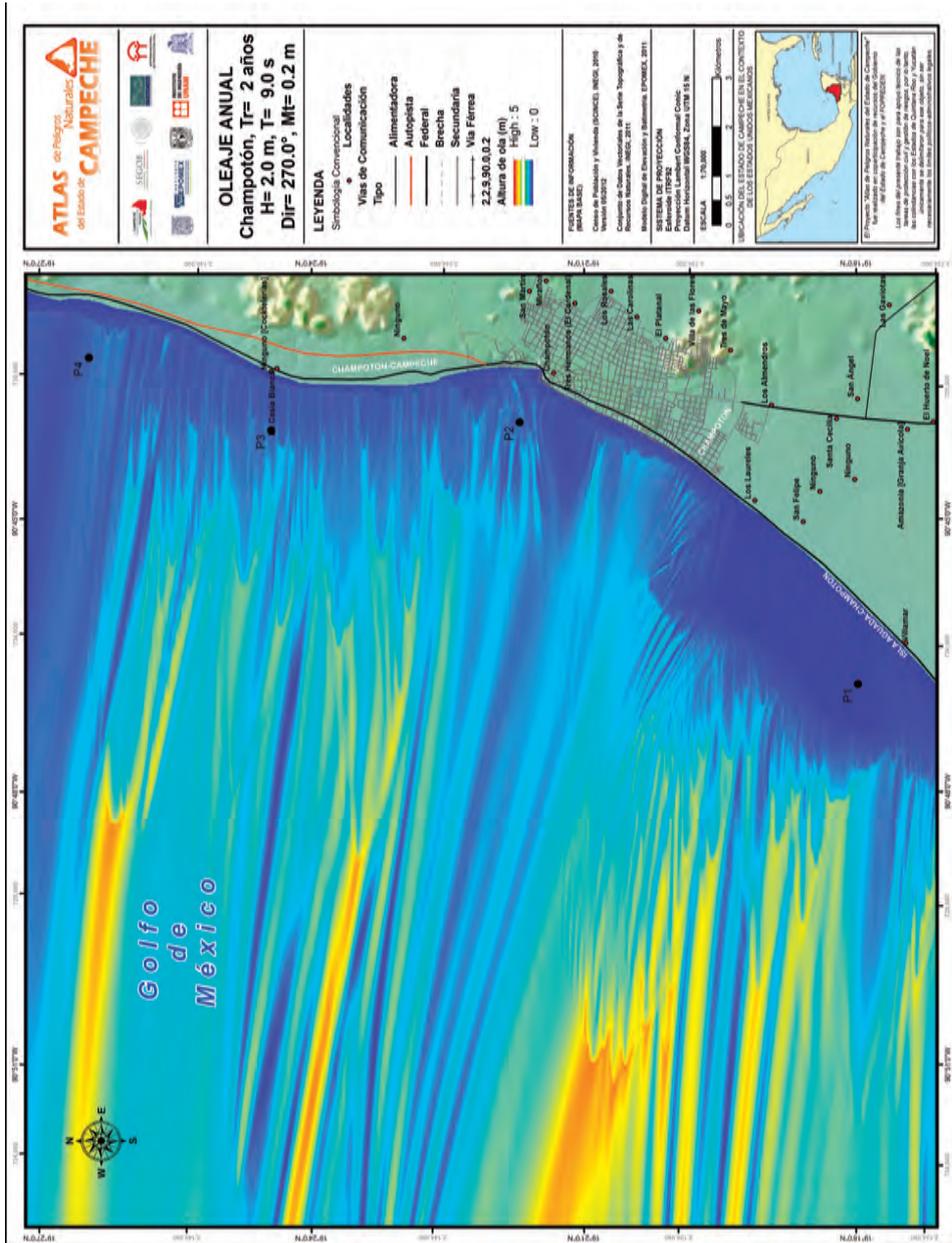


Figura 22. Altura de ola asociada a  $T_r=2$  años en la costa de Champotón- Anual.

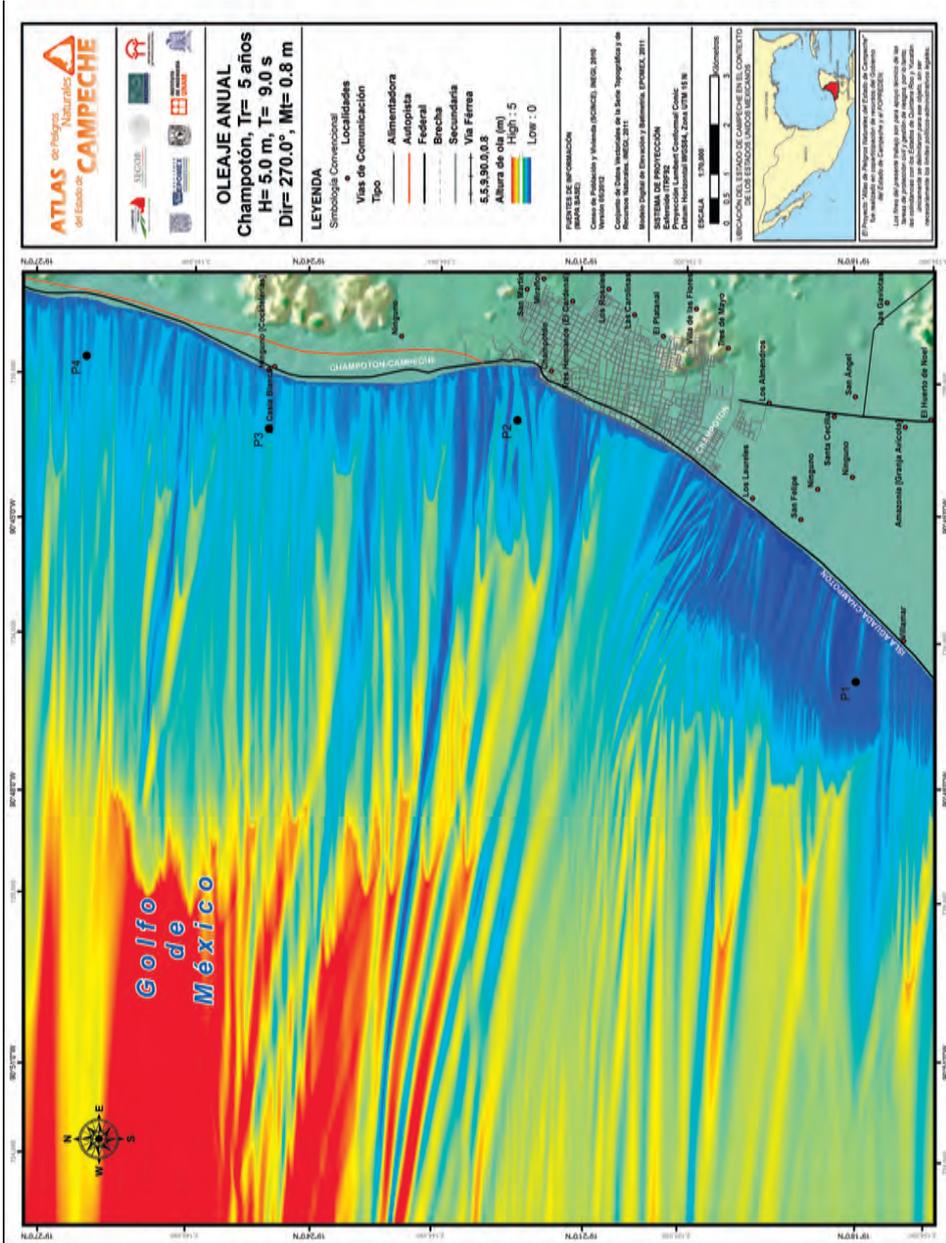


Figura 23. Altura de ola asociada a  $T_r=5$  años en la costa de Champotón- Anual.

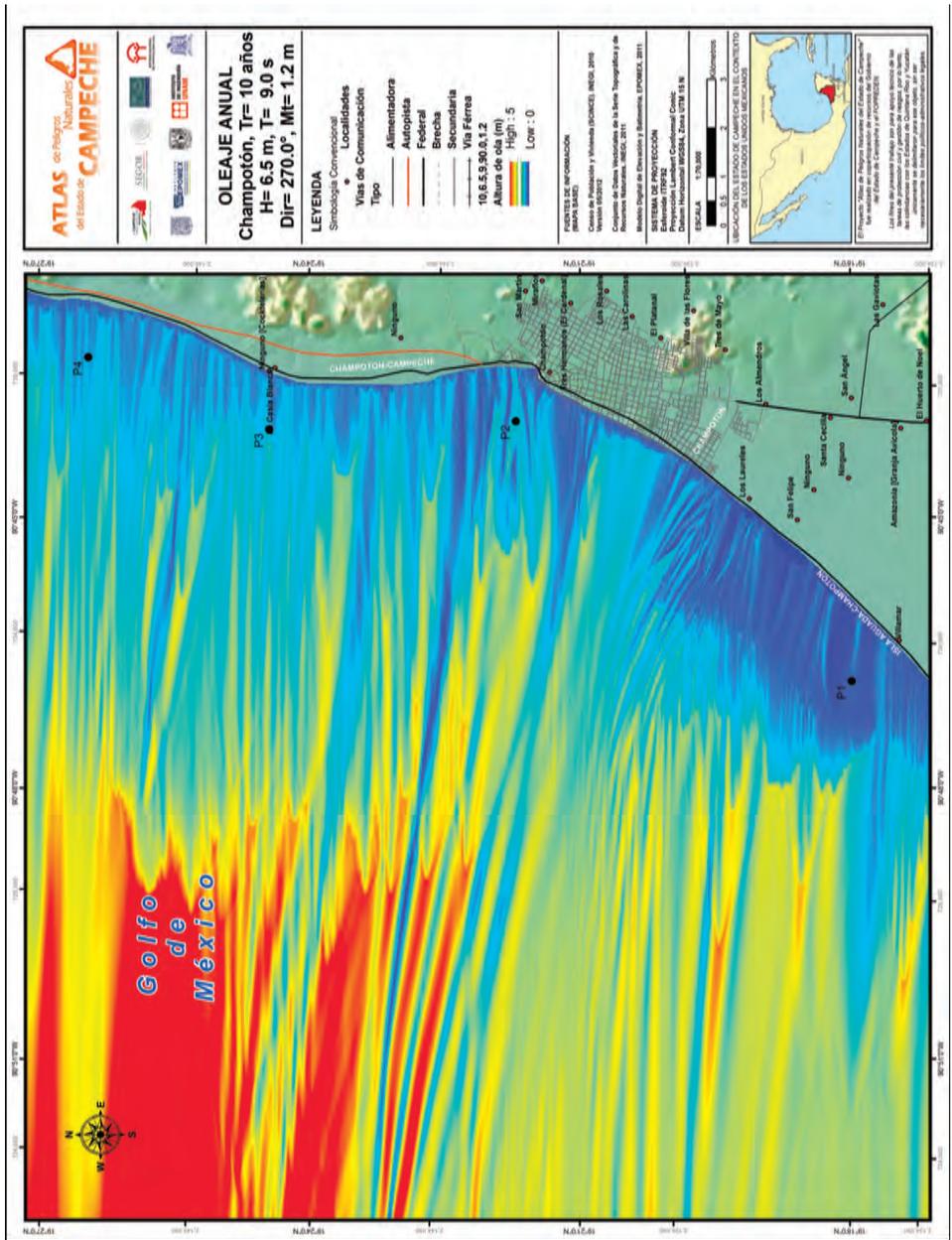


Figura 24. Altura de ola asociada a  $T_r=10$  años en la costa de Champotón- Anual.

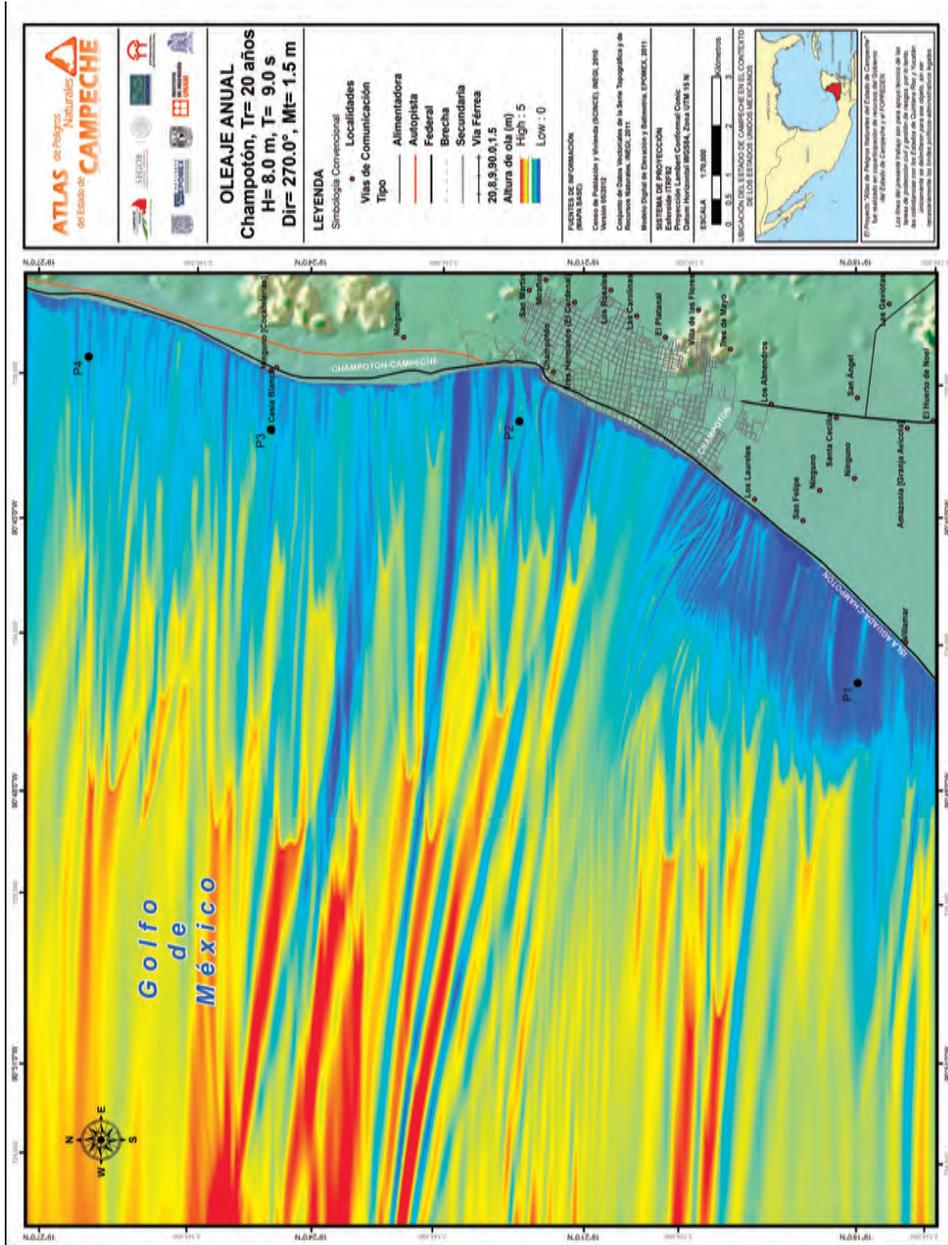


Figura 25. Altura de ola asociada a Tr=20 años en la costa de Champotón- Anual.

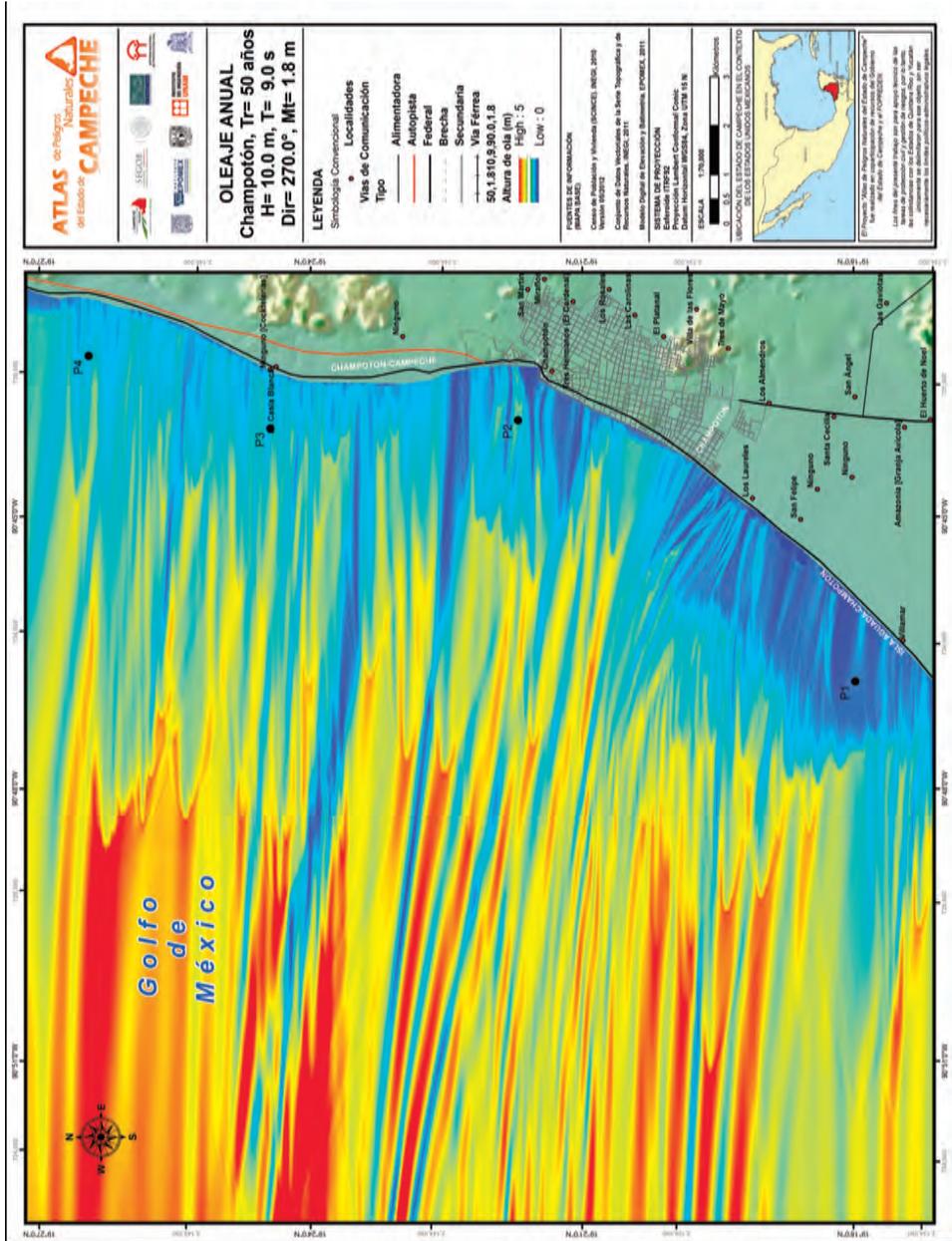


Figura 26. Altura de ola asociada a  $T_r=50$  años en la costa de Champotón- Anual.

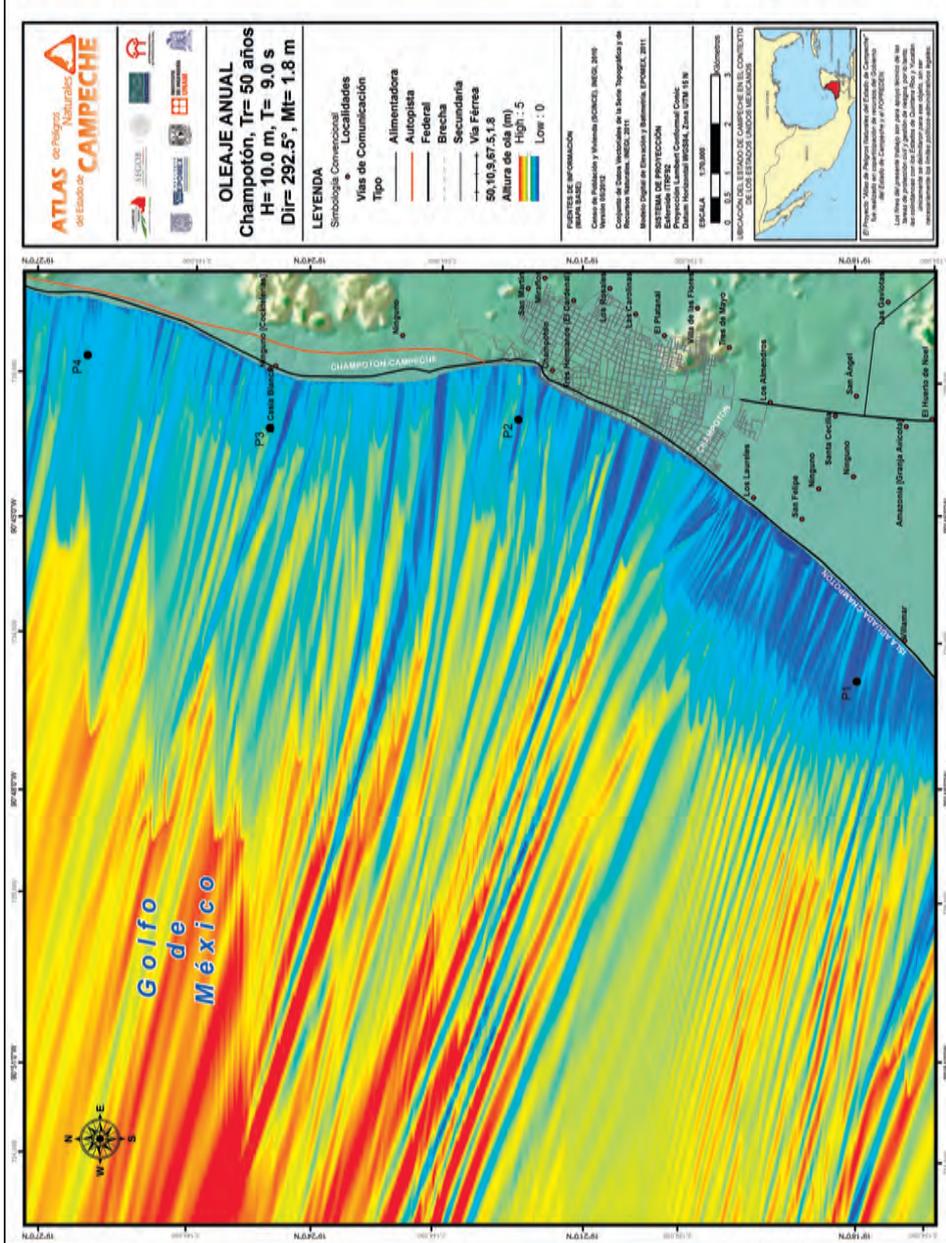


Figura 27. Altura de ola asociada a  $Tr=50$  años en la costa de Champotón- Anual.

**Tabla 5.** Altura de ola en los puntos P1, P2, P3 y P4, en la costa de Champotón. Anual.

	Tr=2 años	Tr=5 años	Tr=10 años	Tr=20 años	Tr=50 años	Tr=50 años
	H=2 m T=9s Dir= 270° Mt=0.2 m	H=5 m T=9s Dir= 270° Mt=0.8 m	H=6.5 m T=9s Dir= 270° Mt=1.1 m	H=8 m T=9s Dir= 270° Mt=1.5 m	H=10 m T=9s Dir= 270° Mt=1.8 m	H=10 m T=9s Dir= 292.5° Mt=1.8 m
P1 X=733250; Y=2135477 (UTM)	0.6 m	0.5 m	0.2 m	0.8 m	0.7 m	0.9 m
P2 X=738200; Y=2142427 (UTM)	0.9 m	0.6 m	0.3 m	1.9 m	1.0 m	2.0 m
P3 X=737975; Y=2147477 (UTM)	0.6 m	0.6 m	0.8 m	1.9 m	1.8 m	1.5 m
P4 X=739325; Y=2151202 (UTM)	0.6 m	0.7 m	0.7 m	1.0 m	1.4 m	1.2 m

**Tabla 6.** Altura de ola en los puntos P1, P2, P3 y P4, en la costa de Champotón. Estacional.

	Tr= 10 años			
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
	H=1.2 m T=6.2s Dir= 315° Mt=1.2 m	H=6 m T=7s Dir= 270° Mt=1.2 m	H=6 m T=10s Dir= 315.5° Mt=1.2 m	H=1.2 m T=10s Dir= 292.5° Mt=1.2 m
P1 X=733250; Y=2135477 (UTM)	0.5	0.7	0.5	0.6
P2 X=738200; Y=2142427 (UTM)	1.1	0.9	0.7	0.3
P3 X=737975; Y=2147477 (UTM)	1.1	1.6	1.1	0.8
P4 X=739325; Y=2151202 (UTM)	1.1	1.1	1.6	1.5



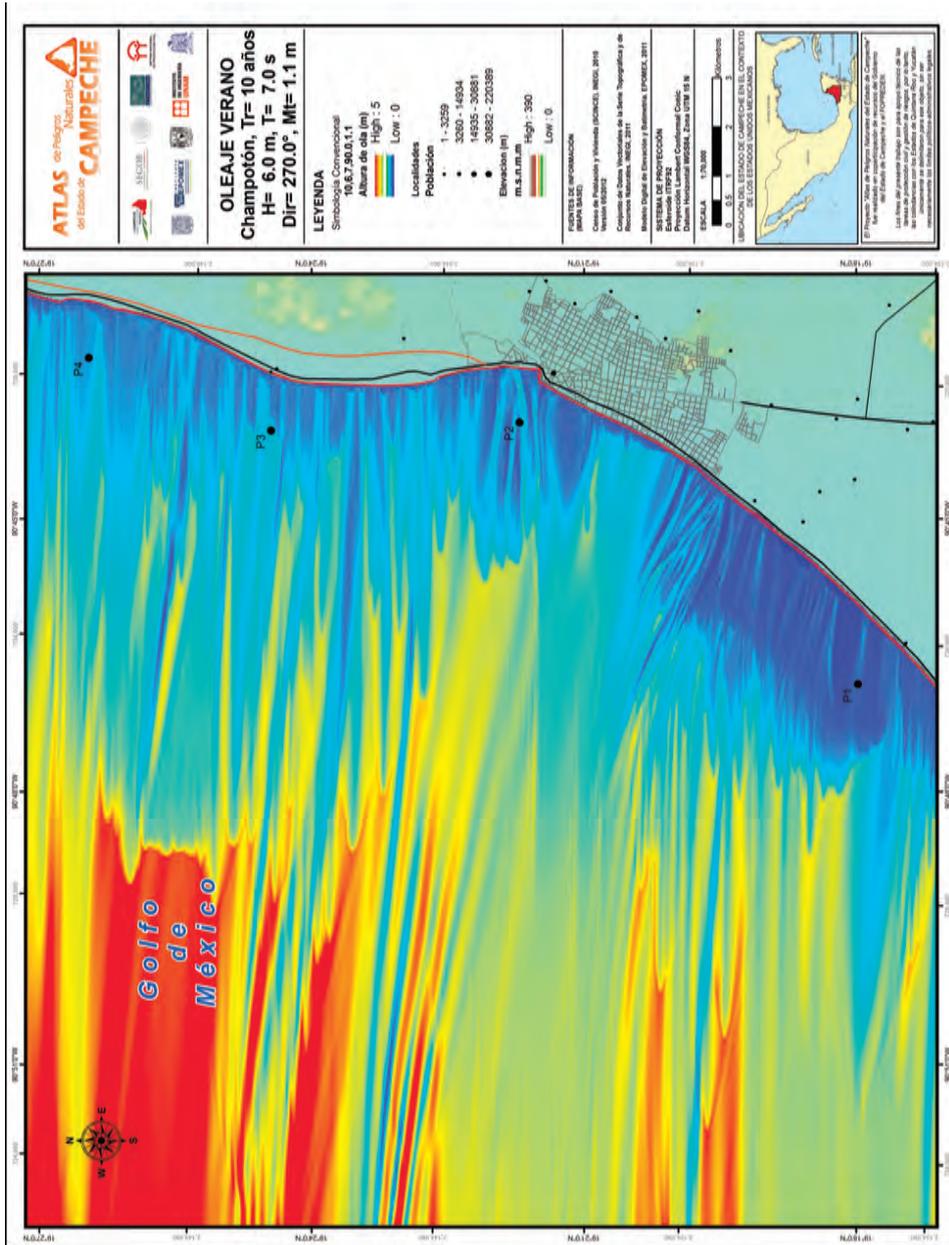


Figura 29. Altura de ola asociada a  $T_r=10$  años en la costa de Chamotón- Verano.

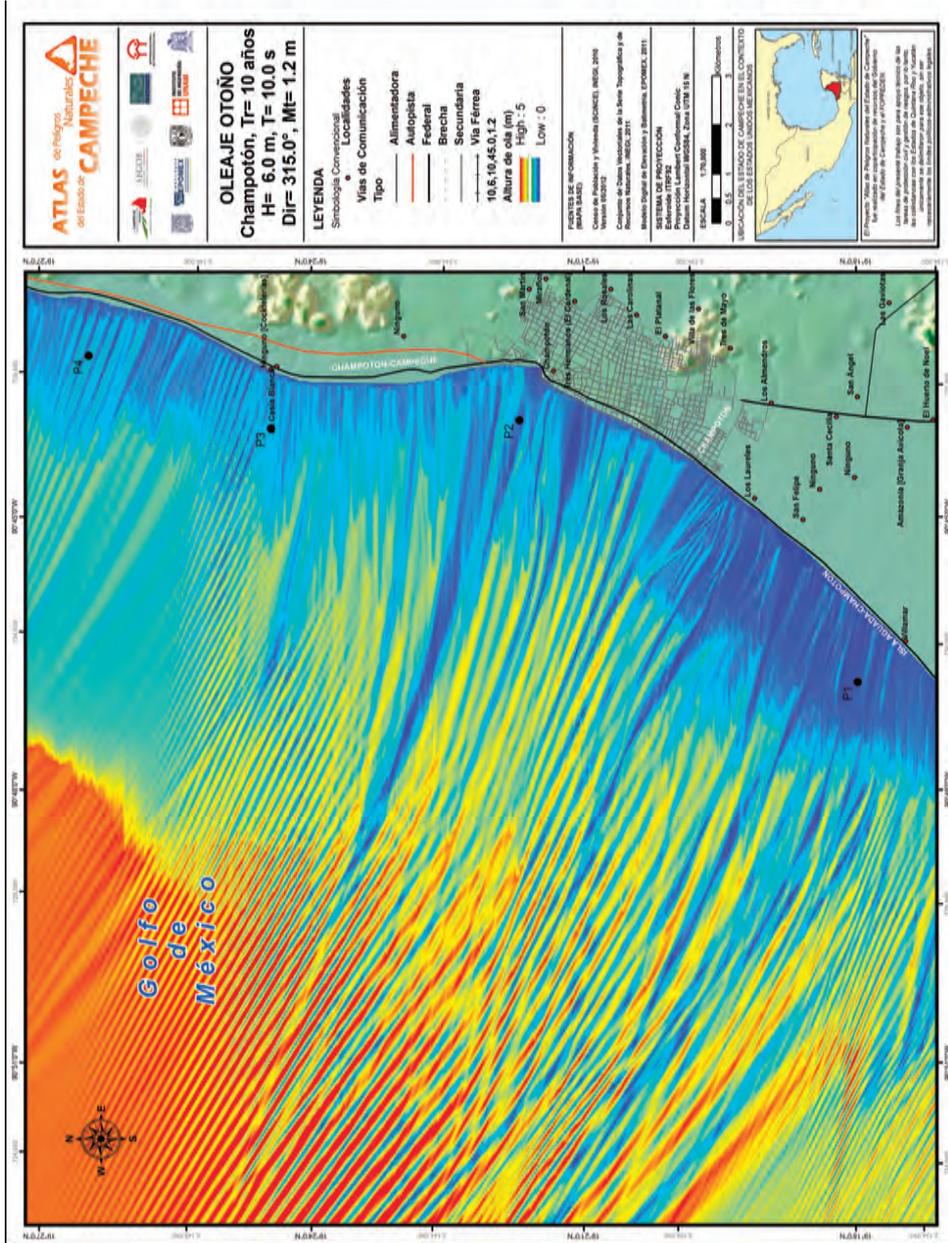


Figura 30. Altura de ola asociada a Tr=10 años en la costa de Champotón- Otoño.

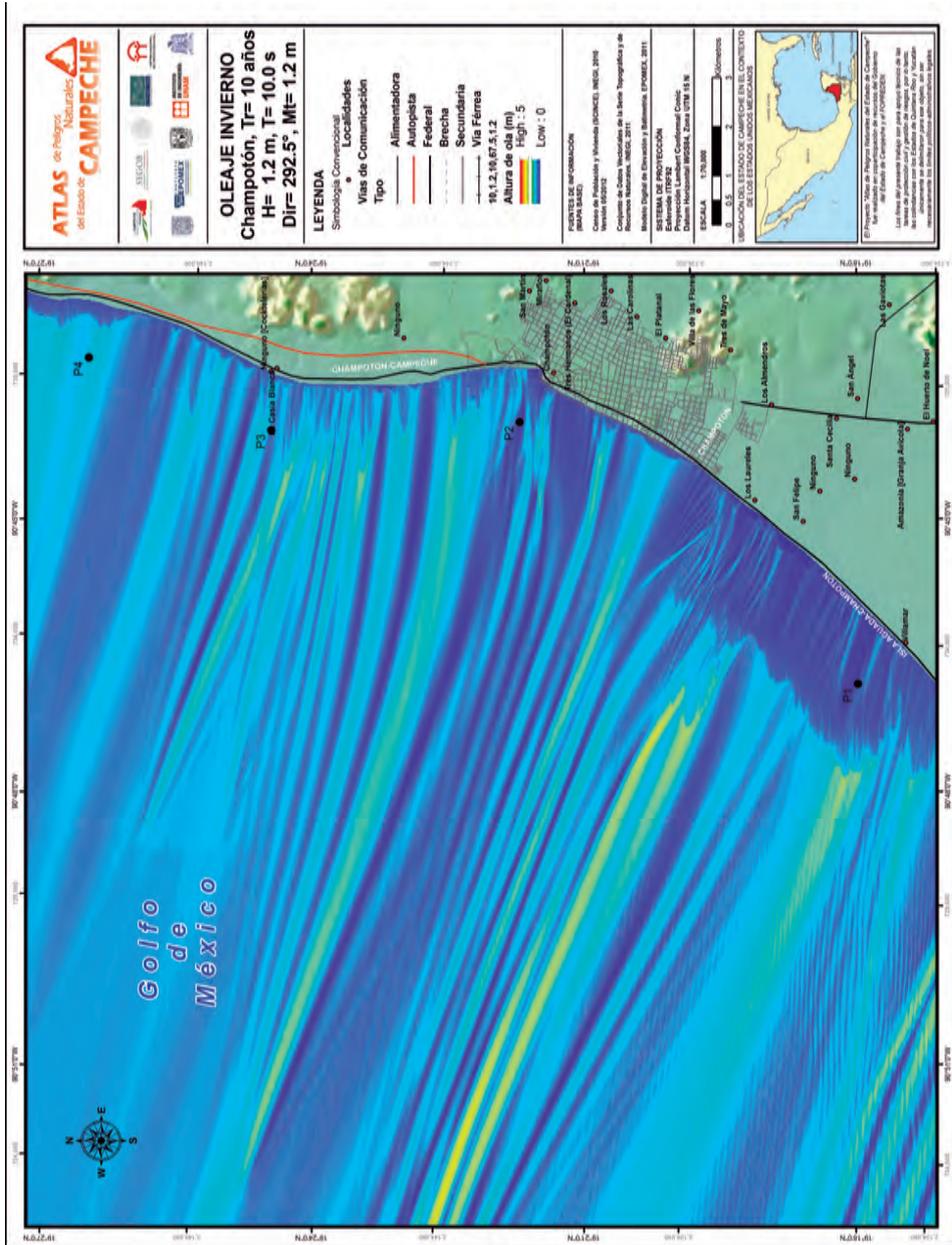


Figura 31. Altura de ola asociada a  $T_r=10$  años en la costa de Champotón- Invierno.

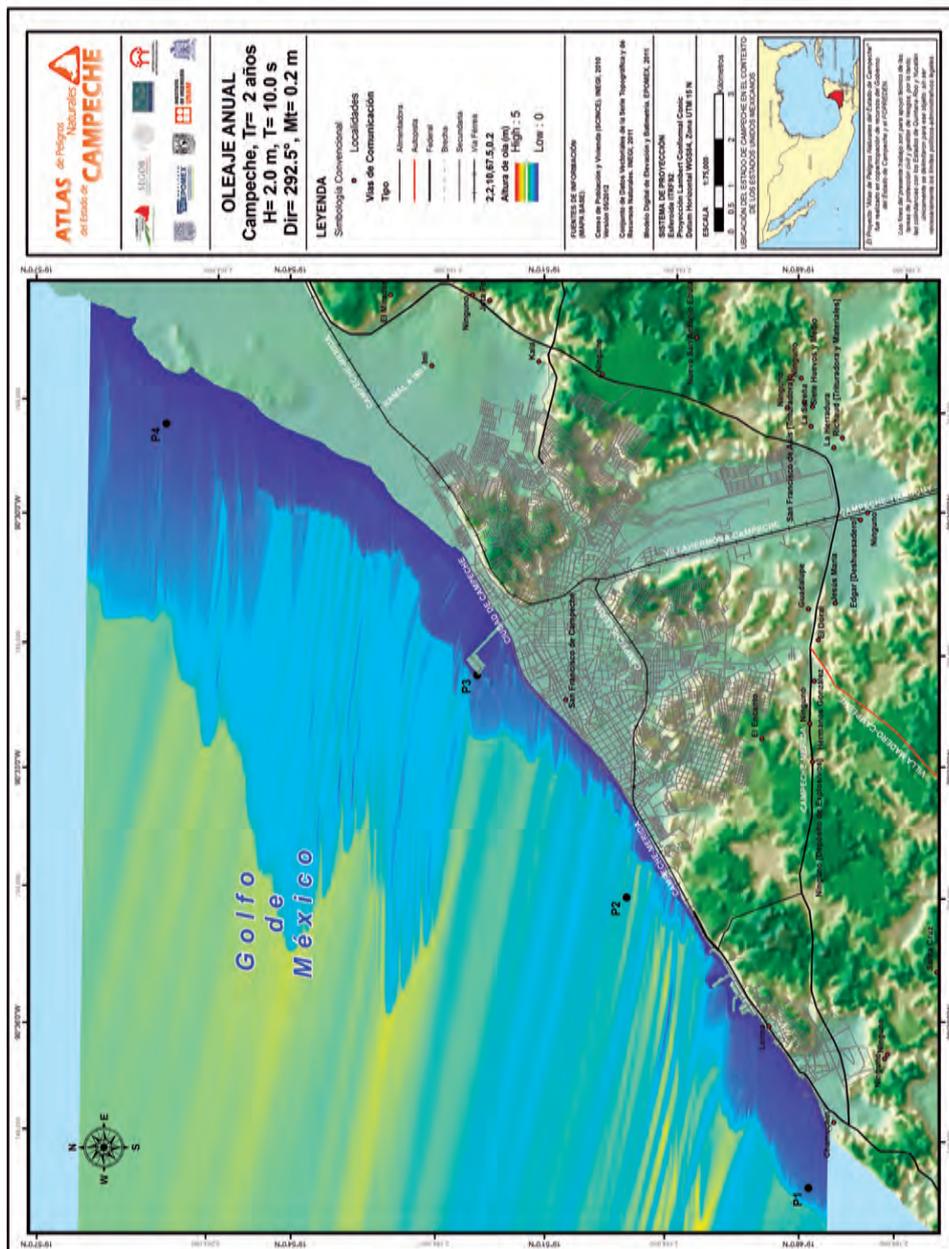


Figura 32. Altura de ola asociada a  $T_r=2$ años en la costa de San Francisco de Campeche-Anual.

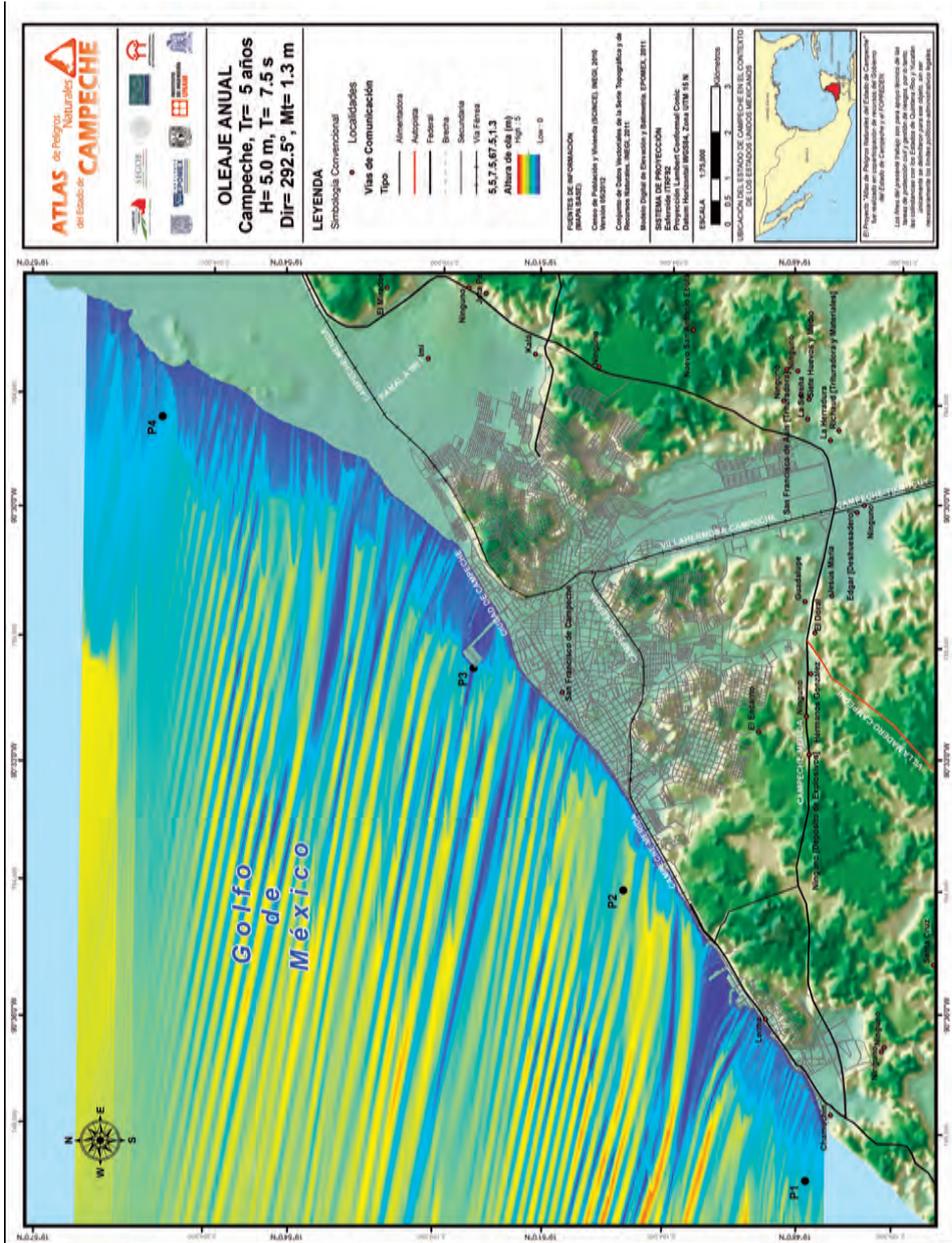


Figura 33. Altura de ola asociada a Tr=5 años en la costa de San Francisco de Campeche-Anual.

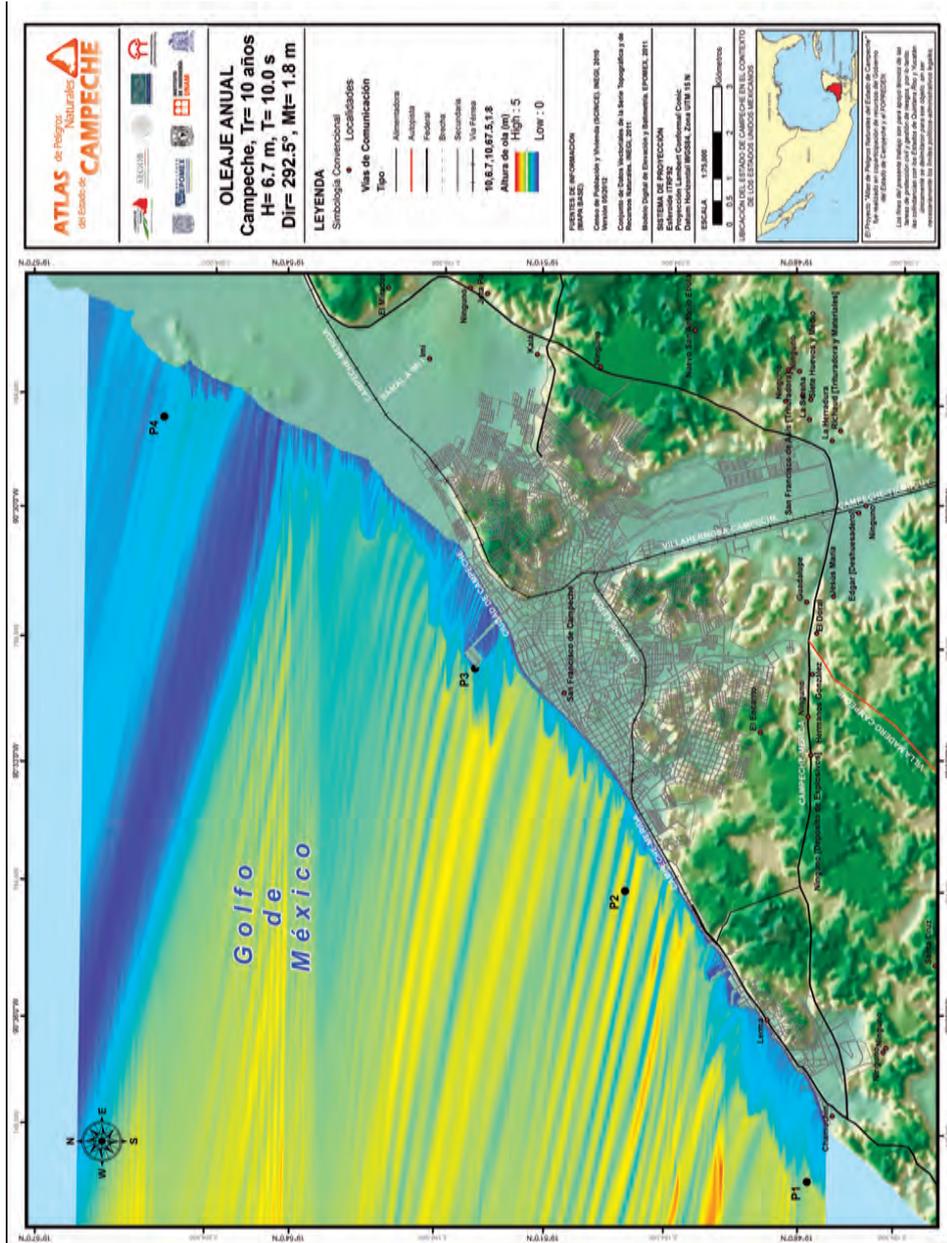
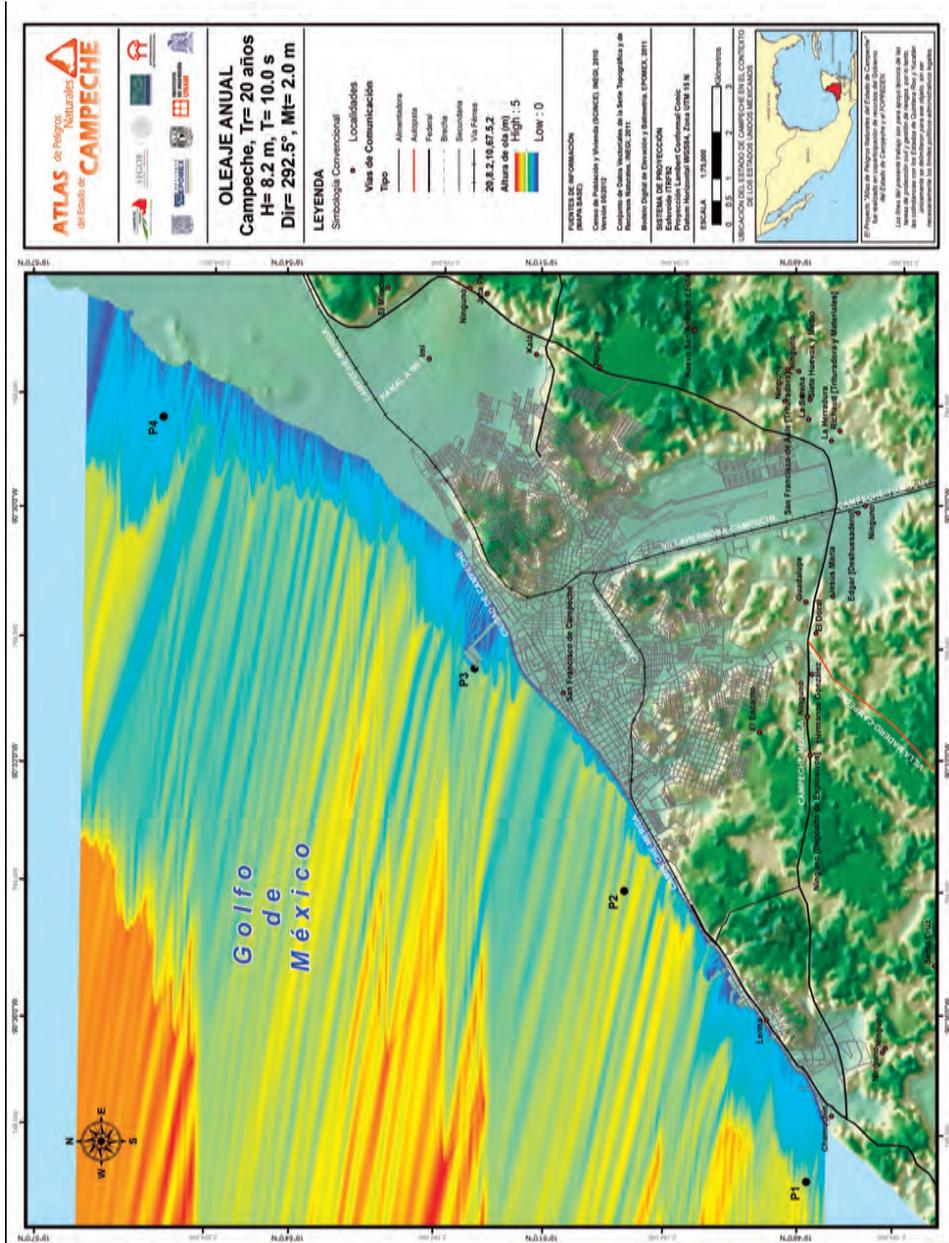


Figura 34. Altura de ola asociada a Tr=10 años en la costa de San Francisco de Campeche-Anual.





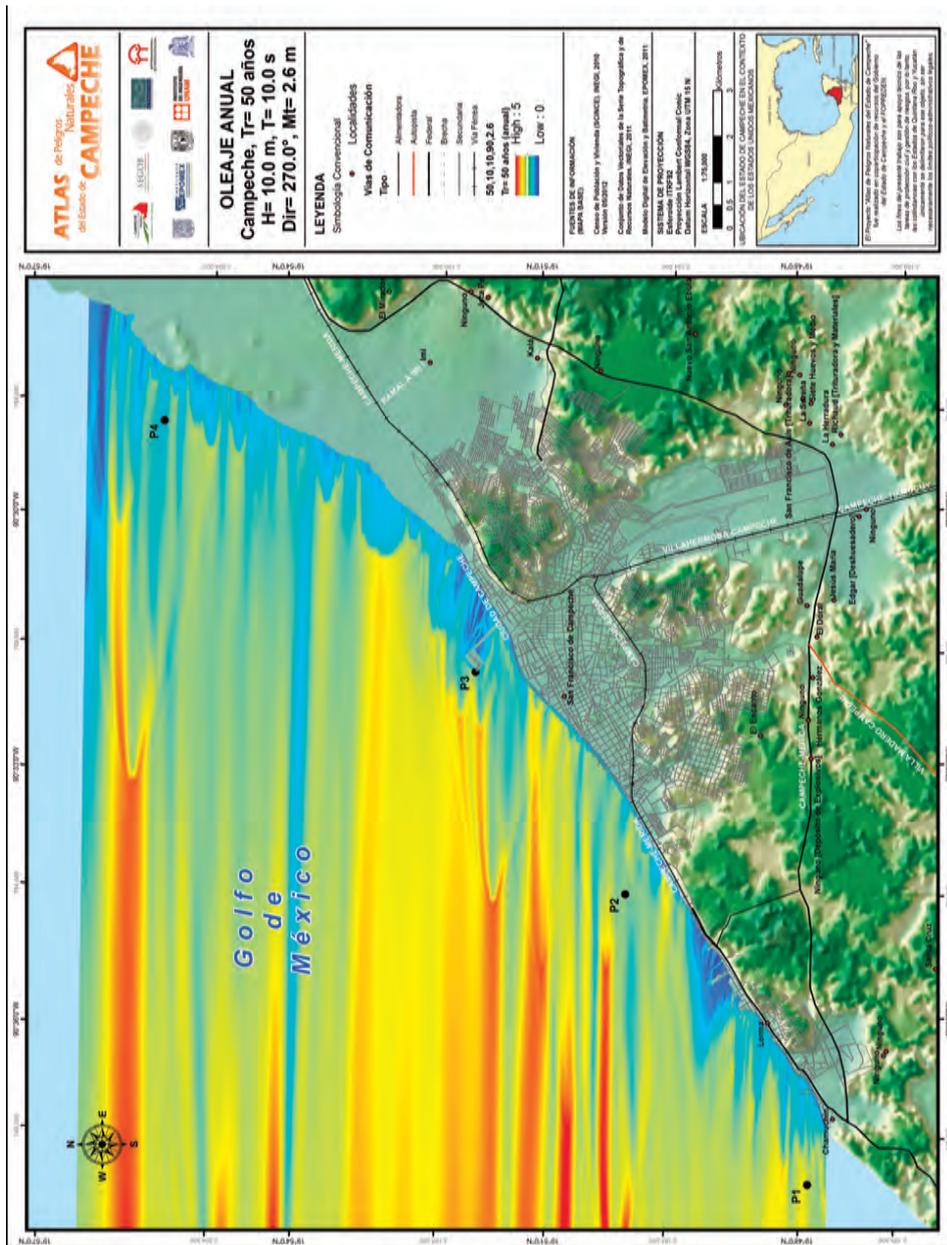


Figura 37. Altura de ola asociada a Tr=50 años en la costa de San Francisco de Campeche-Anual.

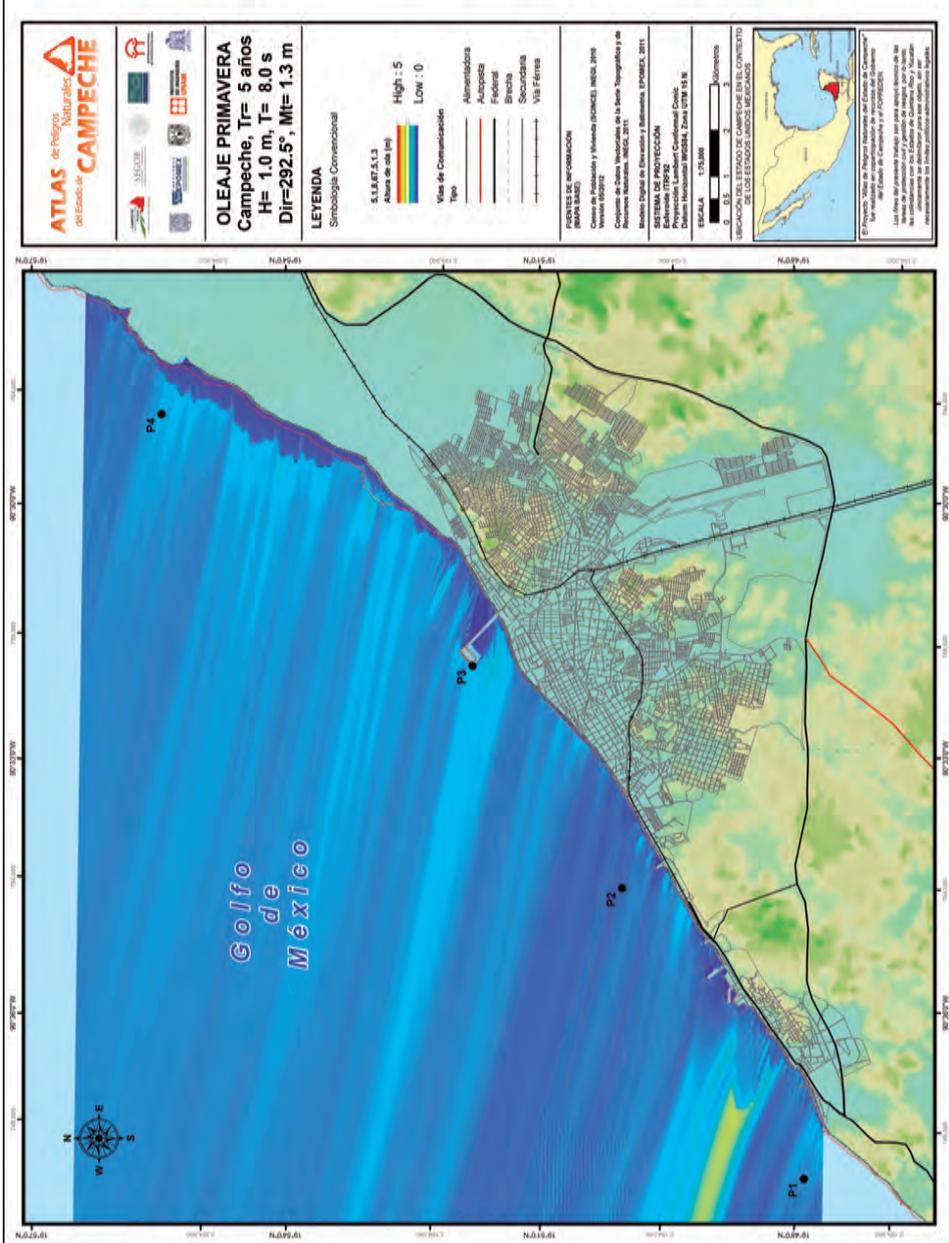


Figura 38. Altura de ola asociada a  $T_r=10$  años en la costa de San Francisco de Campeche- Primavera.

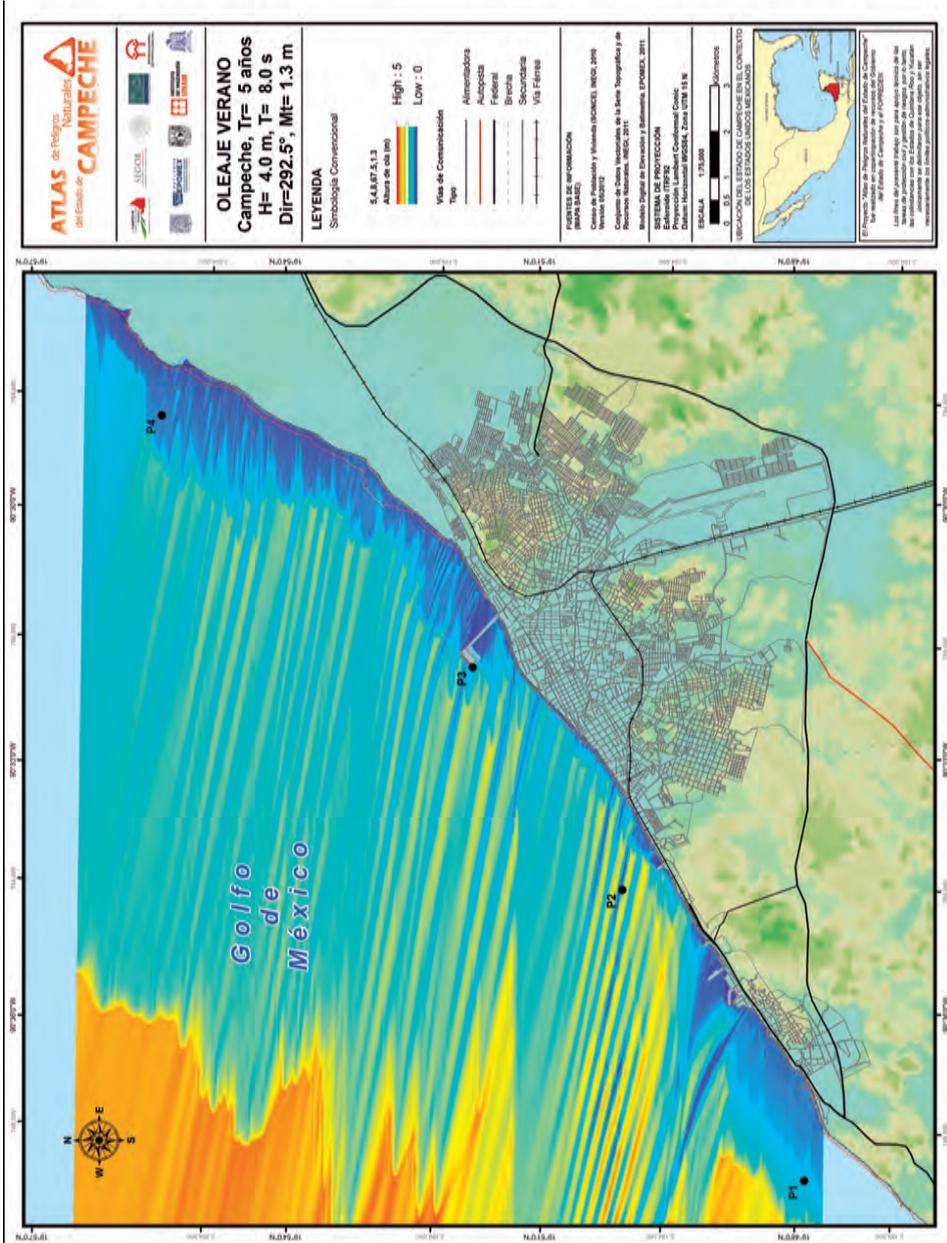


Figura 39. Altura de ola asociada a  $Tr=10$  años en la costa de San Francisco de Campeche-Verano.

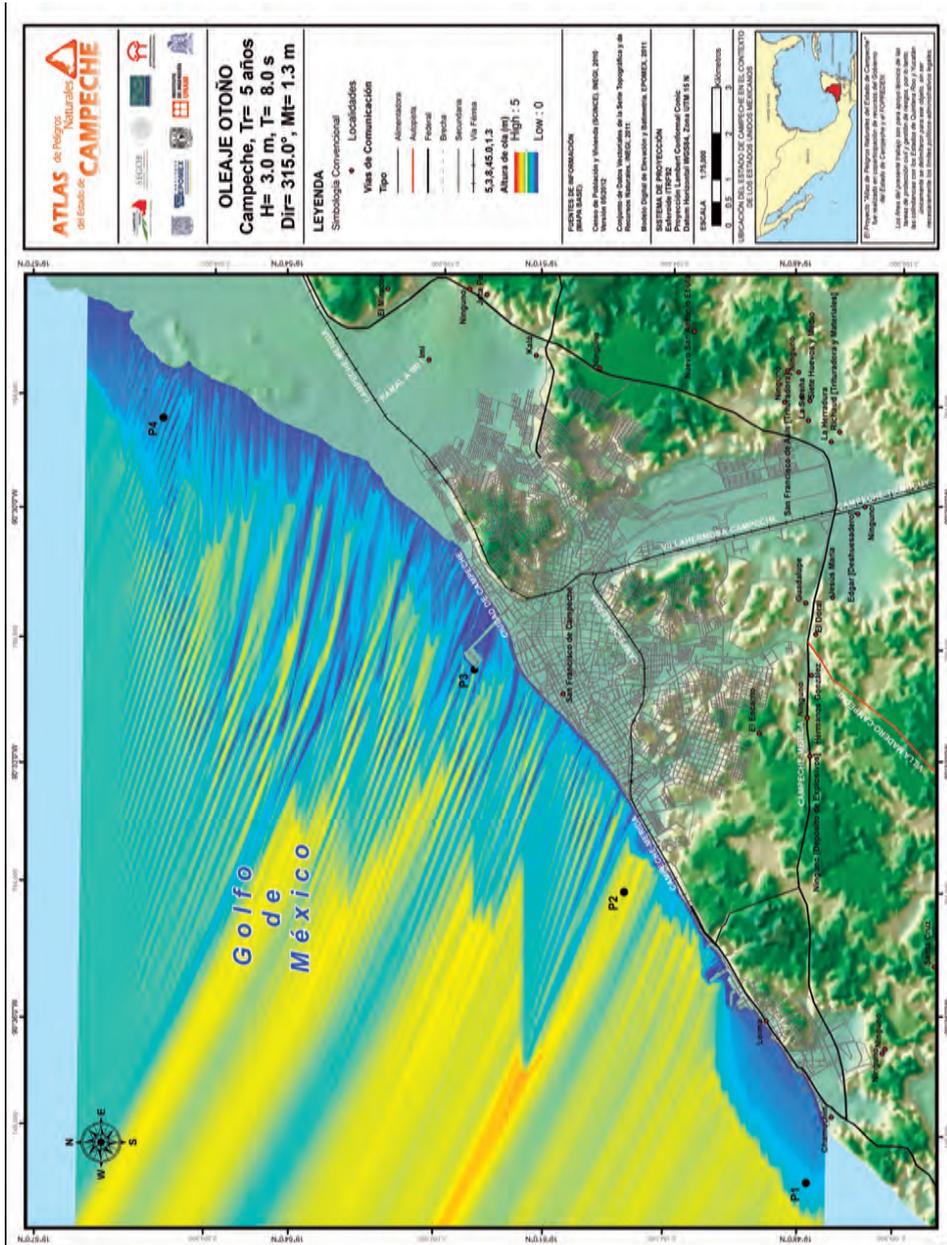


Figura 40. Altura de ola asociada a  $T_r=10$  años en la costa de San Francisco de Campeche- Otoño.

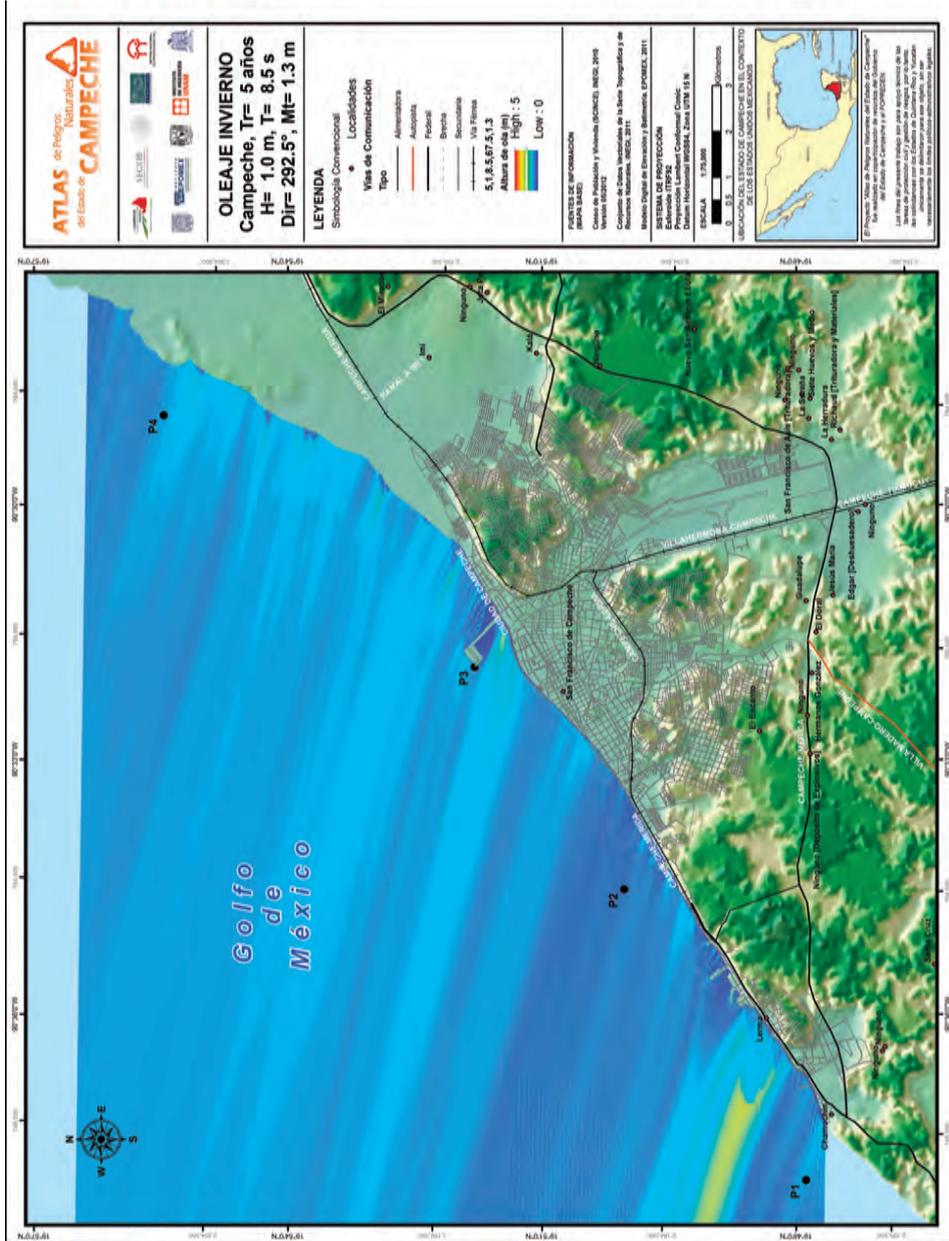


Figura 41. Altura de ola asociada a  $T_r=10$  años en la costa de San Francisco de Campeche- Invierno.

**Tabla 7.** Altura de ola en los puntos P1, P2, P3 y P4, en la costa de San Francisco de Campeche. Anual.

	Tr=2 años	Tr=5 años	Tr=10 años	Tr=20 años	Tr=50 años	Tr=50 años
	H=2.0 m T=10s Dir= 292.5° Mt=0.2 m	H=5.0 m T=7.5s Dir= 292.5° Mt=1.3 m	H=6.7 m T=10s Dir= 292.5° Mt=1.8 m	H=8.2 m T=10s Dir= 292.5° Mt=2 m	H=10 m T=10s Dir= 292.5° Mt=2.6 m	H=10 m T=10s Dir= 270° Mt=2.6 m
P1 X=748015; Y=2190869 (UTM)	0.8	1.5	2.6	2.6	3.0	2.8
P2 X=753940; Y=2194919 (UTM)	1.7	2.6	1.9	2.6	2.4	2.4
P3 X=758465; Y=2198244 (UTM)	0.8	0.7	1.8	2.2	2.4	2.2
P4 X=763540; Y=2205094 (UTM)	0.5	1.2	1.2	1.3	2.2	1.6

**Tabla 8.** Altura de ola en los puntos P1, P2, P3 y P4, en la costa de San Francisco de Campeche. Estacional.

	Tr= 10 años			
	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
	H=1.0 m T=8s Dir= 292.5° Mt=1.3 m	H=4.0 m T=8s Dir= 270° Mt=1.3 m	H=3.0 m T=8s Dir= 315° Mt=1.3 m	H=1.0 m T=8.5s Dir= 292.5° Mt=1.3 m
P1 X=748015; Y=2190869 (UTM)	0.96 m	1.32 m	1.38 m	1.1 m
P2 X=753940; Y=2194919 (UTM)	0.83 m	2.2 m	2.9 m	0.9 m
P3 X=758465; Y=2198244 (UTM)	1.3 m	1.3 m	1.8 m	1.1 m
P4 X=763540; Y=2205094 (UTM)	1.2 m	1.0 m	1.5 m	1.1 m

## CONCLUSIONES

La metodología que se presentó en este capítulo permite obtener las características del oleaje en las proximidades de la costa en términos de probabilidad media de ocurrencia. Estos valores son útiles para el conocimiento de los peligros en la costa o como dato de entrada para una modelación hidrodinámica y/o morfodinámica adicional con la que obtener el peligro de erosión de la playa o inundación en la zona costera.

El estudio refleja la importancia de la consideración de la marea de tormenta en la llegada de olas de mayor intensidad a la costa y, por tanto, en el incremento de los peligros que amenazan a la costa.

El estudio puede ser complementado mediante la consideración de oleaje espectral y la aplicación de un modelo morfodinámico que permita conocer la respuesta de la playa ante la ocurrencia de estos fenómenos hidrometeorológicos.

## LITERATURA CITADA

- Durán G., 2010.** Análisis del peligro por marea de tormenta en el Golfo de México, Tesis de maestría, UNAM. México.
- Kirby, J., & R.A. Dalrymple, 2002.** REF/DIF 1-Version 3.0-Documentation and User's Manual, Center for Applied Coastal Research, Department of Civil and Environment, University of Delaware, Newark, DE.
- Márquez, A., V. Torres, A. Bolongaro, J. Chavarría, F. Varona, G. Expósito et al., 2008.** Estudio de la dinámica costera del litoral norte del municipio del Carmen, Campeche, Universidad Autónoma del estado de Morelos.
- Monbaliu, J., & R. Padilla, 2000.** The spectral wave model, WAM, adapted for applications with high spatial resolution, *Coastal Engineering*, 41: 41-62.
- Posada, G., 2007.** Modelo numérico hidrodinámico tridimensional para la predicción de la evolución de una descarga de una sustancia conservativa de un emisor submarino, Tesis doctoral, UNAM. México.
- Silva, R., 2006.** Manual del usuario y documento de referencia del programa MWAPO3, Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Silva, R., G. Ruiz, G. Posada, D.M. Pérez, G.D. Rivillas, J.C. Espinal, 2008.** Atlas de clima marítimo de la vertiente Atlántica mexicana, Universidad Nacional Autónoma de México.



---

# Identificación y Caracterización de Bajos Inundables

*Gerardo Palacio Aponte*

---

## RESUMEN

El origen, evolución y dinámica natural del territorio en el estado de Campeche, condicionan el comportamiento de las inundaciones en zonas bajas denominadas regionalmente “bajos inundables”. Son planicies bajas originadas por la acumulación residual de arcillas producto de la disolución de rocas carbonatadas, en donde se inhibe la capacidad de infiltración propia de terrenos kársticos. Al mismo tiempo estas planicies se ubican en el ámbito hidrológico de cuencas cerradas o parcialmente cerradas que captan tanto los escurrimientos pluviales areales como los asociados a torrenceras (escurrimientos concentrados). Son entonces por naturaleza áreas con una alta susceptibilidad a las inundaciones que incluso con lluvias ordinarias estacionales pueden afectar localidades y actividades productivas. Bajo esta concepción y con el fin de delimitar las zonas de inundación franca se propone una metodología basada en el análisis detallado de modelos digitales de elevación (MDE) e imágenes de satélite de alta resolución. Se clasifican y ponderan según su relevancia topográfica y ambiental en términos de la susceptibilidad del terreno a las inundaciones.

### Objetivos

- Generar información geográfica georeferenciada que contenga la diferenciación territorial de zonas susceptibles a inundarse por la acumulación ordinaria y extraordinaria de lluvia en el Estado de Campeche.
- Identificar y caracterizar las zonas bajas inundables de las cuencas cerradas y semicerradas a nivel estatal y para Isla del Carmen, San Francisco de Campeche y Champotón.

Los bajos inundables son planicies bajas acumulativas resultado de la acumulación sucesiva de deluviones y de residuales producto de la disolución de rocas carbonatadas. A medida que la evolución kárstica avanza, aumenta la cantidad de geoformas relictuales positivas y depósitos asociados. Las planicies originalmente erosivas se transforman gradualmente en planicies acumulativas confinadas hasta convertirse en planicies residuales extendidas (figura 1).

Al mismo tiempo las geoformas positivas con respecto a los niveles de base locales, aparecen entre las etapas evolutivas de juventud y la madurez como altillos y lomeríos bajos con cimas de pendiente plana horizontal, resultado de la erosión diferencial sobre planicies estructurales de exposición reciente a la karstificación.

Al aumentar los tiempos de disolución y por tanto las cantidades de residuales de terra rosa, los bordes de las cimas planas tienden a redondearse hasta formar colinas cónicas en altas densidades (etapa de madurez) que posteriormente, en la etapa tardía de relictos, tienden a reducir su altura, convirtiéndose en colinas residuales (figura 2) y montículos. Las dolinas con acumulación incipiente de residuales que inician su formación durante la etapa reciente en el cuaternario, se unen gradualmente en algunas zonas durante la madurez, hasta formar uvalas y posteriormente poljés (depresiones alargadas) en la etapa tardía de relictos.

En el diagrama de evolución kárstica se señalan las condiciones ambientales tropicales subhúmedas y húmedas (lluvias en verano) relacionadas con los grados de evolución (fi-

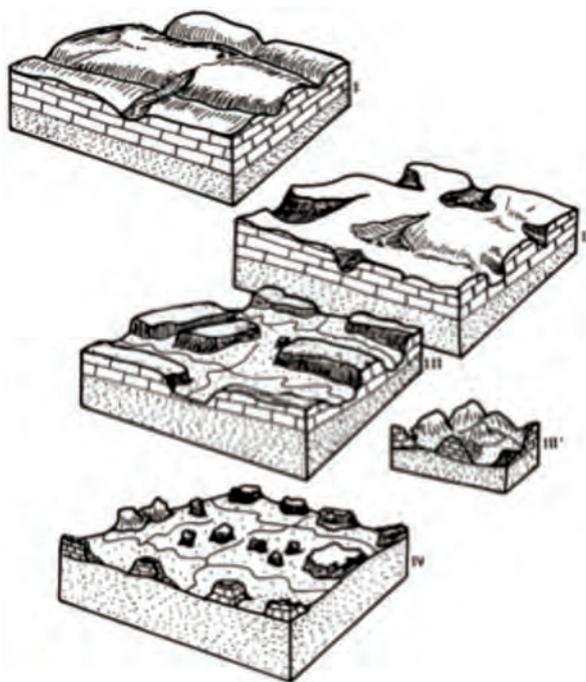


Figura 1. Diagrama de formación de bajos inundables. Modificado de Lehmann H. (1954).

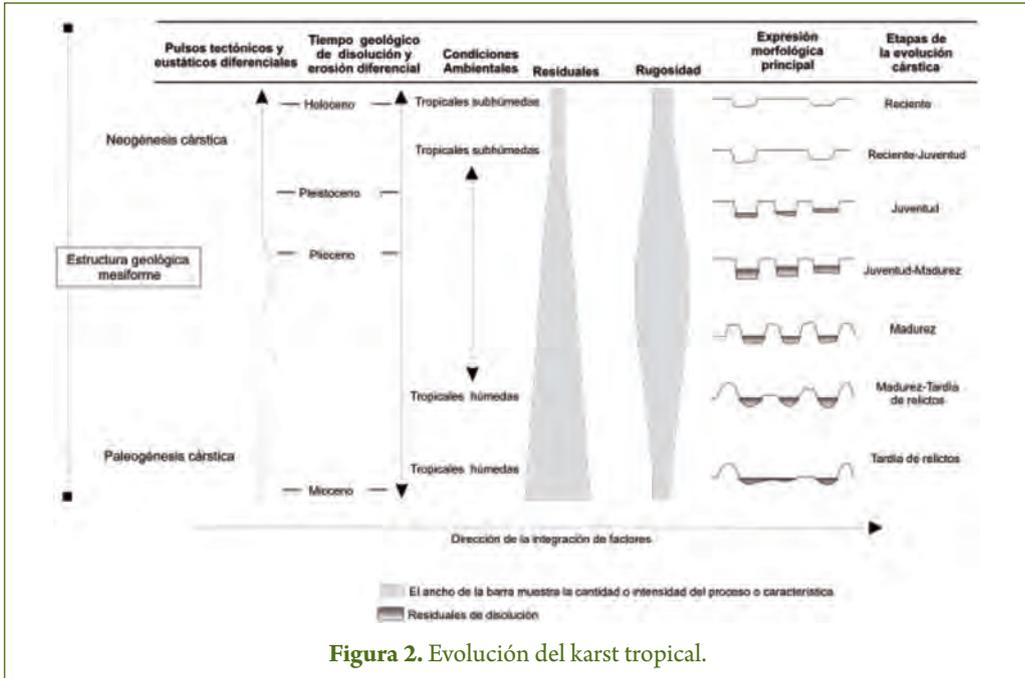


Figura 2. Evolución del karst tropical.

gura 1), sin embargo, es necesario acotar que su vinculación genética a los tipos de paisaje kárstico no es muy clara y que se indica para caracterizar el entorno natural más que para explicar su correlación intrínseca con el estadio evolutivo.

Corbel (1959) encontró, como rangos promedios de denudación kárstica en la Península de Yucatán entre 10 y 40 m<sup>3</sup>/año/km<sup>2</sup> (12 para Mérida y 10 para Champotón) y como ejemplo extremo contrario para zonas frías con lluvias todo el año, valores entre 240 y 275 m<sup>3</sup>/año/km<sup>2</sup> en Francia y Noruega. Estos números muestran que la disolución está asociada a la temperatura ambiente y por tanto del agua, sin embargo, existen referencias de otros autores que indican valores incluso invertidos, lo que en cierta forma demuestra que, aun considerando la variabilidad y precisión de los datos, la correlación directa se presenta entre el arreglo disyuntivo evolucionando hacia la transformación geomórfica del relieve y to-

dos los factores ambientales y no solo con el clima.

Lo que sí es evidente es que en los países tropicales los procesos de disolución se caracterizan por ejercerse más violentamente en superficie, que en profundidad, predominando por tanto la disolución superficial sobre la subterránea (Corbel, 1959). Esto se debe a que en los países tropicales la saturación de las aguas en CO<sub>3</sub>Ca, se ejerce en unas pocas horas, sobre todo en lo que concierne a la última fase del proceso de disolución, mientras que en los países templados, la saturación se adquiere en más de 50 horas (Mateo, 1981). Igualmente las lluvias torrenciales y sus efectos erosivos tienen que ver con la intensificación localizada de la disolución. Jennings (1971) señala que una de las peculiaridades del karst tropical es la verticalidad y horizontalidad del relieve, con la minimización de pendientes intermedias. Es conocido el predominio de formas convexas, a menudo con paredes verticales y ci-

mas cónicas y redondas y de superficies con fondo más o menos llano.

A partir del origen geológico-geomorfológico y ambiental de los bajos inundables en el estado de Campeche, se infiere que hidrológicamente se comportan como cuencas endorreicas, en donde el agua que escu-

rre por las laderas alledañas y torrenteras por lluvias torrenciales, difícilmente encuentra salida directa hacia cuencas vecinas, ríos o mares (Palacio *et al.*, 2002). A continuación se muestran los tipos de bajos presentes en el estado de Campeche (tabla 1).

## METODOLOGÍA

Para delimitar condiciones territorialmente homogéneas donde dominen condiciones de inundabilidad (planicies cóncavas menores a 0.5° de inclinación) se delimitan zonas de inundabilidad franca. Sin embargo, este es el límite para ambientes deposicionales que también requieren de una diferenciación de la geometría o curvatura del terreno (cóncava, convexa, etc.) en planicies. Se

considera como excepción o exclusión a las planicies que se presentan en las divisorias de aguas, que en los ambientes karso-tectónicos tabulares de la región son frecuentes. Se distinguen si se identifican los niveles de base locales y las divisorias de aguas por subcuencas.

Los fondos de los lechos kárstico-fluviales y planicies kársticas subhorizontales, funcio-

**Tabla 1.** Tipos de bajos inundables.

Tipo de bajo	Características principales y variantes
Aislados	Planicies acumulativas colmatadas de sedimentos deluviales distales y residuales de disolución. Dolinas o uvalas aisladas. Dispersos entre todo el sistema de lomeríos del Estado.
Interconectados	Al mismo nivel de base local (Región de los Chenes).
	Con diferente nivel de base local o con el nivel de base general. Genera movilidad de flujos de agua entre bajos (Región de los Chenes y zona costera).
De pendientes marginales abruptas	Resultado de procesos de disolución en estado evolutivo avanzado o por control a través de estructuras disyuntivas. Mayor confinamiento hidrológico de los bajos (Región de Balamkú, Meseta de Zoh Laguna y Calakmul).
De pendientes marginales extendidas	Sobre colinas dómicas residuales con torrenteras o canales de desagüe con actividad estacional torrencial. En términos de regímenes de escorrentía e infiltración funcionan temporalmente como cuencas hidrográficas (Región septentrional de los Chenes, Balamkín y Escárcega).

nan como colectores hidrológicos que afectan significativamente el comportamiento del escurrimiento. El Primer paso es diferenciar las zonas bajas de los declives transicionales y colinas circundantes, delimitando y caracterizando las zonas deposicionales con propósitos hidrológicos y geomorfológicos. Los bajos se presentan dentro de un gran rango de escalas y altitudes, variando en su extensión desde unos pocos metros hasta cientos de kilómetros.

Para delimitar lo fondos de las depresiones se aplica el *Índice de Multiresolución del Fondo de los Valles* o MRVBF (*multi-resolution valley bottom flatness*) que permite identificar el fondo de los valles mediante la delimitación de llanuras a diferentes niveles altitudinales según sus áreas circundantes y la naturaleza de sus pendientes (Gallant & Dowling, 2003). Los supuestos de este índice son: a) los fondos de los valles son bajos y planos en relación a sus alrededores, b) estos fondos se presentan en diferentes niveles y c) los fondos de los grandes valles son más planos que los pequeños (McKergow *et al.*, 2003).

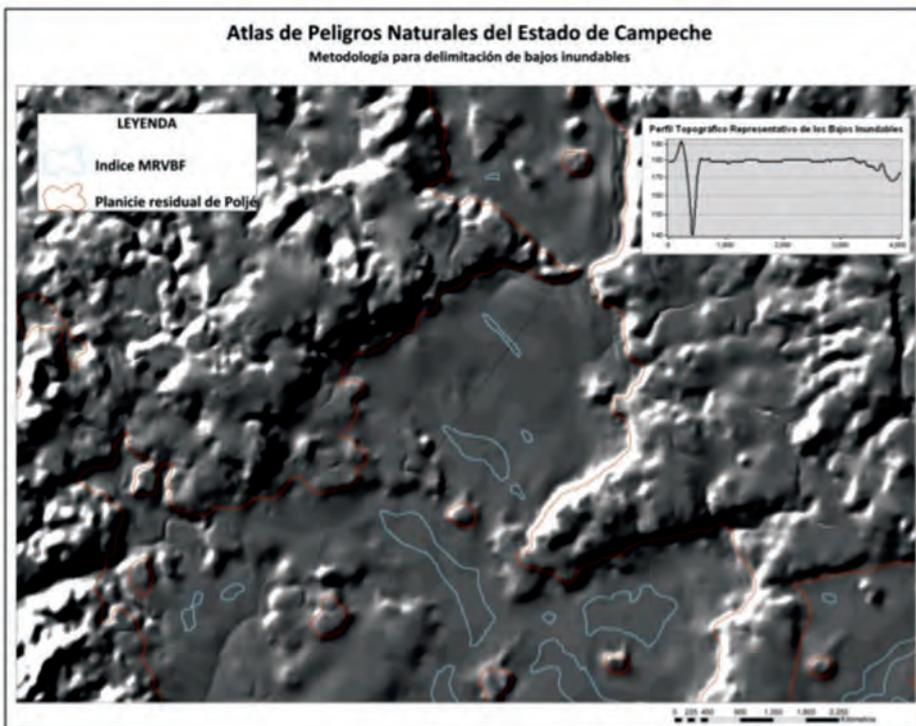
Para el cálculo de este índice se utiliza como insumo un modelo digital de elevación (MDT) para poder identificar los fondos, basándose principalmente en la firma topográfica de las zonas bajas por altitud. Este algoritmo opera a diferentes escalas y combina estos resultados en un índice simple de multi-resolución, clasificando los fondos de las planicies, los que están asociados a zonas de depositación o hundimiento. De los valores obtenidos con este índice, los menores se consideran resultantes de la erosión mientras que los mayores pueden considerarse como de depositación. Los valores altos corresponden a zonas de llanuras amplias y planas y presumiblemente áreas con depósitos profundos de sedimentos. Cada incremento de una unidad del índice MRVBF

corresponde a la reducción en la mitad de la pendiente y la triplicación de la longitud de la escala (Gallant & Dowling, 2003).

Para llevar a cabo el cálculo del índice MRVBF, se utilizó el software de plataforma libre SAGAGIS (*System for an Automated Geo-scientific Analysis*), desarrollado por el grupo de trabajo de análisis geosistémico en el departamento de Geografía Física de la Universidad de Goettingen. En una primera etapa en necesario exportar el Modelo digital de elevación de formato de ArcInfo a ASCII para poder realizar los procesos en SAGA.

Una vez importado en SAGA se utilizó el módulo *Terrain Analysis/Morphometry/Multi-Resolution Index of Valley Bottom Flatness*. En este módulo se ajusto únicamente el valor del umbral de la pendiente (*Initial Threshold for Slope*) a 2 m. Este parámetro permite ajustar el modelo a las diferencias en el relieve. De tal manera que en los pasajes inclinados cercanos al umbral, solamente se agregan a estos, los vecinos de las inclinaciones además de la máxima pendiente. Mientras que en las zonas planas, casi todos los vecinos sin elevación (celdas) pueden corresponder a celdas de flujo, por lo que la tendencia del flujo divergente se incrementa y por lo tanto sea agrupan (Wichmann & Becht, 2003).

Utilizando como criterio rector el cálculo del índice anterior, se generó un mapa en donde se delimitaron las zonas inundables preliminares, según los criterios morfométricos y morfodinámicos implícitos (figura 3). Sin embargo, con el fin de verificar la validez y extensión de los ámbitos susceptibles en términos ambientales, se aplicaron métodos complementarios como la diferenciación territorial de pendientes expuestas a inundación, la geometría del terreno y la humedad en el suelo según su reflectancia en imágenes satelitales de alta resolución.



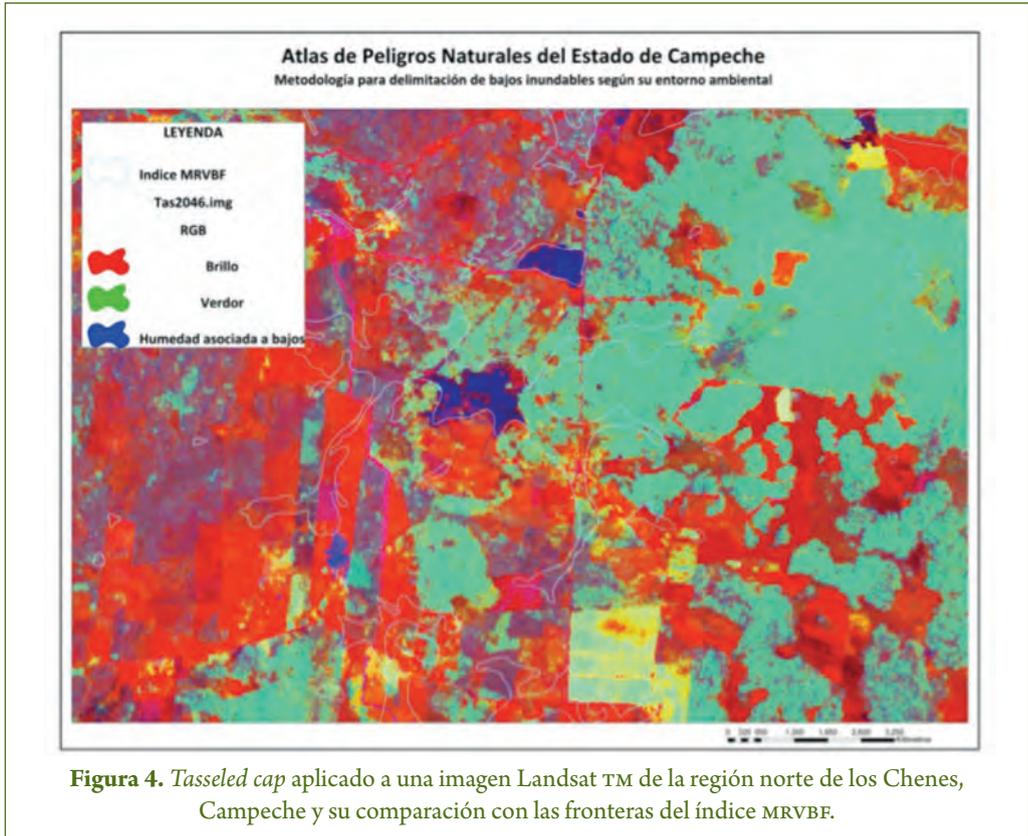
**Figura 3.** Resultado gráfico de la aplicación del índice MRVBF (líneas azules) y su comparación con límites geohidrológicos asociados a un polje (rojo) para la región de Balamkú, Campeche.

Para discriminar zonas que tienden a inhibir la energía cinética del agua, se aplicó el comando *slope* dentro de la extensión *Spatial Analyst/Surface Analysis* sobre el modelo digital estatal en ArcGis, separando pendientes con menos de 0.5 grados (bajos planos) de inclinación del resto.

Por otra parte para a su vez definir las formas de los fondos que naturalmente tienden a captar agua o a dispersarla, la geometría de las planicies bajas inundables, se aplica el comando *curvature* dentro de la extensión *Spatial Analyst Tools/Surface (ArcGis)*. El objetivo es identificar los valores asociados a concavidad reclasificando el grid y ponderándolo por intensidad relativa.

Como criterio ambiental de carácter sintético, se usan imágenes multiespectra-

les de alta resolución Landsat TM y ETM+. Mediante la banda del infrarrojo medio se detectan áreas húmedas incluso durante la época seca. Se aplica un subproceso denominado *Tasseled cap* para detectar brillo, verdor y humedad, diferenciando suelos saturados de humedad de coberturas urbanas o suelos desnudos (brillo) y cobertura vegetal densa (verdor). Los mayores valores de reflectancia en el infrarrojo medio corresponden a suelos menos húmedos. A mayor concentración de humedad mayor proporción de energía es absorbida y consecuentemente en menor proporción es refleja. Para suelos producto de acumulaciones distales, arcillosos con una humedad entre el 30% y 40% el *Tasseled cap* ofrece resultados adecuados y correspondientes con la realidad (figura 4).

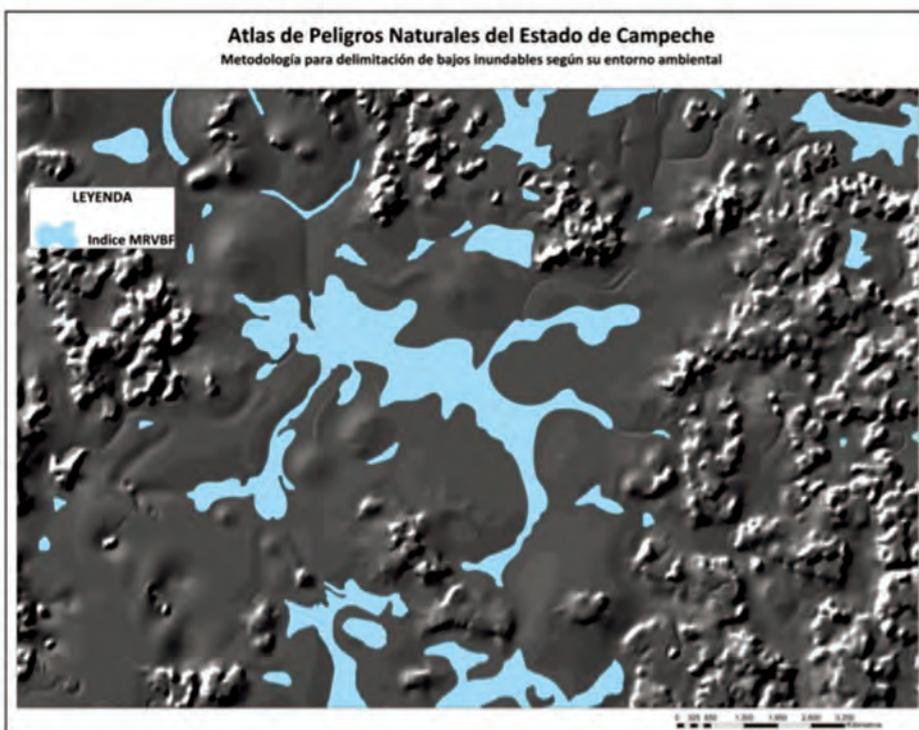


Debido a la complejidad geomorfológica e hidrológica de los terrenos kársticos, un karst desnudo en estructuras tabulares deprimidas, no necesariamente acumula agua. Puede funcionar incluso como ponor o sima kárstica, es decir, como una oquedad que permite filtraciones profundas incluso para flujos torrenciales. Para discriminar las condiciones en las que el fondo del bajo es colector estático y no dinámico, es que se aplica el proceso anterior, de manera que se verifique la condición de susceptibilidad a las inundaciones según su respuesta ambiental y radiométrica. De esta manera las fronteras originales son modificadas (figura 5).

Como criterio complementario para verificar los bajos en su contexto geomorfológico

se utilizó la herramienta *3DAnalyst/Interpolate line/Create Profile Graph* se verifica la geometría de las planicies de inundación y las rupturas de pendiente justo en el límite entre el pie de monte o declive transicional y la planicie.

Para integrar la información parcial, se delimitan zonas de inundación franca por condición hidrogeomorfológica y se diferencian de áreas susceptibles a inundaciones en sus ámbitos circundantes. Las coincidencias previamente diferenciadas y ponderadas que impliquen mayor susceptibilidad a la inundación, permitirán en principio diferenciar unidades del terreno con iguales respuestas ambientales ante la presencia de inundaciones.



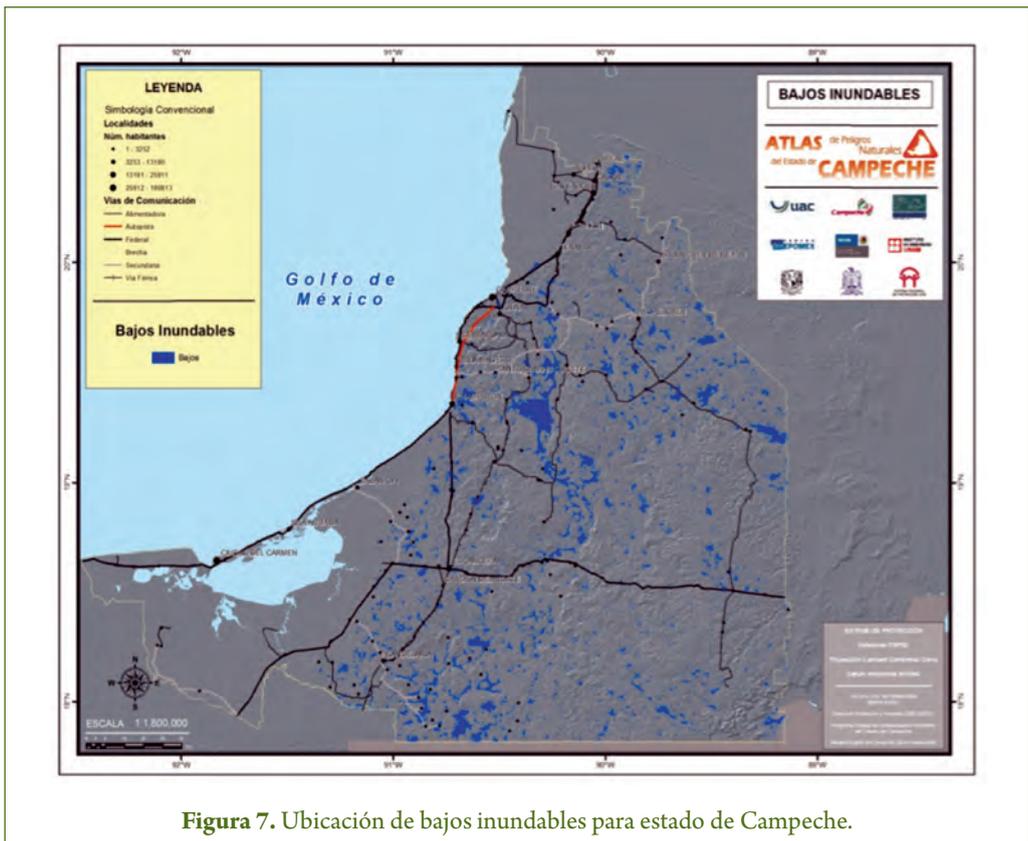
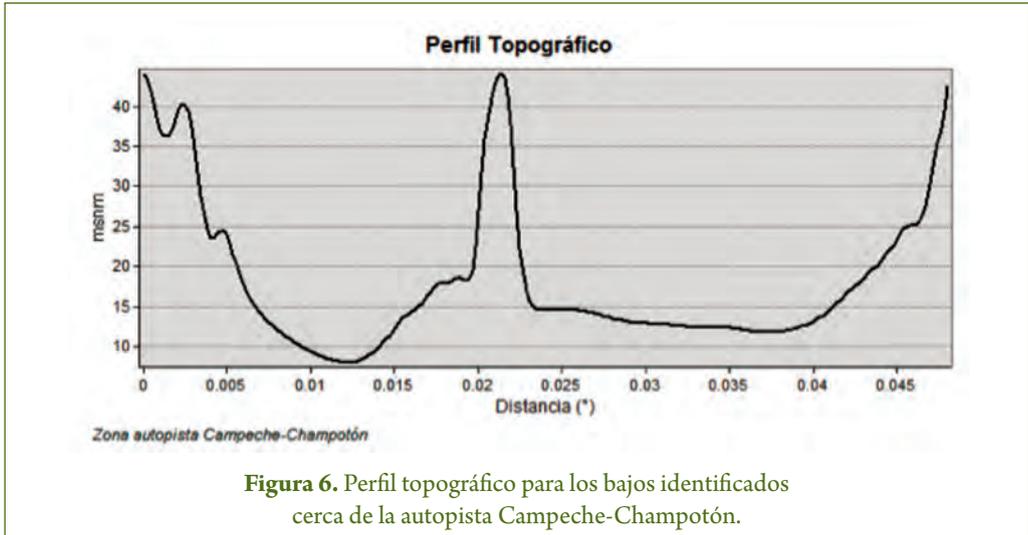
**Figura 5.** Índice MRVBF modificado en las fronteras y extensión de sus polígonos según las respuestas radiométricas del *Tasseled cap*.

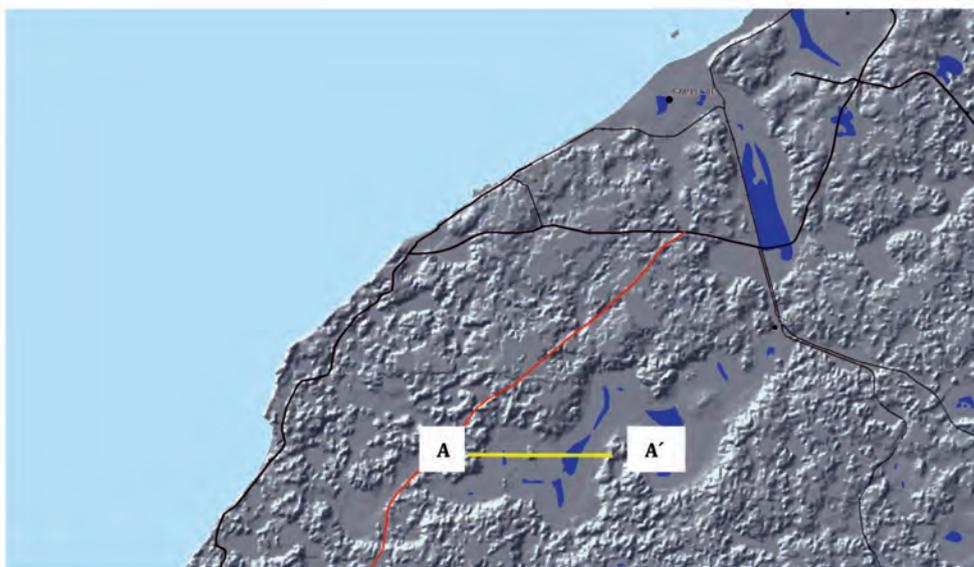
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 6 se presenta la configuración topográfica típica representativa de los bajos inundables para el estado de Campeche, tomando como base el MDE con resolución de 20. En la figura 8 se presenta un acercamiento a dos bajos ubicados en la autopista Campeche, Champotón, y la ubicación del perfil topográfico correspondiente (A-A').

En el territorio estatal se pueden encontrar patrones regionales según el tipo de bajos detectados. La mayoría de los bajos interconectados y con mayor extensión territorial se encuentran en la parte centro-oeste y centro suroeste del Estado en donde se presentan

controles estructurales (fallas y fracturas) y los mayores espesores de sedimentos, ubicados en la zona regionalmente conocida como valle de Yohaltún, zona de Balamkú y en la región de los Chenes. Por otra parte, los bajos aislados se encuentran insertos entre todos los lomeríos del Estado. En lo que respecta a los bajos parcialmente conectados con el mar destacan los que desembocan hacia las ciudades de Campeche y Champotón. Los lugares típicos en donde se han validado los resultados se refieren a los lugares y eventos más representativos sobre todo después de la ocurrencia de lluvias extremas





**Figura 8.** Acercamiento a los bajos identificados cerca de a la autopista Campeche, Champotón.

asociadas a huracanes (*e.g.* Huracán Isidoro) como la región de los Chenes, Balamkín, Balamkú y Yohaltún.

En las figuras 9, 10 y 11 se presentan, respectivamente, la ubicación de los bajos inundables para las ciudades de Ciudad del Carmen, San Francisco de Campeche, y

Champotón, partiendo de los modelos digitales de elevaciones de alta resolución (3 m por pixel). En todos estos destacan las mínimas diferencias topográficas como fronteras para movilidad de los flujos horizontales y verticales del agua.

## CONCLUSIONES

Es importante tener en cuenta que las zonas ubicadas con la metodología antes descrita, corresponden a aquellas en peligro potencial de inundación, lo cual no necesariamente puede ocurrir ya que en el caso de terrenos rurales o urbanos se puede contar con adecuados coeficientes de infiltración o eficientes sistemas de drenaje que permitan drenar el agua acumulada.

La escala del estudio no incluye los volúmenes de escurrimiento medio ni extremos

de alta resolución espacial, sin embargo, para efectos de planificación local es necesario y muy recomendable realizar estos cálculos por subcuenca y microcuenca. Se parte del hecho de que en los bajos se alcanza el valor teórico de infiltración cero y que prácticamente todo el volumen captado por las microcuencas escurre y se acumula en su fondo impermeable.

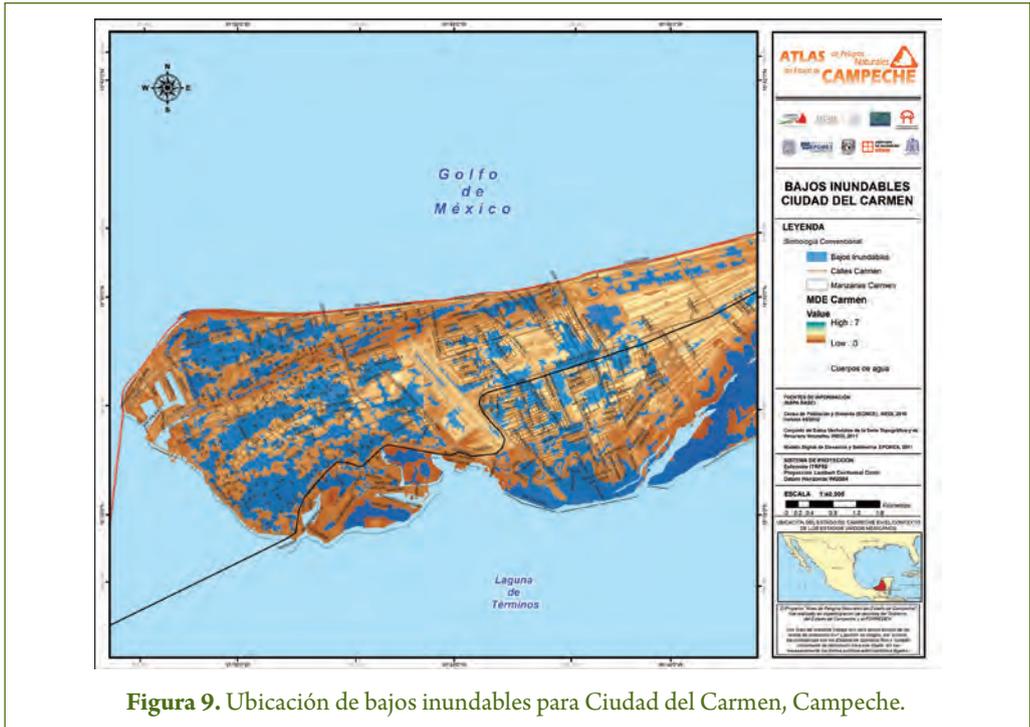


Figura 9. Ubicación de bajos inundables para Ciudad del Carmen, Campeche.

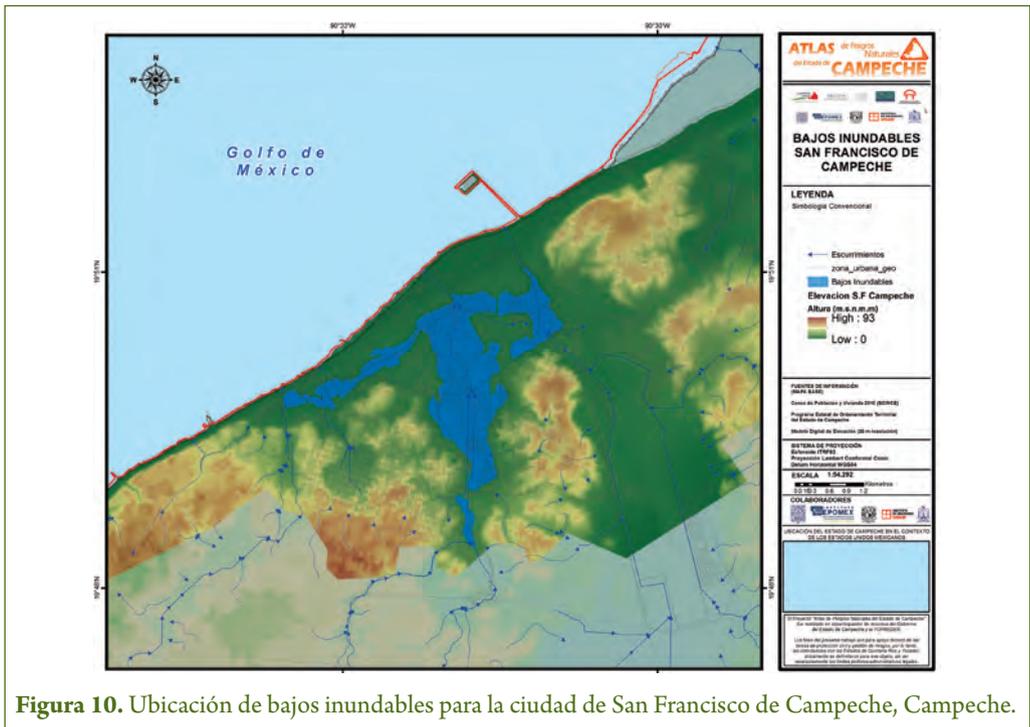


Figura 10. Ubicación de bajos inundables para la ciudad de San Francisco de Campeche, Campeche.

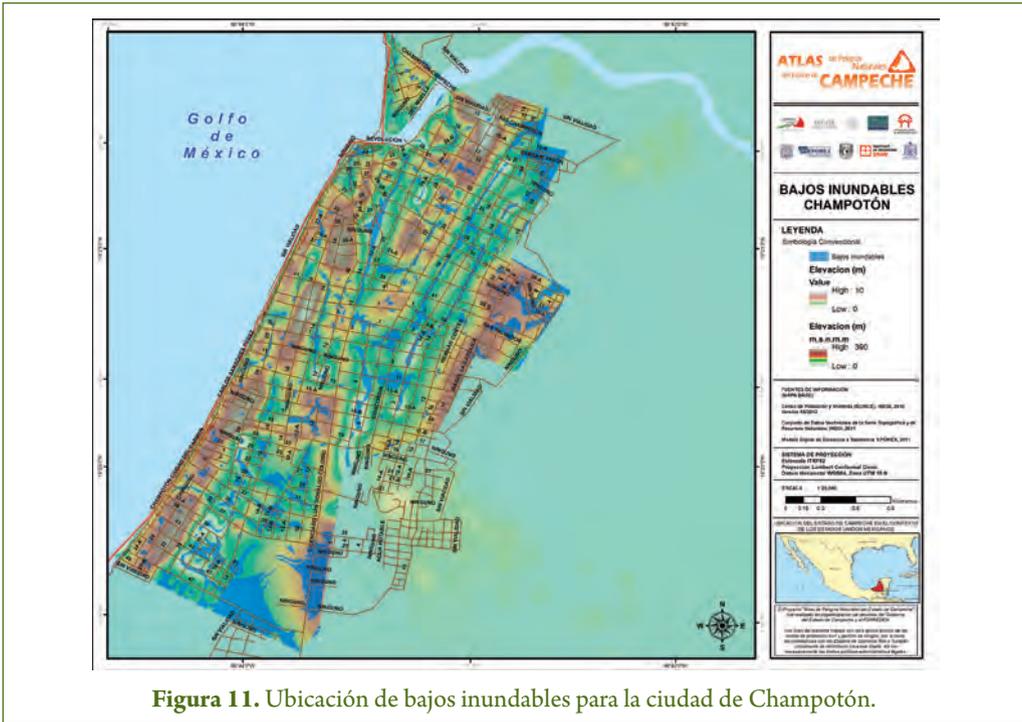


Figura 11. Ubicación de bajos inundables para la ciudad de Champotón.

## LITERATURA CITADA

- Corbel J., 1959.** Les karst du Yucatán et de la Floride. *Bull. Ass. Géogr. de France*, 282- (3):2-14.
- Jennings J. N., 1971.** Karst, an Introduction to Systematic Geomorphology, Volume Seven, The M.I.T. Press, Australia.
- Gallant, J. C., & T. I. Dowling, 2003.** A multi-resolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas, *Water Resources Research*, 39(12), 1347.
- Lehmann H., 1954.** Der tropische kegelkarst and den Grossen Antillen. *Erkunde*, 8(2):130-139.
- Mateo Rodríguez J., 1981.** Morfología Cársica, Facultad de Geografía, Universidad de la Habana, Cuba.
- Palacio Aponte A. G., R. Noriega R. y P. Zamora, 2002.** Caracterización ecológica del paisaje conocido como bajos inundables. El caso del Área Natural Protegida Balamkín, Campeche. *Investigaciones Geográficas*, 49.
- McKergow L. A. , J. C. Galland & T. I. Dowling, 2003.** Modelling wetland extent using terrain indices, Lake Taupo, NZ. *CSIRO* 7 p.
- Wichmann V., & M. Becht, 2003.** Modelling Of Geomorphic Processes In An Alpine Catchment. Department of Physical Geography, University of Goettingen, Goldschmidtstrasse 5, 37077 Goettingen, Germany. 14 p.
- Sitios web  
<http://www.clw.csiro.au/heartlands/BLIS1.3/landform/mrvbf/meta.html>  
<http://www.agu.org/pubs/crossref/2003/2002WR001426.shtml>

---

# Sequía y Temperatura

*Gregorio Posada Vanegas, Beatriz Edith Vega Serratos, Ernesto Peña Puch y Claudia M. Agraz*

---

## RESUMEN

El estado de Campeche cuenta con registros de precipitación y temperatura a partir de 1921, los cuales han sido recabados, entre otros, por el Servicio Meteorológico Nacional, la Comisión Nacional del Agua, Agroasemex (<http://www.agroasemex.gob.mx/>) y en los últimos años por el Centro Estatal de Emergencias de Campeche (<http://www.redcenecam.net/>). Estas mediciones son fundamentales, puesto que a partir del análisis de sus registros se pueden calcular diversos periodos de retorno, intensidad de la precipitación, caudales de ríos, temperaturas máximas ó mínimas e índices de sequía. Por ello, la aplicación del índice de sequía es importante para el estado de Campeche, puesto que presenta con regularidad sequía (como proceso natural) que afectan principalmente las zonas de cultivo de Chiná y Hopelchén, así como las áreas naturales protegidas de Calakmul y laguna de Términos. Ante lo expuesto, este capítulo indica el funcionamiento del programa PAIC, como herramienta esencial para cuantificar de manera anual, estacional o mensual, los valores máximos y mínima de temperatura, niveles de precipitación y caudales; todo esto a partir de la base de datos

### Objetivos

- Calcular los niveles anuales de sequía hidrológica y temperaturas máximas y mínimas para el estado de Campeche.
- Describir la metodología implementada para obtener el índice de precipitación estandarizada
- Describir el funcionamiento del programa de cálculo PAIC
- Caracterizar el estado de Campeche de acuerdo a los valores de IPE y temperaturas máximas y mínimas.



CLICOM. Además el programa PAIC, puede ser utilizado para inferir áreas de inundación por desbordamiento de ríos, evaluar niveles de sequía a partir del Índice de Precipitación Estandarizado y obtener datos de precipitación útiles para cuantificar caudales en el tema de desbordamiento de ríos.

## INTRODUCCIÓN

La adecuada caracterización de un territorio en función de los peligros naturales que pueden afectarlo, implica destinar esfuerzos tanto a los peligros principales como a los secundarios; en relación a los riesgos hidrometeorológicos; si bien para el estado de Campeche el desbordamiento de ríos, marea de tormenta, oleaje y acumulación de lluvias son peligros de alto impacto, es igualmente importante realizar el estudio de otros peligros; como periodos de sequías y temperaturas extremas.

Los estudios antes referidos, pueden efectuarse por medio del análisis de información climatológica a partir de datos generados por estaciones hidrométricas, siendo estos una gran ventaja debido a que la Comisión Nacional del Agua tiene un sistema de medición que cubren la totalidad del territorio Mexicano, con un banco de datos para el estado de Campeche desde 1921, de libre acceso y gratuito.

Por otra parte, es relevante mencionar que los periodos de sequía son fenómenos naturales complejos, con gran impacto social; tendientes a extenderse de manera irregular a través del tiempo y el espacio, con efectos acumulativos y permanentes aún después de la culminación de estos (Wilhite, 2000). Autores como García y Fuentes (1985) definen a estos fenómenos como la ausencia prolongada o deficiencia marcada de la precipitación o también como un periodo anormal de tiempo seco, suficientemente prolongado, en el que la falta de precipi-

tación causa un desequilibrio hidrológico, detectándose en países en desarrollo y desarrollados. Aunque en estos últimos; sus efectos no son tan destructivos, gracias a la rapidez con que se aplican medidas correctivas, al mantener programas vigentes (Hare, 1985). En el caso de México como país en desarrollo por su localización geográfica, es sumamente vulnerable a la acción desastrosa de las sequías (Castorena *et al.*, 1980).

Este fenómeno climatológico se considera como uno de los más catastróficos en lo que se refiere al aspecto económico, debido a la gran cantidad de hectáreas cultivadas y de cabezas de ganado que se pierden durante su ocurrencia (ANR, 2013).

Por otra parte, los periodos de temperaturas extremas son registrados en el estado de Campeche, esto debido a su localización geográfica, altitud y topografía plana; detectándose incluso en algunas ocasiones, temperaturas superiores a los 40° C. Por ello, se han mostrado afectación directa en la población, cultivos y animales. Con respecto a las temperaturas mínimas actualmente es difícil que desciendan por debajo de 10°C, debido a que el estado de Campeche es de los lugares más vulnerables con respecto al cambio climático (Toledo Ocampo, 2005). Por lo cual, es imperativo caracterizar las temperaturas mínimas que hasta ahora se han presentado para que con esta información se puedan validar posibles cambios que ocurran en un futuro.

Como resultado de lo expuesto, este capítulo indica el funcionamiento de programa PAIC, como una herramienta esencial para cuantificar de manera anual, estacional o

mensual, los valores máximos y mínima de temperatura, niveles de precipitación e Índice de Precipitación Estandarizado; todo esto a partir de la base de datos clicom

## METODOLOGÍA

Para cuantificar la sequía en el estado de Campeche dentro del proyecto Atlas de Peligros Naturales, se utilizó el Índice de Precipitación Estandarizado (IPE), propuesto por McKee *et al.* (1993), con una serie de datos de 1952-2010. Esto a partir de la base de datos clicom, para la precipitación diaria registrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Para esto se creó un programa numérico que permite realizar rápidamente los cálculos del IPE; anual, estacional o mensual. Asimismo, proporciona este programa valores extremos de temperatura para cada una de las estaciones hidrométricas del Servicio Meteorológico Nacional.

### BASE DE DATOS CLICOM

Para un manejo ágil y eficiente de la información climatológica disponible en los Bancos Nacionales de Datos Climatológicos y el Programa Mundial de Datos Climáticos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), se desarrolló un modelo para computadora personal denominado CLICOM. El cual utilizando información climatológica digitalizada tiene la capacidad de controlar la calidad de la misma, realizar análisis climatológicos y ofrecer diversos productos a los usuarios (*e.g.* resúmenes de máximos y mínimos, cálculo de medidas de tendencia central, entre otros). Asimismo, el modelo CLICOM permite a la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional

(CGSMN) homogenizar a nivel nacional e internacional el manejo e intercambio de la información climatológica.

La base de datos del clima con carácter oficial en el país es la operada por el SMN en el sistema clima computarizado (CLICOM). Esta base de datos contiene la información registrada en la red de estaciones climatológicas convencionales. Las observaciones se llevan a cabo cada 24 h, a las 8:00 am. Los datos se encuentran en formato separado por comas (\*.csv) en un archivo por cada estado de la república, el cual puede ser solicitado al Servicio Meteorológico Nacional, sin ningún costo, solo es necesario indicar el uso que se le dará a la información.

Las variables registradas en la base de datos CLICOM se indican en la tabla 1.

La figura 1 presenta la red de estaciones climatológicas para el estado de Campeche, cuyos datos de precipitación acumulada en 24 h más antiguos son de 1921 en la estación de Champotón. Sin embargo, la información anual solamente tiene la calidad necesaria, desde el punto de vista estadístico, a partir de 1952.

Posada *et al.* (2012a) desarrollaron el programa PAIC, el cual permite: 1) extraer la información de la base de datos CLICOM para la variable meteorológica de interés tanto para una estación específica o para todo el Estado, 2) obtener valores máximos, mínimos, medios y acumulados, 3) obtener el índice de precipitación estandarizado IPE de

**Tabla 1.** Elementos diarios de estaciones climatológicas.

Nombre del elemento	ID-Elemento
Temperatura a la hora de la observación.	001
temperatura máxima.	002
Temperatura mínima.	003
Precipitación diaria.	005
Evaporación diaria.	018
Nubosidad diurna.	043
Presencia de tormenta eléctrica.	030
Presencia de granizo.	031
Presencia de niebla.	032
Presencia de nieve.	035
Cantidad total de nieve.	049
Presencia de heladas.	091



**Figura 1.** Ubicación de las estaciones climatológicas para el estado de Campeche.

manera anual, estacional o mensual, cuyas principales características se enuncian a continuación.

### ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADO (IPE)

Este índice permite evaluar, con respecto a las condiciones normales de precipitación, el déficit o exceso de lluvia para una región durante un periodo de tiempo específico (generalmente entre 1 mes y 4 años). Siendo relevante enfatizar la importancia de utilizar series de tiempo largas para obtener un análisis adecuado. Los valores del IPE oscilan entre -2.0 y +2.0, un valor cercano a 0.0 indica que la precipitación es similar a la mediana de todos los datos analizado. Valores negativos están asociados a diferentes niveles de sequía; los cuales, de acuerdo a US Drought Monitor 2013, pueden clasificarse en:

- Anormalidad Seca (IPE de -0.7 a -0.5),
- Sequía moderada (IPE de -1.2 a -0.8),
- Sequía severa (-1.5 a -1.3),
- Sequía extrema (-1.9 a -1.6) y
- Sequía excepcional (menor a -2.0),

En la tabla 2 se presentan los valores que puede tomar el IPE.

Los detalles de su cálculo se describen a detalle en Posada *et al.* (2012a y 2012b)

### TEMPERATURAS EXTREMAS

La caracterización de las temperaturas extremas tanto máximas como mínimas se efectuó aplicando el programa PAIC a cada una de las estaciones climatológicas con el fin de obtener los valores máximos y mínimos anuales durante el periodo 1952 a 2010. Posteriormente, estos valores fueron interpolados para obtener los mapas de temperaturas extremas para el estado de Campeche.

**Tabla 2.** Valores del Índice de Precipitación Estandarizado, IPE; McKee 1993.

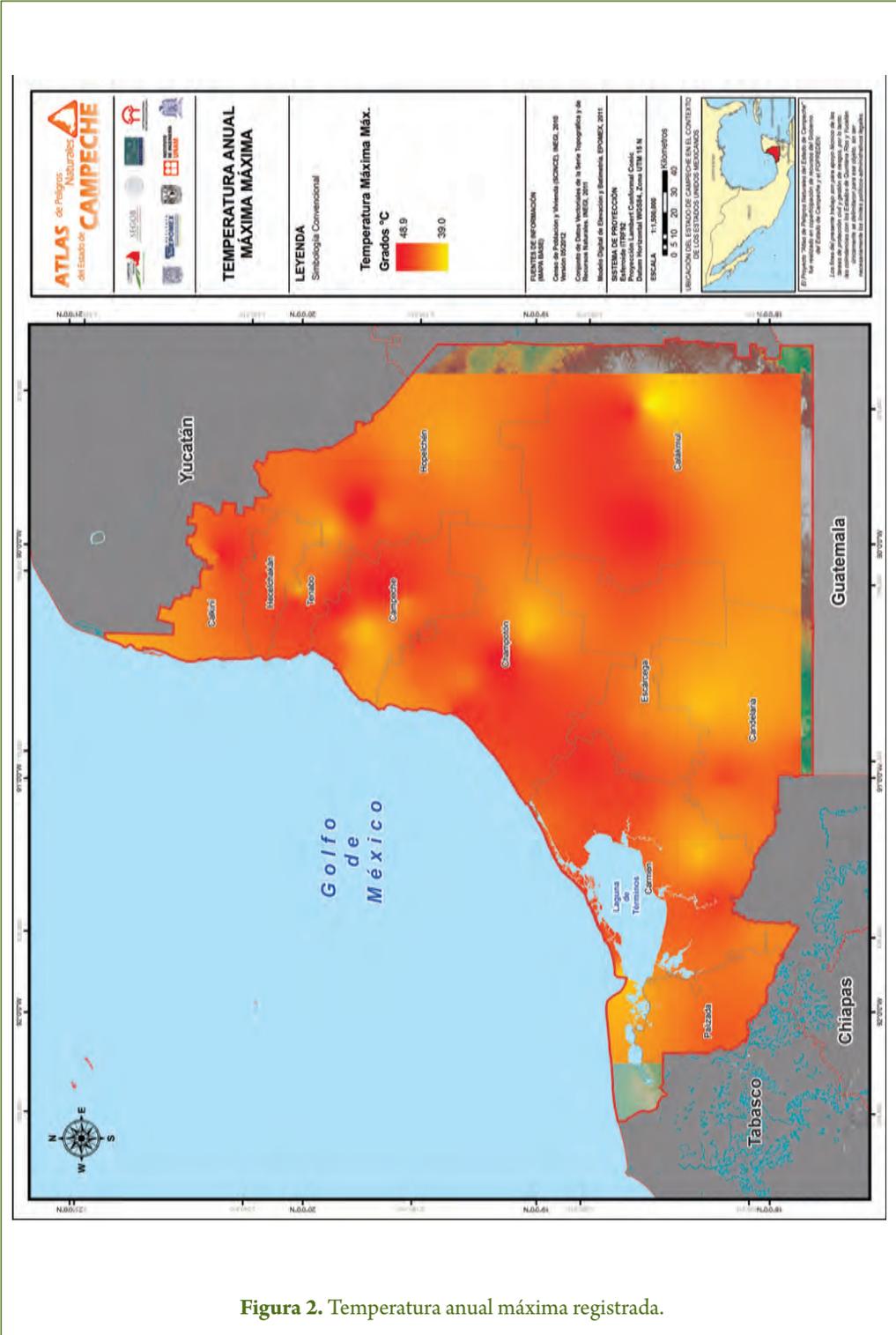
Valores IPE	Categoría de la sequía
2.00 o más	Extremadamente húmedo
1.50 a 1.99	Muy húmedo
1.00 a 1.49	Moderadamente húmedo
0.00 a 0.99	Normal, húmedo
-0.99 a 0.00	Normal, seco
-1.49 a -1.00	Moderadamente seco
-1.99 a -1.50	Severamente seco
Menor a -2.00	Extremadamente seco

## RESULTADOS

Se presentan los valores de temperaturas medias, máximas y mínimas para el estado de Campeche (figura 2 a 5), además de los valores esperados de temperaturas máximas dentro de las máximas. Estos valores son indicativos del verano más cálido que se registraron durante el periodo 1952 a 2010 por cada estación. Así mismo, se detectaron las temperaturas mínimas dentro de las míni-

mas, que corresponden al invierno más frío, según la base de datos CLICOM, por estación.

Los mapas anuales del IPE para el periodo comprendido entre 1994 a 1996 y 2007 a 2008, se esquematizan desde la figura 6 hasta la 10. El año 1994 fue indicativo de sequía (IPE de -2.0) para los municipios de Champotón y Calakmul, por el contrario



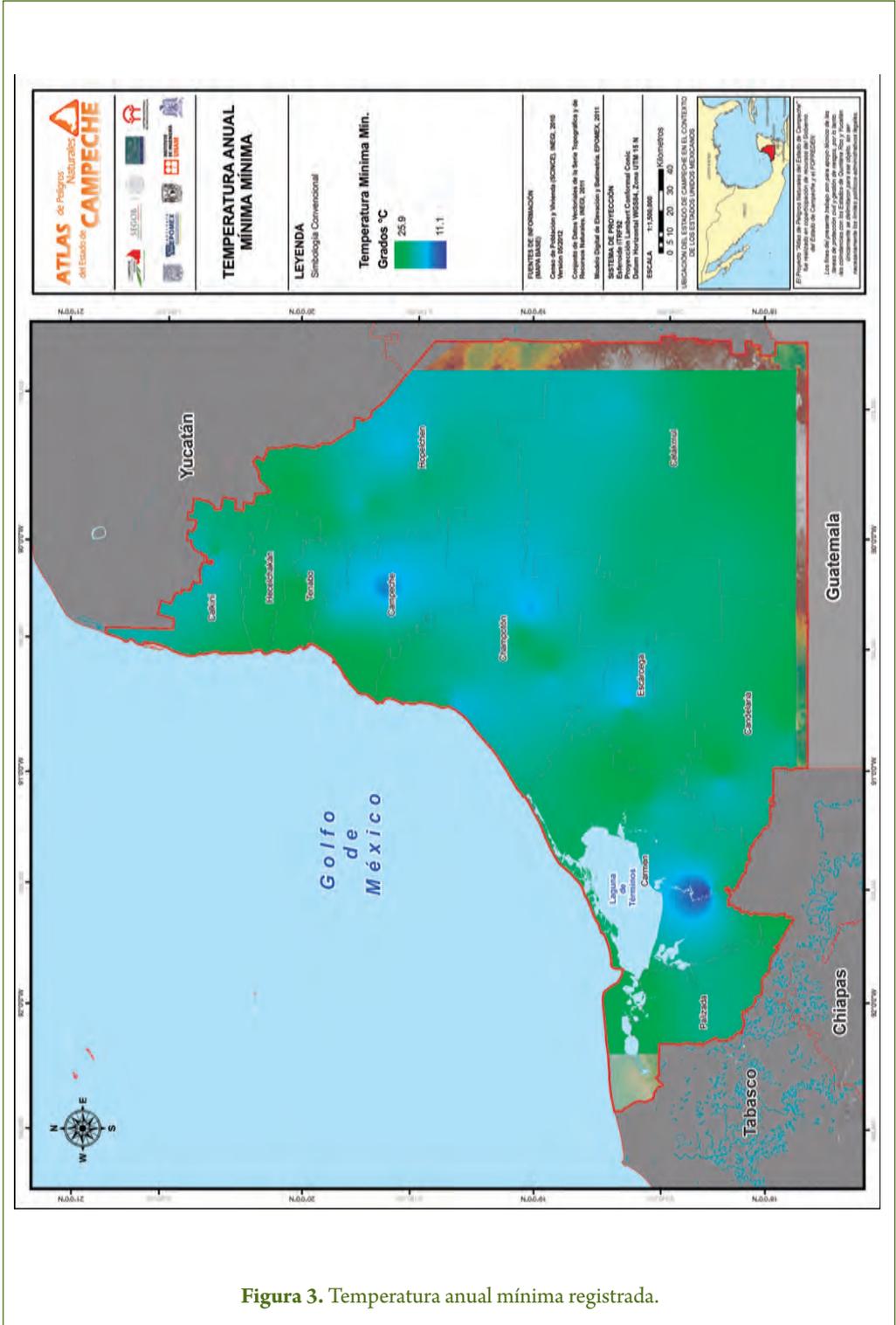
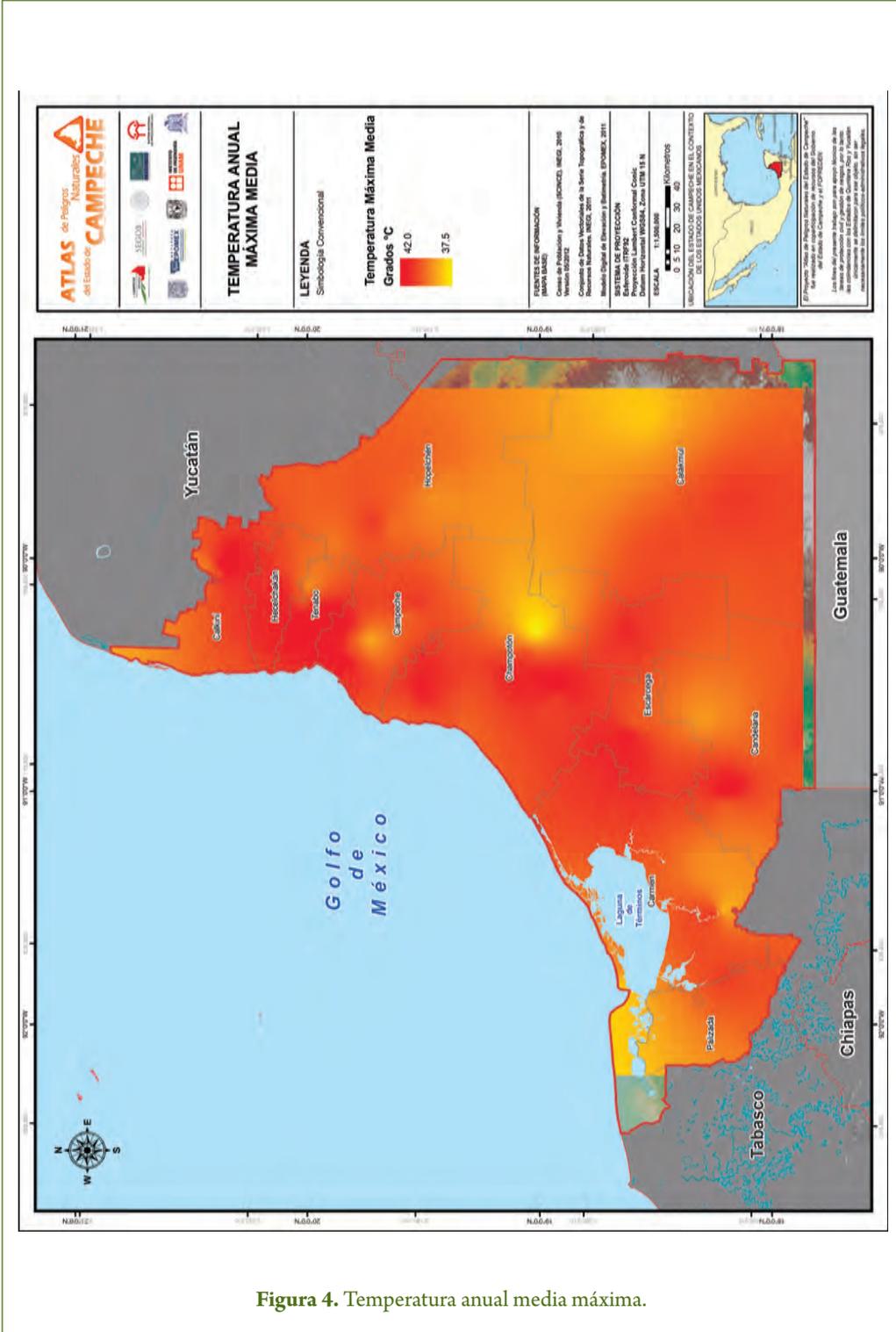


Figura 3. Temperatura anual mínima registrada.



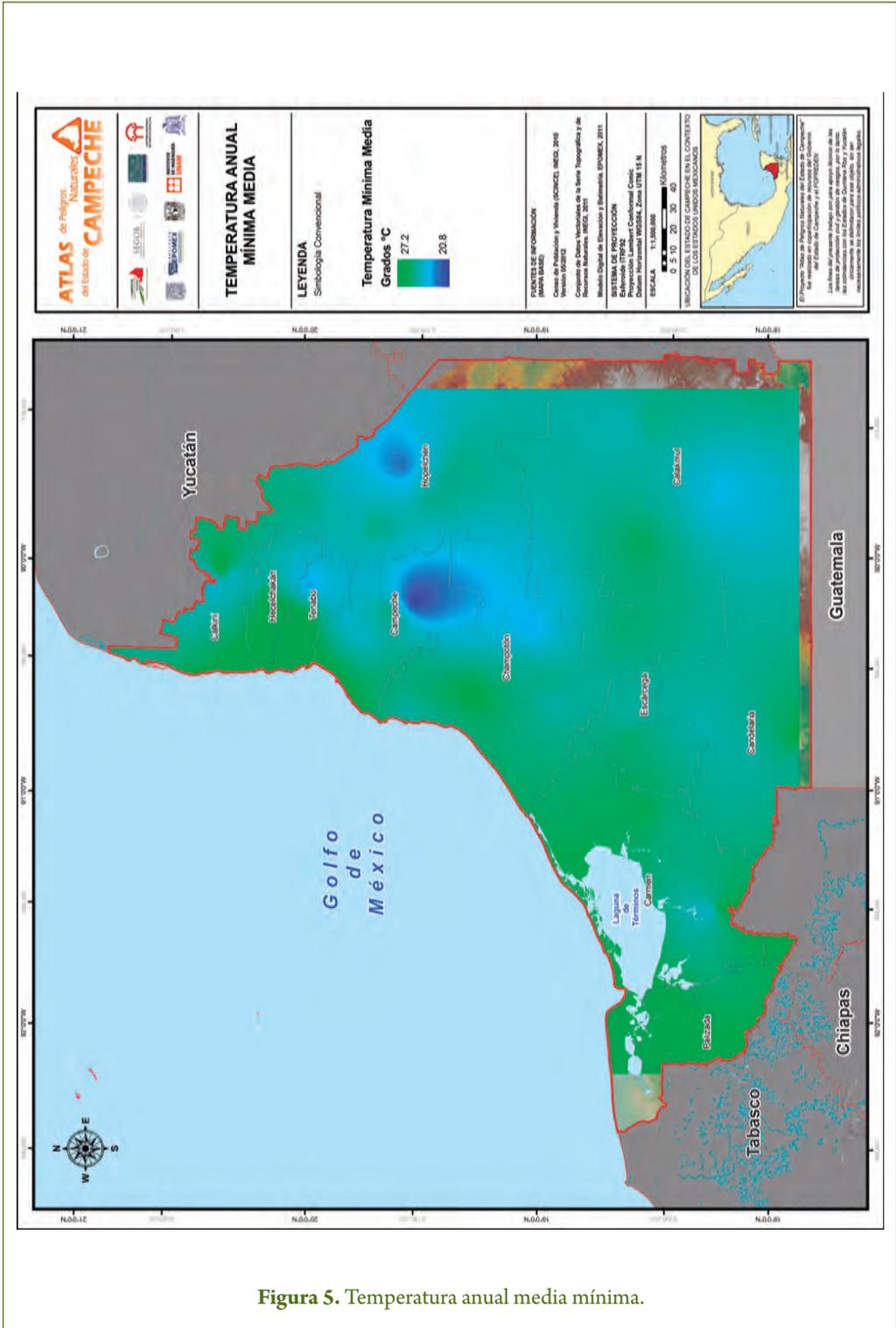


Figura 5. Temperatura anual media mínima.

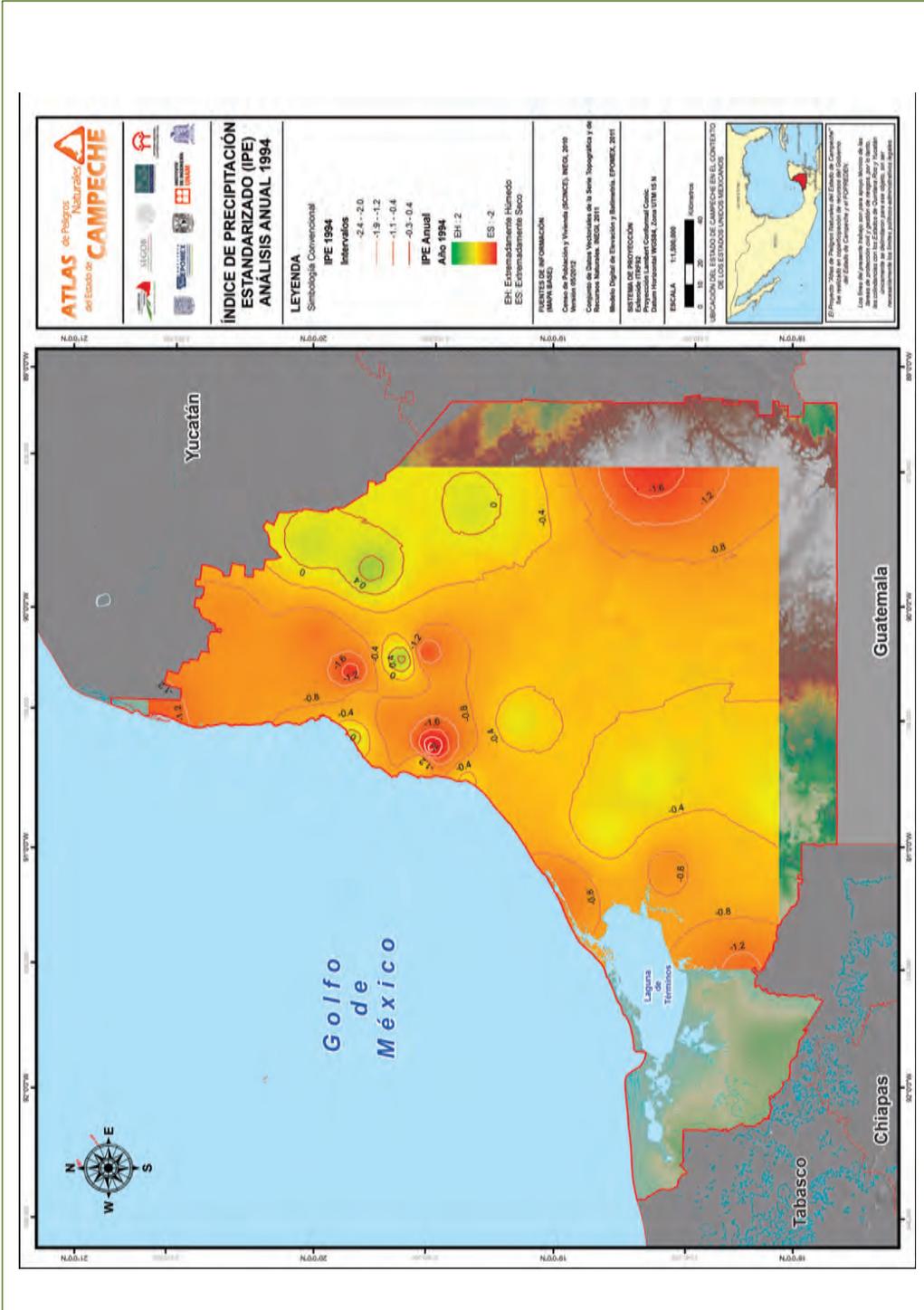


Figura 6. Índice de Precipitación Estandarizado para el año 1994.

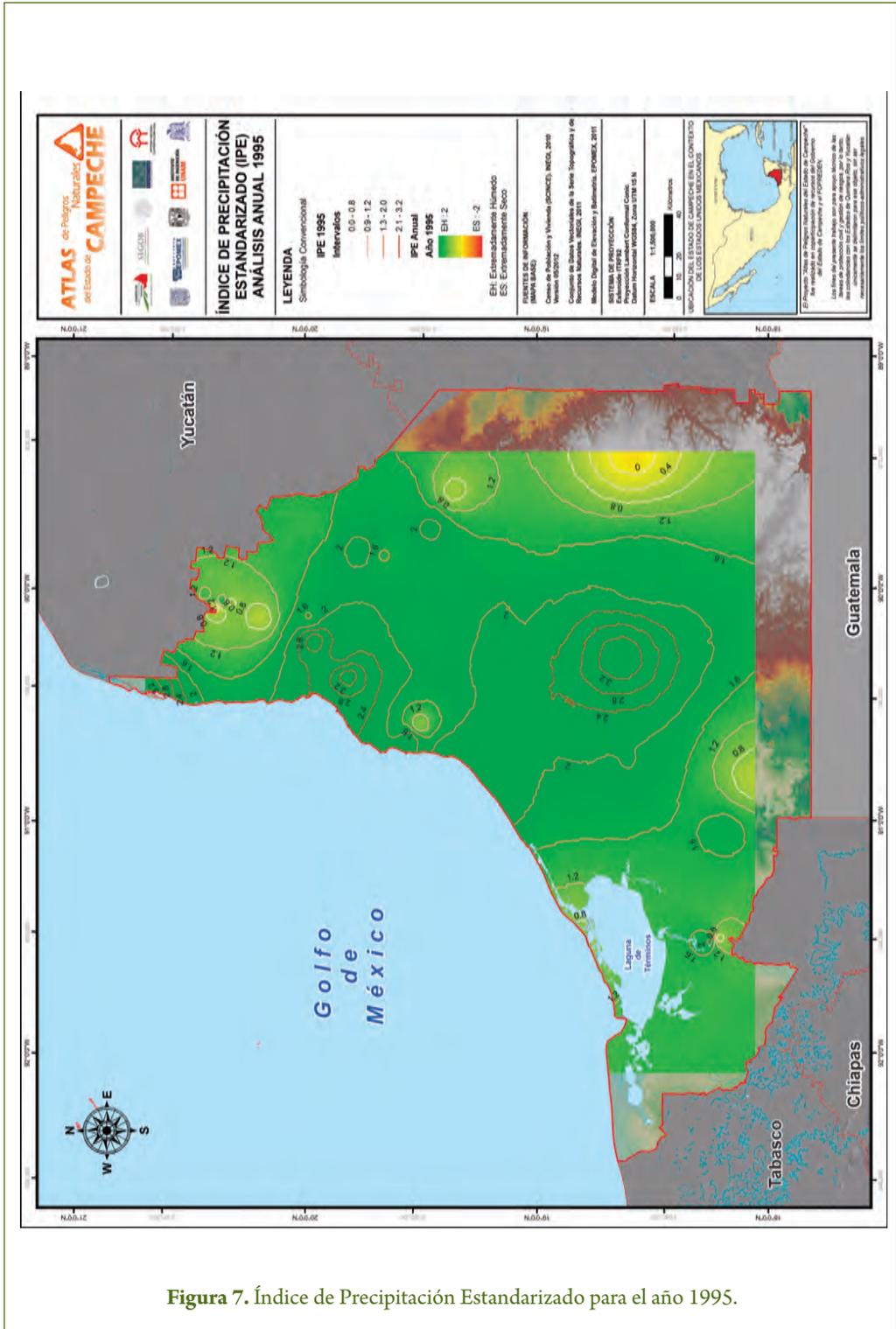
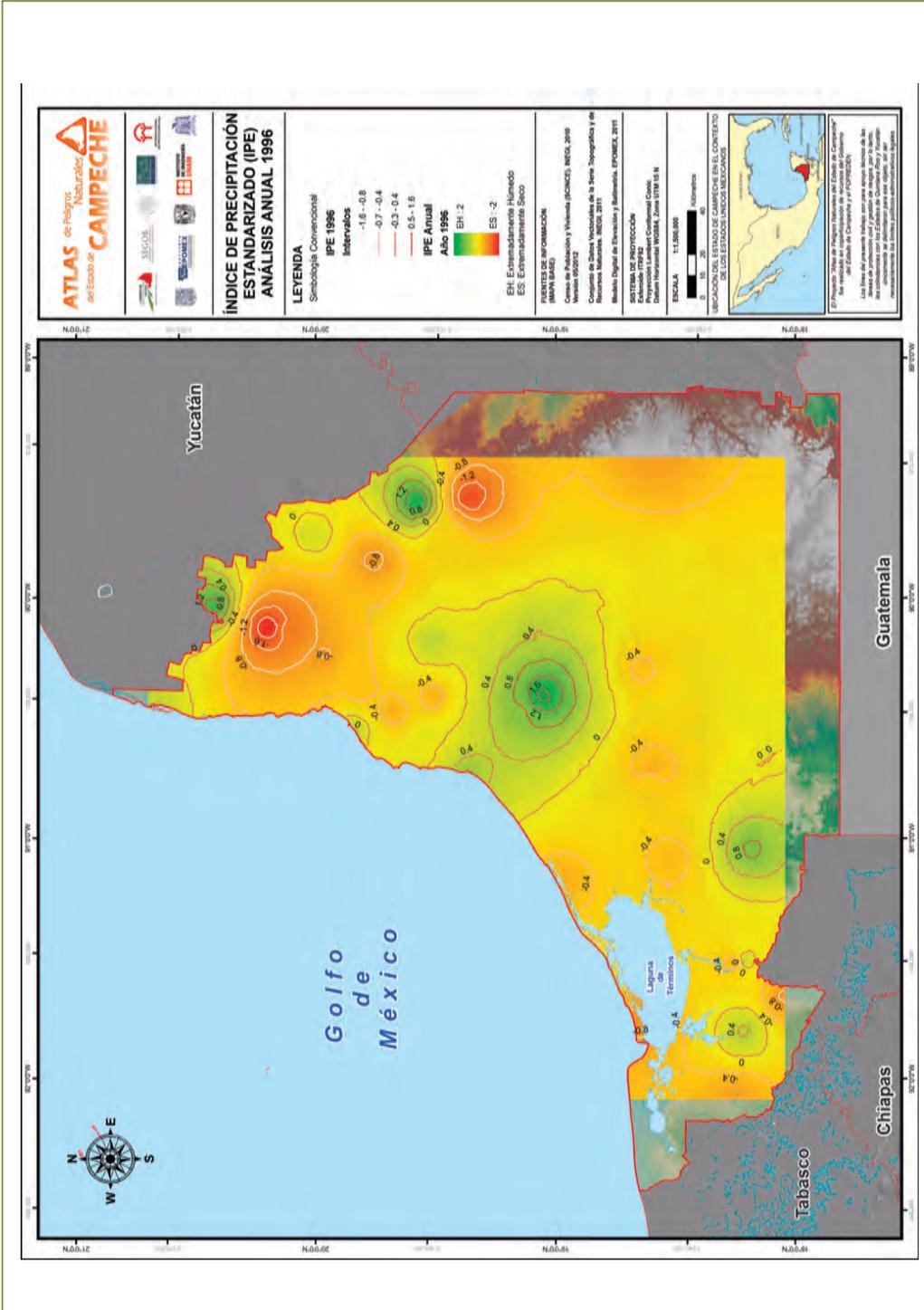
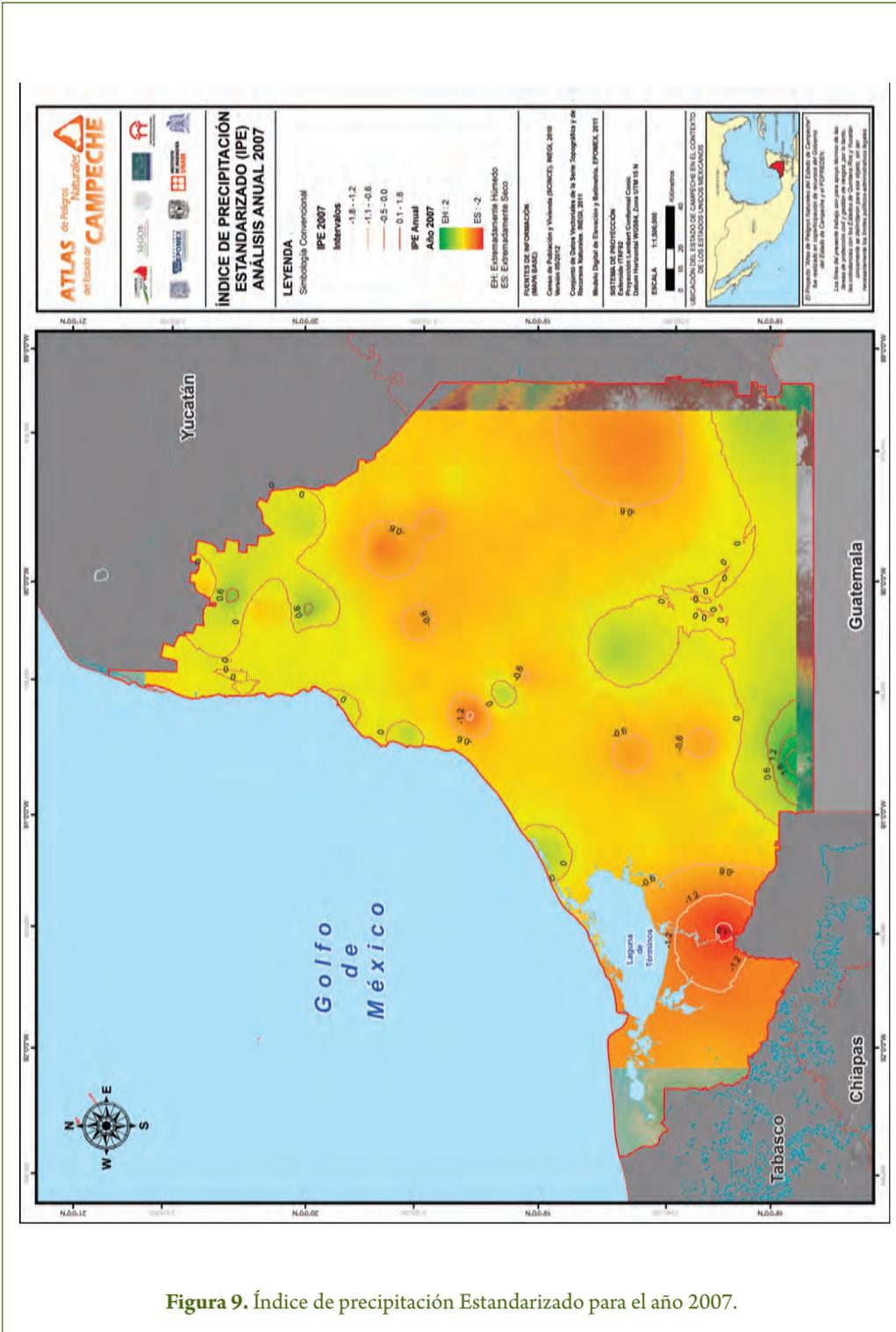


Figura 7. Índice de Precipitación Estandarizado para el año 1995.





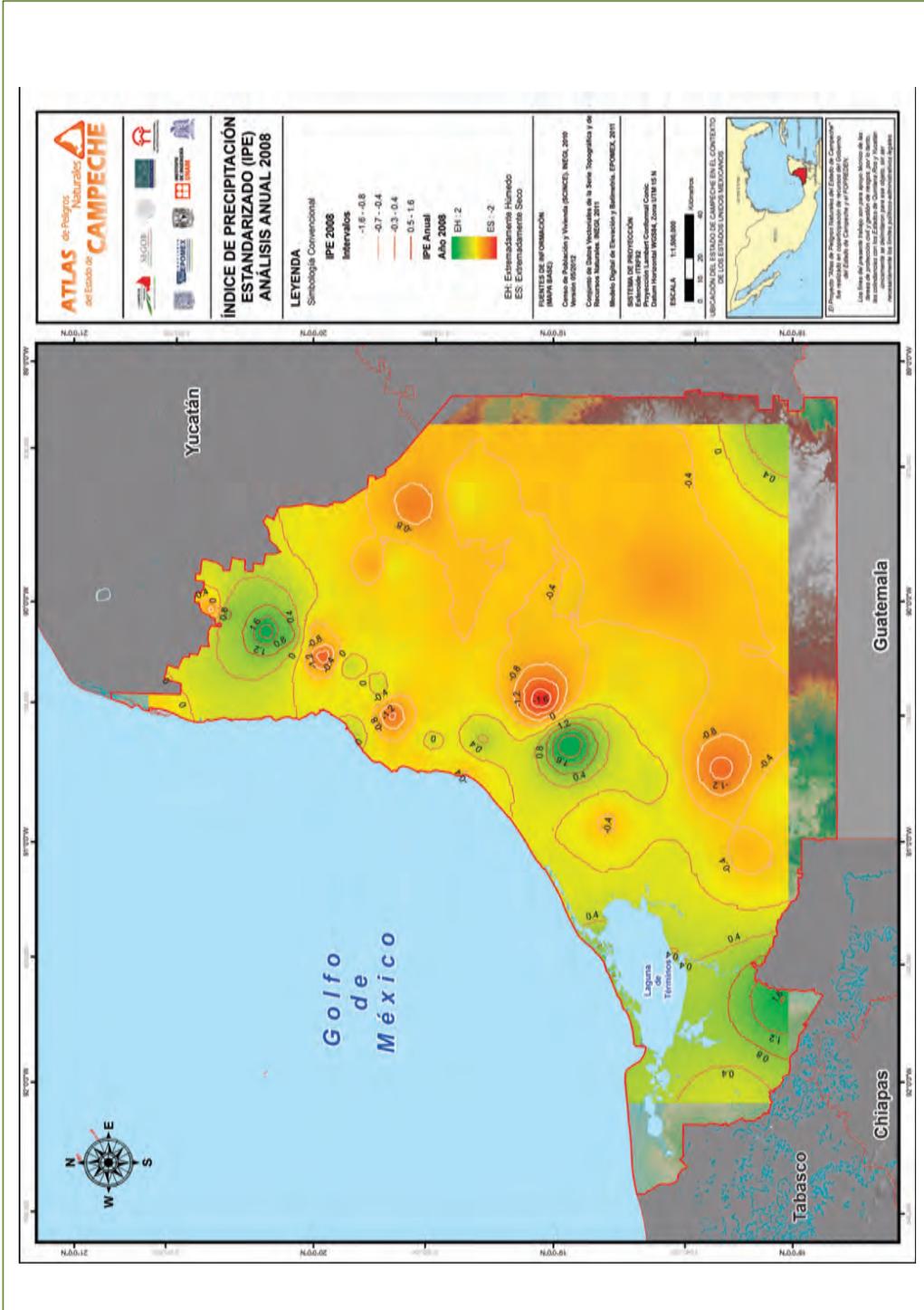


Figura 10. Índice de Precipitación Estandarizado para el año 2008.

el año 1995 se presentaron los huracanes “Roxanne” y “Opal”, calculando un IPE positivo con valores cercanos a +2.0, en casi toda la geografía estatal, con excepción del municipio de Calakmul, el cual registró una cantidad de lluvia anual cercana a la mediana (valores IPE cercanos a 0.0). Para el año 2007 nuevamente se detectaron valores IPE negativos en la cuenca de los ríos Chumpán y Champotón.

En la figura 11 se presenta el análisis estacional del IPE para la región de laguna de

Términos durante los años 2006 a 2010. En la figura 12 se exhiben dos gráficas, una de ellas relacionada con la producción de la hojarasca de un bosque de mangle mono-específico de *Rhizophora mangle*, localizado en la Isla del Carmen (Agraz Hernández *et al.*, 2011) y la otra esquematiza los valores del IPE de manera anualizada, se observa que cuando el IPE es negativo, la concentración de la salinidad del agua intersticial incrementa; y por ende, la producción de hojarasca disminuye notablemente (figura 12).

## CONCLUSIONES

En este documento se presentó un análisis de temperaturas extremas y un análisis de sequía para el estado de Campeche obtenido a partir de la aplicación del programa PAIC a la base de datos CLICOM de la CONAGUA. Este programa fue desarrollado de manera exclusiva para el proyecto *Atlas de Peligros Naturales del Estado de Campeche* y además de ser utilizado para los peligros anteriormente mencionados también fue aplicado para la determinación de precipitación necesaria para el análisis de caudales en el peligro de desbordamiento de ríos.

Las máximas temperaturas registradas en el periodo 1952 a 2010 fueron de 48 grados en los municipios de Calkiní, Campeche y en la región del estero de Sabancuy, las tem-

peraturas mínimas se han registrado en el municipio de Campeche y en la cuenca del río Chumpán con valor de 11 grados centígrados, la temperatura media máxima es de 42 °C, la temperatura media mínima es de 25 °C

El Índice de Precipitación Estandarizado tiene una alta correlación con la producción de hojarasca en el bosque de *Rhizophora mangle*, ubicado en laguna de Términos, por lo que se concluye que puede ser utilizado para cuantificar las pérdidas en cultivos debido a la aparición de la sequía. Las regiones con mayor peligrosidad respecto a la sequía son laguna de Términos, Champotón y Calakmul.

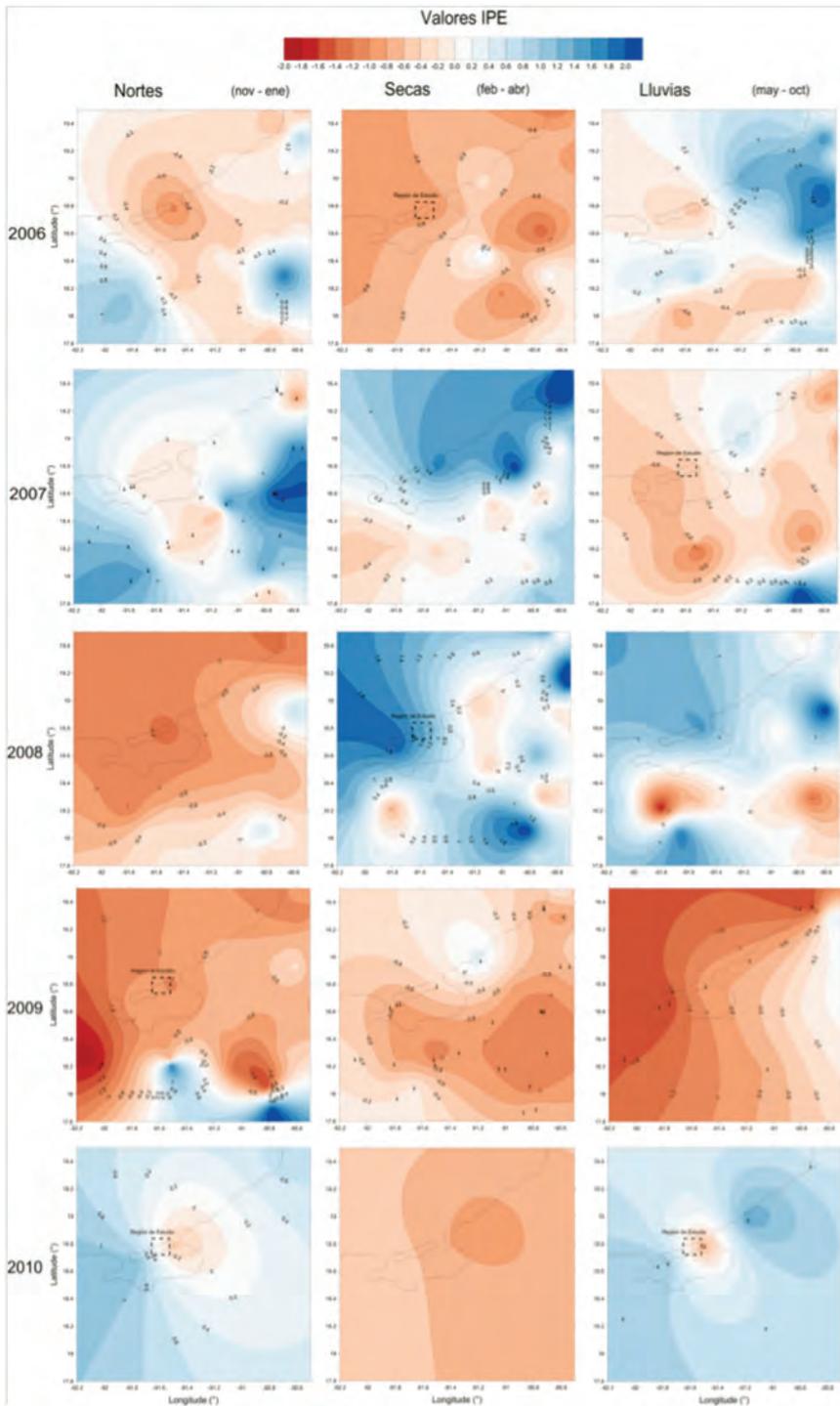
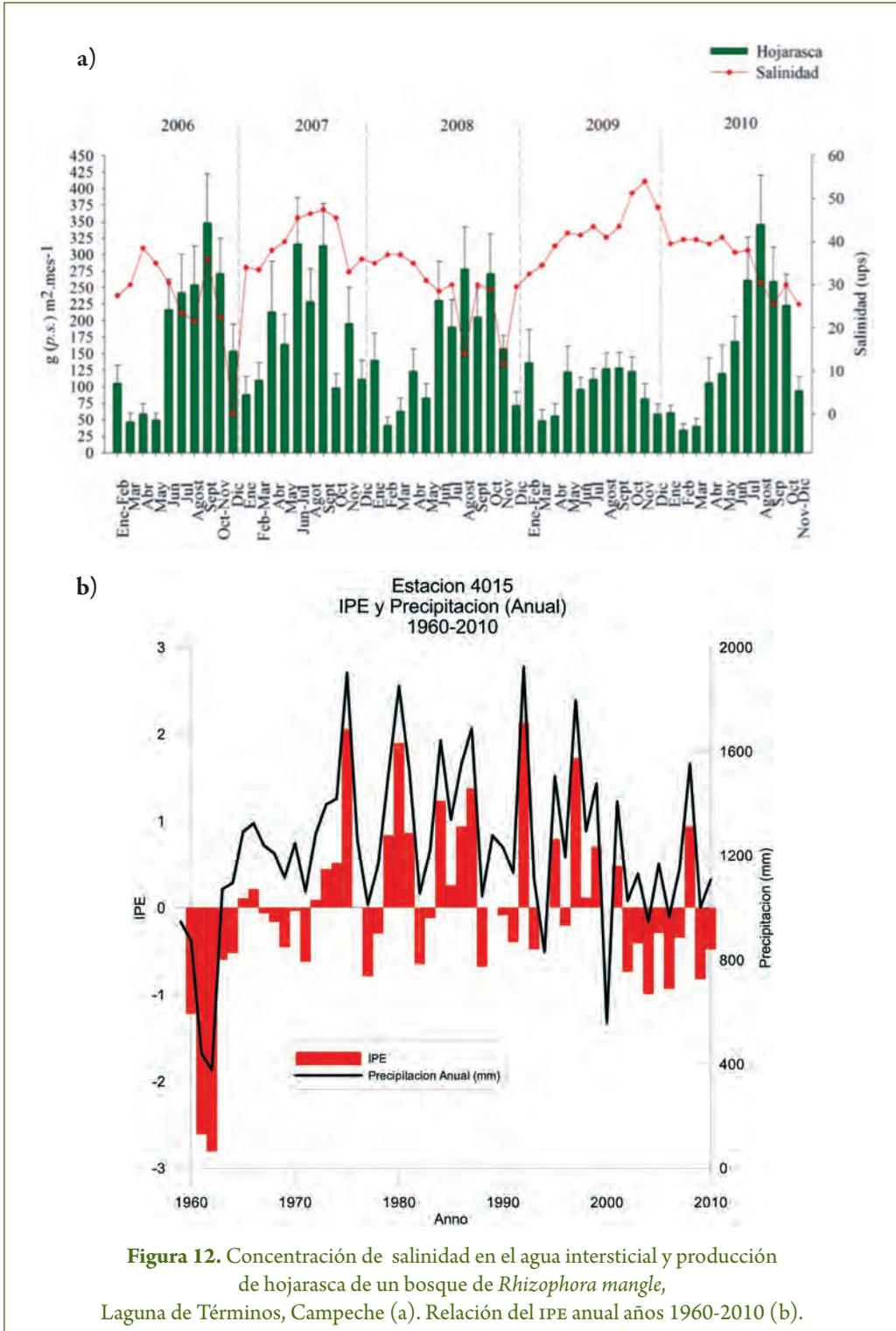


Figura 11. IPE estacional Laguna de Términos, México 2006-2010.



**Figura 12.** Concentración de salinidad en el agua intersticial y producción de hojarasca de un bosque de *Rhizophora mangle*, Laguna de Términos, Campeche (a). Relación del IPE anual años 1960-2010 (b).



## LITERATURA CITADA

- ARN, 2013.** Atlas Nacional de Riesgos, <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/>
- Agraz-Hernández, C.M., C. Chan Keb, J. Osti Sáenz, E. Chan Canul, C. García Zaragoza, G. Posada y B.E. Vega, 2011.** Variación climática en laguna de Términos (Campeche): productividad y fenología de *Rhizophora mangle*. p. 229-254 En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (eds.). Vulnerabilidad de las Zonas Costeras Mexicanas ante el Cambio Climático (segunda edición). Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 754 p. ISBN 978-607-7887-30-0
- Castorena, G., M. E. Sánchez, M. E. Florescano, R. G. Padilla, y U. L. Rodríguez, 1980.** Análisis histórico de las sequías en México, México, Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1980, 137 p.
- CLICOM, 2012.** SMN, [http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=4&Itemid=5](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=4&Itemid=5)
- García J. F. y M.O. Fuentes, 1985.** Análisis de las sequías en México. Cuaderno de Investigación No. 46. Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.
- Hare, K. F., 1985.** Sequía, variación climática y desertificación, Ginebra, Suiza, Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial, No. 653. 35 p.
- McKee Thomas B., J. Doesken Nolan, & J. Kleist, 1993.** The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eighth conference on Applied Climatology. Anaheim, California department of atmospheric science, pp 17- 22.
- Posada, G., B.E. Vega, C. Agraz, C.A. Chen, R. Cel, 2012a.** Aplicación del Índice de Precipitación Estandarizada en la producción de hojarasca de un bosque de mangle. xxv Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José de Costa Rica, Septiembre 2012. ISBN 978-9968-933-06-3.
- Posada, G., B.E. Vega, y E. Peña, 2012b.** Programa de Análisis de Información Climatológica, PAIC, Registro Indautor 03-2012-072512592200-01
- US Drought Monitor, 2013.** <http://drought-monitor.unl.edu/archive.html>
- Wilhite, D.A., 2000.** Drought as a natural hazard p. 3-18. In: Wilhite. D. A. (ed). Drought: A Global Assessment. Routledge publishers. London. UK.

---

## Sismos

*Germán Daniel Rivillas Ospina*

---

### RESUMEN

La historia ha puesto de manifiesto tanto la periodicidad como la variabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos de gran magnitud, así como su capacidad de destrucción, en todo el territorio mexicano. Como respuesta al peligro inminente de los sismos y en la búsqueda de aminorar los riesgos que estos originan, se lleva a cabo el proyecto de *Atlas de Peligros de Campeche*, cuyo esfuerzo técnico y de gestión dio como fruto la expedición de mapas de peligro para diferentes periodos de retorno, que conducen a la caracterización del peligro sísmico del estado para áreas rurales y urbanas, donde deben ser establecidos los parámetros necesarios para la estimación de este fenómeno. Adicionalmente, este estudio debe servir como base para desarrollar en un futuro, un análisis de vulnerabilidad que permita modelar escenarios de sismos futuros, calibrados a partir de sismos reales, para cuantificar las pérdidas potenciales de vidas humanas y materiales, en función del tipo de fuente sísmica.

#### Objetivos

- Presentar una descripción de la metodología para la estimación del peligro sísmico.
- Desarrollar mapas de aceleración sísmica para diferentes periodos de retorno.
- Definir las zonas que presentan mayor peligro sísmico con base en los mapas generados.
- Identificar el origen y el riesgo sísmico en el estado de Campeche.



## METODOLOGÍA

### ANTECEDENTES

La sismicidad es un fenómeno natural, que resulta de la dinámica interna de la tierra, afectando de forma directa cada una de las actividades del ser humano a lo largo de su existencia. El desarrollo de metodologías para la cuantificación de la intensidad máxima, asociada a un periodo de retorno, que un movimiento sísmico puede llegar a registrar en una región, es uno de los avances más significativos de la ingeniería sísmica en las últimas décadas. Metodologías que con la evolución de la tecnología han sido refinadas en los últimos años, con el objetivo de establecer criterios que permitan establecer el riesgo y la vulnerabilidad de la población en diferentes zonas del planeta.

El riesgo en términos técnicos significa “la posibilidad de pérdida o daño o exposición al cambio de daño o pérdida” (Sauter, 1996; Dowrick, 1997). La peligrosidad se expresa como “amenaza impuesta por ciertos fenómenos naturales, como son los huracanes, erupciones volcánicas, riadas, terremotos, etc., que pueden causar consecuencias adversas a la actividad humana, impacto social negativo y pérdida de vidas humanas y económicas severas” (Sauter, 1996; CSSC, 1999). La vulnerabilidad se define como “algo que puede ser herido o recibir lesión, física y mentalmente” y técnicamente “se utiliza como una escala para expresar las diferentes formas de responder ante el efecto de un terremoto” (Grüntal, 1998). Algunos comités y trabajos científicos se han encargado de establecer una nomenclatura adecuada dentro del área de la sismología e ingeniería sísmica, que permita unificar y aclarar las diferencias existentes en la definición de los conceptos

mencionados. Entre los comités se encuentran el Instituto de Investigaciones de Ingeniería Sísmica (EERI), la Asociación Europea de Ingeniería Sísmica (CSSC) y el Servicio Geológico de los E.U. (USGS). El Riesgo, la Peligrosidad y la Vulnerabilidad Sísmica se pueden definir de la siguiente manera:

**Riesgo Sísmico.** Son las consecuencias sociales y económicas potenciales provocadas por un sismo, como resultado de la falla de estructuras cuya capacidad resistente fue excedida por un terremoto.

**Peligrosidad Sísmica.** Probabilidad de que ocurra un fenómeno físico como consecuencia de un terremoto, provocando efectos adversos a la actividad humana. Estos fenómenos además del movimiento de terreno pueden ser, la falla del terreno, la deformación tectónica, la licuefacción, inundaciones, tsunamis, etc.

**Vulnerabilidad Sísmica.** Es un valor único que permite clasificar a las estructuras de acuerdo a la calidad estructural intrínseca de las mismas, dentro de un rango de nada vulnerable a muy vulnerable, ante la acción de un terremoto”.

El riesgo sísmico depende directamente de la Peligrosidad y de la Vulnerabilidad, es decir, los elementos de una zona con cierta peligrosidad sísmica pueden verse afectados en menor o mayor medida, dependiendo del grado de vulnerabilidad sísmica que tengan, ocasionando un cierto nivel de Riesgo Sísmico del lugar.

De acuerdo con estudios realizados por el CENAPRED (2006) durante el siglo pasado se presentaron en todo el territorio mexicano 71 eventos sísmicos con una magnitud mayor o igual a 7, con profundidades que alcanzan 40 km a partir de la superficie terres-

tre. Esto hace indispensable el conocimiento del riesgo a que se encuentra sometida una población o área específica.

De acuerdo con Amaya (2012), entre los distintos tipos de catástrofe natural, los movimientos sísmicos y sus secuelas han constituido a través del tiempo, hechos de gravedad que afectan a la población en todos los ámbitos de la existencia y aunque por tratarse de fenómenos naturales impredecibles, son imposibles de evitar. El conocimiento de los factores físicos que lo producen permite prevenir los riesgos y minimizar la pérdida de vidas y de recursos económicos. La experiencia en casos de sismos en grandes ciudades, indica que la catástrofe es directamente proporcional al grado de aislamiento para enfrentarla y que la función de prevención empieza con el cumplimiento de una serie de requisitos de orden técnico e institucional, que pueden y deben mejorarse al evaluar lo conocido, aprovechando los recursos disponibles para desarrollar esos conocimientos desde el punto de vista de la investigación científica.

No existe un procedimiento que permita estimar con precisión, la ocurrencia y magnitud de este tipo de eventos. Un movimiento sísmico no puede ser modelado de forma sencilla y bajo un enfoque determinista, debido a que no es posible establecer con certeza la manifestación de éste en un lugar y tiempo específico. Sin embargo, el análisis estadístico de los terremotos que han ocurrido en el pasado y la aceleración registrada en cada uno de los sitios donde se presentaron, sirve como base para establecer la probabilidad de ocurrencia de ciertas aceleraciones en el futuro. No obstante, no se debe evadir el hecho que un sismo es considerado como un proceso discreto estocástico en el tiempo, y que muchos de los aspectos que caracterizan la actividad sísmica son desconocidos dada

la naturaleza de este tipo de fenómenos. El hecho que valida su aplicación estadística, consiste en suponer la aceleración del suelo como un proceso que ocurre, en todos los casos de forma similar, y que no depende del lugar donde éste se presente. Este análisis debe contar, por lo tanto, con una base de datos de los eventos que han ocurrido en el pasado, que permita definir la distribución de aceleraciones en el sitio de estudio. Estadísticamente, para que una muestra sea representativa del fenómeno que se está analizando, debe contar con un registro que posea una muestra con 30 datos, sin embargo, usualmente no se cuenta, con una serie de información lo suficientemente amplia de las aceleraciones en cada sitio. Esta limitación conduce al desarrollo de modelos que permitan determinar el valor de la aceleración probable que puede llegar a presentarse en el lugar de interés.

## MAGNITUD SÍSMICA

Una medida indirecta de conocer el tamaño de un sismo, que no depende de variables como la intensidad, la densidad de la población, el tipo de construcciones, es el registro sísmico. Este permite comparar el tamaño de los terremotos en todo el mundo.

Existen diversas modalidades de registro: tiras de papel, cintas magnéticas y digitales, y película. En la actualidad la mayoría de los registros sísmicos son de tipo digital, que facilitan el procesamiento de la información en computadoras. Esta medición se relaciona con la cantidad de energía liberada y no se halla en función de los instrumentos de medición.

Esta escala de magnitud de medición cuantitativa se aplica a sismos superficiales y cercanos y fue desarrollada Charles Richter, técnica que evalúa las amplitudes de las on-



das registradas mediante un instrumento llamado sismógrafo.

## ESTIMACIÓN DEL PELIGRO SÍSMICO

La descripción del peligro sísmico, es llevada a cabo, a través de indicadores cuantitativos de las probabilidades de ocurrencia de movimientos de distintas intensidades durante un periodo de tiempo dado (II, 2003). Para ello se requiere la tasa de excedencia de parámetros de intensidad sísmica instrumental, que es el inverso del periodo de retorno y se puede definir como el número medio de veces por unidad de tiempo, durante el cual ocurre un temblor de gran magnitud.

El escenario determinista representa la severidad de un movimiento sísmico del terreno sobre un área urbana, mediante el uso de uno o más elementos que describan el peligro sísmico. Este escenario se obtiene:

- Mediante la consideración de un sismo de referencia especificado por una magnitud o una intensidad epicentral, asociado a una fuente sísmica particular (por ejemplo, una falla, un punto o un volumen de la corteza). En este caso, normalmente los niveles de intensidad sísmica local necesitan ser estimados a través de relaciones de atenuación para él o los parámetros de peligro seleccionados (Aguilar, 2011).
- Estimación directa a través de los valores de intensidad macrosísmica, o de parámetros medidos instrumentalmente, generados por sismos en el pasado. En este sentido, se suele seleccionar el valor de la intensidad de los parámetros sísmicos asociados al sismo histórico, que a su vez fue seleccionado con el sismo representativo.

La evaluación probabilística del peligro del movimiento sísmico, o del escenario de peligrosidad uniforme, es una representación del movimiento sísmico sobre un área (rural/urbana) que describe, a través de los parámetros de peligrosidad seleccionados, la severidad de los movimientos sísmicos esperados con una probabilidad de excedencia asociada del 10% en 50 años. Esta representación se obtiene mediante el uso de herramientas computacionales (Ordaz & Arboleda, 1999).

Para la estimación y el conocimiento del peligro sísmico se requiere la obtención de catálogos sísmicos con magnitudes y localizaciones epicentrales, además de un conocimiento amplio de la tectónica que caracteriza la región que se está analizando.

De acuerdo con Aguilar (2011) los escenarios sísmicos obtenidos de forma probabilística, deben ser descritos en términos de la intensidad macrosísmica, para que sea posible estimar el escenario de daño sísmico.

Generalmente, la mayoría de los países no cuenta con bases de datos lo suficientemente amplias sobre información sísmica; esto conduce a la aplicación de procedimientos probabilísticos para determinar los periodos de recurrencia para las diferentes zonas sismogénicas. El procedimiento para la estimación del peligro inicia con el análisis de la sismicidad local, dividiendo el territorio en fuentes generadoras con una tasa constante de generación de sismos. Se calculan posteriormente, los efectos que produce cada fenómeno para el punto estudiado a partir de la intensidad sísmica instrumental. Es necesario contar con leyes de atenuación que relacionan la magnitud, la posición de la fuente con relación al sitio dado y la intensidad producida. Estas leyes se fundamentan en que a medida que aumenta la distancia a partir de la fuente, la intensidad disminuye.

La intensidad se puede definir como un conjunto de parámetros cualitativos o cuantitativos distribuidos espacialmente, con los que se puede determinar el potencial que tiene un fenómeno. En general, la intensidad reúne a un conjunto de parámetros distribuidos espacialmente para descubrir la potencia destructiva de los movimientos del terreno. Estos parámetros pueden ser cuantitativos como la aceleración máxima o la velocidad máxima, o cualitativos como la escala de Mercalli Modificada.

Actualmente se puede tener una medición indirecta de la intensidad de una forma instrumental, a través de valores de aceleración del terreno producto de los acelerógrafos. A diferencia de los sismógrafos, independientemente de la magnitud del sismo, los acelerógrafos registran las aceleraciones del terreno expresada como fracción de la gravedad terrestre. La idea fundamental es registrar la intensidad del movimiento producido por un temblor en un sitio determinado. Esta información es muy utilizada por los ingenieros para medir el comportamiento de los edificios, puentes y otras estructuras excitadas por un sismo.

La evaluación de la amenaza sísmica tiene en cuenta las siguientes etapas:

**Definición de la zona sísmica.** Contrario a lo anterior, investigaciones realizadas en las últimas décadas han permitido caracterizar las regiones con mayor intensidad sísmica, las cuales, se encuentran bien definidas y se tiene una estimación de las magnitudes máximas determinadas a partir de series de datos históricos y de estudios geofísicos. El primer paso en el proceso de análisis es definir las zonas que potencialmente pueden presentar fuertes terremotos. Se acepta en la literatura, que la ocurrencia y localización de un evento de este tipo se encuentra relacionada a las propiedades tectónicas y del

sistema de fallas geológicas que presenta una región. La definición de la zona sísmica se encuentra fundamentada en los datos existentes de las características sísmicas y tectónicas de cada sitio.

**Modelación geométrica de la fuente sísmica.** La fuente de origen de los sismos se considera como un volumen dentro de la tierra, sin embargo, en muchos casos una de sus tres dimensiones puede ser bastante mayor. Los modelos de las fuentes de origen que se utilizan para el análisis normalmente son el punto, la línea, el círculo y el área (Cornell, 1967). Esta modelación se justifica como una primera aproximación, puesto que el error en sus resultados es comparable con el causado por la insuficiente cantidad de información y por la limitada definición de los parámetros de origen de los sucesos (Cardona, 2000).

**Modelación de la ocurrencia sísmica.** El hecho de caracterizar un sismo como proceso discreto estocástico no estacionario en el tiempo genera una gran complejidad al estudio de la cuantificación de éste fenómeno. Esta limitante se soluciona al modelar la actividad sísmica como proceso discreto estocástico simple, a través de metodologías como la de Bernoulli, Poisson o Markov. El modelo más empleado es el de Poisson por su simplicidad y porque la incertidumbre es consistente con la falta de información.

**Estimación de la distribución de magnitudes.** El nivel de amenaza depende, de la recurrencia del fenómeno y la magnitud de éste. Por lo tanto, es imprescindible conocer no sólo el número de veces que ocurre un sismo, sino también, su magnitud asociada. Esto se determina a través del empleo de expresiones empíricas que indican la relación existente entre la frecuencia y la magnitud de un evento para cada sitio.



### **Cálculo de las funciones de atenuación.**

Es conocido que un movimiento telúrico con diferentes magnitudes puede presentar diferentes aceleraciones para un mismo sitio, como también, una serie de terremotos con la misma magnitud pueden producir diferentes aceleraciones a diversas profundidades. Un factor que hace del cálculo de la atenuación un problema mayor, es que la aceleración no solo depende de elementos como la magnitud y la distancia, también, de las propiedades del medio por donde se propagan las ondas sísmicas, las propiedades locales del suelo y la topografía. Actualmente, se aplican curvas promedio obtenidas de análisis estadístico de las bases de datos que contienen los eventos medidos, definidas en términos de la magnitud y la distancia hipocentral.

**Evaluación de la amenaza sísmica.** Los parámetros que definen la amenaza sísmica son: La función de distribución de probabilidad acumulada de los valores máximos; el parámetro que expresa el movimiento del suelo; el período de retorno de los eventos sísmicos para diferentes intensidades y el nivel de probabilidad del máximo movimiento del suelo, relacionado con el período de retorno. Las técnicas más utilizadas proveen un método para la integración de las influencias individuales de las fuentes potenciales del fenómeno sísmico, teniendo en cuenta la distancia y el nivel de actividad, dentro de la distribución de probabilidad de valores máximos anuales (Cardona, 2004).

La elaboración de un atlas requiere de varias etapas. La recolección de información necesaria y el apoyo de profesionales expertos en ingeniería sísmica como los más relevantes. Dicha información, utilizada para la estimación del riesgo, se genera en observatorios sismológicos a través de la operación de redes instrumentales, con el apoyo de

estudios teóricos con diversos criterios de cálculo.

No sólo el conocimiento de las magnitudes de los sismos permite valorar el impacto y los efectos de estos en una región, debido a la variabilidad en cuanto a profundidad y distancia del sitio afectado. Es necesario generar un mapa que brinde la posibilidad de estimar la distribución de las intensidades, en términos de la aceleración del terreno, asociada a un periodo de recurrencia. Esta información constituye un elemento trascendental para los ingenieros que se dedican a la construcción o toma de decisiones en lo que a riesgo se refiere.

### **MAPAS DE RIESGO SÍSMICO**

La información utilizada para la construcción de los mapas del estado de Campeche se tomó de la base de datos actualizada de la clasificación municipal que realizó el CENAPRED, condensada en el informe de “Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos Sísmicos”. En este trabajo se reportan los valores de aceleración máxima del terreno para cada municipio. A su vez, la información fue generada a partir del Programa de Riesgo Sísmico (PSM), el cual permite construir mapas para diferentes periodos de retorno.

Los mapas son el resultado final de la metodología planteada, en ellos se resume la incidencia y el aporte, tanto de la amenaza, como de la vulnerabilidad del escenario mismo. Los mapas sirven como método de análisis bajo diferentes perspectivas y de comparación en general. Constituyen un apoyo sobre la información del posible escenario de riesgo y en ningún momento los resultados obtenidos son absolutos por sí mismos. Por lo tanto, es muy importante tener en cuenta que los resultados allí presentados no repre-

sentan de ninguna manera valores absolutos de pérdidas, sino que son tendencias y esperanzas de lo que eventualmente puede llegar a esperarse en caso de que se genere un sismo con las características mencionadas.

En las tablas 1 a 3 se presentan los valores de aceleración máximos calculados para

diferentes periodos de retorno en las estaciones sismológicas ubicadas en el estado de Campeche.

En las figuras 1 a 3 se presentan los mapas interpolados de aceleraciones para el estado de Campeche.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización del peligro para el estado de Campeche, confirma los resultados obtenidos por la regionalización sísmica de la República Mexicana realizada por el Instituto de Sismología de la UNAM (figura 4), en la cual el país se divide en 4 regiones, A,B,C y D, donde la zona A es una zona donde no se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo

mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores. La zona D es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, con la ocurrencia de sismos frecuentes y las aceleraciones del suelo que pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad. Las otras dos zonas (B y C) son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero

**Tabla 1.** Aceleración para el estado de Campeche,  $T_r = 10$  años.

No.	Municipio	Long. °N	Lat. °W	Aceleración (Gal)
1	Calkiní	-90.06	20.32	11.00
2	Calkiní	-90.05	20.37	11.00
3	Campeche	-90.53	19.84	11.00
4	Carmen	-91.83	18.64	11.00
5	Champotón	-90.72	19.35	11.00
6	Hecelchakán	-90.10	20.22	11.00
7	Hopelchén	-89.75	20.01	11.00
8	Palizada	-90.87	18.81	11.00
9	Tenabo	-90.23	20.04	11.00
10	Escárcega	-90.73	18.61	11.00
11	Calakmul	-89.52	18.86	11.00
12	Candelaria	-91.04	18.19	11.00

**Tabla 2.** Aceleración para el estado de Campeche, Tr = 100 años.

No.	Municipio	Long. °N	Lat. °W	Aceleración (Gal)
1	Calkiní	-90.06	20.32	27.0
2	Calkiní	-90.05	20.37	27.0
3	Campeche	-90.53	19.84	27.0
4	Carmen	-91.83	18.64	27.0
5	Champotón	-90.72	19.35	27.0
6	Hecelchakán	-90.10	20.22	60.0
7	Hopelchén	-89.75	20.01	27.0
8	Palizada	-90.87	18.81	27.0
9	Tenabo	-90.23	20.04	27.0
10	Escárcega	-90.73	18.61	27.0
11	Calakmul	-89.52	18.86	27.0
12	Candelaria	-91.04	18.19	27.0

**Tabla 3.** Aceleración para el estado de Campeche, Tr = 500 años.

No.	Municipio	Long. °N	Lat. °W	Aceleración (Gal)
1	Calkiní	-90.06	20.32	45.00
2	Calkiní	-90.05	20.37	45.00
3	Campeche	-90.53	19.84	45.00
4	Carmen	-91.83	18.64	45.00
5	Champotón	-90.72	19.35	45.00
6	Hecelchakán	-90.10	20.22	45.00
7	Hopelchén	-89.75	20.01	70.00
8	Palizada	-90.87	18.81	45.00
9	Tenabo	-90.23	20.04	45.00
10	Escárcega	-90.73	18.61	45.00
11	Calakmul	-89.52	18.86	80.00
12	Candelaria	-91.04	18.19	90.00

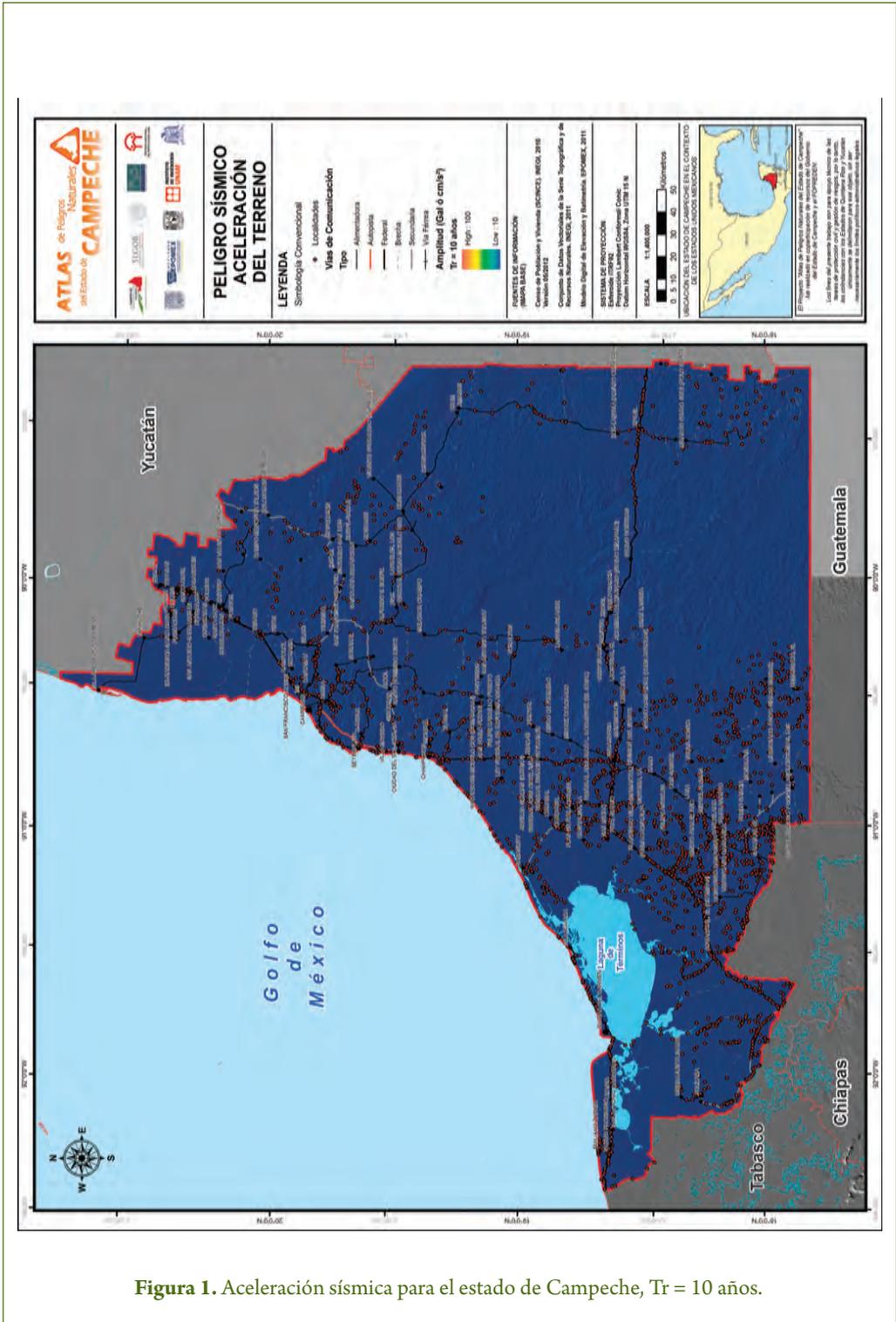
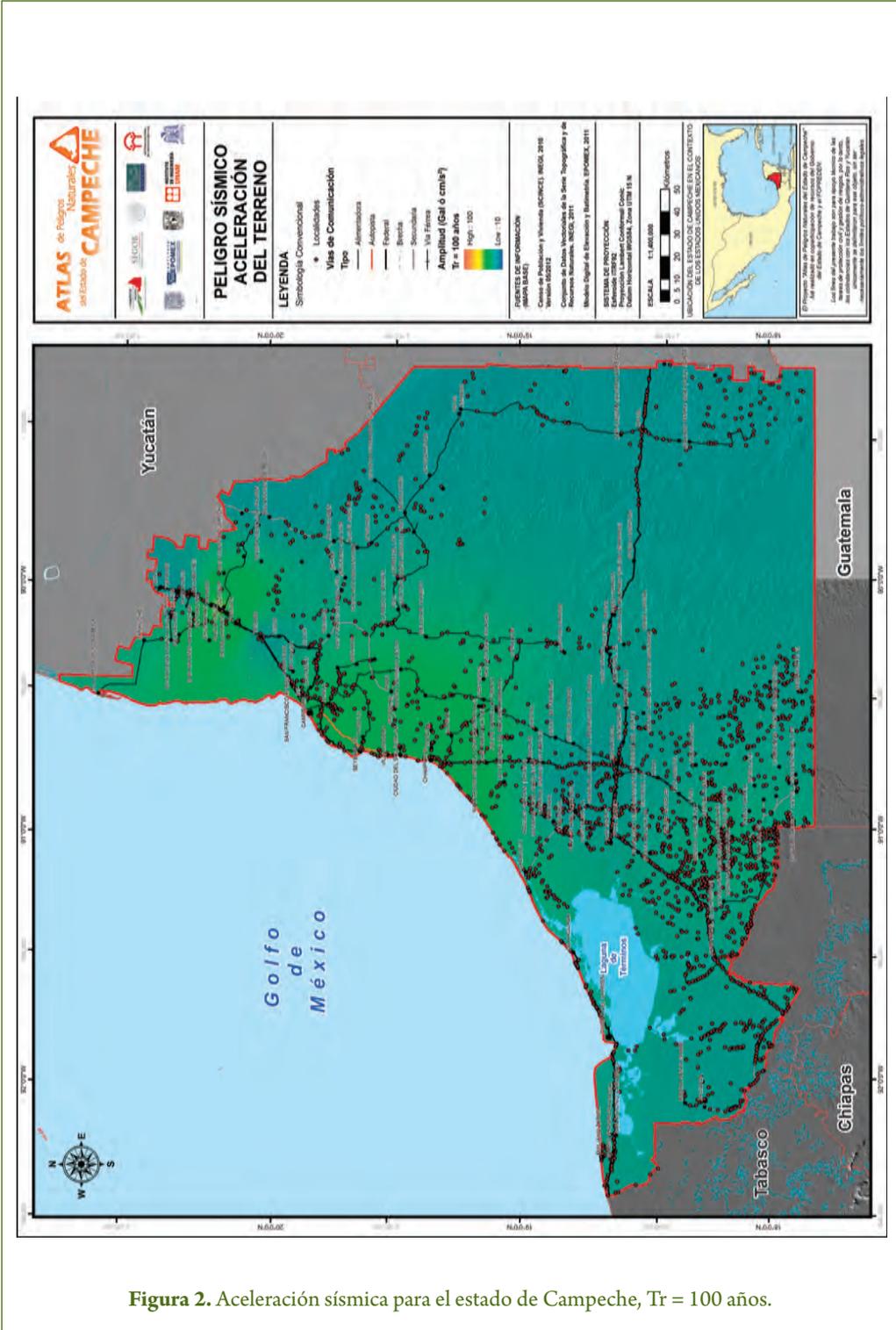


Figura 1. Aceleración sísmica para el estado de Campeche, Tr = 10 años.



**Figura 2.** Aceleración sísmica para el estado de Campeche, Tr = 100 años.





Figura 4. Regiones sísmicas en México.

que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo.

El territorio estatal se ubica entre las zonas A y B, de acuerdo a la figura 4, donde la parte suroeste es la que presenta un mayor nivel de aceleración. De acuerdo a la figura 3, la parte sur del Estado es también la que presenta una mayor aceleración.

Es importante notar que la figura 4, es más conservadora que la figura 3, debido a que para su obtención se consideró un mayor número de sismos, con un factor de seguridad alto.

## CONCLUSIONES

El análisis de riesgo sísmico para el estado de Campeche, con base en la definición de regiones sísmicas elaborados por el Instituto de Sismología de la UNAM, en la cual el país se divide en 4 regiones, constituye un aporte fundamental para definir las zonas de mayor peligro en caso de presentarse un evento sísmico, así como establecer el impacto que tendría un evento de esta magnitud en el es-

tado de Campeche, a causa de los modelos de desarrollo actuales, donde el crecimiento demográfico y los procesos de urbanización son inadecuados; hecho que genera un aumento en la vulnerabilidad de asentamientos frente a los peligros naturales.

La revisión del estado del arte sobre el daño sísmico, ha permitido identificar las diferentes vías de la forma como se puede

estimar el riesgo en forma analítica, especialmente cuando no existe una buena fuente de información de datos de campo.

Este estudio sirve como base para crear conciencia en la población, una conciencia social del riesgo, que sirva para generar conocimiento en la ciudadanía de los de los riesgos geológicos, y que sirva mejorar la capacidad de respuesta ante este tipo de fenómenos. A su vez, sirve como herramienta para los planes de prevención de desastres, permitiendo establecer procedimientos que enseñen a la sociedad como comportarse durante la acción de un sismo, aumentando la resiliencia de la comunidad ante los fenómenos naturales.

Este trabajo informativo, debe ser reforzado no sólo con el monitoreo y actualización continua de los mapas, sino también con la educación de la población, los funcionarios públicos, los gobernantes, para que tengan más efectividad en la gestión del riesgo y el manejo de emergencias. La prevención resulta menos costosa y debe incluirse desde los primeros años escolares.

Con este trabajo es posible aplicar y ejecutar reglamentos de construcción y principios de planificación territorial realistas y acordes con los riesgos. Identificar territorios seguros para los ciudadanos de bajos recursos y mejorar los asentamientos informales.

## LITERATURA CITADA

- Aguilar, A., 2011.** Evaluación Probabilista del Riesgo Sísmico de Edificios en Zonas Urbanas.
- Amaya, J. E., 2012.** Gestión del Riesgo Sísmico en Medellín. Tesis.
- Cardona, O. D., 2000.** Holistic seismic risk estimation of a metropolitan center. In: Proceedings of 12th world conference of earthquake engineering, Auckland, New Zeland.
- Cardona, O. D., 2004.** The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: a necessary review and criticism for effective risk management. p. 37-51. In: G. Bankoff, G. Frerks, and D. Hilhorst (eds.). Mapping vulnerability: disasters, development and people. London, UK. Earthscan Publishers.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2006a.** Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México. Secretaría de Gobernación.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2006b.** Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Secretaría de Gobernación.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2006c.** Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Conceptos Básicos sobre Peligros, Riesgos y su Representación Geográfica. Secretaría de Gobernación.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2008.** Peligro y Riesgo Volcánico en México. Secretaría de Gobernación.
- CSSC, 1999.** Earthquake risk management: a toolkit for decision-makers. California Seismic Safety Commission, State of California.
- Cornell, C. A., 1967.** Engineering Seismic Risk Analysis, Research Report R 67-75, MIT, Boston.
- Dowrick, D. J., 1997.** Earthquake Resistant Design for Engineers and Architects. John Wiley & Sons, 2nd Edition.



**Instituto de Ingeniería (II), 2003.** Guía Metodológica para el Análisis del Peligro, Vulnerabilidad, Riesgo y Pérdidas Causadas por Desastres Naturales o Antropogénicos y su Reducción y Prevención. Secretaría de Gobernación.

**Ordaz, M.A., & J. Arboleda, 1999.** CRISIS99. Program for computing seismic hazard, UNAM.

**Sauter, F., 1996.** Redefining terms in the field on seismic safety and risk mitigation. *Earthquake spectra*, Vol. 12(2): 315-326.

Sitios web

<http://www.clw.csiro.au/heartlands/BLIS1.3/landform/mrvbf/meta.html>

<http://www.agu.org/pubs/crossref/2003/2002WR001426.shtml>

---

# Identificación y Caracterización de la Subsistencia y/o Colapso de Terrenos Kársticos

*Gerardo Palacio Aponte*

---

## RESUMEN

El peligro asociado a la disolución de rocas sedimentarias carbonatadas es resultado de la interacción entre factores endógenos o estructurales y exógenos o ambientales. Las rocas sedimentarias carbonatadas susceptibles a la disolución en conjunción con terrenos fracturados y húmedos pueden originar hundimientos diferenciales o colapsos superficiales en el terreno. Aunque estos fenómenos se manifiestan después de largos periodos disolutivos, en Campeche existen ya zonas de alta susceptibilidad en donde eventos hidrometeorológicos extraordinarios pueden detonar manifestaciones locales de peligro por subsistencia o colapso.

### Objetivos

- Zonificar el estado de Campeche según los grados diferenciales de susceptibilidad a la subsistencia y/o colapso por disolución kárstica, teniendo en cuenta las condiciones geológico-geomorfológicas y ambientales.
- Determinar la subsistencia y los colapsos en regiones donde exista una alta susceptibilidad a la disolución de rocas sedimentarias carbonatadas según las condiciones geológico-geomorfológicas y ambientales locales.



## INTRODUCCIÓN

La subsidencia y los colapsos en el terreno tienen orígenes comunes y sobre todo mecanismos combinados en ambientes donde existe una alta susceptibilidad a la disolución de las rocas por el agua. Aunque los mecanismos específicos que los generan son diferentes a niveles locales, siempre existen detonadores ambientales comunes. La subsidencia se define como un hundimiento generalmente lento, superficial y diferencial del terreno por la compactación y/o disolución de materiales finos compresibles; y el colapso como un hundimiento rápido superficial o profundo, normalmente asociado a la pérdida de soportes líticos y estructurales subterráneos. Los mecanismos naturales por medio de los cuales se producen se clasifican en tres grupos: químicos, mecánicos y tectónicos (Bryant, 2005). La subsidencia y colapso de origen químico involucra la disolución de rocas carbonatadas o rocas formadas por minerales solubles y forma parte de la evolución natural del paisaje kárstico, la cual, en zonas pobladas es un peligro geológico que debe evaluarse.

El generador inicial que detona la disolución kárstica y que ocasiona hundimientos diferenciales lentos o rápidos (colapsos) es el ciclo hidrológico. Sin embargo, son las condiciones geológico-geomorfológicas y ambientales locales, las que condicionan la susceptibilidad diferencial a la disolución. Para su desarrollo es fundamental considerar el potencial de disolución, la porosidad primaria y secundaria, el tiempo en que el agua se mantiene en contacto con las rocas, la temperatura del agua y a su vez de forma asociada, la presencia potencial de anhídrido carbónico que acelera o inhibe el proceso de

disolución. Corbel (1959) encontró, como rangos promedios de denudación kárstica en la península de Yucatán entre 10 y 40 m<sup>3</sup>/año/km<sup>2</sup> (12 para Mérida y 10 para Champotón) y como ejemplo extremo contrario para zonas frías con lluvias todo el año, valores entre 240 y 275 m<sup>3</sup>/año/km<sup>2</sup> en Francia y Noruega. Estos valores muestran que la disolución está asociada a la temperatura ambiente y por tanto del agua, sin embargo, existen referencias de otros autores que indican valores diametralmente diferentes, lo que demuestra que, aun considerando la precisión de los datos, existen condiciones ambientales relacionadas con el emplazamiento específico de los procesos de disolución.

Lo evidente es que en los países tropicales los procesos de disolución se caracterizan por ejercerse más violentamente en superficie, que en profundidad, predominando por tanto la disolución superficial sobre la subterránea (Corbel, 1959). Esto se debe a que en los países tropicales la saturación de las aguas en CO<sub>3</sub>Ca, se ejerce en unas pocas horas, sobre todo en lo que concierne a la última fase del proceso de disolución, mientras que en los países templados, la saturación se adquiere en más de 50 horas (Mateo, 1981). Igualmente las lluvias torrenciales y sus efectos erosivos tienen que ver con la intensificación localizada de la disolución. Jennings (1971) señala que una de las peculiaridades del karst tropical es la verticalidad y horizontalidad del relieve, con la minimización de pendientes intermedias, predominio de formas convexas, paredes verticales y cimas cónicas y redondas y de superficies con fondo más o menos llano.

## METODOLOGÍA

Los factores que controlan el desarrollo de los procesos kársticos y que condicionan los peligros geológicos por colapso y/o disolución se pueden agrupar en: litológicos, estructurales, hidrogeológicos y climáticos, geomecánicos, sismotectónicos y antrópicos.

Entre los factores litológicos destaca el diferente comportamiento entre yesos, sales y carbonatos. La extraordinaria diferencia de las solubilidades respectivas (hasta cientos de gr/litro para la sal, en torno a 2 gr/litro el yeso, frente algunos centenares de mgr/litro de las calizas y las dolomías).

Los factores estructurales condicionan la densidad de diaclasas relacionada directamente con la densidad de dolinas y las intersecciones con los puntos nodales del inicio preferente de la disolución. Por otra parte el buzamiento de los estratos rocosos, favorece la generación de dolinas cuando es menor a 15° (Durán, 1987).

En cuanto a las condiciones ambientales, la variabilidad climática e hidrogeológica es

también fundamental. En zonas tropicales húmedas con intensidades de lluvia muy altas se presentarán tasas de disolución elevadas.

La primera detección de zonas susceptibles o de probable amenaza por disolución en ambientes kársticos, se basa en la selección de variables de expresión regional, bajo criterios ponderados según la importancia relativa de los componentes ambientales antes mencionados. Al final se generan mapas parciales con valores ponderados entre alto, medio y bajo que se integran a un mapa síntesis mediante álgebra de mapas en un sistema de información geográfica.

## LITOLOGÍA Y SOLUBILIDAD

Las solubilidades teóricas a 25°C, presión de 1 atm y en agua con pH 7, la solubilidad de los minerales en la corteza terrestre son (tabla 1).

**Tabla 1.** Solubilidad de los materiales líticos.

Mineral	Solubilidad (mg/l)	Litología en el Estado de Campeche	Nivel de Susceptibilidad
Cuarzo	12		
Sílice	120	Caliza-Conglomerado	Baja
Calcita	100-500		
Dolomía	90-480	Caliza-Marga	Media
Yeso	2400-10000	Caliza-Yeso	Alta
Halita	360000		
Silvina	264000		



## **IMPUREZAS DE LA ROCA**

Cuando predominan arcillas en un 20-30% se suele encontrar poco karst (Quiles, 2002). Existe una relación inversamente proporcional entre las impurezas y el desarrollo del karst, es decir a mayor cantidad de impurezas menor desarrollo del karst (Gutiérrez, 2010). En términos prácticos para el nivel regional las impurezas se consideran a nivel de unidades litológicas.

## **TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS**

Existen calizas según el tamaño del grano y se distinguen las micríticas con partículas de unas 20  $\mu\text{m}$  y las de grano grueso. Cuanto más fino sea el grano mayor la solubilidad (Quiles, 2002).

## **ESTRUCTURALES (PLANOS DE ESTRATIFICACIÓN, DIACLASAS Y PLEGAMIENTOS)**

Determinan la variedad de formas y desarrollo del sistema kárstico. Predisponen la susceptibilidad regional del terreno a nivel de grandes estructuras del relieve y a nivel local según la permeabilidad de fractura (Veni, 1987).

## **POROSIDAD SECUNDARIA ASOCIADA A LA MORFOESTRUCTURA**

La porosidad primaria o intrínseca de las rocas carbonatadas es en general baja, por lo que en realidad lo fundamental para detectar patrones de disolución superficial es diferenciar la permeabilidad secundaria o asociada a redes de diaclasas y fracturas (figura 1). Del mismo modo es relevante delimitar su densidad así como la red de puntos de intersección por unidad territorial homogénea.

Como criterio para el muestreo estratificado del territorio y para conocer en ámbitos territoriales homogéneos los grados de susceptibilidad a la disolución, se utilizan como referente territoriales los ámbitos litológicos y la densidad de fracturas calculadas por la densidad tipo Kernel (figura 2). En la densidad Kernel se suman todos los objetos (sitios, líneas o puntos) que están dentro de un área específica total y se divide entre el valor del área, generando el valor de densidad de las celdas de dicha área. Las celdas que estén más cerca del centro del área de búsqueda tendrán un mayor peso (mayor valor de densidad) que aquellas que estén más cerca de los bordes.

Cuando la porosidad primaria es baja (inferior al 15%) la morfología e hidrología del karst están condicionadas por la porosidad secundaria interconectada por fisuras, conductos subterráneos y cavernas (Quiles, 2002).

El ámbito geográfico para delimitar la condición litológica (SGM, 2007) se basa en una red de 42 muestras en campo (figura 3) analizadas en el Instituto de Geología de la UNAM mediante difracción de rayos X. La difracción de rayos X es uno de los fenómenos físicos que se producen al interaccionar un haz de rayos X, de una determinada longitud de onda, con una sustancia cristalina. La difracción de rayos X se basa en la dispersión coherente del haz de rayos X por parte de la materia (se mantiene la longitud de onda de la radiación) y en la interferencia constructiva de las ondas que están en fase y que se dispersan en determinadas direcciones del espacio. Aunque se obtiene datos semicuantitativos es posible determinar las características químicas dominantes según las firmas espectrales conocidas. Esta característica se incorpora al mapa de unidades litológicas actualizadas en el 2007 por el Servicio

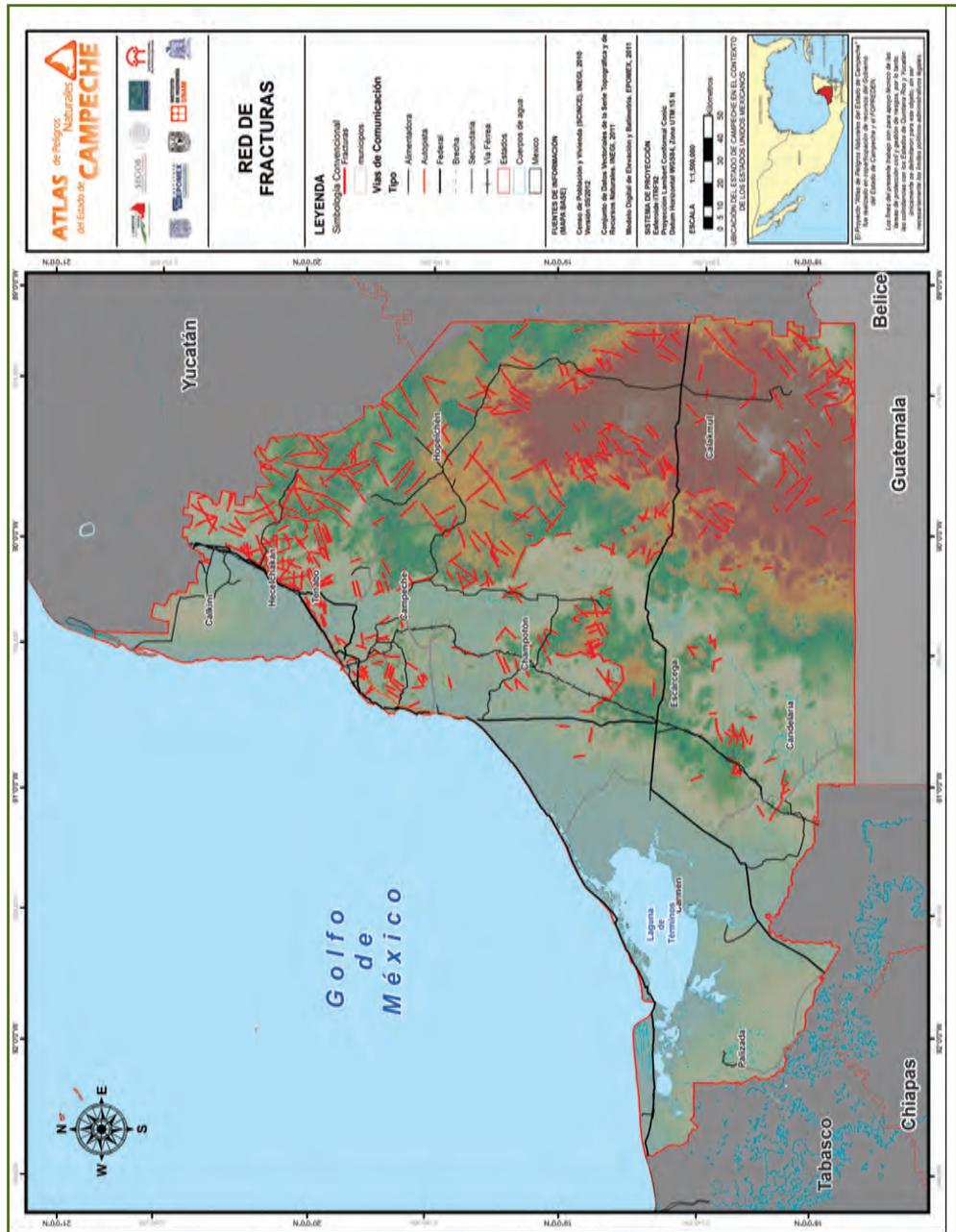


Figura 1. Red de fracturas y puntos de intersección sobre MDT sombreado.

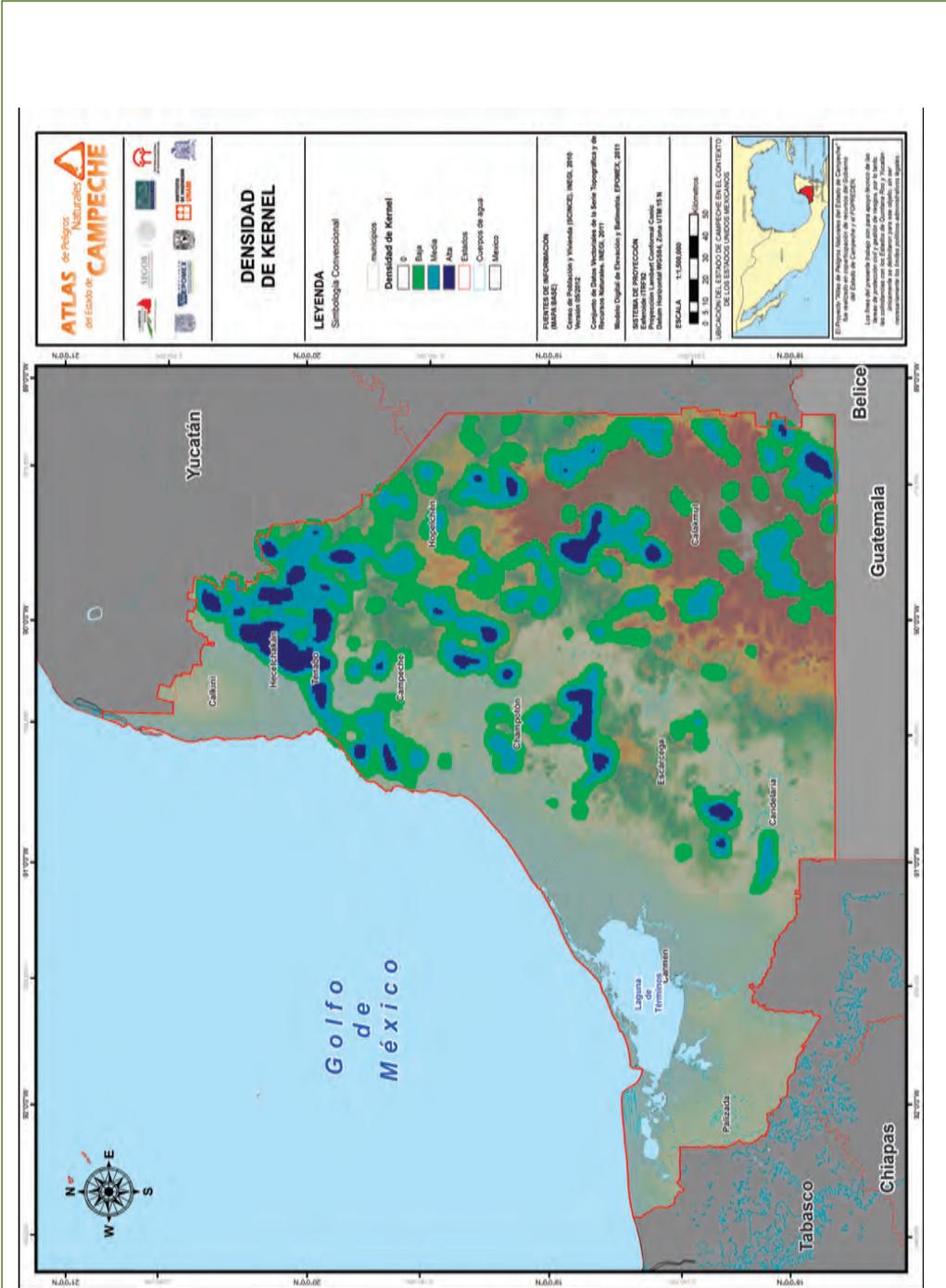


Figura 2. Red de fracturas y densidad de Kernel.

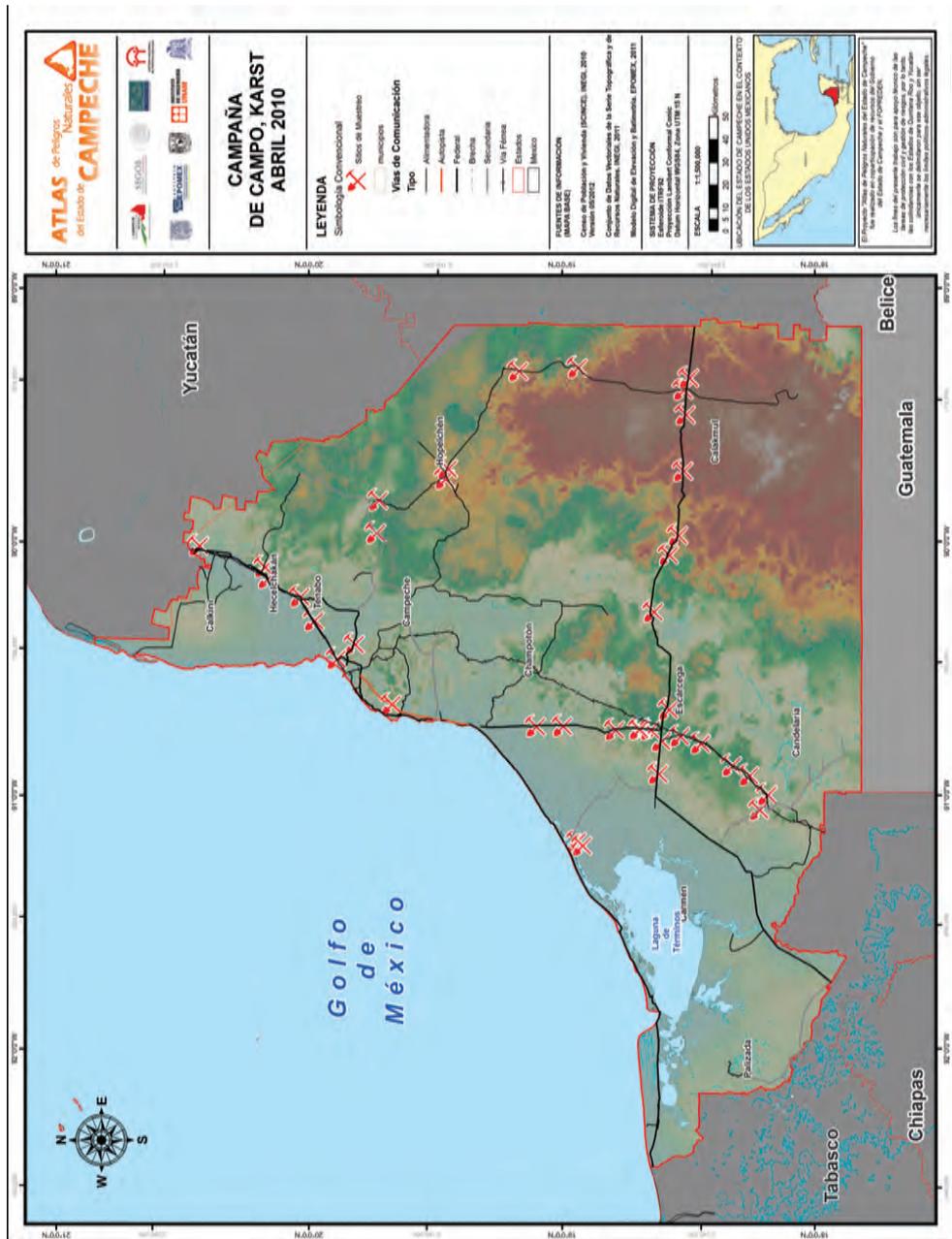


Figura 3. Campaña de campo para muestreo de rocas.



Geológico Mexicano (SGM, 2007) donde se muestra una importante correlación entre el origen, composición y edad de las rocas (figura 4). Muestran también las características de las estructuras geológicas superficiales y profundas.

Los planos de estratificación y su espesor propician o interrumpen los flujos de agua y su respectiva presión hidrostática (tabla 2). Si la estratificación es delgada el agua penetra pocos metros, pero si la estratificación es masiva o potente puede alcanzar cientos de kilómetros (tabla 3).

Se infiere, a reserva de verificar en campo rasgos micromorfológicos diferenciales, que los procesos de disolución serán más intensos en las aéreas de rupturas litológicas y más aun en los puntos de intersección de fracturas, en donde efectivamente se ha verificado que coinciden los núcleos de disolución inicial de numerosas dolinas en la península de Yucatán.

Los datos tanto del espesor de los estratos como la separación entre diaclasas se obtienen de la interpolación de los datos obtenidos en campo y registrados en las fichas correspondientes.

## RESISTENCIA GEOMECÁNICA

Depende del macizo rocoso de la densidad y orientación de las fisuras y los planos de

estratificación. Se utilizan pruebas de compresión simple sobre testigos con ayuda del martillo de Schmidt con escalas entre 10 y 100 (Quiles, 2002). Este análisis es sumamente útil para estudios locales.

Al final se clasifica un grid síntesis, resultado del álgebra de los mapas parciales fundamentalmente basados en los criterios antes mencionados y obtenidos del trabajo de campo. Se clasifica originalmente en 10 clases que permiten separar los grupos más evidentes de susceptibilidad kárstica. De estas clases se seleccionan 4 clases normalizadas mediante el método natural breaks (Jenks) de manera que se verifique correspondencia lógica entre los resultados de la clasificación y las unidades geomorfológicas y litológicas. Las clases se basan en grupos naturales inherentes a los datos. Se identifican saltos relativamente grandes entre grupos de valores similares para maximizar las diferencias entre las clases (tabla 4).

Los valores numéricos de las clases representan la coincidencia o divergencia de las de variables ponderadas. Entre más grande sea la cifra numérica, mayor será su significancia en función de la mayor coincidencia de coberturas parciales de susceptibilidad con valores ponderados más altos y viceversa.

## RESULTADOS

El estado de Campeche, al ubicarse en la península de Yucatán, es susceptible al peligro geológico por disolución kárstica, tal como queda en evidencia en este proyecto, sin embargo y como es natural se excluyen

del análisis zonas bajas acumulativas de origen fluvial o fluviomarino y lacustre. Ante la imposibilidad de asignar probables periodos de recurrencia a las zonas del terreno susceptibles, se asignó a cada punto de la geografía

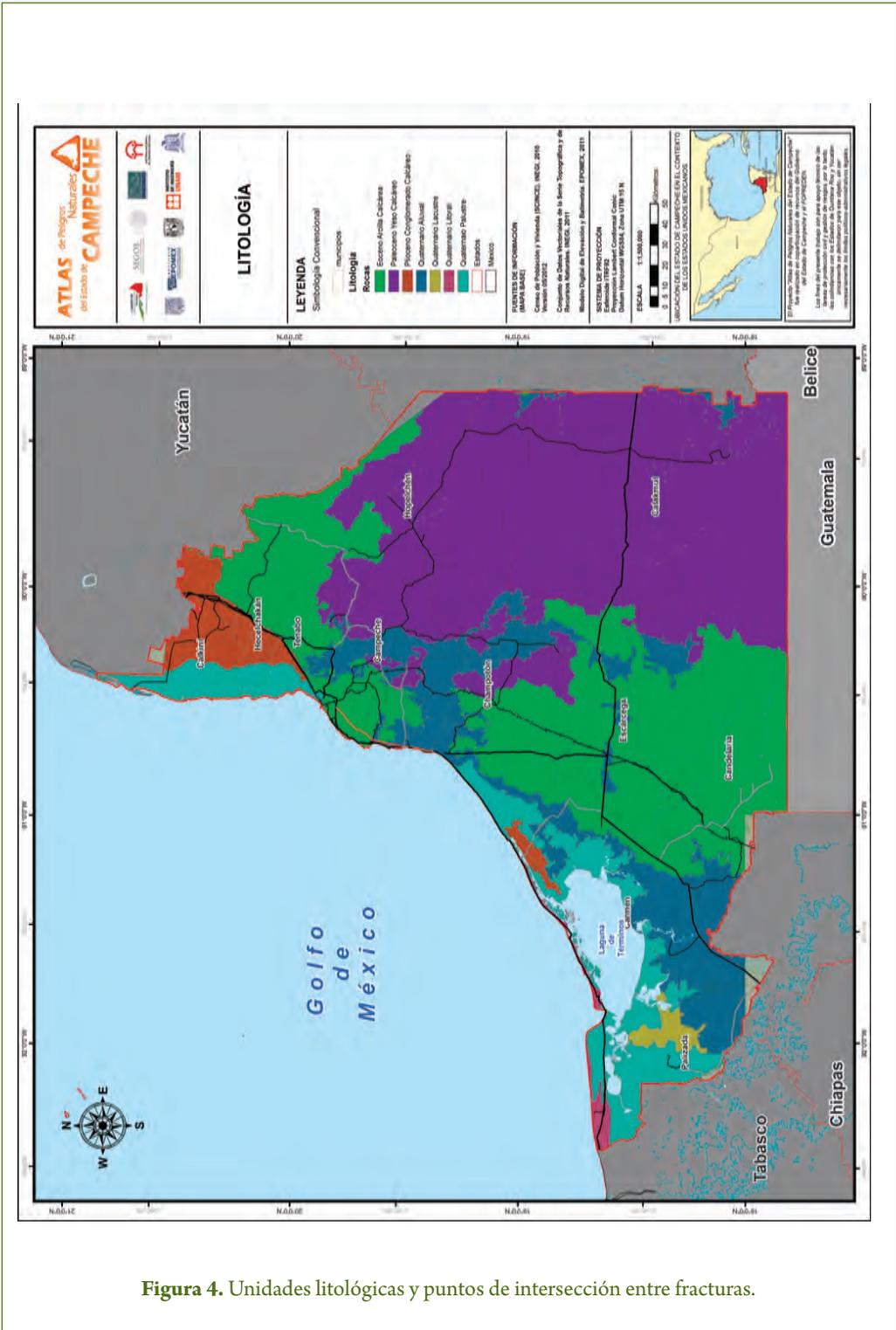


Figura 4. Unidades litológicas y puntos de intersección entre fracturas.

**Tabla 2.** Espesor de estratos rocosos y separación de diaclasas (Quiles, 2002. Modificada).

Espesor de estratos (cm)	Nivel de Susceptibilidad
Masiva o muy potente	Alta
30-100 potente	
10-30 potencia media	Media
3-10 delgados	Baja
1-3 muy delgada	
< 1 laminada	

**Tabla 3.** Espesor de los estratos rocosos y separación entre las diaclasas (Quiles, 2002. Modificada).

Separación entre diaclasas (cm)	Nivel de Susceptibilidad
> 300 muy separadas	Bajas
100-300 separadas	
30-100 muy próximas	Media
5-30 próximas	Baja
< 5 muy juntas e intersecciones	

**Tabla 4.** Índice de amenaza por disolución kárstica.

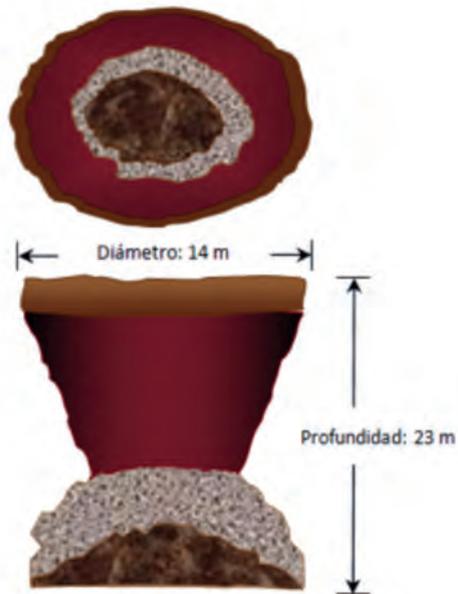
Rangos	Susceptibilidad	
2	1322	Baja
1323	2322	Media
2323	3031	Alta
3032	3331	Muy Alta

estatal un valor cualitativo que representa la disposición a que en el ocurra una por disolución del terreno. De acuerdo con el mapa de la figura 5, la parte centro-este del estado tiene un mayor nivel de amenaza por disolución y por tanto de susceptibilidad a la subsidencia o, por lo que para cualquier obra de importancia que ahí se construya debe realizarse un estudio local y detallado del terreno para conocer las condiciones geológicas e hidrológicas, en particular para aquellas zonas con nivel "Muy Alto". Las localidades del estado de Campeche que limitan con los estados de Tabasco y Chiapas tiene un nivel bajo y prácticamente nulo de que el terreno

falle por disolución, lo anterior ya que sus componentes principales están asociados a depósitos fluviales y lacustres.

En la figura 5 se presenta el mapa final de peligro de subsidencia y/o colapso de terrenos kársticos para el estado de Campeche, en el cual las áreas con color rojo son las que tiene una probabilidad mayor de que se presenten estos fenómenos. Con el fin de validar la confiabilidad del mapa, se señala el punto en el cual se originó, en julio del 2010, una dolina de succión (figura 6) en el municipio de Hopelchén con coordenadas geográficas 19°09'2'' norte y 89°55'19'' oeste.





**Figura 5.** Falla ubicada en el terreno agrícola Las Flores, Hopelchén, Campeche.  
(Esquema y Fotografía).

## CONCLUSIONES

Aunque la mayoría de los procesos de naturaleza kárstica que ocasionan subsidencia o colapsos se gestan u originan subsuperficialmente y en profundidad, son sus expresiones en superficie las que generan peligro. El mapa final ha resultado confiable en término de las áreas susceptibles, sin embargo, todavía es necesario realizar monitoreos específicos de orden geológico e hidrogeológico

o cuando de diseño del crecimiento urbano o económico a nivel local se trate. Habrá zonas que por la naturaleza del ambiente o por la intervención humana propicien específicamente el colapso en zonas de lomeríos o de subsidencia en donde se presente descompensación de fluidos en zonas de explotación de petróleo o agua.

## LITERATURA CITADA

- Bryant, E., 2005.** Natural Hazards (Second ed.). Australia: Cambridge University Press.
- Corbel J., 1959.** Les karst du Yucatán et de la Floride. *Bull. Ass. Géogr. de France*, 282-(3):2-14.
- Durán Valsero, J. J., 1987.** Riesgos asociados al karst. p. 261-283. En: Riesgos Geológicos, Serie Geología Ambiental. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- Jennings J. N., 1971.** Karst, an Introduction to Systematic Geomorphology, Volume VII, The M.I.T. Press, Australia.
- Gutiérrez, F., 2010.** Hazards associated with karst. p. 161-175. In: I. Alcántara-Ayala and A. Goudie (Eds.), *Geomorphological hazards and disaster preventions*. New York: Cambridge University Press.
- Mateo Rodríguez J., 1981.** Morfología Cárstica, Facultad de Geografía, Universidad de la Habana, Cuba.
- Quiles Aparisi E., 2002.** Tratamiento de terrenos kársticos mediante inyecciones. En: Ingeniería del terreno. Editor, Carlos López Jimeno. Madrid. U.D. Proyectos, E.T.S.I. Minas, Universidad Politécnica de Madrid, 415 P.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2007.** Carta Geológico-Minera Estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán, Escala 1:500,000.
- Veni, G., 1987.** Fracture permeability: implications on caves and sinkhole development and their environmental assessment. p. 101-105. In: *Karst Hydrogeology: Engineering and Environmental Applications*.



---

## Cenizas Volcánicas

*Germán Daniel Rivillas Ospina*

---

### RESUMEN

México es un país con un número considerable de volcanes, localizado en la región circumpacífica. La tasa de erupción promedio en México durante los últimos 15 años de acuerdo con el CENAPRED (2001) ha sido de 15 erupciones de diversa magnitud. Se pretende por lo tanto minimizar el riesgo, específicamente, por la dispersión de ceniza volcánica y los efectos adversos que genera en la población civil. En la búsqueda de aminorar los riesgos que estos originan, se lleva a cabo el proyecto de *Atlas de Peligros de Campeche*, cuyo esfuerzo técnico y de gestión dio como fruto la expedición de mapas que caracterizan el riesgo volcánico a través de las modelaciones hechas con el modelo ASHFALL, a efecto de o a fin de simular la distribución de la ceniza volcánica en las zonas próximas al volcán El Chichón.

#### Objetivos

- Presentar una descripción de la metodología para la estimación del peligro volcánico.
- Desarrollar mapas de dispersión de ceniza volcánica.
- Definir las zonas que presentan mayor peligro con base en los mapas generados.



## METODOLOGÍA

### ANTECEDENTES

El vulcanismo es una manifestación de la energía interna de la Tierra. Gran parte del vulcanismo de la república mexicana está relacionado con la zona de subducción formada por las placas de Rivera y Cocos con la gran placa Norteamericana. En México hay más de 2 000 volcanes, de los cuales alrededor de 15 se consideran activos o peligrosos (CENAPRED, 2006).

La actividad volcánica puede tener efectos destructivos, pero también benéficos. Las tierras de origen volcánico son fértiles, altas, de buen clima. Esto explica el asentamiento de poblados en esos sitios. De acuerdo con CENAPRED (2008), existen en el mundo alrededor de 1 300 volcanes continentales activos. De éstos, 550 han tenido alguna erupción en tiempos históricos, afectando a poblaciones asentadas en su área de influencia en diferentes partes del mundo.

Es difícil estimar el valor de los daños materiales originados de una erupción volcánica, pues sus efectos pueden ser catastróficos, involucrando pérdida de ciudades enteras, destrucción de bosques, cosechas y el colapso de las economías de las regiones afectadas por largos períodos, fundamentalmente en países en desarrollo, donde el impacto de los daños puede representar un alto porcentaje del Producto Interno Bruto (PIB). Sin embargo, la magnitud del desastre va asociado al crecimiento de la población y de asentamientos en sitios susceptibles a ser afectados por erupciones. Es necesario identificar y eliminar las causas de los desastres.

Para ello, debe considerarse al riesgo volcánico como probabilidad de pérdida ante la posible ocurrencia de una erupción, concep-

to que habilita el surgimiento del problema de reducción o mitigación del riesgo. Este planteamiento resulta de la posibilidad de modificar el riesgo. Considerando que el peligro es una característica del fenómeno que no puede ser modificada, la vulnerabilidad se puede reducir en forma considerable a través de la preparación de la población. La preparación se deriva de la comprensión de los efectos de las manifestaciones volcánicas y de la adecuada percepción del riesgo, y consiste en una respuesta organizada de la sociedad encaminada a realizar una serie de medidas coordinadas y precisas que reduzcan la exposición y fragilidad de los bienes amenazados por esas manifestaciones.

En el análisis del riesgo volcánico es muy importante distinguir la diferencia entre el fenómeno volcánico y su impacto, es decir, el efecto que puede llegar a ejercer sobre el entorno del volcán, que en función del tamaño, se puede transformar en desastre. Esto permite concluir que si no es posible evitar la ocurrencia de una erupción volcánica, se puede evitar que este fenómeno se convierta en catástrofe.

El riesgo es, en diversas formas, una vía de medir el daño o las pérdidas esperadas con base en la aparición de algún fenómeno natural denominado amenaza. El riesgo volcánico se define en función de las condiciones de peligro de una erupción y que van a generar un grado de afectación a una localidad asentada en el entorno de un volcán. Teniendo en cuenta, sin duda, que las erupciones volcánicas no constituyen un mismo proceso eruptivo para cada volcán. Sus características son física y químicamente diferentes, así como sus manifestaciones de peligro, sus componentes se encuentran

caracterizados en flujos de lava, flujos piroclásticos, emanaciones de ceniza o fenómenos asociados como, avalanchas de lodos, lahares, etc. (Macías, 1997). La evacuación constituye en la actualidad el único mecanismo para evitar pérdida de vidas humanas, dado que las manifestaciones originadas por la erupción de un volcán rebasan cualquiera de los recursos técnicos y tecnológicos de reducción del riesgo, disponibles en la actualidad.

Las erupciones catastróficas ocurridas en las últimas décadas han dado origen al concepto de riesgo volcánico. A través de mecanismos de comunicación, diversos organismos internacionales han puesto en marcha iniciativas dirigidas a generar conciencia sobre lo que representa el riesgo volcánico para la sociedad. Uno de estos es el programa desarrollado por las Naciones Unidas “Década para la Mitigación de Desastres Naturales 1990-2000”, después del desastre ocurrido por la erupción del volcán Nevado del Ruiz en Colombia en 1985. Se ha venido impulsando una cultura para la mitigación de los desastres naturales a partir de diferentes esquemas como: a) desarrollo de metodologías para la estimación del riesgo; b) divulgación científica hacia todos los organismos de la sociedad; y c) a partir de programas educativos.

## **RIESGO VOLCÁNICO**

Una metodología de evaluación del riesgo exige conocer y aplicar las probables características de extensión, frecuencia, e intensidad de los eventos volcánicos, que por su nivel de peligro, puedan y deban ser considerados como amenazas ligadas a la erupción del volcán. En consecuencia, es el principio de que un volcán activo es capaz de repetir o exceder lo que ha hecho en el pasado, y es

necesario un estudio geológico de los depósitos de materiales arrojados en erupciones previas en la periferia del volcán, que incluya todas las regiones que han sido afectadas en el pasado.

Los resultados de este estudio se pueden representar en mapas geológicos que expresan las dimensiones y los alcances de manifestaciones volcánicas ocurridas en el pasado. Adicionalmente, se debe construir una base de datos de las erupciones históricas, que permita inferir estadísticamente una distribución de erupciones, indicando la tasa de excedencia y su probabilidad de ocurrencia.

A diferencia del riesgo sísmico, que representa un peligro único y casi instantáneo, la erupción volcánica se puede prolongar durante meses y trae asociado una serie de factores de múltiple origen (flujos de lava, flujos piroclastos y caída de ceniza volcánica, lahares y avalanchas, gases, sismos volcánicos, tsunamis, gradientes térmicos, deformación del terreno, etc.).

El grado de peligrosidad que un evento de esta naturaleza puede generar en una localidad, es inherente al riesgo volcánico. El concepto de peligro volcánico engloba un conjunto de eventos que se producen en un volcán y que, potencialmente pueden ejercer daños a personas o bienes que estén de forma directa, expuestos a este tipo de fenómenos. El grado de peligro de un volcán está asociado a su historia eruptiva, característica que permite definir el estado actual o más reciente y prevenir el comportamiento final de un volcán.

La información histórica, en conjunto con los datos topográficos y morfológicos que permiten prever las trayectorias y alcances de nuevos productos volcánicos (CENAPRED, 2008) se integran en mapas de peligro, donde se expresa el grado de probabilidad de que uno de los fenómenos volcánicos (flujos de



lava, caída de piroclastos, lahares, etc.) afecte un lugar concreto en un intervalo de tiempo determinado. Estos mapas se realizan para una zona extensa y un intervalo de tiempo establecido. El mapa de riesgo volcánico es una representación espacial de las pérdidas esperadas por la actividad volcánica, elaborado a partir del grado de peligrosidad y la vulnerabilidad de cada sitio. Los mapas deben además, establecer la diferencia entre los riesgos primarios como flujos piroclásticos, los efectos sobre la población, etc.; y los secundarios (aquellos que se presentan después de la erupción como flujos de lodo).

En el estado de Campeche no hay presencia de volcanes activos, el volcán más cercano es el Chichón o Chichonal ubicado en el estado de Chiapas. Este volcán hizo erupción la última vez en marzo de 1982, la cual fue importante desde el punto de vista de cenizas volcánicas ya que la pluma de estas viajó grandes distancias.

En este apartado se presenta la simulación la nube de cenizas por medio del programa Ashfall, el cual debió ser acoplado a las coordenadas de la región (sur, sureste) de México. Los datos de la erupción, tanto magnitud como calidad del sedimento fueron tomados de Macías *et al.* (2003). Se generaron a su vez diversos escenarios en los cuales se varió la duración de la erupción de 9 a 12 h, así como la magnitud y la dirección de los vientos

## MAPAS DE PELIGROSIDAD VOLCÁNICA

En el estudio de la peligrosidad volcánica se ha tenido la necesidad de dividir, a cada una de las manifestaciones volcánicas, en elementos muy sencillos que son evaluados en forma independiente, constituyendo cada uno de ellos un peligro volcánico. Los peli-

gros volcánicos pueden prolongarse durante meses y son múltiples: lahares, flujos de tierra, flujos de lava, gases, etc. Los peligros volcánicos tienen características físicas como la magnitud (volumen y energía), alcance, duración y tiempo de propagación.

Cada peligro se analiza individualmente y se deben determinar los parámetros físicos necesarios para la modelación numérica del mismo. Los modelos proporcionan semejanza con la realidad del fenómeno y brindan información sobre los alcances de éste, lo que permitirá en última instancia, evaluar el grado de exposición para las zonas cercanas al volcán.

La identificación de los mecanismos eruptivos debe considerar la información disponible para eventos sucedidos en el pasado, así como conocer las áreas de origen de los peligros, y a partir de esa información se pueden aplicar modelos para simular los efectos que un evento tipo podría llegar a producir.

Los mapas de peligros volcánicos, representan cartográficamente la extensión o área probable que puede ser afectada por todos los productos que un volcán es capaz de generar durante una erupción, y que son capaces de producir daños en su entorno.

La elaboración de un mapa de peligro volcánico es un proceso complejo en el que se debe expresar de forma concreta toda la información disponible acerca del sistema volcánico en estudio. Una vez que se ha definido la zona de estudio y el intervalo de tiempo para el que se realiza el mapa, debe incluirse la metodología para la elaboración del mapa del peligro volcánico, donde se pueden incluir los siguientes aspectos:

- Definición de los peligros esperados.
- Probabilidad de ocurrencia del fenómeno.
- Área fuente.

- Caracterización de la erupción esperable.
- Simulación numérica de peligros esperables.
- Elaboración del mapa de peligrosidad.

La historia eruptiva del volcán es un factor fundamental a la hora de estimar la peligrosidad volcánica, al permitir determinar y caracterizar de forma aproximada los peligros esperados. Cuanto mayor sea el conocimiento acerca de cómo ha funcionado un sistema volcánico en el pasado, mejor será la inferencia de su comportamiento en el futuro.

El uso de este tipo de mapas depende del intervalo de tiempo para el que son calculados. En el largo plazo, generalmente aplicado a extensas zonas, se emplean en planes de ordenamiento territorial. A corto plazo, son una herramienta para la gestión de un evento volcánico, así como punto de partida para el diseño e implementación de estrategias mitigadoras del riesgo, tales como evacuaciones.

Los mapas son dinámicos, pues cambian cada que se produce una nueva erupción. La razón principal a esto obedece a los cambios que se producen en el relieve durante el fenómeno volcánico, pues originan nuevas condiciones topográficas que hacen necesaria la actualización del mapa.

## ZONIFICACIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO

El concepto de riesgo volcánico involucra al peligro, la distribución de la vulnerabilidad de la población, la infraestructura de la población y de la producción, las comunicaciones alrededor del volcán, definido como la susceptibilidad de estos sistemas a ser afectados por el fenómeno natural (CENAPRED, 2008).

Con la información de los mapas de peligro volcánico, la base de datos topográficos a una escala adecuada y los datos de la distribución de la población, es posible elaborar una microzonificación del riesgo, representada en mapas detallados a nivel estatal o municipal, identificando las localidades más vulnerables a los efectos de una erupción volcánica.

## CENIZAS VOLCÁNICAS Y EFECTOS

Las partículas volcánicas inyectadas a la atmósfera durante erupciones explosivas forman plumas y lluvia de cenizas características, constituyendo una serie amenaza a las poblaciones cercanas, incluyendo daño por la inhalación de cenizas, perjuicios en zonas cultivadas, interrupción de caminos y disminución en la seguridad del transporte aéreo (Connor *et al.*, 2001).

Las plumas volcánicas son monitoreadas generalmente usando técnicas de identificación basadas en satélites. Sin embargo, estos métodos están limitados por las condiciones meteorológicas y la frecuencia de barrido del satélite (Mulena *et al.*, 2012). Para superar esta limitación y complementar la información de este tipo de sistemas se utilizan modelos de dispersión, que pueden simular la concentración de ceniza en la atmósfera y la sedimentación de partículas del suelo.

Dentro de los peligros originados por los procesos asociados a los volcanes, se identifica la dispersión de cenizas volcánicas como consecuencia del proceso eruptivo. Las cenizas, son partículas de lava que ha sido molida y convertida en polvo o arena durante la erupción del volcán. La explosión genera la expulsión de material de tamaño diverso, donde los fragmentos más gruesos caen rápidamente en los taludes cercanos al



volcán, mientras que el material más fino es transportado por el viento a distancias mucho mayores, que van desde centímetros a kilómetros a la redonda, y que afectan áreas extensas de poblados y ecosistemas.

Los aerosoles formados por la condensación de varios de los gases volcánicos y sus interacciones con el agua, el vapor de agua o la columna eruptiva, la humedad atmosférica, pueden permanecer suspendidos un tiempo mayor.

### **SIMULADORES DE DISPERSIÓN DE CENIZAS**

La caída de los piroclastos que han sido inyectados a la atmósfera por una columna eruptiva convectiva, depende básicamente de la velocidad límite de caída de las partículas, la altura a la que las partículas son elevadas por la columna, la velocidad y la dirección del viento a lo largo del descenso de las partículas. Es decir, todos estos factores, que a su vez dependen de múltiples parámetros, permiten calcular la trayectoria de cada partícula y, por lo tanto, determinar su posición final en la superficie terrestre. El resultado de la superposición de todas las partículas de diferente tamaño, forma y densidad da lugar a los depósitos de caída.

Existen diferentes modelos para la simulación de la caída de partículas producidas por una erupción volcánica, cada uno con objetivos diferentes y definidos al fenómeno que intenta representar. Los modelos inversos, intentan deducir los diversos parámetros acerca de la fuente que los originó, a partir de las características de los depósitos, como la altura máxima alcanzada por la columna, el volumen de material emitido y sus características granulométricas, etc. La información obtenida con estos modelos se puede aplicar para conocer el comportamiento del volcán en erupciones pasadas e inferir las ca-

racterísticas de una posible erupción futura.

Otro objetivo puede ir dirigido al desarrollo de modelos que permitan pronosticar la evolución de la nube de cenizas y la distribución de éstas en la superficie. Estos modelos adquieren gran importancia en temas relacionados con la mitigación del riesgo en zonas que pueden verse afectadas por la caída de cenizas volcánicas, así como en la definición de alertas para el tráfico aéreo cuando se produce una erupción. Estos modelos se denominan modelos directos.

Los modelos que simulan la caída de piroclastos consideran procesos de advección-difusión, asumiendo que todo el material es emitido en el instante inicial de la erupción, formando una columna vertical, despreciando los efectos de la dimensión horizontal de la columna. Adicionalmente, consideran una distribución del volumen de material entre las distintas clases de partículas y a lo largo de la columna eruptiva. El efecto de advección se estima, para cada tipo de partículas y para cada altura inicial en la columna, calculando la trayectoria de acuerdo a la velocidad límite de caída y el campo de vientos. El efecto de la difusión atmosférica, se evalúa según el valor de la difusividad atmosférica horizontal y el tiempo empleado por las partículas en alcanzar la superficie. El depósito final se obtiene como la suma de los resultados obtenidos para todos los tipos de partículas considerados.

### **DIAGNÓSTICO DE PELIGROS VOLCÁNICOS**

Los resultados de una evaluación inicial de los peligros volcánicos conducen a identificar si un volcán en el área de estudio representa una amenaza, a corto plazo.

Los datos esenciales necesarios para una evaluación de los peligros volcánicos deben incluir lo siguiente:

- Registros completos de erupciones históricas.
- Actividad eruptiva deducida a partir del registro geológico.
- Datos geológicos (estratigrafía), petrológicos y geoquímicos sobre la naturaleza, distribución y volumen de los productos eruptivos.
- Fechas de los productos volcánicos y de los eventos interpretados a partir de los mismos.

En conjunto todos estos datos permiten la reconstrucción del comportamiento eruptivo del volcán a lo largo de la historia, pues ambos son indicadores de las posibles erupciones que pueden llegar a presentarse en un futuro.

Las evaluaciones de los peligros volcánicos generalmente toman en cuenta la hipótesis

que, en general, al presentarse el flujo de lava, éste afectará las mismas áreas del pasado para eventos de magnitud similar.

Los datos de viento (dirección y magnitud) son fundamentales a la hora de evaluar los peligros de caída de ceniza. Así mismo, es importante considerar los cuerpos de agua existentes en las áreas aferentes a los volcanes, como embalses o lagunas, que pueden en determinado momento contribuir al flujo de lahares.

En la etapa de estudio acerca del potencial peligro que supone un volcán, es preciso realizar un diagnóstico del potencial desarrollo de la región, que sirven como respuesta acerca de la necesidad de información en caso de que un volcán sea identificado como amenaza inminente a largo plazo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### DATOS DE MODELACIÓN

Según Macías *et al* (2003) la duración de la erupción del volcán Chichonal fue de 9 h, la magnitud y dirección de los vientos para 10 capas verticales de anchura constante se indican en la tabla 1.

Los valores de la curva granulométrica fueron obtenidos de muestras recolectados en campo, como se puede ver en Macías *et al.* (2003).

Las características de las cenizas volcánicas se resumen en la tabla 2.

El Programa ASHFALL permite generar isoporches o líneas de espesor de ceniza volcánica en cm; en la figura 2 se presenta la

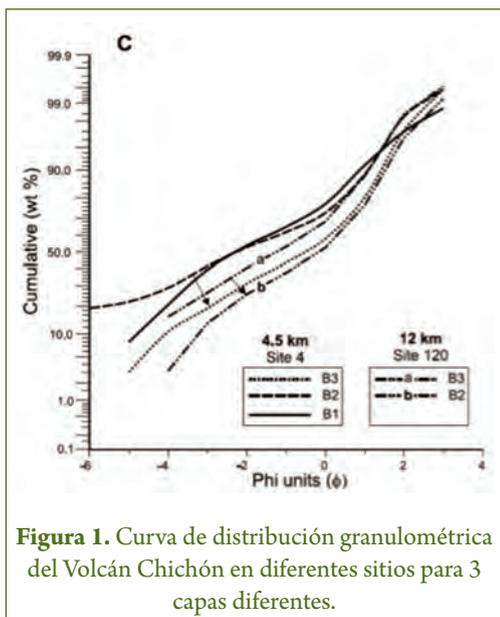
distribución de cenizas volcánicas para la erupción de 1982. Se puede observar que el estado de Campeche no fue afectado.

### ESCENARIOS DE SIMULACIÓN DE CENIZAS VOLCÁNICAS

Con el fin de inferir las zonas donde es factible la depositación de cenizas se modelaron diversos escenarios tomando como base los datos proporcionados por Macías *et al.* (2003), en la tabla 3 se presentan los casos generados, en las figuras 3 a 6 se presentan algunos de los mapas de cenizas generados para este proyecto.

**Tabla 1.** Magnitud y velocidad del viento durante la erupción del volcán el Chichón.

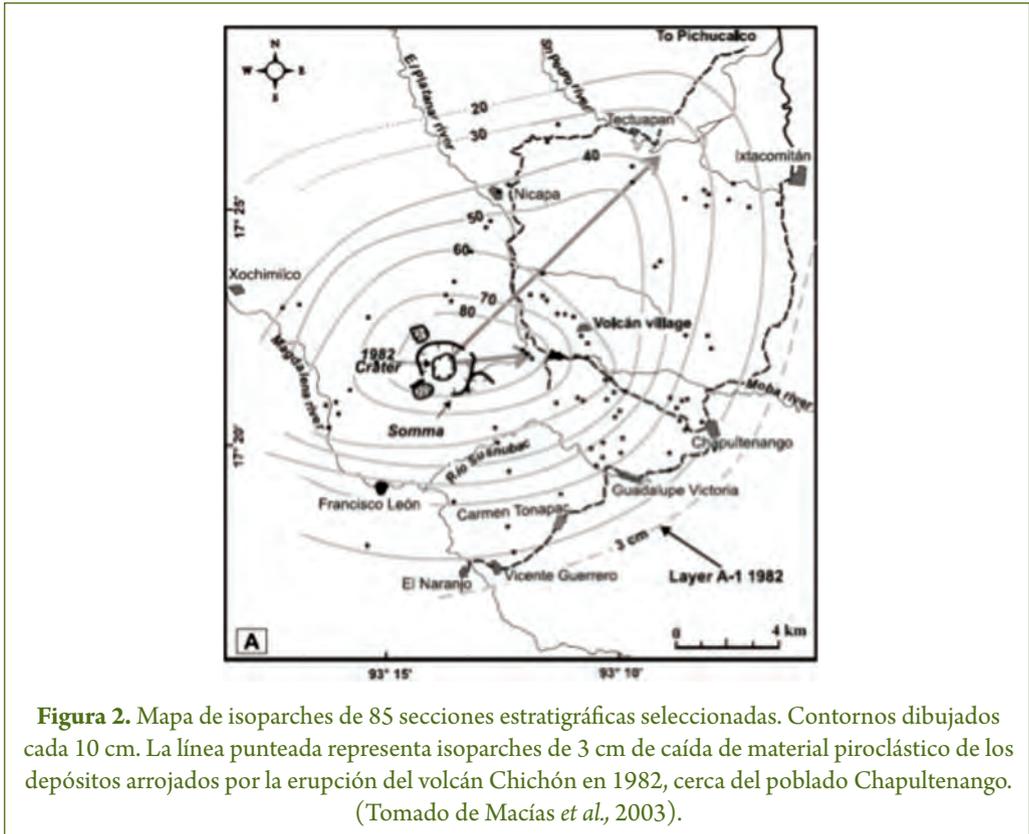
Capa	Velocidad (m/s)	Dirección (°)
1	2.85	75
2	4.28	78
3	4.28	88
4	8.57	96
5	8.57	258
6	14.28	100
7	14.28	133
8	17.14	170
9	18.57	234
10	22.85	342



**Figura 1.** Curva de distribución granulométrica del Volcán Chichón en diferentes sitios para 3 capas diferentes.

**Tabla 2.** Características de las cenizas volcánicas.

Número de grupos de tamaño utilizado	Velocidad de la partícula
0.27	0.0226
0.39	0.0217
0.56	0.0917
0.76	0.1097
1.00	0.1537
1.50	0.1517
1.80	0.0817
2.30	0.0887
3.00	0.0597
3.60	0.0667
4.50	0.027
5.40	0.0497
6.70	0.0397



**Tabla 3.** Escenarios de simulación de cenizas volcánicas.

Escenario	Duración	Magnitud	Dirección
1	9	Macías <i>et al.</i> , 2003	+90° en cada capa
2	9	Macías <i>et al.</i> , 2003	+120° en cada capa
3	12	Macías <i>et al.</i> , 2003	Macías <i>et al.</i> 2003
4	12	Macías <i>et al.</i> , 2003	+90° en cada capa
5	12	Macías <i>et al.</i> , 2003	+120° en cada capa
6	24	Macías <i>et al.</i> , 2003	Macías <i>et al.</i> 2003
7	24	Macías <i>et al.</i> , 2003	+90° en cada capa
8	24	Macías <i>et al.</i> , 2003	+120° en cada capa
9	9	10 % mayor Macías <i>et al.</i> , 2003	+90° en cada capa
10	9	10 % mayor Macías <i>et al.</i> , 2003	+120° en cada capa
11	9	20 % mayor Macías <i>et al.</i> , 2003	+90° en cada capa
12	9	20 % mayor Macías <i>et al.</i> , 2003	+120° en cada capa

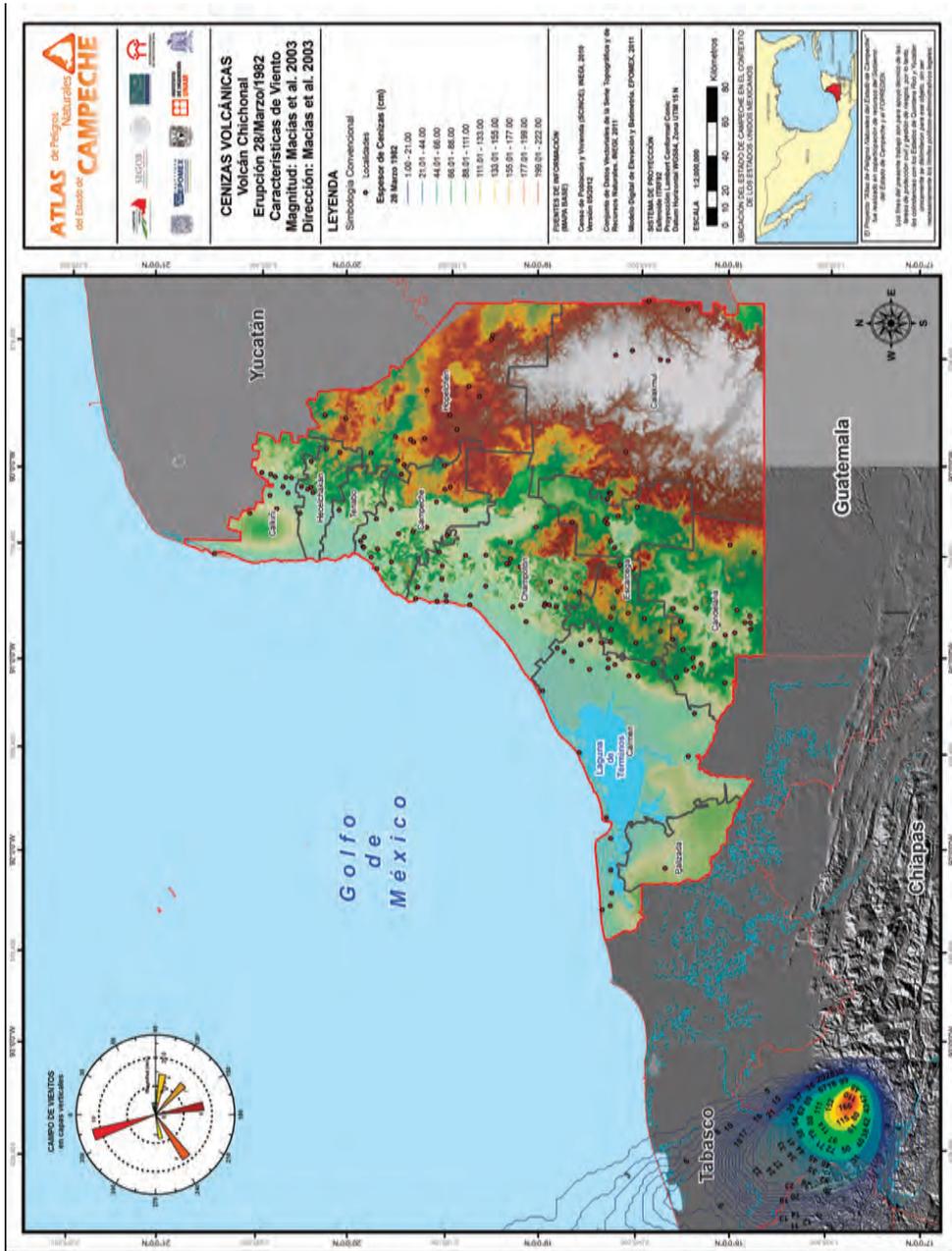


Figura 3. Distribución de cenizas para la erupción del volcán Chichónal el 28 de marzo de 1982.

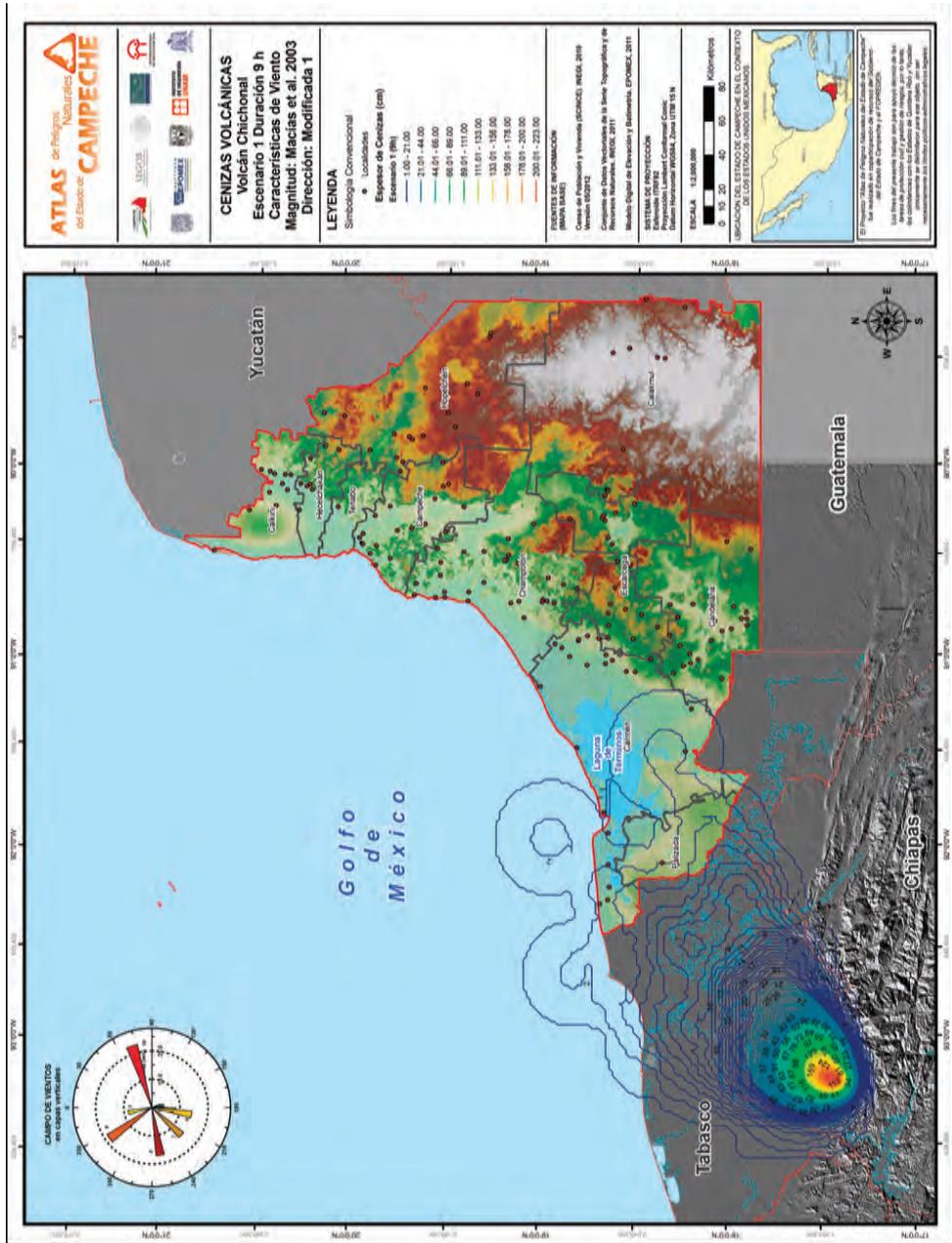


Figura 4. Escenario 1 para erupción del volcán Chichonal.

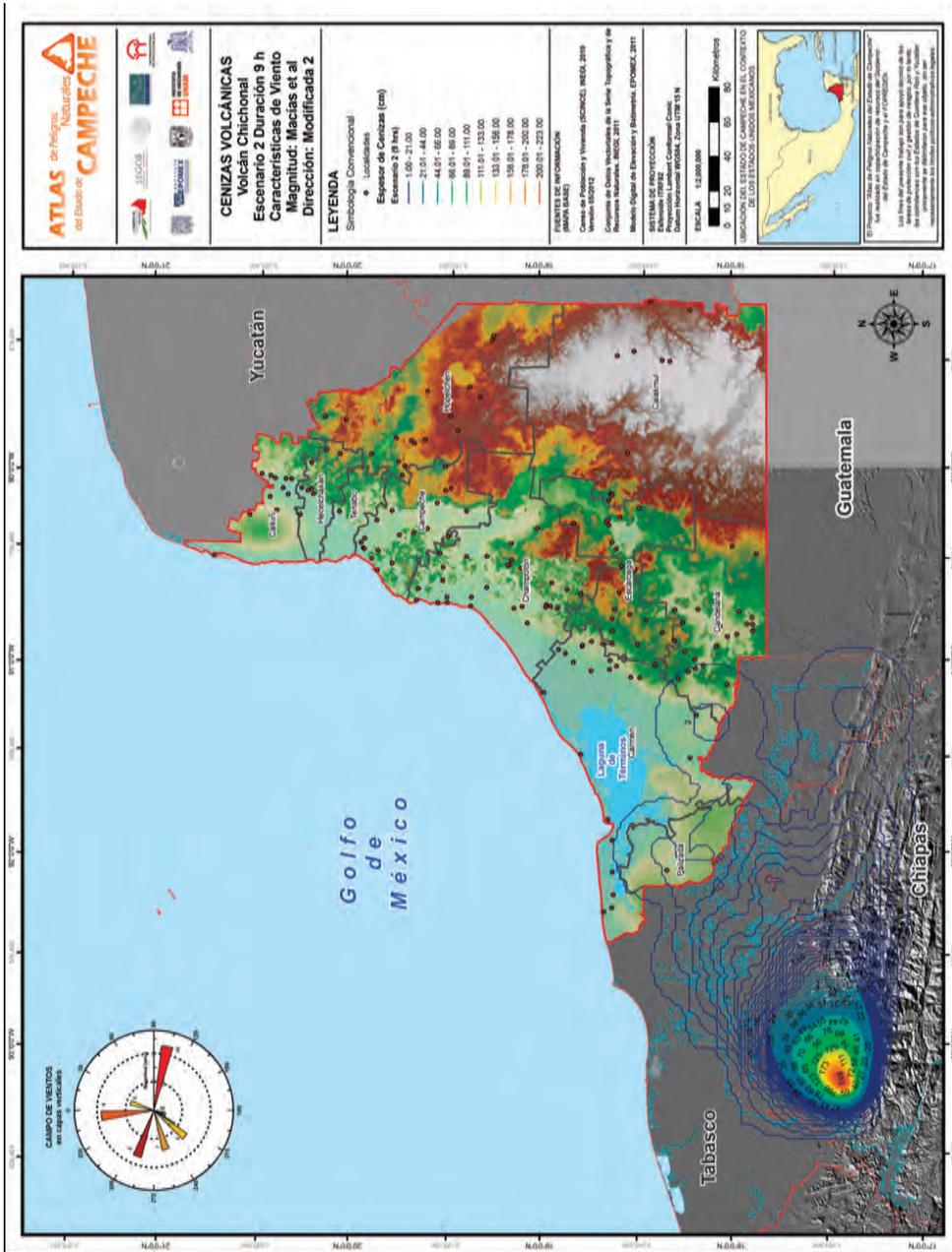


Figura 5. Escenario 2 para erupción del volcán Chichón.

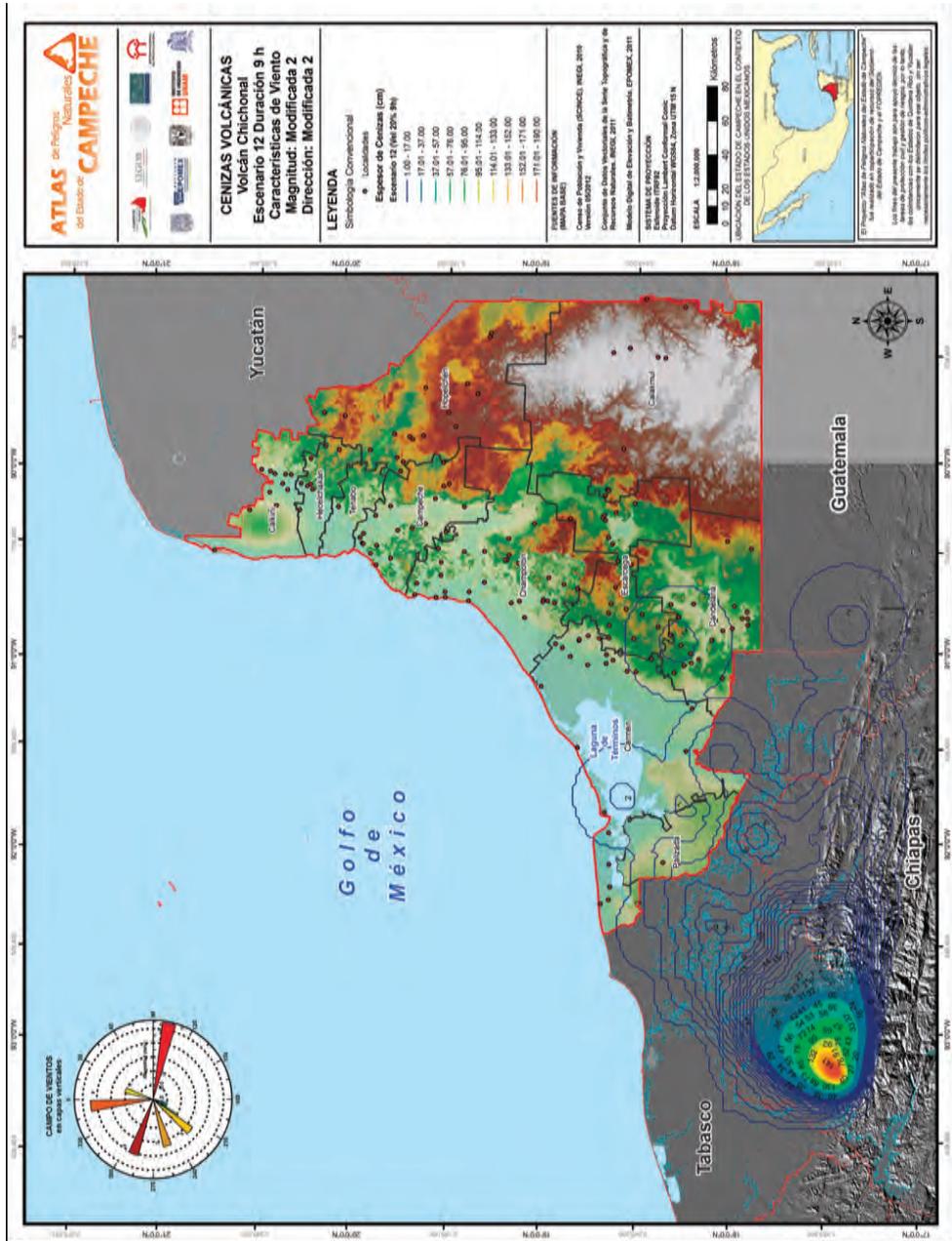


Figura 6. Escenario 12 para erupción del volcán Chichonal.



## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados de las modelaciones fueron presentadas en mapas, caracterizados por escenarios que indican unas condiciones de viento y que se muestran en las figuras 183 a 192. Los escenarios más desfavorables para el estado de Campeche son, según la tabla 3, los números 1, 2, 11 y 12, en los dos primeros se mantienen las mismas velocidades propuestas por Macías *et al.* (2003) pero con un giro de 9° y 120 ° respectivamente. En los escenarios 11 y 12 se incrementan en un 20% la magnitud de las velocidades, con respecto a los escenarios 1 y 2.

En las siguientes tablas 4 a la 7 se observan, los alcances máximos de la nube de cenizas, definidos por aquella región en la que al menos cae 1.0 cm de espesor de ceniza y

los espesores de cenizas para las principales localidades ubicadas dentro del área de afectación.

Ante una erupción del volcán el Chichón, las principales localidades que pueden llegar a ser afectadas con al menos 1.0 cm de espesor de cenizas volcánicas son Ciudad del Carmen, Candelaria y Palizada. En general se espera que el máximo espesor de ceniza sea del orden de 3.0cm. Es importante mencionar que estos valores se obtuvieron con condiciones de viento diferentes y desfavorables a las obtenidas por Macías *et al.* (2003), con el objetivo de crear los escenarios más negativos para el estado de Campeche. En otras localidades del norte y centro del Estado pueden caer cenizas pero con un espesor inferior a 1.0 cm

## CONCLUSIONES

En este trabajo se aplicó el Modelo ASHFALL para representar la dispersión de ceniza volcánica de la erupción del volcán Chichón y generar escenarios de riesgo debido a la caída de material piroclástico. El modelo fue

ejecutado con datos de viento establecidos por Macías *et al.* (2003).

Un parámetro fundamental para la estimación de las cenizas es la masa total de material liberada durante la erupción, que pre-

**Tabla 4.** Escenario 1, máximo alcance y espesor de caída de cenizas volcánicas.

No.	Población	Distancia (km)	Espesor (cm)
1	Ciudad del Carmen	203.31	1.0
2	Conquista Campesina	222.42	1.0
3	Palizada	150.35	2.5
4	Atasta	175.82	2.0
5	Nuevo Progreso	163.90	2.5
6	Candelaria	244.92	0.0

**Tabla 5.** Escenario 2, máximo alcance y espesor de caída de cenizas volcánicas.

No.	Población	Distancia (km)	Espesor (cm)
1	Ciudad del Carmen	203.31	0.0
2	Benito Juárez I	243.43	1.0
3	Palizada	150.35	2.3
4	Atasta	175.82	0.0
5	Nuevo Progreso	163.90	0.0
6	Candelaria	244.92	1.1

**Tabla 6.** Escenario 11, máximo alcance y espesor de caída de cenizas volcánicas.

No.	Población	Distancia (km)	Espesor (cm)
1	Ciudad del Carmen	203.31	1.0
2	Enrique Rodríguez C.	283.75	1.0
3	Palizada	150.35	3.1
4	Atasta	175.82	2.7
5	Nuevo Progreso	163.90	3.0
6	Candelaria	244.92	0.0

**Tabla 7.** Escenario 12, máximo alcance y espesor de caída de cenizas volcánicas.

No.	Población	Distancia (km)	Espesor (cm)
1	Ciudad del Carmen	203.31	1.6
2	Haro	287.48	1.0
3	Palizada	150.35	3.0
4	Atasta	175.82	0.0
5	Nuevo Progreso	163.90	0.0
6	Candelaria	244.92	1.8



senta gran incertidumbre en su estimación. Otra fuente de incertidumbre la constituyen las alturas de la columna eruptiva y el caudal emitido.

Se generaron mapas de peligrosidad por caída de ceniza a escala regional, válida para el territorio del estado de Campeche, para

varios escenarios que toman en cuenta la magnitud y la velocidad del viento. Es importante resaltar, que la fiabilidad de los mapas de peligros depende fundamentalmente del nivel de conocimiento del volcanismo del área de estudio.

## LITERATURA CITADA

- Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2006a.** Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México. Secretaría de Gobernación.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2006b.** Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Secretaría de Gobernación.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2006c.** Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Conceptos Básicos sobre Peligros, Riesgos y su Representación Geográfica.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, 2008.** Peligro y Riesgo Volcánico en México. Secretaría de Gobernación.
- Connor, C. B., B.E. Hill, B. Winfrey, N.M. Franklin, & P.C. la Femina, 2001.** Estimation of volcanic hazards from Tephra Fallout. *Natural Hazards Review*, 2(1), 33-42.
- Macías, J. L., M.F. Sheridan, & J.M. Espíndola, 1997.** Reappraisal of the 1982 eruption of El Chichón volcano, Chiapas, México: new data from proximal deposits. *Bull Volcanol.*, 58:459-471.
- Macías, J. L., J. L. Arce, J. Mora, J. M. Espíndola, & R. Saucedo, 2003.** The ~550 BP Plinian eruption of El Chichón Volcano, Chiapas, México: explosive volcanism linked to reheating of a magma chamber. *Journal of Geophy. Research*, 108(B12), 2569
- Mulena, C., D. Allende, E. Puliafito, y G. Lakkis, 2012.** Estudio de la Dispersión de Cenizas Volcánicas del Puyehue: Simulaciones y Validación.

---

## Comentarios finales

*Gregorio Posada Vanegas, Beatriz Edith Vega Serratos y Rodolfo Silva Casarín*

---

En sus inicios la protección civil se enfocaba principalmente a la atención de la población durante y después de la ocurrencia de un desastre natural, su acción era generalmente reactiva. En la actualidad, la protección civil debe además servir como elemento de prevención, preparación y planeación urbana que permita disminuir los efectos nocivos en la población ante los peligros naturales. El gobierno del estado de Campeche, por medio del Centro Estatal de Atención a Emergencias, ha tenido la visión de que además de prepararse operativamente para la atención de emergencias debe incidir directamente en la cultura de la planeación de tal manera que los niveles de riesgos naturales sean día a día menores en la geografía estatal. Este libro pretende, sustentado en los resultados del proyecto FOPREDEN - Gobierno del Estado – *Atlas de Peligros Naturales del Estado de Campeche*, generar conciencia en la población acerca de los tipos de peligros más comunes que pueden afectarla y servir como elemento de consulta a las autoridades, de los diferentes órdenes de gobierno, que permita sustentar la toma de decisiones relacionadas con la planeación urbana.

De los dos tipos de peligros naturales analizados en este libro, hidrometeorológicos y geológicos, debido a su localización geográfica el estado de Campeche es afectado en mayor medida por los peligros asociados al agua, aun así la profundidad del análisis empleada en este proyecto para la caracterización de los peligros geológicos permite obtener conclusiones útiles y aplicables a la población.

A continuación se remarcan, por peligro natural analizado, algunas de las conclusiones más importantes descritas en los capítulos correspondientes.



Para la cuantificación de los peligros hidrometeorológicos se tomaron como base las metodologías propuestas por el Centro Nacional de Prevención de Desastres, las cuales fueron adaptadas y mejoradas a la geografía estatal por medio de trabajo de campo, en específico estudios batimétricos y medición de marea astronómica, y de gabinete relacionado con modelación numérica; para las cuencas de los ríos Champotón, Candelaria y Palizada se obtuvieron las áreas y tirantes de inundación asociados a diferentes periodos de retorno.

Como conclusiones generales, los escenarios de inundación en la cabecera municipal de Champotón se producen cuando el río del mismo nombre se desborda 2 km aguas arriba de la desembocadura, siendo esta última la condición de frontera por los niveles de marea astronómica y de tormenta que se presentan durante un evento meteorológico extremo. Las inundaciones son mayores en las colonias ubicadas al este del municipio, cercanas al río Champotón, cualquier desarrollo urbano que se realice en esta zona debe contar con estudios específicos que disminuyan la vulnerabilidad ya que el peligro de inundación es medio-alto. El comportamiento del río Palizada está controlado por el nivel en el río Usumacinta, la influencia de la marea astronómica solo se circunscribe a la parte baja que se encuentra cerca de la población de Canales; un nivel mayor a 5.80 m.s.n.m en la escala de medición de la CONAGUA ubicada en el puente vehicular sobre el río Palizada implica el inicio de la inundación en la cabecera municipal. El río Candelaria debido a su tamaño tiene la mayor área de inundación, sin embargo la cantidad de personas afectadas es menor debido a que los centros poblacionales se encuentran ubicados principalmente en la orilla sur, con excepción del Chilar, comunidad

que se inunda completamente para periodos de retorno mayores a 20 años; la cabecera municipal de Candelaria sufre afectaciones en las casas ubicadas sobre el malecón y principalmente en la colonia Alejandría, la cual está construida en zona claramente inundable.

El peligro de marea de tormenta fue caracterizado por medio de la aplicación de dos modelos numéricos desarrollados por los autores del capítulo, se analizó el efecto de sobrelevación del nivel del mar de todos los huracanes que han pasado al menos a 200 km de la geografía del estado y por medio de un análisis extremal se determinó, cada 3 km sobre la línea de costa, la función de inundación de acuerdo a los periodos de retorno de 2 a 500 años. Los lugares con mayores niveles de marea de tormenta para el mismo periodo de retorno se encuentran en Isla Aguada y en la parte este de la laguna de términos, las ciudades con mayor posibilidad de afectación por este fenómeno son San Francisco de Campeche y Ciudad del Carmen, esta última debido a la combinación de este fenómeno con acumulación de agua en bajos inundables, la ciudad de Champotón tiene una afectación baja por marea de tormenta, pero este peligro es un condicionante que evita la libre descarga del río Champotón cuando se presentan intensas lluvias en la cuenca que incrementen el caudal descargado, con lo cual se incrementa el área de inundación.

La caracterización del oleaje se realizó para las ciudades de San Francisco de Campeche, Carmen y Champotón por medio de un modelo numérico útil en aguas profundas de tal manera que los diseñadores hidráulicos puedan propagar los resultados hacia la costa para obtener los niveles de altura de ola adecuados para el diseño de estructuras marinas, este peligro al verse combinado con

marea de tormenta incrementa el daño en las construcciones ubicadas sobre la línea de costa.

Se identificaron aquellas zonas denominadas bajos inundables, para las tres principales ciudades del Estado, los cuales son sitios que por su gran acumulación de agua de lluvia deben analizarse con mayor detalle y cuidado en los casos en los cuales se destine su uso de suelo para construcción de cualquier tipo de infraestructura; se deberá garantizar que los sistemas de drenaje pluvial estén diseñados para los caudales picos que desembocan en ellos, los cuales deben obtenerse por medio de análisis hidrológicos. Es fundamental recalcar que estos sistemas, ya sean canales abiertos o entubados deben contar con el mantenimiento preventivo, antes de cada temporada de lluvias, que permita garantizar que su sección trasversal sea siempre la sección de diseño y no una menor que sea insuficiente y propicie inundaciones.

El análisis de sequía fue realizado a partir de la información climatológica de la CONAGUA, este estudio no estaba contemplado en los términos de referencia del proyecto pero los autores consideran que, aunque sus efectos no son tan impactantes como pueden ser los asociados a una inundación, el costo en pérdidas por daños en cultivos y disminución en la productividad vegetal de los bosques es alto por lo que los resultados aquí planteados pretende servir como indicador de que tan severa, a partir del índice de precipitación estandarizada, ha sido la sequía en años pasados, lo que puede llegar nuevamente a repetirse.

Al realizar el análisis de peligrosidad por sismo se confirma que para el estado de Campeche todas las construcciones deben diseñarse al menos para resistir un fuerza

equivalente al 10 por ciento de la masa del edificio por la aceleración de la gravedad, la península de Yucatán es una zona sísmica lo que obliga que las edificaciones se diseñe y construyan adecuadamente.

Con relación a la caída de cenizas volcánicas, no existen volcanes en el estado de Campeche, el peligro más cercano está relacionado con el volcán Chichonal en el estado de Chiapas, ante una eventual erupción y si los vientos se dirigen hacia el este con la intensidad y duración pertinente, es factible que sea perceptible una ligera capa de cenizas, máximo de 1 cm, en el municipio de Palizada y en partes de Candelaria.

El peligro de disolución kárstica fue obtenido a partir del análisis de información geológica, de fallas, fracturas y tipo de suelo, igualmente se realizó una caracterización de la dureza de rocas y su factibilidad de disolución, los mapas obtenidos son estatales, por lo que deben tomarse como indicativos y servir para enfocar, en aquellas zonas con peligro medio y alto, las investigaciones que por medio de mediciones en campo permitan mejorar la caracterización de este peligro. En especial se debe analizar algunas zonas del municipio de Hopelchén, las cuales principalmente están enfocadas a labores de agricultura.

Los resultados de este libro deberán complementarse con el análisis de vulnerabilidad y exposición de tal manera que sea posible el cálculo del riesgo, asociado a cada fenómeno natural, obteniendo un panorama completo, tanto con niveles de daños y costos. Lo anterior, permitirá que las autoridades estatales y municipales tengan elementos financieros útiles para sustentar las políticas relacionadas con la planeación urbana.

---

**PELIGROS NATURALES EN EL ESTADO DE CAMPECHE**  
Cuantificación y Protección Civil

Se realizó en el Departamento de Difusión y Publicaciones  
del Instituto EPOMEX-Universidad Autónoma de Campeche.  
Composición, diseño y proceso editorial a cargo de Jorge Gutiérrez Lara  
Diseño de la cubierta a cargo de Juan Manuel Matú

Se termino de imprimir en septiembre 2013  
en los talleres de Print Service. Av. Agustín Melgar 3B.  
Col Bosques de Campeche, C.P. 24030 San Francisco de Campeche, Campeche.

La edición consta de 1 000 ejemplares más sobrantes.

---



Tradicionalmente la Protección Civil se ha concebido como un conjunto de acciones, por parte de los diferentes niveles de gobierno, instituciones y la población civil, reactivas ante los fenómenos y desastres naturales que ya han ocurrido, como en el caso de un terremoto, o que están por ocurrir en un corto plazo, como pueden ser las inundaciones asociadas a un huracán que tocará tierra unos días después de ser detectado. Para mejorar la atención a la población e infraestructura en México, a partir de los últimos años, se han realizado diversos trabajos e investigaciones que tienen como objetivo fortalecer el Sistema de Protección Civil – SINAPROC-, sin descuidar la atención de desastres durante las emergencias, en el ámbito preventivo. Los resultados de estos trabajos forman parte del Atlas de Riesgos Naturales, herramienta en permanente actualización, que permite y apoya a las autoridades en las labores de prevención, atención y reglamentación relacionadas con los desastres naturales.

Los resultados presentados en este libro son parte del proyecto Atlas de Peligros Naturales del Estado de Campeche el cual fue realizado por el Instituto EPOMEX de la Universidad Autónoma de Campeche, el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México y la Universidad Autónoma de San Luis Potosí para el Centro de Atención a Emergencias del Gobierno del Estado de Campeche, este proyecto fue realizado con recursos estatales y federales del Fondo para la Prevención de Desastres Naturales. Se analizaron los peligros hidrometeorológicos y geológicos de mayor impacto a partir de las metodologías propuestas por el Centro Nacional de Prevención de Desastres – CENAPRED-, las cuales fueron adaptadas y mejoradas para poder ser aplicadas a la geografía del Estado de Campeche.

ISBN: 978-607-7887-53-9

