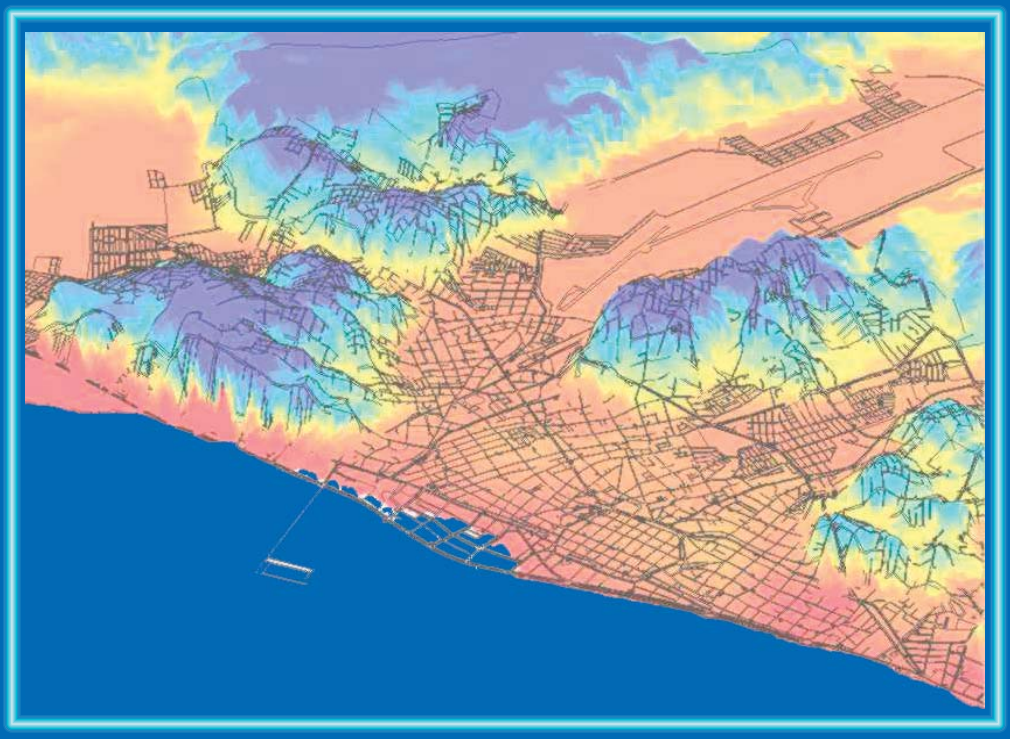
Diagnóstico de Riesgos por Inundación para la Ciudad de Campeche

A. Gerardo Palacio Aponte, Paulo Salles Afonso de Almeida
Rodolfo Silva Casarín, Erick Gustavo Bautista Godínez,
Gregorio Posada Vanegas y Rafael Val Segura



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CAMPECHE
CENTRO EPOMEX
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CAMPECHE
CAMPECHE
H. AYUNTAMIENTO 2003-2006
SECRETARÍA DE DESARROLLO SOCIAL | SEDESOL
Hábitat

Diagnóstico de Riesgo por Inundación para la Ciudad de Campeche

A. Gerardo Palacio Aponte, Paulo Salles Afonso de Almeida,
Rodolfo Silva Casarin, Erick Gustavo Bautista Godínez,
Gregorio Posada Vanegas y Rafael Val Segura

Diagnóstico de Riesgo por Inundación para la Ciudad de Campeche

A. G. Palacio Aponte, P. Salles Afonso de Almeida, R. Silva Casarin, E. Gustavo Bautista Godínez, G. Posada Vanegas y R. Val Segura, 2005. Diagnóstico de Riesgo por Inundación para la Ciudad de Campeche. Universidad Autónoma de Campeche, H. Ayuntamiento del Municipio de Campeche. 109 p.

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

ISBN XXX-XXXX-XX-X

CONTENIDO

Prologo

1 Introducción 4

2 Área de Estudio 10

3 Zonificación de la Susceptibilidad del Terreno ante la Ocurrencia de Inundaciones 14

4 Zonificación Inundaciones de Origen Continental 56

5 Zonfificación de Inundaciones de Origen Marino-Continental 68

6 Resultados 82

7 Conclusiones y Recomendaciones 102

Prologo

Es tarea fundamental de todos los niveles de gobierno y del sector académico, realizar estudios de riesgos naturales que permitan planificar con elementos certeros de decisión, el crecimiento urbano y suburbano de Ciudades en expansión como Campeche.

Particularmente el municipio de Campeche considera de especial interés el estudio de las inundaciones, debido a que es la principal amenaza natural que lo afecta. Las inundaciones asociadas a lluvias torrenciales de temporada y las ocasionadas por huracanes, son las que históricamente, han ocasionado más daños a la infraestructura y la población que cualquier otro fenómeno. Ante este panorama el gobierno municipal decidió trabajar en forma conjunta con los grupos de investigación de la Universidad Autónoma de Campeche (Centro EPOMEX), para evaluar el riesgo de inundaciones y establecer estrategias de planificación para el desarrollo urbano y la protección de los Ciudadanos y sus bienes.

El estudio de los riesgos de origen natural adquiere cada vez más importancia en términos del ordenamiento de las actividades humanas sobre el territorio y de la vida misma de las poblaciones. Permite detectar los probables daños a la inversión tanto pública como privada y sobre todo proteger la integridad física de la población. Es bien sabido que a medida que se conocen mejor las amenazas naturales y se aplican adecuadas estrategias preventivas y de mitigación, los niveles de vulnerabilidad o exposición se reducen.



La presente obra es una primera contribución al estudio de las inundaciones en Campeche. Se investiga su génesis, áreas de afectación, intensidad y recurrencia histórica. A partir del estudio del relieve y de los regímenes de infiltración y escurrimiento del terreno, se identifican zonas susceptibles a las inundaciones de origen continental y marino. Se caracteriza su intensidad verificando mediante información documental y de campo las alturas promedio alcanzadas por el agua en lluvias de temporada y huracanes. Al mismo tiempo, a través de la información documental y meteorológica, se realiza un análisis probabilístico de la recurrencia de los eventos meteorológicos que ocasionan inundaciones. Finalmente el libro incluye cinco mapas que muestran el comportamiento espacial de las inundaciones ordinarias y extraordinarias en Campeche así como las zonas susceptibles a inundaciones y la permeabilidad del terreno.

Este estudio contribuye a fortalecer la cultura de la prevención en la sociedad campechana y es un instrumento de gestión para la planificación urbana y el ordenamiento territorial a nivel local.

FERNANDO ORTEGA BERNÉS
Presidente Municipal de Campeche
2003-2006

Diagnóstico de Riesgos por Inundación para la Ciudad de Campeche

Estudio para la Zonificación de la Susceptibilidad a las Inundaciones



1 Introducción

Las inundaciones son los fenómenos de origen natural que más situaciones de desastre generan. Se estima que a nivel mundial ocasionan más pérdidas fatales que incluso los huracanes tropicales. Son responsables de aproximadamente el 40% de las muertes anuales (Kingma, 1990) por desastres naturales (Tabla 1).

Tabla 1. Tipos de amenazas naturales y sus frecuencias

Tipos de amenazas naturales	Frecuencia
Inundaciones	40
Huracanes	20
Terremotos	15
Sequías	15
Otros	10

Las inundaciones tienen diferentes causalidades, comportamientos y periodos de retorno. Debido a estas características los escenarios de sus efectos destructivos son complicados de modelar. La incertidumbre en la determinación de los escenarios se reduce usando diversos indicadores cuantitativos y semicuantitativos de susceptibilidad expresados espacialmente y validados estadísticamente. Se incluyen índices hidrológicos complejos como volúmenes de escurrimientos medios y extremos, coeficientes de escurrimiento, velocidad de infiltración y tiempos de concentración, entre otros. Estos requieren a su vez datos meteorológicos ponderados de frecuencias de lluvias medias, lluvias máximas en 24 hrs. y frecuencia de huracanes.

En los últimos cinco años la ciudad de Campeche ha experimentado un importante crecimiento en áreas urbanizadas. Ante este crecimiento y su tendencia acelerada surge la inquietud de las autoridades municipales por reordenar la urbanización actual y la potencial hacia zonas preferentemente libres de amenazas naturales, como la afectación por inundaciones de diferentes orígenes e intensidades.

El estudio de la zonificación de la susceptibilidad del terreno a las inundaciones se basa en el balance de los aportes totales y netos de agua producto de las precipitaciones ordinarias y extraordinarias del sistema regional de subcuencas, los aportes marinos de tormenta o de sobre elevación del nivel del mar y sobre todo en las respuestas locales de las unidades del terreno a nivel local (ciudad) para acumularlos o dispersarlos.

Cuando la capacidad natural y/o artificial del terreno para mitigar la energía cinética de los flujos de agua se pierde y se inhibe la facilidad del terreno para permitir la percolación del agua, el potencial destructivo y los tiempos de permanencia de los tirantes aumenta sobre todo en terrenos bajos.

Por otra parte es importante señalar que el área urbana de Campeche no es un conjunto de subcuencas aislado sino que forma parte de un sistema hidrológico regional que contribuye con importantes volúmenes de agua. En este sentido es necesario considerar la naturaleza cárstica del terreno en la región y el carácter torrencial de las lluvias, evaluando el potencial de escurrimiento e infiltración (balance hídrico) según la morfoestructura regional y la conectividad entre subcuencas.

Los únicos antecedentes en cartografía sobre inundaciones en la ciudad de Campeche, son el mapa de zonas inundables propuesto por el CENECAM en el Atlas de Riesgos 2000 y los anexos cartográficos (mapas escala 1:40,000) de las inundaciones ocasionadas por el Huracán Isidoro, elaborados en el Centro EPOMEX (UAC) con financiamiento del CONACYT (Sisierra) regional (Rivera-Arriaga *et al.*, 2004).

Por lo anterior y ante la necesidad de ordenar el crecimiento urbano se busca diferenciar espacialmente los grados de alerta preventiva o importancia del potencial de inundación en la ciudad de Campeche en función del conjunto de elementos naturales y antrópicos que los condicionan. Se establece la relación entre el potencial de escurrimiento y de acumulación de agua en mapas a escalas semidetalladas 1:10,000.

Caracterización y Tipificación de las Inundaciones

Cuando la cartografía de amenazas naturales y riesgos es producto de la investigación científica de los fenómenos perturbadores, tiene como estructura medular un modelo conceptual que expresa en forma consistente el escenario espacial del comportamiento y los efectos esperados por el fenómeno en cuestión. Este modelo se expresa a través de un mapa en cuya leyenda se refleja la forma en que fue procesada y organizada la información de entrada.

El mapa de susceptibilidad a las inundaciones presenta varias categorías generales según su escala o cobertura espacial, su ocurrencia en el tiempo, su origen y la respuesta particular del terreno ante el balance entre el escurrimiento y la infiltración. Técnicamente la susceptibilidad se expresa como la probabilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un evento con un nivel de severidad, en un sitio específico y durante un periodo de tiempo.

En la tabla 2 se muestran las principales formas de tipificar las inundaciones.

Tabla 2. Tipificación general de inundaciones

Escala	Expresión espacial	Ocurrencia	Origen
Subregional (Escala < 50000)	Aereal	Ordinarias	Continentales
Local (escala > 50000	Lineal	Extraordinarias	Marinas
	Puntual		Mixtas (incluyendo causas antrópicas)

La escala se refiere a la magnitud o amplitud de la cobertura espacial a considerar en el estudio de las inundaciones. Según la escala se incluirán procedimientos de análisis más o menos detallados. A nivel subregional las inundaciones consideran las poblaciones y el mesorelieve de divisorias de aguas, laderas y planicies bajas acumulativas y en el nivel local el arreglo del microrelieve y las áreas urbanas (colonias o barrios) y suburbanas.

La ocurrencia se refiere a la regularidad temporal con que se presentan los fenómenos naturales que ocasionan perturbaciones al sociosistema afectable. Se basa en la obtención de datos directos (bibliografía, encuestas, evidencias físicas, registros iconográficos, etc.) e indirectos (métodos geológicos, geomorfológicos, geofísicos, etc.) para conocer la ocurrencia del fenómeno y determinar que tan frecuente o disperso ha sido en el tiempo. La frecuencia en términos de periodos de recurrencia depende de la elasticidad temporal en la repetición de los fenómenos, sin embargo, en la generalidad se evalúa como sigue:

- Frecuencia alta. Corresponde con los fenómenos cíclicos frecuentes (recurrencia estacional o anual)

- Frecuencia media. Corresponde con fenómenos diacrónicos más o menos frecuentes (intervalo de recurrencia de la mayoría de los fenómenos perturbadores, entre uno y 100 años, según Alexander ,(1991)
- Frecuencia baja. Corresponde con fenómenos diacrónicos poco frecuentes (repeticiones en intervalos mayores a 100 años)

Para cubrir este componente se reorganiza la información histórica disponible y se procesa estadísticamente o se inserta en algún modelo predictivo.

El conocimiento de los procesos, mecanismos y factores generadores de un fenómeno permite definir las condiciones bajo las cuales se puede originar y/o repetir, ubicando así, las zonas en las que el fenómeno tiene su primera expresión espacial. Los procesos explican mediante una serie de fases la forma en que funcionan y se relacionan los mecanismos que originan el fenómeno. Así las inundaciones de origen marino están relacionadas con la génesis de fenómenos en ambientes acuáticos extendidos y las de origen continental incluyen flujos superficiales o subterráneos que por condiciones del terreno quedan confinados. En ambientes costeros es sumamente común que ante la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extraordinarios se mezclen fenómenos de diversos orígenes.

Debido a la complejidad de los sistemas físicos en los cuales un gran número de variables pueden condicionar el proceso, la ciencia aún no cuenta con técnicas que le permitan modelar con alta precisión dichos sistemas y por lo tanto los mecanismos generadores de cada una de las amenazas. Por esta razón, la evaluación de la amenaza, en la mayoría de los casos, se realiza combinando el análisis probabilístico con el análisis del comportamiento físico de la fuente generadora, utilizando información de eventos que han ocurrido en el pasado y modelando con algún grado de aproximación los sistemas físicos involucrados (Maskrey , 1993).

Estudio Subregional

En el contexto de la dinámica hidrológica regional las inundaciones se dividen por su origen en continentales y marinas con expresiones espaciales principalmente areales. A escala subregional las inundaciones de expresión areal continental se basan en el conocimiento del balance hidrogeológico e hídrico de las subcuencas y su régimen de inundabilidad. Asociando los registros meteorológicos históricos de: precipitación media, probabilidad de lluvia, frecuencia y periodo de retorno, con factores asociados a la morfometría y geometría de las subcuencas como: tamaño, forma, pendiente media, tiempo de concentración, cubierta vegetal (coeficiente de rugosidad y escurrimiento), escurrimiento medio, escurrimiento máximo y volumen medio de escurrimiento. Este análisis dentro del contexto del potencial del escurrimiento y la inundabilidad del terreno.

Por otra parte, debido al constante avance de la ciudad sobre el mar y viceversa (cambio climático global) es necesario prever el nivel de las inundaciones marinas ordinarias (mareas vivas) y extraordinarias (mareas de tormenta) así como sus áreas de afectación según la batimetría, la topografía costera y la rugosidad de la línea de costa. El estudio subregional de estas inundaciones requiere tanto del registro histórico de los fenómenos hidrometeorológicos y su comportamiento, así como de las variables físico-geográficas del terreno que las condicionan.

Estudio Local

A escalas semidetalladas, las inundaciones en el área de estudio se caracterizan a partir del concepto de unidades del terreno, diferenciando principalmente la permeabilidad de los suelos (por grados), la predisposición dinámica de las geoformas para captar o dispersar el agua y el origen y volumen de los flujos potencialmente confinables. Se generan mapas índice donde se muestran los promedios de escorrentía y permeabilidad por unidad de área y su relación con geoformas colectoras y/o dispersoras. Al mismo tiempo al diferenciar la cobertura del suelo se pueden inferir los coeficientes de rugosidad-escurrimiento (pendiente–vegetación-no vegetación) y permeabilidad asociada. Conociendo los promedios y los eventos extremos de precipitación se calcula el balance potencial entre el agua que satura el suelo, la que escurre y la que se infiltra.

Objetivos

General

Zonificar y caracterizar la susceptibilidad del terreno a las inundaciones según se origen, periodicidad e intensidad en la ciudad de Campeche.

Específicos

Analizar estadísticamente los registros meteorológicos y su relación con los regímenes de inundación documentados históricamente.

Caracterizar el comportamiento hidrológico e hidrogeológico de las subcuencas de la ciudad de Campeche y subcuencas asociadas (nivel regional).

Zonificar los tipos de cobertura (superficies permeables e impermeables, colectoras, difusoras) según sus características naturales y/o artificiales y su susceptibilidad a las inundaciones.

Calcular y modelar las áreas de cobertura de tirantes de agua ordinarios y extraordinarios tanto de origen continental como marino y su impacto directo en el patrón de inundaciones.

El origen continental o marino de las inundaciones requiere adecuar cálculos hidrológicos y modelos probabilísticos detallados sobre la movilidad de los flujos. A nivel local su expresión espacial puede ser lineal, puntual o areal. La expresión lineal caracteriza hidrológicamente las fuentes de agua que se concentran en calles, drenes naturales y artificiales así como su funcionalidad operativa para desalojar excesos de agua. Los aportes puntuales se refieren a los gastos localizados de origen subterráneo que ocasionan inundaciones confinadas. Por otra parte la expresión areal refleja comportamientos espaciales de homogeneidad relativa en cuanto a intensidades y permanencias de las inundaciones. En términos de planificación del territorio es la que permite generar normatividad en términos de desarrollo urbano.



2 Área de Estudio

Estructura Geológica y Relieve

La superficie rocosa de la ciudad de Campeche y sus alrededores se caracteriza por tener una relativa homogeneidad en cuanto origen, edad y composición química y mineral. Las rocas son de origen sedimentario típicamente marino constituidas predominantemente por carbonato de calcio ($CaCO_3$) bajo la forma mineral de calcita, y en menor medida de dolomita y aragonita. Estas rocas forman parte de las formaciones Carrillo Puerto y Miembro Pisté compuestas por calizas marinas blancas o amarillentas, duras y fosilíferas (López-Ramos 1973), las cuales tuvieron su origen durante el Mioceno (neógeno inferior) hace unos 23 millones de años.

La estructura geológica de la superficie y el subsuelo demuestran que la plataforma estructural que constituye la península actual inició su emersión sobre el nivel del mar durante el Oligoceno y Mioceno en la porción meridional (Lugo Hubp *et al.*, 1992).A medida que se inicia este ascenso continental el relieve pasa de planicies onduladas a lomeríos fracturados que favorecen el desarrollo de carst subterráneo. El entorno urbano de la ciudad de Campeche se encuentra precisamente entre relieve de transición cárstica de conos y domos (etapa paleogénica) al sur (Miembro Pisté) y planicies extendidas del norte. Así se presentan lomeríos aislados que conforman subcuencas con divisorias de aguas incompletas

que captan los flujos de agua pluvial durante la época de lluvias y planicies bajas limo-arcillosas y rocosas que acumulan el agua en condiciones de lluvia extrema. Los lomeríos son en realidad pliegues bloque con dirección WNW-ESE compuestos por calizas masivas o de estratos delgados con echados subhorizontales de 2º al pie de ladera, 10º sobre los flancos y 15º sobre las pendientes más pronunciadas. Son el resultado de levantamientos eustáticos que permitieron la emersión de planicies estructurales a diferentes niveles altitudinales de 7,14, 30, 40 y 60m y pendientes agrupadas en rangos de 20 y 40%.

Dentro de la homogeneidad litológica de calizas existen 3 diferencias morfológicas básicas que son: coraza calcárea, calizas blandas subsuperficiales y arenales calcáreos costeros. La coraza calcárea exterior conocida con los nombres regionales de laja o chaltún, es un producto que resulta de un proceso de litificación lento y gradual de la parte superior de los sedimentos calcáreos más blandos. Los espacios porosos son reducidos y su consistencia es muy dura lo que inhibe de manera importante los ritmos de infiltración. Sin embargo si debido a termoclastismo, intemperismo biogénico o rupturas de la roca por asentamientos locales la coraza se rompe entonces la infiltración se acelera. Las calizas blandas subsuperficiales llamadas en lengua maya, sahcab que significa tierra blanca, son estratos de sedimentos marinos inmediatos inferiores a la coraza calcárea, de composición calcárea, textura amorfa o cristalina y consistencia suelta.

Hidrología

La región de Campeche se localiza en la Región Hidrológica No. 31 Yucatán Oeste y pertenece a la zona Península de Yucatán, abarcando el municipio de Campeche (CNA, 2004). Como consecuencia de la naturaleza cárstica del terreno y su escaso relieve, los escurrimientos superficiales son escasos. Existen pequeñas corrientes superficiales perennes que se originan en resurgencias y desembocan en el Golfo de México, las principales son: El Caguamo, Huaymil, Santa Juana, Moa y la Ensenada.

El acuífero es libre, se encuentra subexplotado y se formó en las rocas carbonatadas del Terciario (calizas fracturadas), las cuales presentan huellas de disolución, fenómeno que origina las dolinas, bajos confinados y pequeñas cavernas. El acuífero presenta productividad muy alta y se aprovecha por medio de 865 pozos profundos y 415 norias cuyo nivel estático promedio es de 3.7 m, haciéndose más somero conforme se acerca a la costa.

Régimen Climático

El clima predominante en la zona centro-sur del Estado de Campeche, es Aw (cálido subhúmedo con lluvias en verano).Dentro de este tipo climático la temperatura promedio siempre se encuentra por arriba de los 18°C y para la ciudad de Campeche varía alrededor de los 26.4°C. La precipitación media es de 1086 mm anuales (CNA, 2004) y se concentra entre los meses de junio y septiembre (Fig, 1)

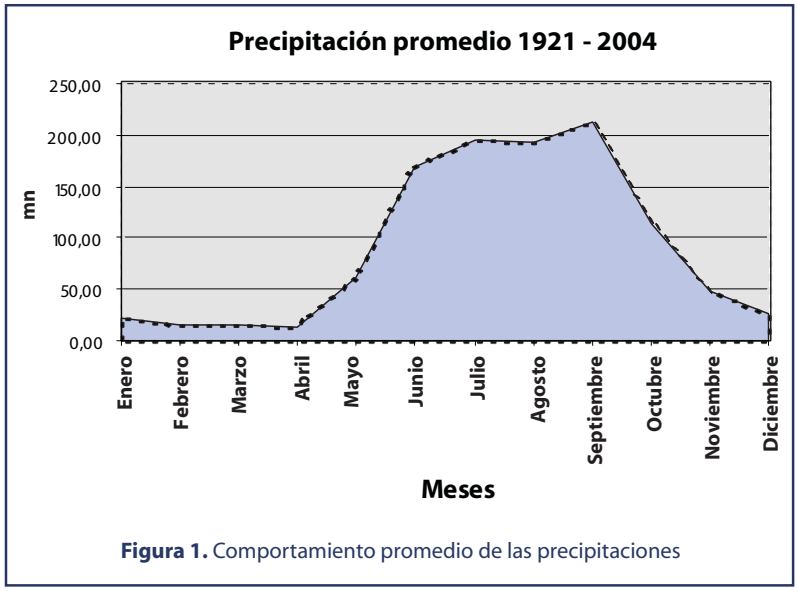


Figura 1. Comportamiento promedio de las precipitaciones

La circulación del viento en el Golfo de México durante el verano es principalmente anticiclónica. Los vientos alisios prevalecen en la región central y sur de Estado de Campeche y los promedios de velocidad son mayores durante el invierno (nortes). Aunque los huracanes de efectos destructivos directos son poco frecuentes en la Bahía de Campeche (detalles adelante), cuando ocurren ocasionan importantes daños materiales a las poblaciones y el entorno natural. Se han presentado 24 huracanes desde categoría 1 hasta 4 desde 1866 a la fecha. El oleaje de tormenta y la sobrelevación del nivel medio del mar acompañan frecuentemente a estos fenómenos.

En cuanto al régimen de vientos en Campeche dominan los de dirección E y ESE, de velocidades entre 2 y 6 km/h y rachas de hasta 15 km/h (fig.2). Las características del viento antes mencionadas reflejan las condiciones atmosféricas promedio observadas durante un periodo mínimo de 20 años (Fig.1). Lo anterior supone la exclusión de comportamientos extremos diurnos y estacionales como brisas tierra-mar, nortes y huracanes.

Aunque la ocurrencia de huracanes en Campeche es poco frecuente sus efectos son muy significativos en términos de afectación a las zonas urbanas. En un radio 500 km alrededor de Campeche han afectado 13 huracanes desde 1949.

En cuanto a los nortes o lluvias invernales existen pocas inundaciones significativas asociadas a estos fenómenos. La afectación se restringe a la línea de costa por efectos asociados

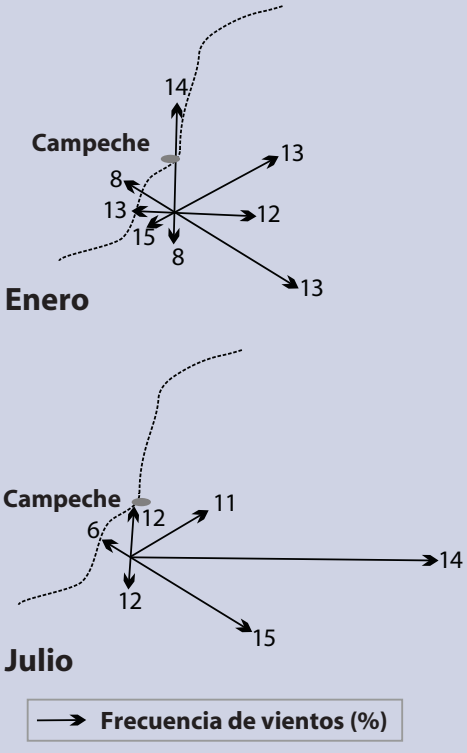


Figura 2. Frecuencia y dirección de los vientos en la ciudad de Campeche.

lluvia-viento y algunos puntos poco representativos al interior de la ciudad (Fig.2).

Caracterización Edafológica

Asociados al relieve encontramos principalmente dos grupos de suelos: Leptosoles réndzicos y gleysoles vérticos. Los Leptosoles son suelos poco desarrollados, pedregosos y someros que se encuentran sobre las planicies rocosas bajas acumulativas y lomeríos dispersos o alineados y son resultado del intemperismo físico y químico sobre las corazas calcáreas del terciario. Por otra parte los gleysoles son suelos hidromórficos condicionados en su pedogénesis a la acumulación de materiales alóctonos y autóctonos y ala presencia semipermanente de agua que origina condiciones anaerobias de ambientes inundables (bajos inundables o intermareales). Las arcillas que componen su perfil son alteradas por la alternancia de periodos secos y húmedos propiciando microrelieve tipo gilgai o de montículos, la formación de costras salinas y la colonización de vegetación hidrofítica.



3 Zonificación de la Susceptibilidad del Terreno ante la Ocurrencia de Inundaciones

La susceptibilidad del terreno analiza la distribución espacial y correlación múltiple de las condiciones naturales del terreno, que predisponen la capacidad de las unidades del paisaje para amortiguar o magnificar la incidencia directa de un fenómeno natural sobre un territorio específico. Se basa en el conocimiento del potencial destructivo extremo del conjunto de fenómenos ocurridos en el pasado (frecuencia, intensidad y magnitud) y su relación intrínseca con las condiciones naturales o antrópicas locales del terreno.

Para su determinación se aplica el análisis condicional basado en un conjunto de criterios ponderados de susceptibilidad y su expresión territorial sobre unidades del terreno (terrain-units). Este análisis se basa en el Teorema de Bayes, donde el discernimiento de la probabilidad de las causas, se determina a partir de los efectos que han podido ser observados en el pasado. A partir de este principio se establecen correlaciones entre los efectos modificadores o destructivos registrados sistemáticamente y las unidades del terreno o unidades de mapeo homogéneas donde se categorizan las respuestas (impactos) a la amenaza. En estas unidades se infieren respuestas ambientales similares ante las variantes en los efectos destructivos similares del fenómeno perturbador. A partir de esta correlación se establecen analogías geográficas basadas en la interpretación de datos puntuales, lineales o areales.

Estudio Subregional de la Cobertura, los Coeficientes de Escurrimiento y la Susceptibilidad a las Inundaciones. Aspectos Geomorfohidrológicos.

El balance hídrico entre el escurrimiento, el ritmo de infiltración y la evapotranspiración dependen del tipo de cobertura, la naturaleza del suelo y la morfometría del terreno (longitud de vertientes y pendiente del terreno). Los estudios subregionales a nivel de subcuencas incluyen el coeficiente de escurrimiento para evaluar tanto el volumen de escurrimiento medio como extremos potenciales, las pendientes del terreno y las fronteras hidrodinámicas reconocidas como parteaguas y niveles de base. Estos factores se consideran para detectar diferencias en la intensidad de la amenaza sobre todo en el estudio de los escurrimientos asociados a lluvias de ocurrencia rápida y torrencial dentro de zonas urbanas y suburbanas. De manera que la susceptibilidad del terreno a nivel subregional en función del balance hídrico comprende cinco etapas:

- Identificación y caracterización de la cobertura
- Coeficientes de escurrimiento asociados
- Determinación de pendientes del terreno
- Trazo de divisorias de aguas y niveles de base locales
- Cálculo de los volúmenes de escurrimiento potenciales

La primera caracterización subregional de la cobertura se realizó mediante una clasificación no supervisada (Isodata) con 12 clases de una imagen Landsat ETM+ del 2003 remuestreada a 12.5 m de píxel con el software ERDAS. El tamaño del píxel permite alcanzar resoluciones semidetalladas escala 1:30,000, obteniendo un primer acercamiento de los tipos de cobertura y su relación con los coeficientes de escurrimiento (Fig. 3). La resolución espectral de esta imagen permite identificar diferentes grados de humedad en el suelo y variaciones en la estructura y vigor de la vegetación, redundando en la precisión de las fronteras entre tipos de cobertura. Posteriormente estas clases se redujeron a cinco según la dominancia relativa de los tipos de cobertura y pendientes medias en el área de estudio.

Los coeficientes de escurrimiento que se presentan en cuencas interceptadas intervenidas por ambientes urbanos y suburbanos son diversos y resultado de la aplicación de modelos hidrológicos experimentales (Bedient, 1992, Maidment, 1993, McCuen, 1998) que han servido primordialmente en el diseño de drenes urbanos. La detección de los tipos de co-

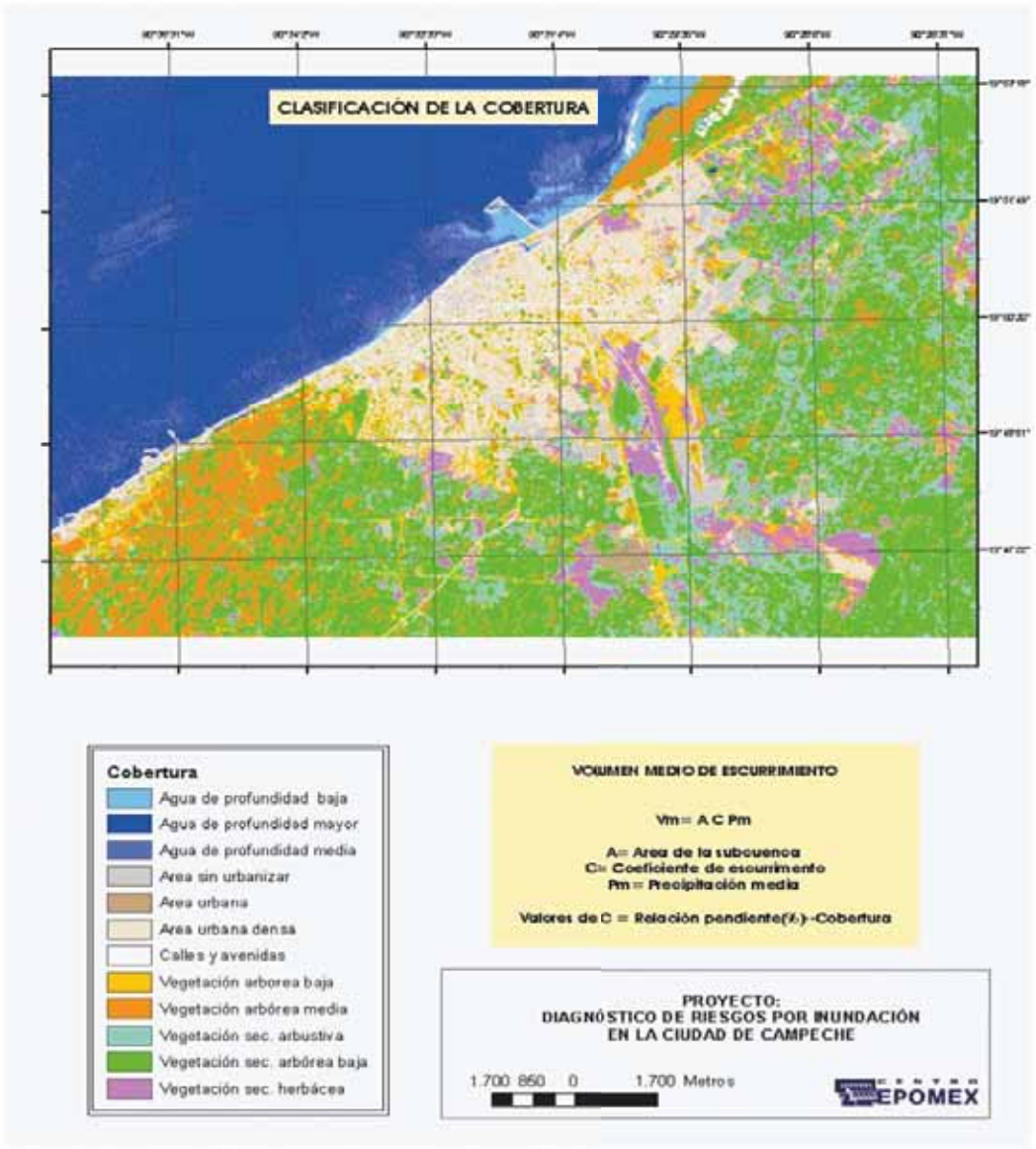


Figura 3. Tipos de cobertura del terreno.

bertura subregional y la asignación de coeficientes de escurrimiento (Tabla 3) permite diferenciar en forma ponderada los escurrimientos potenciales en función de la rugosidad de la cobertura, los promedios de infiltración y la predisposición hidrodinámica del terreno. Igualmente se consideran variaciones asociadas a la textura del suelo que regulan los tiempos de infiltración sobre todo durante la ocurrencia de lluvias de larga duración o lluvias de intensidad baja durante varios días. Los rangos de los coeficientes de escurrimiento varían entre 0.1 y 1.0 y la inundabilidad del terreno depende del potencial de escurrimiento asociado.

Los rangos de pendientes se calcularon a partir del modelo digital del terreno escala 1:50,000 del INEGI utilizando la herramienta slope del SIG (Sistema de Información Geográfica) Arcview y según los 15 umbrales más representativos reclasificados (Fig. 4) según sus límites naturales (Jenks) con una media del 16% y una desviación estándar de 21.6% (Tabla 4).

Tabla 3. Coeficientes de escurrimiento para cuencas interceptadas

Unidades del terreno	Textura del suelo		
Cobertura	Gruesa	Media	Fina
Vegetación arbórea			
Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% pendiente)	0.25	0.35	0.50
Escarpado (11-30 % pendiente)	0.30	0.50	0.60
Vegetación herbácea			
Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% pendiente)	0.16	0.36	0.55
Escarpado (11-30 % pendiente)	0.22	0.42	0.60
Terrenos cultivados			
Plano (0-5% pendiente)	0.30	0.50	0.60
Ondulado (6-10% pendiente)	0.40	0.60	0.70
Escarpado (11-30 % pendiente)	0.52	0.72	0.82
Parques y jardines, con pasto y arborizados:			
0-20%	0.20		
20-45%	0.25		
45-100%	0.27		
Mayor de 100%	0.30		
Zonas sin urbanizar, escasa vegetación:			
0-20%	0.25		
20-45%	0.30		
45-100%	0.35		
Mayor de 100%	0.37		
Zonas urbanas			
0-20%	0.35		
20-45%	0.40		
45-100%	0.50		
Mayor de 100%	0.60		

Tabla 4.- Rangos de pendientes de uso frecuente en cuencas interceptadas.

	Rango en %
Pendientes	0-5
	5-10
	10-20
	20-30

Delimitación de Subcuencas y Cálculo de los Volúmenes de Escurrimiento según sus Coeficientes de Escurrimiento

A nivel subregional la delimitación de subcuencas se realiza mediante la diferenciación de las divisorias de aguas o red de cimas y los niveles de base locales o planicies bajas acumulativas. Estos dos conjuntos de elementos son el primer acercamiento a la diferenciación ente unidades del terreno susceptibles de ser inundadas de las no inundables. Para ubicar con precisión estas fronteras se utilizan las funciones hillshade (Fig. 5) y countour del SIG Arcview y el formato vectorial 1:50,000 de INEGI con curvas cada 10 m. Sobre los modelos derivados se traza digitalmente la línea de parteaguas y la ruptura de pendiente que delimita el pie de monte de las planicies bajas acumulativas. Se sigue la secuencia incompleta de las

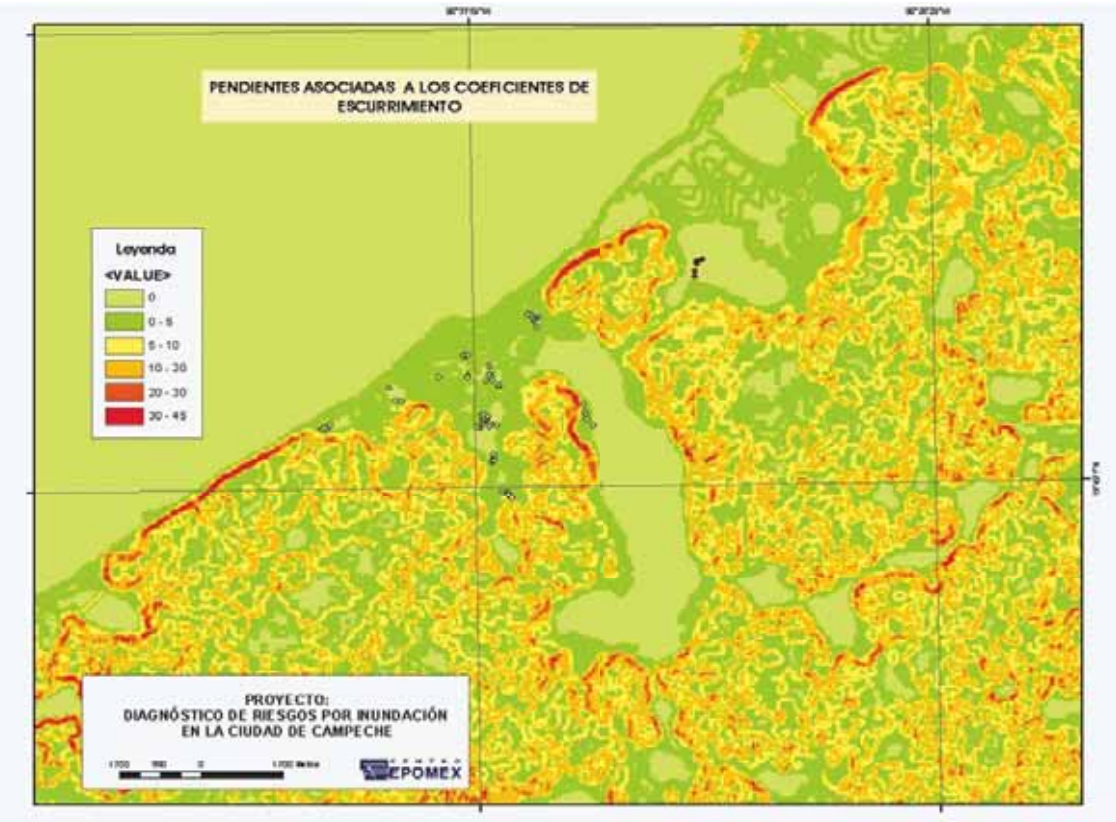


Figura 4. Rangos de pendientes.

cimas más altas de mayor cercanía a los niveles de base locales (Fig. 5). El trazo incompleto de cimas se debe a la naturaleza de evolución geológica de la subregión y a los ambientes de transición cárstica de lomeríos aislados a planicies bajas palustres extendidas.

Una vez trazados los parteguas y los niveles de base locales se delimitaron tres subcuencas que con fines de identificación, se les ha denominado Este, Central y Oeste que interceptan el área urbana y suburbana de Campeche (Fig.5). Sobre el grid (formato raster) resultado de la clasificación de la cobertura del terreno y sus coeficientes de escurrimiento, se aplicó un clip de extracción de las áreas según los límites de cada subcuenca. Al mismo tiempo se calculan las coberturas relativas de cada coeficiente de escurrimiento en m^2 y hectáreas para después ponderarlas e incorporarlas a la siguiente fórmula para el cálculo del escurrimiento medio:

$$Vm = A\ C\ Pm$$

Donde:

Vm----Volumen medio que puede escurrir (miles de m3)
A------Area de la cuenca (km^2)

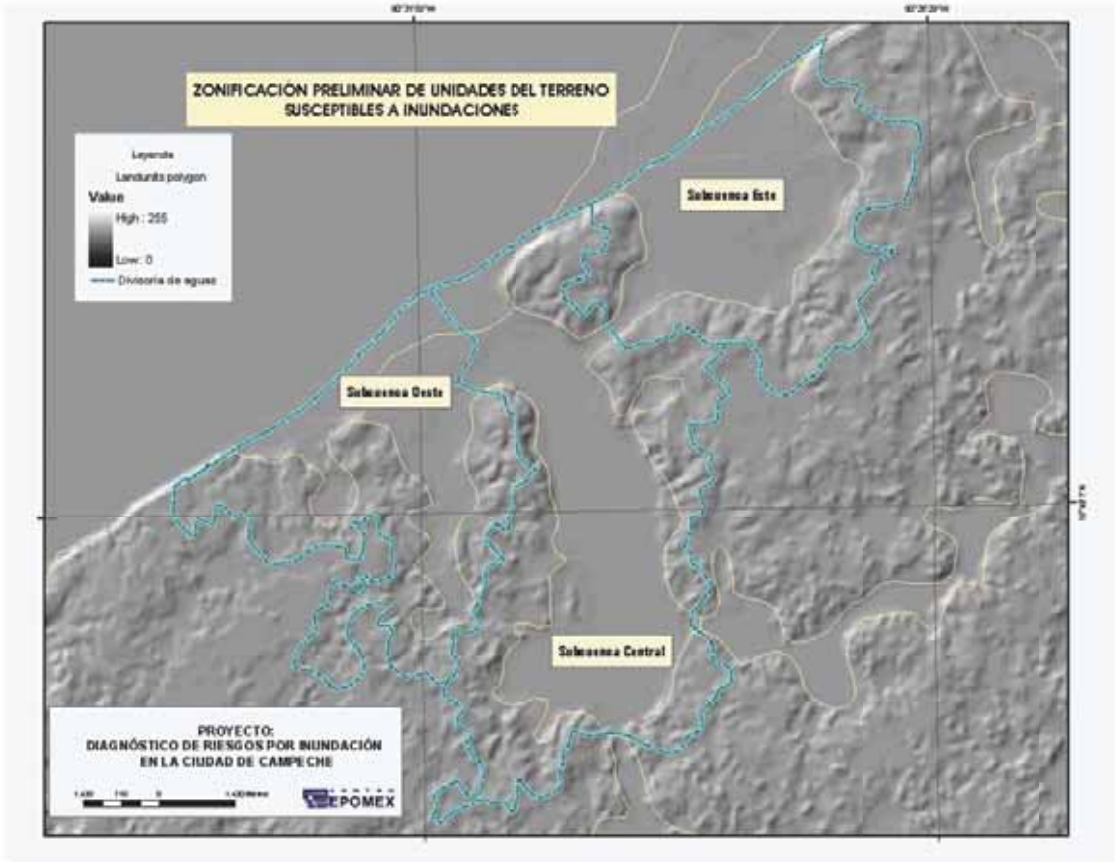


Figura 5. Unidades del terreno y susceptibilidad a la inundación.

C------Coeficiente de escurrimiento

Pm----Precipitación media (mm)

En la tabla 5 se muestra el cálculo ponderado por subcuenca según el tipo de cobertura y los coeficientes de escurrimiento. Cada tipo tiene un número proporcional de píxeles asociados con un equivalente areal en metros cuadrados que es transformado a hectáreas. El K ponderado refleja las composiciones relativas de tipos de cobertura y su impacto directo en los potenciales de escurrimiento. De manera que las composiciones proporcionales de cada uso del suelo presionaran directamente el incremento o decremento de los escurrimientos y su expresión de peligrosidad.

Como se observa en la misma tabla, en la subcuenca Central que corresponde a las planicies de bajos extendidos de Chiná, el Aeropuerto y la Ría, se presenta casi el doble del escurrimiento potencial medio calculado en 12815.8 miles de m^3. Eso se debe en primera instancia al tamaño de la cuenca (38.05 km^2) que representa más de la mitad más de las otras subcuencas y a la proporcionalmente mas alta presencia de coeficientes de escurrimiento de valores 0.9 y 1. A su vez se encuentra como condicionante adicional, la pre-

Tabla 5. Cálculo ponderado del volumen medio de escurrimiento por subcuenca y tipo de cobertura.

Cobertura		K	No. de píxeles (0.36 m² por pixel)	Area m²	Area Ha	Ha/ comp	K*Ha comp	K ponderado (C)	Precipitación media 1921-2004 (Pm)	Area en km² (A)	Volumen medio de escurrimiento en miles de m³
Subcuenca 3 Este											
1	Arborizados	0.2	34220063	12319222	1232.0	1947.9	389.58	0.24	1086.50	23.56	6143.5
2	Inundables	0.1	2061570	742165	74.2	74.2	7.42				
3	Calles	0.9	3543860	1275790	127.6	127.6	115				
4	Áreas/s urbanizar	0.3	4054487	1459615	146.0	146.0	44				
5	Residencial	1.0	1684875	606555	60.7	60.7	60.7				
Total			45564855	16403347	1640.5	2356.4	572.7				
Subcuenca 2 Central											
1	Arborizados	0.2	46745060	16828222	1682.8	2816.42	563.28	0.31	1086.50	38.05	12815.8
2	Inundables	0.1	2696127	970606	97.1	97.1	9.71				
3	Calles	0.9	9585980	3450953	345.1	345.1	311				
4	Áreas/s urbanizar	0.3	9229402	3322585	332.3	332.3	99.7				
5	Residencial	1.0	5960504	2145781	214.6	214.6	214.6				
Total			74217073	26718146	2671.9	3805.52	1198.29				
Subcuenca 1 Oeste											
1	Arborizados	0.2	30262168	10894380	1089.4	1419.04	283.8	0.28	1086.50	23.86	7258.7
2	Inundables	0.1	335595	120801	12.0	12.0	1.2				
3	Calles	0.9	11971254	4309651	431.0	431.0	388				
4	Áreas/s urbanizar	0.3	9661659	3478197	347.8	347.8	104.3				
5	Residencial	1.0	4894324	1761957	176.2	176.2	176.2				
Total			57125000	20564987	2056.4	2386.04	670.9				

sencia de suelos hidromórficos y semihidromórficos tipo gleysol compuestos por arcillas expandibles que inhiben los tiempos de infiltración tanto en la subcuenca Central como en la subcuenca Oeste. La pedogénesis en los gleysoles se debe a la reducción del hierro en condiciones anaeróbicas (gleyzación) de saturación permanente o semipermanente de agua. Pueden presentar profundidades de hasta 1.25 m con más del 70% de arcillas en su composición textural. Localmente se les asocia a los akalchés o zonas naturalmente inundables que han sido colonizadas por el hombre en condiciones inapropiadas de drenaje y salubridad. Contrariamente a lo que ocurre en estas dos subcuencas, en la subcuenca Este existen Leptosoles réndzicos poco profundos de no mas de 20 cm, con 40% de arenas, 30% de limos y

30% de arcillas, composición textural que facilita los tiempos de infiltración hasta en un 70%, reduciendo considerablemente la susceptibilidad a las inundaciones. Según lo anterior se puede inferir que comparativamente hablando la subcuenca Central debe manejarse con mayor cuidado en términos de proyectos urbanísticos, sobre todo de alta densidad.

El sistema de subcuencas delimitadas según las divisorias de aguas generales e inferidas y los niveles de base locales se pueden observar en el mapa anexo denominado: *Sistema de Subcuencas Interceptadas por el Área Urbana y Suburbana de Campeche*.

Análisis Probabilístico de los Factores Meteorológicos Promedio y Extremos Subregionales (precipitaciones diarias y máximas en una hora)

En general las lluvias de alta intensidad se presentan frecuentemente en períodos de tiempo cortos; consecuentemente, desarrollan una mayor capacidad para inundar los suelos. La combinación entre alta intensidad y larga duración ocurre con poca frecuencia, pero cuando sucede, resulta una tormenta de gran magnitud con alto riesgo de inundación.

El objetivo de este apartado es determinar las zonas que pueden ser afectadas por lluvias o escurrimientos extraordinarios. Con la información disponible es posible llevar a cabo un análisis de la precipitación para la Ciudad de Campeche. La información disponible es la siguiente:

- Registros de lluvia a cada hora, 24 horas y mensuales para la estación "Observatorio Meteorológico de Campeche"
- Registros de precipitación para 24 horas y mensuales en las estaciones "Chiná" y "Pocyaxum".

En las tres estaciones se realiza el análisis de precipitación más importante, es decir para la duración de 24 horas. También se presenta el estudio para lluvias horaria y mensual en la estación del Observatorio.

A la información existente se le ajustaron las funciones siguientes: Normal, Lognormal, Gumbel, Exponencial, Gamma, Doble Gumbel; de tal forma que fue posible ver cual era la que mejor se ajustaba y poder obtener los valores de precipitación para diferentes periodos de retorno. El análisis se llevó a cabo para las tres estaciones y con diferentes duraciones. A continuación se muestran en las tablas 6 a 12, los ajustes para dichas estaciones.

Como se puede observar, en la mayoría de los casos, la función que mejor se ajusta es la Doble Gumbel; ello indica que en dicha zona se presentan dos tipos de precipitaciones las normales y las extraordinarias que son las que pueden llegar a ocasionar inundaciones.

Tabla 6. Lluvia horaria. Estación Observatorio Meteorológico de Campeche.				
Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	6.519	……..	6.519	……
Lognormal	4.911	4.714	5.033	4.963
Gumbel	4.732	……..	4.742	……..
Exponencial	4.498	.....	24.904	……..
Gamma	5.381	4.668	5.634	11111.000
Doble Gumbel	4.047			
Mínimo error estándar: 4.047 Calculado por la función Doble Gumbel				

Tabla 7. Lluvia diaria. Estación Observatorio Meteorológico de Campeche.

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	14.269	……..	14.269	……
Lognormal	8.131	7.050	9.930	10.723
Gumbel	8.609	……..	10.814	……..
Exponencial	6.561	.....	40.826	…….
Gamma	9.982	7.204	16.648	8.371
Doble Gumbel	5.932			
Mínimo error estándar: 5.932 Calculado por la función Doble Gumbel				

Tabla 8. Lluvia mensual. Estación Observatorio Meteorológico de Campeche.

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	29.825	……..	29.825	……
Lognormal	17.136	15.937	19.541	50.817
Gumbel	15.954	……..	18.687	……..
Exponencial	16.749	.....	168.707	……..
Gamma	20.640	15.362	22.881	17.563
Doble Gumbel	14.985			
Mínimo error estándar: 14.985 Calculado por la función Doble Gumbel				

Tabla 9. Lluvia diaria. Estación Chiná.

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	47.480	…….	47.480	……
Lognormal	35.409	34.830	44.559	30.252
Gumbel	38.895	……..	47.148	……..
Exponencial	33.072	……..	37.461	……..
Gamma	38.093	33.805	43.820	11111.000
Doble Gumbel	21.310			

Mínimo error estándar: 21.310
Calculado por la función Doble Gumbel

Tabla 10. Lluvia mensual. Estación Chiná.

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	104.782	…….	104.782	……
Lognormal	87.384	79.026	98.733	104.548
Gumbel	88.255	……..	101.908	……..
Exponencial	77.845	……..	156.926	……..
Gamma	93.838	80.805	98.726	11111.000
Doble Gumbel	57.003			

Mínimo error estándar: 57.003
Calculado por la función Doble Gumbel

Tabla 11. Lluvia diaria. Esatación Pocyaxum.

Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	32.471	……..	32.471	……
Lognormal	23.232	22.599	29.604	9.517
Gumbel	25.115	……..	32.198	……..
Exponencial	20.401	……..	31.946	……..
Gamma	25.343	21.492	29.461	11111.000
Doble Gumbel	13.381			

Mínimo error estándar: 8.517
Calculado por la función Lognormal (Máx. Ver.) 3 parámetros

Tabla 12. Lluvia mensual. Estación Pocyaxum				
Función	Momentos		Máxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	68.001	……..	68.001	……
Lognormal	60.176	52.076	64.832	123.407
Gumbel	56.397	……..	64.137	……..
Exponencial	50.062	……..	203.102	……..
Gamma	63.534	52.728	65.202	60.048
Doble Gumbel	37.587			
Mínimo error estándar: 4.047 Calculado por la función Doble Gumbel				

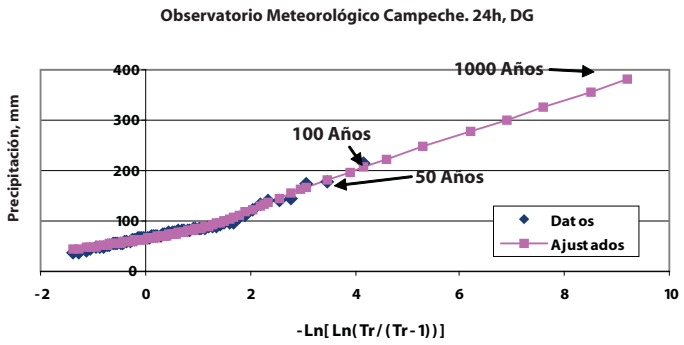


Figura 6. Estación Observatorio Meteorológico de Campeche, lluvia diaria.

Los resultados de la estación Observatorio para la duración de 24 horas se muestran en la figura 6 y tabla 13.

En la figura 6 se puede observar que ya se presentaron valores mayores a 150 mm de lluvia en un día, lo que puede originar inundaciones considerables en los lugares más bajos. También se ve que se tienen valores muy cercanos o iguales a periodos de retorno de 100 años, como se observa en la tabla siguiente, donde se presentan los valores extrapolados para los diferentes periodos de retorno.

Tabla 13. Periodos de retorno. Estación Observatorio Meteorológico de Campeche, lluvia diaria

Tr (años)	mm
2	71.29
5	99.58
10	132.48
20	162.71
50	197.5
100	222.25
200	246.44
500	278.02
1000	301.73
2000	325.26
5000	356.14
10000	379.67

El análisis también se llevó a cabo para duraciones 1 hora de duración y para registros mensuales, los resultados se presentan en la figura 7 y tabla 14.

Se presentan valores de más de 80mm en una hora, muy cercanos al periodo de retorno de 50 años, por lo que aún es de riesgo para la población.

Para la duración de un mes se obtuvo los valores de la figura 8 y tabla 15.

Como se puede ver en la figura 8 el valor extrapolado para un periodo de retorno de 50 años es muy probable que se pueda presentar.

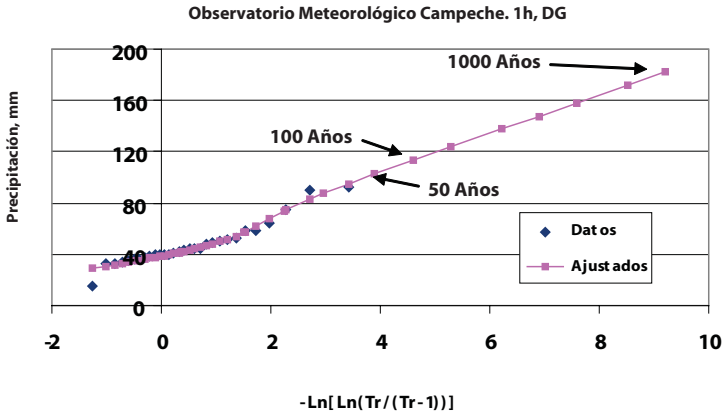


Figura 7. Estación Observatorio Meteorológico de Campeche, lluvia horaria.

Tabla 14. Periodos de retorno, Estación Observatorio Meteorológico de Campeche, lluvia horaria..

Tr (años)	mm
2	41.94
5	57.02
10	73.83
20	87.22
50	102.41
100	113.21
200	123.76
500	137.54
1000	147.91
2000	158.28
5000	171.78
10000	182.07

Tabla 15. Periodos de retorno, Estación Observatorio Meteorológico de Campeche, lluvia mensual.

Tr (años)	mm
2	259.32
5	355.93
10	436.38
20	494.59
50	561.27
100	608.98
200	655.74
500	716.84
1000	762.97
2000	809.11
5000	869.66
10000	918.68

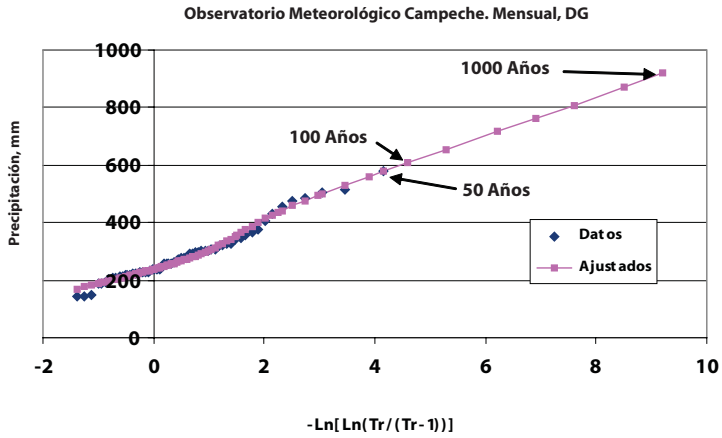


Figura 8. Estación Observatorio Meteorológico de Campeche, lluvia mensual.

Para la Estación Chiná los resultados se presentan en la figura 9 y tabla 16.

Como se puede observar en la figura 9, los valores extrapolados para los diferentes periodos de retorno son bastante elevados, y posibles de presentarse ya que el valor más grande reportado está cerca de un periodo de retorno de 20 años. Por lo cual, la estación de Chiná es de importancia en el estudio de las precipitaciones.

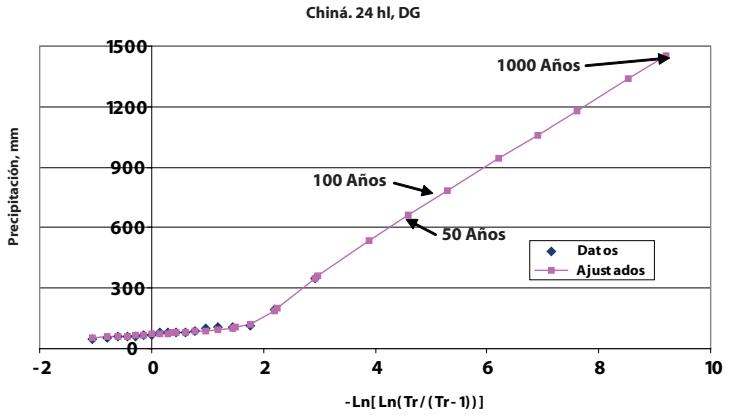


Figura 9. Estación Chiná, lluvia diaria.

Tabla 16. Periodos de retorno, Estación Chiná, lluvia diaria.

Tr (años)	mm
2	77.47
5	105.49
10	204.23
20	361.08
50	535.87
100	660.13
200	781.86
500	940.86
1000	1060.06
2000	1179.71
5000	1339.87
10000	1450.32

En la figura 10 y en la tabla 17 se presentan los resultados obtenidos para la estación Pocyaxum.

En la figura 10, se observan para esta estación valores muy altos en la extrapolación a los periodos de retorno, como se puede ver en la tabla 17.

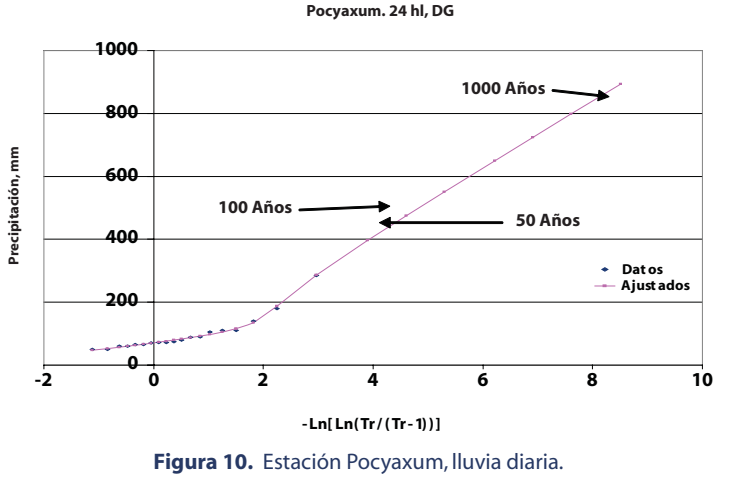


Figura 10. Estación Pocyaxum, lluvia diaria.

Tabla 17. Periodos de retorno, Estación Pocyaxum, lluvia diaria.

Tr (años)	mm
2	79.3
5	115.86
10	1896.96
20	286.76
50	396.95
100	474.61
200	550.33
500	649.25
1000	723.4
2000	797.84
5000	894.04
10000	971.91

Se aprecia que los valores diarios máximos que se registraron en la Estación Observatorio de Campeche en los años 1995 y 2002 son los más grandes, y están muy cerca de las precipitaciones de periodos de retorno de 50 y 100 años, respectivamente. En particular en el año 2002, durante el paso del Huracán Isidoro, la precipitación máxima diaria en septiembre alcanzó 215.3 mm, lo cual corresponde a un perío-

do de retorno aproximado de 84 años. En las estaciones de Chiná y Pocyaxum fue posible observar que los valores extrapolados para los diferentes periodos de retorno son muy grandes, sin embargo dichas estaciones se encuentran fuera del área de influencia de la Ciudad de Campeche, es por ello que no son de consideración para el estudio. Por tanto, se puede concluir, a partir de los datos disponibles, que de la información de la estación Campeche para periodos de retorno de 100 años la ciudad en partes bajas existe la posibilidad de una inundación por las precipitaciones que se pueden llegar a presentar.

Frecuencia de la Lluvia

La frecuencia de la lluvia es la periodicidad media estadística en años con que pueden presentarse las tormentas de características similares en intensidad y duración. Los períodos comúnmente utilizados son de 2, 5, 10, 15, 50 y 100 años. Por ejemplo cuando se habla de una frecuencia o período de retorno de cinco años, se espera que la magnitud de precipitación sea igualada o superada una vez cada cinco años.

Con la revisión documental disponible, se realizó una correlación entre inundaciones documentadas y los registros de precipitación pluvial (CNA Campeche, 2004a), mostrando que la ciudad de Campeche presenta condiciones de inundación significativa a partir de una precipitación de 41 mm/hora.

Para el diseño de obras, que requieren fuertes inversiones y que pongan en peligro vidas humanas o infraestructura estratégica, el período de retorno a utilizar deberá ser de 25 a 50 años. Para el cálculo de la frecuencia o períodos de retorno de lluvia con intensidades 41 mm/hora, se utilizo la siguiente formula:

$$F = t / m \quad \ldots\ldots (1)$$

Donde:

F – Frecuencia o período de retorno
t – Número total de años de registro
m – Número de orden de la lluvia

La forma de calcular la frecuencia o período de retorno de valores de intensidad de la lluvia, se presentan a continuación:

Se obtuvieron 33 observaciones de intensidad máxima de la lluvia para una duración de 60 minutos en la estación "Observatorio Meteorológico de Campeche", Campeche y se calcularon los valores de intensidad para períodos de retorno de 1, 2, 3, 5, 10 y 15 años.

Procedimiento:

a) Se tabularon los valores anuales de intensidad máxima de la lluvia, desde 1970 hasta 2002.

b) Se ordenan los valores de intensidad máxima en forma decreciente.

c) Se aplicó la fórmula (1) y se calcularon los períodos de retorno.

Desarrollo: A continuación se presenta la tabla 18 donde se desarrolla la secuela del cálculo.

Tabla 18. Cálculo del período de retorno para una intensidad máxima de 60 minutos.

Año	Intensidad máxima (60 min)mm/hora	Número de orden	Intensidad máxima ordenada (mm/hora)	Período de retorno
2002	44	1	93	33.00
2001	40	2	90	16.50
2000	48	3	75	11.00
1999	93	4	65	8.25
1998	32	5	59	6.60
1997	37	6	58	5.50
1996	51	7	53	4.71
1995	90	8	51	4.13
1994	45	9	50	3.67
1993	59	10	49	3.30
1992	44	11	48	3.00
1991	41	12	48	2.75
1990	42	13	45	2.54
1989	19	14	45	2.36
1988	65	15	44	2.20
1987	36	16	44	2.06
1986	14	17	42	1.94
1985	40	18	41	1.83
1984	39	19	40	1.74
1983	33	20	40	1.65
1982	49	21	40	1.57
1981	50	22	39	1.50
1980	45	23	39	1.43
1979	36	24	37	1.38
1978	16	25	26	1.32
1977	53	26	36	1.27
1976	40	27	35	1.22
1975	48	28	34	1.18
1974	35	29	33	1.14
1973	34	30	32	1.10
1972	39	31	19	1.06
1971	58	32	16.	1.03
1970	72	33	14	1.00

Al observar la tabla 19, se encuentran los valores de intensidades para cada uno de los períodos de retorno señalados; mostrando que una intensidad ≥41 mm/hora se presenta aproximadamente cada dos años.

Como el registro de intensidades máximas de lluvias para 60 minutos sólo tiene disponibles datos para 33 años, no se pudo calcular, bajo esta metodología, los valores de intensidad para períodos de retorno mayores (50 y 100 años).

Tabla 19. Intensidad máxima para 60 minutos y período de retorno.

Periodo de retorno en años	Intensidad máxima en mm/hora
1	14
2	42 – 44%
3	48
5	53 – 58*
10	65 – 75*
15	75 – 90*
25	60 – 33*
33	93
50	96.5**
100	107.2**

* El valor se encuentra dentro de este rango, puesto que no se obtuvo directamente de la tabla anterior (Tabla 18).
** Valor calculado en base a la metodología propuesta por Gumbel (Citado por COLPOS Chapingo, 1982)

Para calcular períodos de retorno de 50 y 100 años se utilizo la metodología propuesta por Gumbel (Citado por COLPOS Chapingo, 1982).

Método de Gumbel. Método para calcular curvas de intensidad – duración para frecuencias mayores de 10 años, en su teoría de valores extremos.

a) Buscar las observaciones de intensidad – duración para varios años de la estación más cercana al área de estudio.

b) Calcular la intensidad media de la lluvia para la duración problema (60 min.), en base a la siguiente fórmula.

$$Xmed = \Sigma Xi / n \quad \ldots\ldots (2)$$

Donde:

Xmed – Intensidad media para una duración = 45.1 mm/h
Xi – Intensidad de la lluvia para una duración (Σ Xi es la suma de todas las intensidades de lluvia para una misma duración) = 1,488.0
n – Número de años de registro = 33 registros

c) Determinar la desviación estándar de la lluvia aplicando la siguiente fórmula:

$$Sx = \text{Raíz cuadrada de } (Xi - Xmed)/ n -1 = 17.2 \quad \ldots\ldots (3)$$

d) Con esta información, se aplica la formula siguiente para el período de retorno problema (50 y 100 años):

$$Xtr = Xmed + K * Sx \quad \ldots\ldots (4)$$

Donde:

Xtr - Valor máximo para el período de retorno

Xmed - Intensidad media

K - Factor de frecuencia

Sx – Desviación estándar

El factor de frecuencia para cada período de retorno seleccionado, se obtiene con la siguiente expresión:

$$K = (Ytr - Yn) / Sn \quad (5)$$

Donde:

K – Factor de frecuencia
Ytr – Variable reducida
Yn – Media reducida
Sn – Desviación reducida

Los valores Ytr, Yn y Sn aparecen en tablas del Apéndice I de COLPOS Chapingo (1982)

El procedimiento del cálculo, es para intensidades máximas de lluvia a una duración de 60 minutos.

Secuela:

a) Se agrupan las intensidades máximas anuales de la lluvia a la duración de 60 minutos y se le coloca el número de orden decreciente (m).

b) Se determina la intensidad media de la lluvia y desviación estándar, como se muestra a continuación (Tabla 20).

c) Se calcularon los valores de K utilizando la ecuación (5) para los períodos de retorno de 50 y 100 años (K50 y K100, respectivamente). Los valores de Ytr encontrados para 50 y 100 años fueron 3.9010 y 4.600, respectivamente. El valor Yn y Sn obtenido para una observación de 33 registros fue de 0.5388 y 1.1226, consecutivamente. Los cálculos se presentan a continuación:

$$K50 = (3.9010 - 0.5388) / 1.1226 = 2.9950$$

$$K100 = (4.6001 - 0.5388) / 1.1226 = 3.6178$$

d) Los valores de K se sustituyen respectivamente en la ecuación (4) y se obtienen las intensidades máximas de la lluvia para una duración de 60 minutos y para períodos de 50 y 100 años.

$$Xtr50 = 45.1 + 3.4210 (17.2) = 96.5 \text{ mm/h}$$

$$Xtr100 = 45.1 + 3.6178 (17.2) = 107.2 \text{ mm/h}$$

Tabla 20. Intensidad media de lluvia.

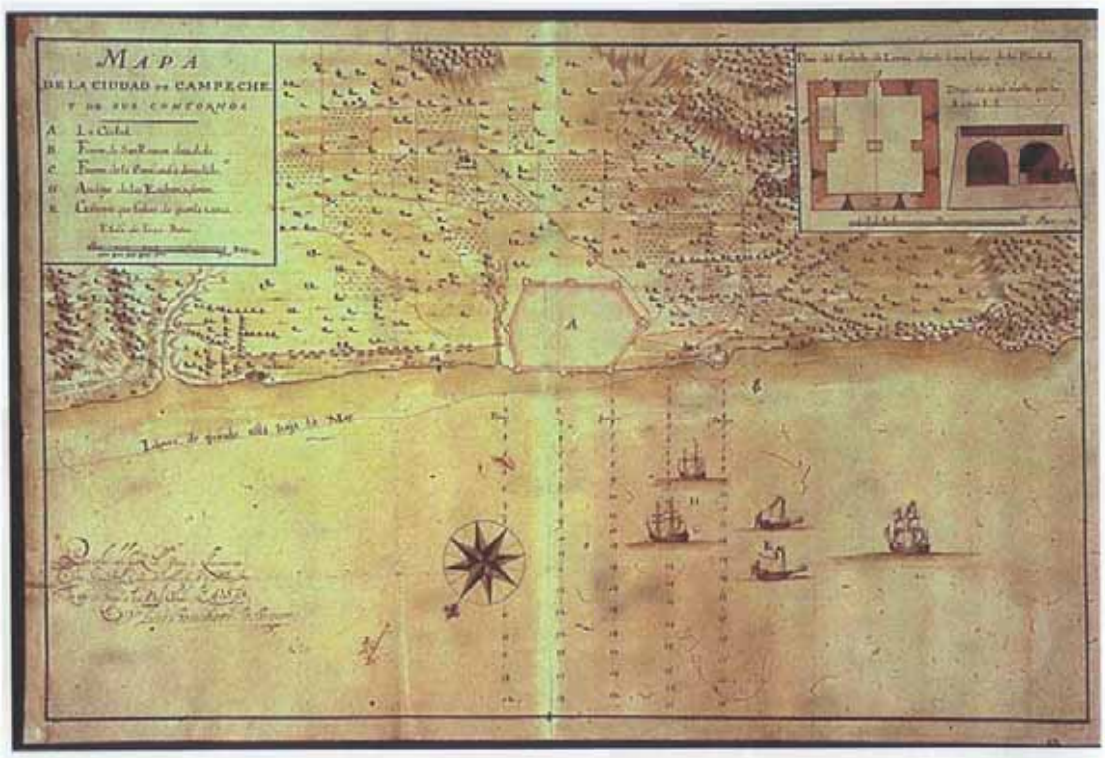
Año	Xi (mm/h)	m	Xi-med	(Xi-Xmed)2
2002	44	15	-1.1	1.2
2001	40	19	-5.1	25.9
2000	48	12	2.6	6.8
1999	93	1	47.5	2,257.2
1998	32	30	-12.8	163.6
1997	37	24	-7.8	60.7
1996	51	8	6.0	36.1
1995	90	2	44.4	1,972.2
1994	45	13	-0.1	0.0
1993	59	5	13.6	185.2
1992	44	16	-1.5	2.2
1991	41	18	-3.7	13.6
1990	42	17	-3.1	9.5
1989	19	31	-25.8	665.1
1988	65	4	19.5	380.6
1987	36	25	-9.3	86.3
1986	14	33	-31.1	966.6
1985	40	20	-5.1	25.9
1984	39	22	-5.8	33.5
1983	33	29	-12.4	153.5
1982	49	10	3.8	14.5
1981	50	9	4.9	24.1
1980	45	14	-0.6	0.3
1979	36	26	-9.3	86.3
1978	16	32	-29.4	863.8
1977	53	7	7.5	56.4
1976	40	21	-5.1	25.9
1975	48	11	3.2	10.3
1974	35	27	-10.2	103.8
1973	34	28	-10.8	116.4
1972	39	23	-6.1	37.1
1971	58	6	12.9	166.7
1970	75	3	29.9	894.6

n = 33
Xi = 1,488.0
Xmed = = 45.1 mm/h
Sx = 17.2

Estudio Local de la Susceptibilidad del Terreno y la Amenaza de Inundaciones

Fuentes Documentales sobre Inundaciones en la Ciudad de Campeche

El Catálogo de Fuentes Documentales sobre inundaciones en la ciudad de Campeche muestra 37 tipos de documentos que incluyen imágenes de mapas, puentes, canales, drenajes y calles que permiten ubicar zonas bajas, inundables e intransitables por inundaciones desde 1769 a la fecha. Los documentos históricos permiten ubicar sitios, colonias, barrios y recu-



Plano de la Fortificación de San Francisco de Campeche elaborado en 1705.

rrencias en zonas afectadas por inundaciones y las modificaciones ambientales antrópicas que incrementan o inhiben la susceptibilidad a las inundaciones.

La información se ha organizado según las siguientes características:

- Fecha del evento
- Fuente documental
- Número de ficha
- Contenido o resumen del contenido.
- Ubicación del documento del que se hace referencia.

Abreviaturas o siglas usadas en las fichas

AGEC.- Archivo General del Estado de Campeche.
APEC.- Archivo Público del Estado de Campeche.
Bib. CIHSIC.- Biblioteca del Centro de Investigaciones Históricas y Sociales del Instituto Campechano.
Bib. H.P.M.- Biblioteca de Héctor Pérez Martínez.
C.- Caja.

Cap.- Capítulo.
Cat. BMA.- Catálogo de la Biblioteca de Gustavo Martínez Alomía.
E, Exp.- Expediente.
Filet.
fs.- fojas.
Leg.- Legajo.
mm.- Milímetros.
s/a.- Sin año.
s/f.- Sin Fecha.
SMN.- Servicio Meteorológico Nacional.
SN.- Sin nombre.
T.- Tomo.
v.- Volumen.



Construcción del primer Malecón

1769

Ficha 678: 1769/2/17. Mérida Yucatán. / AGN, R. CDA, v 11, Exp. 17, fs. 175-178.
El gobernador de esta provincia solicita la libertad de dinero para la subsistencia por los daños que causó el huracán.
Se infiere la ocurrencia de inundación en Febrero del año 1769.

1807

Tres documentos dan testimonio de la inundación de 1807, en la noche del 7 de septiembre:

Periódico Oficial No. 488. Campeche. Martes 25 de octubre de 1887. AGEC.

Referencia sobre el nivel del agua alcanzado dentro del área amurallada (hasta el Brazo Fuerte (actualmente tienda Omega, calle 10 por 59) por en un temporal de 1807.

"El Museo Yucateco", 1841. T. 1., pp.293-296. Campeche.

Anónimo: Relación del temporal acaecido en Campeche en la noche del 7 de septiembre de 1807.

Manuel A. Lanz. Gran Tormenta en Campeche – 1807. En: Ah-Kim-Pech.
1º de diciembre de 1940. p. 7. AGEC: RV-179.

Crónica sobre la inundación de dicho año, nivel alcanzado por el agua, zonas inundadas, afectaciones y causas adicionales (geológicas) que agravaron la inundación.

"Era el Capitán General de la provincia de Yucatán el Mariscal don Benito Pérez Valdelomar, cuando la gran tormenta..."

La Puerta del Muelle, que fue cerrada para evitar la entrada al mar, cedió al empuje de éste, que alcanzó gran altura de la muralla y hasta dos brazas en las calles inmediatas,...



Mercado antiguo y aduana ubicados en la línea de costa primaria

Un bergantín, que rompió sus amarras,... y se detuvo frente a la puerta principal del templo de Guadalupe, tocando con su bauprés el balcón del coro. Derribada La puerta que mira al mar, se inundo el templo...

Varios buques, entre ellos, la fragata, La Tambora, fueron impelidos hasta tierra adentro encallando en los manglares..."

1869

Tres documentos dan testimonio de la inundación de 1869, en la noche del 26 de octubre, Álvarez Suárez (1913), AZNAR (1968) y Pérez Galaz (1979)

Álvarez Suárez. Francisco, 1913. Inundación en Campeche el 26 de octubre de 1869. En: Anales Históricos de Campeche, p. 99-101. Mérida, Yucatán, México. Imp. del Colegio S. José de Artes y Oficios, Tomo II. Bib. Pub. Central Francisco Sosa Escalante.

Descripción de áreas inundadas, altura del agua. Hora y día en que comenzó la< precipitación, número de cadáveres que pudo contabilizar el autor, contabilización de algunos daños, respuesta del H. Ayuntamiento y nombramiento de los comisionados para prestar apoyo.

AZNAR Z. A.J., Inundación en la Ciudad de Campeche en 1869. En: Despertar. Febrero 1968. Tomo V, Nº 50 p.148. AGEC C5/E291

Inundación ocurrida en la noche del 26 de octubre de 1869, atribuida a gran aguacero después de medio día

"...todas las partes bajas de la ciudad estaban bajo el agua, y que en la casona don de vivía, la número 42 de la calle América (hoy 36 de la 59), el nivel del agua alcanzaba

casi el piso del zaguán. ...desde un balcón de esa casa se escuchaba a lo lejos el clamor y la gritería de la gente que andaba en embarcaciones llevadas desde el muelle, prestando auxilio a los damnificados que habían quedado atrapados en los techos de las casas; ello ocurría por el lado de Santa Ana, o más bien por el rumbo de La Alameda y del Puente de los Perros, que es la parte más baja de los alrededores".

Pérez Galaz, Juan de Dios, 1979. "Inundación de Campeche en 1869, p 148-149. En: Diccionario Geográfico, Histórico y Biográfico de Campeche. 2ª Ed., Campeche, Gobierno del Estado de Campeche.



Imagen costera de Campeche antes de los rellenos

La noche del 26 de octubre de 1869 la ciudad de Campeche sufrió una inundación de tal magnitud que ha quedado a través de los tiempos como uno de los sucesos notables en la historia regional.

Cerca de las dos de la tarde de aquel día comenzó un torrencial aguacero que duro cuatro horas. A las seis, la lluvia cesó de caer, componiéndose la noche,... Pero poco después de las nueve, procedente de los bosques próximos, comenzó a descender un verdadero torrente, a tal extremo, que en hora y media, el nivel había cubierto las calles alcanzando en algunos lugares hasta tres metros de altura sobre el suelo.

Rápidamente, se dispusieron varias embarcaciones que anclaban en la costa para el salvamento de las familias que se habían refugiado en los lugares altos. Multitud de botes recogía a los desamparados para ponerlos en lugar seguro.

El origen de la inundación no se supo de manera cierta,... que fue motivada por una "manguera" o tromba que descargo en la serranía, lo que parece probable no tan sólo por los estragos que causó en la misma serranía, cuanto por que es la única explicación posible.

... para proporcionar hospedaje a las familias desvalidas de los barrios de Santa Ana y San Román... Santa Lucía, Ermita, San Francisco y Guadalupe.

... folleto, donde consta la relación de las familias afectadas, con los daños sufridos por cada una de ellas, siendo en total trescientas trece, en la ciudad..."

1887

Tres documentos dan testimonio de la inundación de 1887, a partir de la noche del 13 de octubre. AZNAR Z. A.J. (1968), Pérez Galaz (1979) y Periódico Oficial de Campeche (25 de octubre de 1887).

AZNAR Z. A.J., Inundaciones en la Ciudad de Campeche. En: Despertar. Febrero 1968. Tomo V Nº 50. AGEC C5/E291.

> Inundación mayor ocurrida el 13 de Octubre y días siguientes del año 1887, "consistiendo en grande aguaceros traídos por vientos del noroeste y del este. Aquí se consigna la acción simultánea de una gran creciente del mar que por sí misma produjo la inundación de las zonas próximas a él, inclusive con grandes olas que derribaron puertas y ocasionaron otros desperfectos en las casas próximas a la orilla. ..., y entre los resultados se consigno que hubo destrucción de parte de la vía hacia el pueblo de Lerma, lo cual indica que la marejada que desbordó el litoral fue considerable".

Pérez Galaz, Juan de Dios, 1979. Diccionario Geográfico, Histórico y Biográfico de Campeche. 2ª Ed., Campeche, Gobierno del Estado de Campeche. p. 149-150.

> "Inundación de Campeche en 1887.
>
> La inundación iniciada el martes 13 de octubre de 1887 en la ciudad de Campeche.
>
> De los datos consignados en el periódico oficial, de 25 del mismo mes de octubre, se deduce que el martes 13 comenzó a perfilarse la catástrofe. Aquel día, cinco fuertes aguaceros descargaron sobre la ciudad, con su correspondiente acompañamiento de rayos y truenos.
>
> ...estalló, finalmente, a las nueve de la noche del mismo día 14. Desde ese momento, gran cantidad de lluvia comenzó a caer, acompañada de un viento ciclónico, amainando hasta el domingo 16, bien entrado el día. Su período crítico lo alcanzó la noche del sábado 15.
>
> Las aguas del mar, debido a la creciente producida por el temporal, inundaron la ciudad hasta la calle de la muralla próxima ala plaza e internándose tierra adentro, hasta cincuenta metros"
>
> Barios inundados: Santa Ana, San Francisco, Guadalupe, San Román. En estos dos últimos, menciona el autor que las aguas de la inundación y del mar se confundían."
>
> El autor igual documenta inundación en 1889.

Periódico Oficial de Campeche. Martes 25 de octubre de 1887. pp. 149-150.

> Días que llovieron y apreciaciones sobre cantidad de aguaceros, variaciones de la dirección de los vientos y reporte de creciente en el nivel del mar, que sumados, cau-

saron inundación. Alcance de la inundación (alcanzo la calle de la "Muralla", siendo transitable en "cayucos" y en botes hasta la "Plaza Mayor" y a la tienda "El Brazo Fuerte" como ocurrió en el temporal de 1807) y pérdida de vidas, aunque no se detalla el numero de ellas, algunos daños en el campo, propiedades, embarcaciones y el tranvía.

"Iniciada el martes 13 de octubre de 1887... de gran magnitud, cosa nunca ocurrida antes. De los datos consignados en el periódico Oficial, 25 del mismo mes de octubre, se deduce que desde el martes 13 de octubre comenzó a perfilarse la catástrofe. Aquel día, cinco fuertes aguaceros descargaron sobre la ciudad. El día 14 a las nueve de la noche estallo el temporal...

... Desde ese momento, gran cantidad de lluvia empezó a caer acompañado de un viento ciclónico, amainando hasta el domingo 16, bien entrado el día. Su periodo crítico lo alcanzó la noche del sábado 15.

Las aguas del mar, debido a la inmensa creciente producida por el temporal, inundaron la ciudad hasta la calle de la muralla próxima a la plaza, hasta cerca de 50 metros...

Se inundaron los barrios de Santa Ana, San Francisco, Guadalupe y San Román. En los dos últimos las aguas de la inundación y del mar se confundían.

Destruyo varios tramos del tranvía que unía la ciudad con el pueblo de Lerma Desgracias en gente humilde de Lerma y sus casas.

El convento de San francisco sufrió, también los desperfectos, pero en donde más estragos causaron fue en las fincas próximas a la capital, en los plantíos principalmente arrozales y maizales originaron incalculables pérdidas.



Mercado antiguo ubicado en la línea de costa

1889

AZNAR (1968) y Pérez Galaz (1979) documentan inundación del día 18 de septiembre de 1889.

AZNAR Z. A.J., Inundaciones en la Ciudad de Campeche. En: Despertar Febrero 1968. Tomo V Nº 50 p3. AGEC C5/E291.

> Inundación ocurrida "Desde las seis de la tarde del día 18 de septiembre de 1889", menciona la intervención de un temporal con fuertes vientos y lluvias.
>
> "... los vecinos de los barrios se vieron obligados a refugiarse en el centro de la población. No ocurrieron desgracias personales, debido a la precaución que se tuvo de limpiar los caños de desagüe al aproximarse la estación de lluvias.
>
> Hasta el día 21 decreció el temporal, causando algunos desperfectos en la plaza principal, la antigua maestranza, el teatro Toro, el mercado público. Varias embarcaciones fondeadas en el puerto sufrieron, también, las consecuencias y,..."

1911

Aznar Z. A.J., Inundaciones en la Ciudad de Campeche. En: Despertar Febrero 1968. Tomo V Nº 50. AGEC C5/E291.

> "... inundación grande también no consignada como dato histórico, que ocurrió allá por 1911. En la calle América (hoy calle 59)el agua revuelta y lodosa llegaba al borde de las banquetas, y en la esquina de la calle Onda - la calle de Moctezuma, - hoy 14- podía llegar a la cintura de una persona adulta.
>
> No había corriente notable por esta parte de la ciudad, pero se decía que en la zona de la Planta Eléctrica, el Puente de los Perros, y la profunda calle que llamaban de la Zanja, el corriental era tan fuerte que se había llevado algunas personas amen de animales, trastos y...; lo mismo se dijo del raudal que se formaba pasando el Puente de la Viga en la calle de Toro y hacia el boquete de la muralla próxima, con salida al descampado de Guadalupe".
>
> (No existía San Martín, se le conocía como el descampado de Guadalupe, aun costado del canal de Guadalupe o San Martín -nota del autor).

1931

Novedades de Yucatán, 1981. Sábado 09 de Mayo, Sección Campeche, p. 2.

> Documenta, en su columna "Hace 50 años", una inundación el 09 de mayo de 1931.

1936

Diario de Yucatán. Mérida, 11 de julio de 1936.

Parte de Campeche, inundada por lluvias torrenciales. Dentro de las casas de varios lugares subió el agua a dos metros de altura.

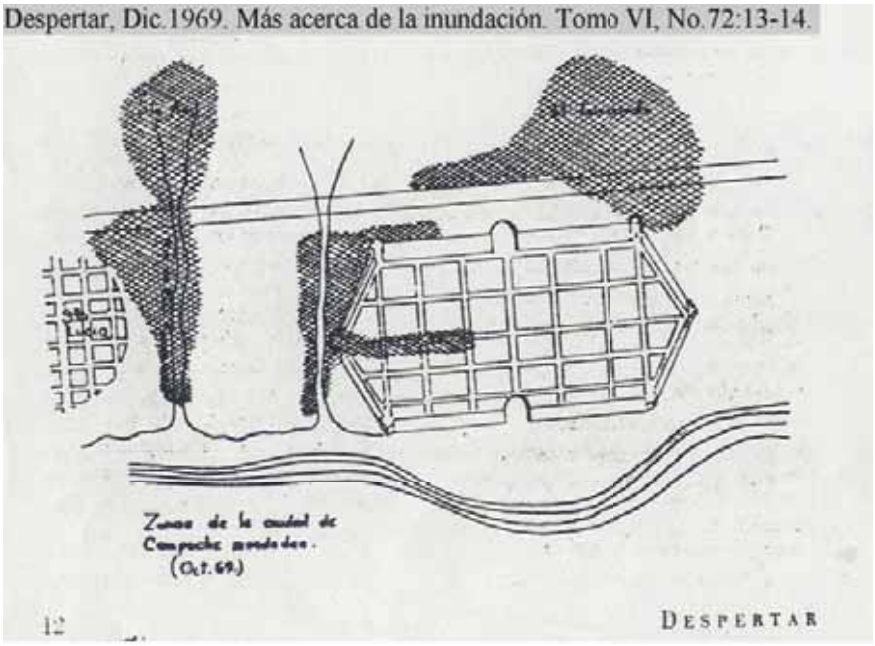


Inundación de la Alameda

1969

Despertar. 1969. Más acerca de la inundación, Tomo VI, diciembre No. 72 (12-13). Campeche, México. AGEC C5/E299.

Señala partes más afectadas por la inundación de septiembre de 1969, incluye croquis de la ciudad de Campeche.



Áreas más afectadas por la inundación en septiembre de 1969.

1975

Novedades de Yucatán, 1975. (Sección Campeche).
Dom. 22 de Abr.



Hotel Baluartes y primera etapa de rellenos circundantes.

Antecedentes de problemas causados por inundación en zonas bajas de La Colonia Aviación a personas de bajos recursos.

Dom. 17 de Ago.

Foto de inundación en calle 16 c/Av. Bulevar y del centro de la población de Samulá con referencia a insalubridad y peligro a la salud.



Construcción de drenes en el centro histórico.

1981

Novedades de Yucatán, 1981. Sección Campeche.
22 de Agosto

Foto: Av. Gobernadores inundada.

1988

Comunicación Campechana. Nº 33:10-13. Septiembre de 1988. AGEC. C9/E452.

"Gilberto" del 13 de septiembre de 1988.

... vientos con velocidad mayor a los 300 kilómetros por hora, torrenciales lluvias y olas de 3 metros de altura que saltaron el malecón para adentrarse hasta 450 metros de la amurallada ciudad.

* En rehabilitación de caminos: 525 km., con un costo estimado en 6 mil millones de pesos.

* SEDUE informo sobre los daños a la vivienda urbana de Ciudad del Carmen y Campeche, de 5 mil a 6 mil casas... Al patrimonio histórico de la ciudad los padecidos en los portales de San Martín y a la iglesia de San Francisco...

Comunicación Campechana. Nº 34:2-7. Septiembre de 1988. AGEC. C9/E453.



Imagen de la Calle 14 (Moctezuma u Onda) en el cruce de la calle 49 C (s/f)

El material de... y los 4 carros - tanque vienen a apoyar las labores de desagüe que se realizan en la unidad habitacional Plan-Chac.

Restablecimiento de servicio, limpieza de calles, desagüe de drenajes, reforestación de áreas afectadas, rehabilitación del sistema de alumbrado público, bacheo y desagüe de calles se estima una inversión de mil 550 millones de pesos.

Salud: daños al Hospital General de Campeche, con pérdidas en equipo e instalaciones por 2 mil 300 millones de pesos; se resintieron daños en 16 centros comunitarios de salud rural por cerca de 450 millones; en las clínicas IMSS e ISSSTE de la capital hubo daños en equipos por 800 millones de pesos.

...resultaron afectados los muelles fiscal y pesquero del puerto de Campeche.

Desarrollo urbano: en materia de vivienda resultaron afectadas 5 mil casas - habitación urbanas... 12 mil millones de pesos para su reconstrucción, en tanto que en el renglón de agua potable se averiaron mil 500 tomas domiciliarias.



Canal de San Martín (s/f)



.- Av. Álvaro Obregón X Gobernadores 30 septiembre 1994

1992

Cornelio Sosa, Roger E. Los veinte días de desastre en Campeche. En "Agenda" Nº 3 Noviembre de 1995. AGEC, C12.

Menciona las inundaciones de Virgilio en octubre de 1992, no presenta mayores datos.

1995

Tribuna, Sección Campeche, Primera Plana, sábado 24 de junio de 1995.

Muestra dos fotografías, Ría y ADO. Se aprecia que las personas, que atraviesan la intersección de la Ría con Av. Gobernadores, presentan el agua a la altura de las rodillas.

La nota explica que tras media hora de lluvia empezaron las llamadas de auxilio a la central de policía desde varios puntos de la ciudad.

Tribuna, Sección Campeche, Primera Plana, sábado 24 de junio de 1995.



Ciudad Concordia 25-Junio-1995

Muestra dos fotografías, Ría y ADO. Se aprecia que las personas, que atraviesan la intersección de la Ría con Av. Gobernadores, presentan el agua a la altura de las rodillas.



La ría de San Francisco 24-Junio-1995

La nota explica que tras media hora de lluvia empezaron las llamadas de auxilio a la central de policía desde varios puntos de la ciudad.

Los sitios afectados según la nota fueron San Martín, calle 49, Solidaridad, desbordamiento de la Ría, Periferia del mercado Sainz de baranda, La Alameda, Circuito Baluartes, IMSS, ADO, Av. López Mateos, Gobernadores y calle 49 B.

Tribuna, Sección Campeche, Primera Plana, sábado 25 de junio de 1995.

Dos imágenes de ciudad concordia inundada. La nota expone hasta 50 cm de altura del agua en algunos puntos de la ciudad.

Los lugares afectados fueron Av. Álvaro Obregón, Av. Gobernadores, Av. López Mateos. Unidades habitacionales de Ciudad Concordia y Fidel Velásquez. Los daños comprenden deslaves, destrucción de viviendas, caminos cuarteados y levantados por las corrientes de agua.


Central de autobuses 24-Junio-1995

La Secretaría de Obras Publicas, Comunicaciones y Transportes recurrió a romper el drenaje sanitario de la Av. Central a la altura de la vía del tren debido a la acumulación de agua y basura.

Tribuna, Sección Campeche pagina 2-A, sábado 25 de junio de 1995.

Se reporta 182 mm de precipitación en el día viernes 24 de junio de 1995, evacuándose diez personas de la colonia Dzarbay, donde el agua alcanzó 1.5 metros. Los sitios afectados según la nota fueron San Martín, calle 49, Solidaridad, desbordamiento de la Ría, Periferia del mercado Sainz de baranda, La Alameda, Circuito Baluartes, IMSS, ADO, Av. López Mateos, Gobernadores y calle 49 B.

Cornelio Sosa, Roger E. 1995. Los veinte días de desastre en Campeche; Primera parte. En: "Agenda" Nº 3, Noviembre de 1995. AGEC, C 12.

Documento dedicado a la descripción parcial de lo ocurrido ante Misael, Noel, Roxana, Roxana II, Sebastián y Opal, la Participación y actividades de diversas instituciones.

Descripción por día ante lo ocurrido por Roxana, incluyendo resumen de los reportes del numero de damnificados, número de albergues por localidad personas movilizadas, muertos, número de viviendas afectadas, daños a infraestructura y costos.

Opal 30 de septiembre 1995: 15 mil damnificados en los albergues, 10 muertos.

Roxana 08 de octubre de 1995: 15 mil damnificados en los albergues.

1999


El torrencial aguacero que cayó ayer provocó inundaciones en diversas partes de la ciudad y problemas de tránsito. Aspectos de la calle 49-A, junto al cine Estelar; Circuito Baluartes, frente al PRI; calle Nayarit, en unidad "Fidel Velázquez" y calle 45 del barrio de Guadalupe.

Tribuna, Campeche, 1ª Plana. Jueves 17 de junio de 1999

Figura 12. Zonas inundadas en los alrededores de cine Estelar.

Tribuna. Sección Campeche, 1ª Plana. Jueves 17 de junio de 1999

Presenta cuatro fotografías con notas que permiten identificar sitios inundados.

Contiene una nota "Problemas que ocasionan las lluvias"; resultando afectadas la calle 45 del barrio de Guadalupe, Privada del Sol, Solidaridad Urbana, Fidel Velásquez, Avenida López Mateos, la periferia del mercado Pedro Sainz de Baranda, Plan-Chac, Colonia Cumbres.

Tribuna. Sección Campeche

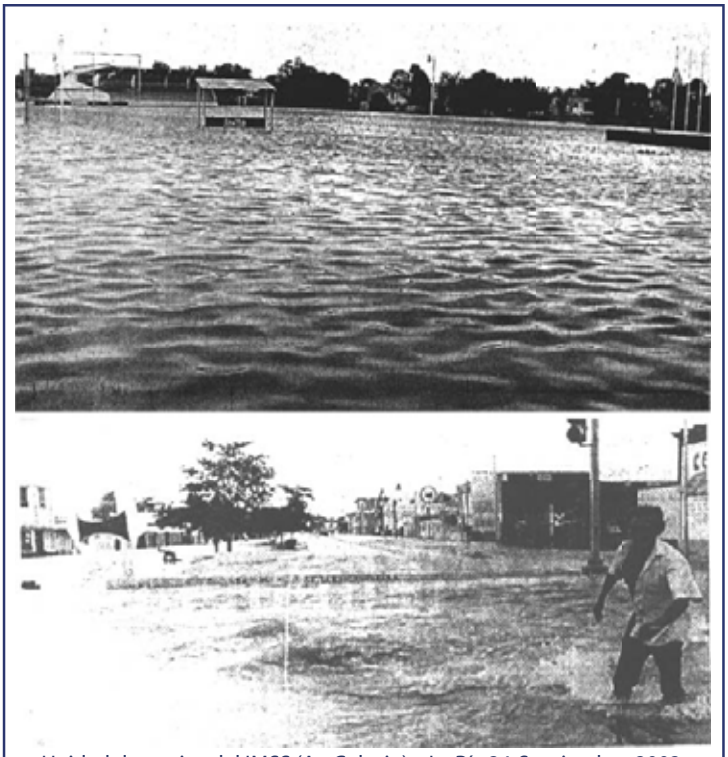
2-A. Jueves 17 de junio de 1999.

"Vecinos aprueban...

La lluvia del martes fue de 41 mm y el miércoles de 35.1, superando los 60 mm que se presentaron durante el huracán Opal (sic)

La nota menciona que se resolvió el problema de inundación al desalojarse el agua en menos de dos horas, debido a pozos de absorción recién realizados en los siguientes sitios:

La esquina de la Cueva del Toro
Calle 19 y calle Justo Sierra de la colonia Pensiones
Privada del Sol
Calle 45.
En tanto que en la colonia Carmelo el desalojo se logró en una hora.



Unidad deportiva del IMSS (Av. Colosio) y La Ría 24-Septiembre-2002

Centro Estatal de Emergencias (CENECAM). 2000. Atlas Estatal de Riesgos. Gobierno del Estado de Campeche.

Una síntesis de daños ocasionados por los huracanes Gilberto (1988), Opalo y Roxana (1995), Mitch (¿?), y mapa de zonas inundables de la ciudad de Campeche.

2002

Ayuntamiento de Campeche. Edición 647 del viernes 15 de Marzo de 2002:
(http://www.larevista.com.mx/ed651/acamp647.htm

EL EXCESO DE basura que se acumuló en alcantarillas y desagües, e impidió la circulación del agua, propició las inundaciones y encharcamientos que sorprendieron ayer a los campechanos, afirmó el director de Protección Civil Municipal, Nehemías Chi Canché.

-Este problema, que surgió con el aguacero de anoche, causó que brigadas del Ayuntamiento salieran a limpiar las alcantarillas tapadas -dijo. Habitantes de las colonias Plan Chac, Presidentes de México, El Carmelo y Cuatro Caminos afrontaron grandes dificultades por los desperdicios que tira la gente en la vía pública, lo cual se agudiza en situaciones como la de anoche. Como publicamos hoy, un aguacero que comenzó a las 7:30 p.m y duró casi 70 minutos, ocasionó que varias calles se inundaran y se produjera el deslave de algunos cerros, lo que propició que las calles se llenaran de tierra, botellas y basura de todo tipo.

El director de Protección Civil Municipal indicó que la fuerte precipitación pluvial de anoche afectó también a unas 30 comunidades rurales cercanas a la capital.

Según los primeros reportes, la lluvia registrada ayer fue de apenas 29.5 milímetros, pero pareció mayor debido a los grandes encharcamientos.

Chi Canché recomendó a la ciudadanía que procure no tirar basura en las calles. -Las brigadas que salieron durante la lluvia hicieron una intensa labor porque se acumuló una gran cantidad de basura -reiteró.



Plan Chac 24-Septiembre-2002



Héroes de Nacozari
24-Septiembre-2002



El Carmelo 24-Septiembre-2002

Valencia Barreto, F. 2004. Análisis del impacto del paso del huracán Isidoro en la ciudad de Campeche. Informe de Prácticas Profesionales Centro Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México (Centro EPOMEX) de la Univ. Autón. de Campeche.

Analiza situaciones presentadas durante el huracán Isidoro:

1. Calidad de vida
2. Daño en la infraestructura por el impacto del huracán
3. Preparación ante huracanes
4. Acciones gubernamentales para la preparación de la población
5. Ayuda solicitada/recibida

6 Perspectiva de los vecinos y daños a la salud.

Presenta áreas inundables de la ciudad de Campeche

El documento menciona que en la ciudad de Campeche "se pudo constatar que el mayor riesgo para la ciudadanía provenía de las inundaciones y en muchos de los casos las personas encuestadas tienen clara idea del motivo por el cual se inundaron, e inclusive proponen soluciones", igualmente agrega, que las condiciones socioeconómicas orillan a las personas a entrar al mercado inmobiliario ilegal, que en muchos casos son irregulares y de riesgo para asentamientos humanos.

Agrega, que en la mayoría de los casos, la distribución de ayuda se da a través de líderes de colonia.

2004

Tromba azota Campeche por: redacción, Fuente: Noticieros Televisa
http://www.esmas.com/noticierostelevisa/mexico/387681.html

Deja tromba inundaciones y graves daños materiales en la capital de Campeche. CAMPECHE, México, ago. 26, 2004.- Inundaciones en calles y colonias, árboles y anuncios derribados, así como cortes de energía eléctrica y problemas de tránsito, provocó inesperada tromba que golpeó a Campeche con fuertes vientos e intensas lluvias.

El meteoro tan sólo duró 15 minutos, pero fueron suficientes para que se inundaran cuando menos 10 colonias de la capital campechana.

Por falta de mantenimiento del drenaje de la ciudad, en algunas colonias el agua alcanzó casi medio metro de altura.

Un árbol cayó sobre la parte delantera de un autobús de pasajeros. Por fortuna no hubo lesionados.

Para evitar accidentes se hicieron cortes en el sistema de cableado de las áreas en donde la tromba derribó árboles y postes de energía eléctrica.



Daños sufridos por inundaciones en diferentes puntos de la ciudad, Junio 2004

También se registraron problemas viales.

Crónica, Sección Campeche, Primera Plana. 03 de octubre del 2004.

Fotografía de área inundada, se puede identificar el sitio.

Zonas afectadas: Av. Central, Gobernadores, Colonia Plan-Chac, Presidentes de México.

Los encargados de la limpieza de los drenajes en zonas conflictivas es el área de drenaje, Aseo y Obras Publicas del Municipio.

Calderón Quijano, José Antonio. 1953. Historia de las fortificaciones en Nueva España. Escuela de Estudios Hispanoamericanos de Sevilla. AGEC: 409.

Ya desde el establecimiento y mantenimiento de las murallas en Campeche, se recono-

cía el problema que representaban las zonas bajas, como ejemplo tenemos, que el fuerte de San Francisco (al este de Puerta de Tierra) estaba

"situado en el terreno más bajo, y sobre ciénegas, y que por las aguas que afluían de los montes, perjudicaba la cimentación de las cortinas que venían de los baluartes de San Pedro (hoy Frente al mercado Sainz de Baranda) y San Juan"

(frente al edificio del IMSS), según informe de José de Castro al Rey, en Campeche a 18 de mayo de 1708, que documenta Calderón (1953).

En abril de 1732 (Calderón, 1953), el Gobernador Antonio Figueroa le comunica al Rey la abertura de la Puerta de Tierra, misma que incluía "tres calzadas, con el correspondiente relleno de tierra, y el necesario desagüe, con un puente que evitaba el embarazo de las lluvias en aquellos bajos parajes. Era tal su eficiencia que después de aquellas, al poco tiempo quedaba nuevamente limpia la campaña"

En el texto de la pagina 190 se infiere que existía influencia de las aguas, de tierra adentro, sobre la ciudad amurallada, impidiéndose el paso hacia el recinto por la recién construida Puerta de Tierra. "...frente a ella (Puerta de Tierra) había un desagüe que corría a lo largo de la pared y tres baluartes (San Juan, San Francisco y San Pedro) de seis pies (1.83 metros) de profundidad y veinte (6.10 metros) de ancho, lo cual impedía en tiempos de aguas que nadie pudiera penetrar a ella, por hacerse una laguna con las aguas del monte".

Uribe González, A. s/f. Campeche Historia Paludismo Inundaciones Petróleo Ciudad del Carmen. Campeche, México 576 p.

Este autor documenta los causes naturales, canales de desagüe, colectores pluviales, construcción de puentes e inundaciones históricas; condiciones que provocan inundaciones y las magnifican; implicaciones urbanísticas, ecológicas y socioeconómicas; propuesta de levantamiento topográfico para localizar zonas de riesgo y zonas de descargas; y las obras drenaje proyectadas y construidas bajo su dirección a partir de 1949, en la ciudad de Campeche.

Documenta que en 27 de julio de 1937 se realiza la formación del "Comité de Conservación Colonial y Mejoramiento de Campeche", que tiene entre sus compromisos, el saneamiento de la ciudad, consistentes en la construcción del drenaje e introducción del agua potable.

Cronología de Inundaciones Significativas y Obras de Drenaje Destinados a Solucionarlos

1807 Inundación el 07 de septiembre.

1830 se abre el canal de desagüe de Santa Ana (conocido anteriormente como Zanja de Iturbide).

1845 Se mejora y rectifica el rumbo del canal de Santa Ana.

1846 Se proyecta y concluye la construcción de un puente sobre el canal de Santa Ana.

1869 Inundación, octubre 26.

1887 Inundación, s/f.

1911 Inundación, s/f.

1948 Inician estudios topográficos e hidrológicos para las obras de los canales Zanja de San Martín y La Ría de San Francisco:

- Zanja de San Martín: Calculada para desalojar un gasto de 1.44 m3/seg y una longitud de 1,260 metros.
- Ría de San Francisco: Calculada para desalojar un gasto de 2.5 m3/seg.
- Construcción del Puente No. 1 en el cruce da la calle 14.
- Reparación del Puente No. 2.

1962- 1967 En este período se cubre el canal de La Zanja de San Martín.

1967-1973 Nivelación desde el Puente de los perros hasta el cruce de la vía del ferrocarril, en Fracciorama 2000, y construcción de un canal paralelo a La Av. Central, desde ¿? hasta La Casa del Campesino.

1980 Construcción del drenaje pluvial Fracciorama 2000-San Martín.

1988 Septiembre 14- , inundación provocada por el huracán Gilberto.

1988 inicia construcción del Canal de Plan-Chac

Registro General de Zonas Inundables en la Ciudad de Campeche

En el siguiente listado se registraron los lugares que han presentado inundaciones históricas significativas, independientemente de su duración e intensidad.

Avenidas y Calles	Colonias, Barrio, Zonas
1. Av. Álvaro Obregón 2. Av. López Mateos 3. Av. Reforma Agraria 4. Calle 10 5. Calle 14 6. calle 16 c/Av. Bulevar 7. Calle 45 del Bario de Guadalupe 8. Calle 59 9. Calle 8 10. Calle de La Zanja 11. Calle Montecristo 12. Costados de la carretera Campeche–Mérida	1. Bosques de Campeche 2. Carmelo 3. Centro 4. Colonia Aviación 5. Colonia Cumbres 6. Colonia Dzarbay 7. Colonia Prado 8. Cuatro Caminos 9. Estación del Tamarindo ¿ubicación actual? 10.Fidel Velásquez 11. Foviste UAC 12. Foviste Belem 13. Fracciorama 2000 14. Guadalupe 15. La Alameda 16. La antigua Maestranza 17. La Ermita 18. Las Flores 19. Laureles 20. Mercado Pedro Sainz de Baranda y periferia 21. Mercado Publico (Antiguo: 1889) 22. Pensiones 23. Periferia de la Calle Montecristi 24. Periferia del aeropuerto y Ferrocarriles. 25. Plan- Chac 26. Plaza Mayor 27. Plaza de La República 28. Prado 29. Presidentes de México 30. Préstamos de Ferrocarriles del Sureste 31. Privada del Sol 32. Puente de la Viga en la Calle del Toro ¿ubicación actual? 33. Puente de los Perros 34. Reparto de Kala 35. Samulá 36. San Francisco 37. San Martín 38. San Román 39. Santa Ana 40. Santa Lucia 41. Solidaridad Urbana 42. Súper 10 Centro 43. Tula II 44. Valle del Sol Zanja de San Martín

En la figura 11 se muestra en líneas azules las calles que han presentado inundaciones históricas recurrentes desde 1807 a la fecha.

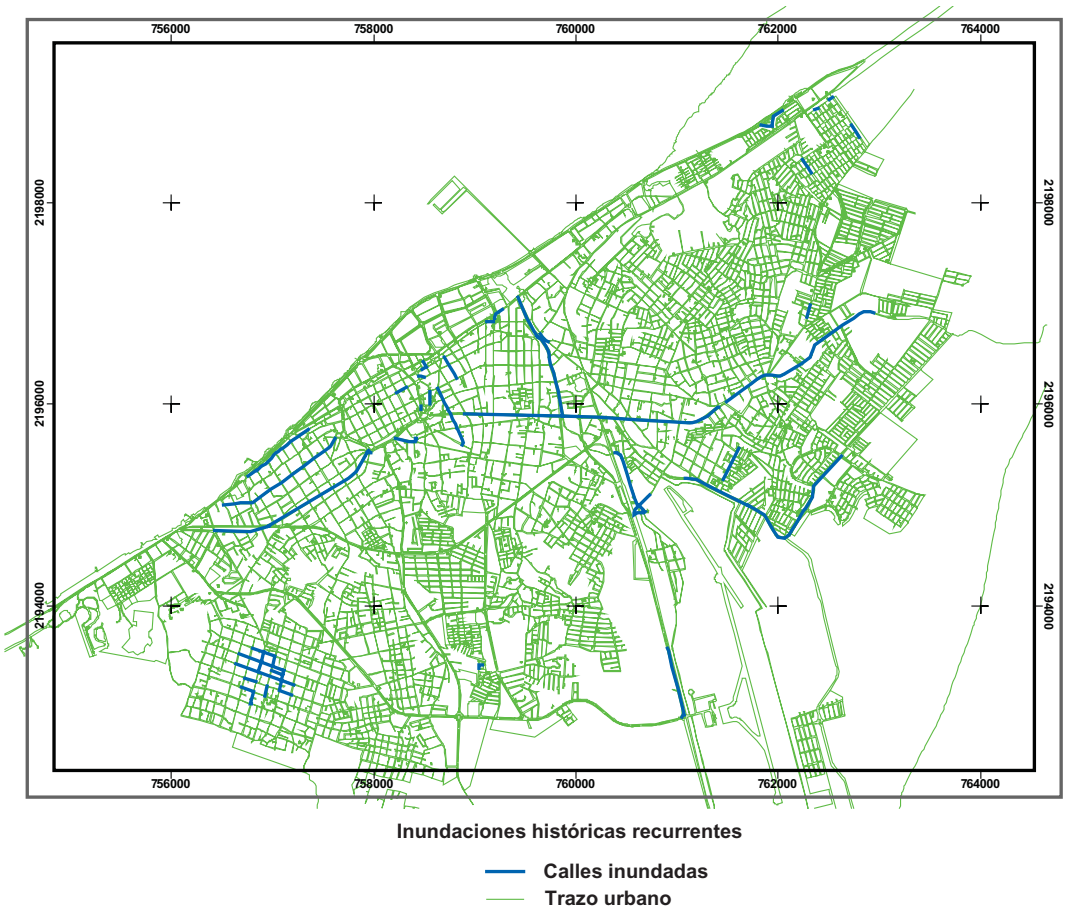


Figura 11. Calles (en azul) que han presentado inundaciones históricas. recurrentes desde 1807 a la fecha.

Cronología de las Inundaciones Ocurridas en la Ciudad de Campeche

La cronología detalla en secuencia histórica, las inundaciones significativas ocurridas en la Cd. de Campeche, enfatizando las causas y los efectos se muestran en la tabla 21.

En el plano de la fortificación de San Francisco de Campeche (pag. 30) elaborado en 1705 elaborado por el Ing. Luis Bauchard de Becour se pueden caracterizar varios elementos del ambiente litoral de la época. Partiendo de la escala gráfica en baras que equivalen a 0.84 m de los referentes españoles y con las reservas de precisión cartográfica del documento, se ubican los siguientes sitios y ambientes:

Tabla 21. Cronología detallada de las inundaciones ocurridas en la Cd. de Campeche.

Año/mes	Día	Fenómeno Meteorológico	Lugar	Características y/o efectos
1464/?	?	Huracán	?	Evacuación de comunidades
1516/?	?	Lluvia torrencial	?	Evacuación de comunidades
1769/?	¿?	Huracán	?	Inundación de colonias
1807/ Sep	7	Surgencia	Malecón-Calle 10	Inundaciones en la ciudad, alcanzó la calle10.
1869/ Oct	26	Lluvia torrencial	Centro, Santa Ana, La Alameda, Puente de los perros, San Román, Santa Lucia, La Ermita, San Francisco y Guadalupe	Entrada de nocturna de agua a la ciudad hacia tierra adentro, 307 familias afectadas.
1887/ Oct	13-16	Lluvia c/tormenta eléctrica y vientos (ciclónicos) del noreste y este	Calle de La Muralla (hoy calle 8), Plaza Mayor, hasta la calle 10, Santa Ana, San Francisco, Guadalupe, San Román	Desborde y destrucción de la vía a Lerma, Pérdida de vidas humanas (?), tranvías, hogares (?).
1889 /Sep	18-21	Temporal con fuertes vientos y lluvias	Centro	Evacuación de barrios hacia el centro de la ciudad. Desperfectos en la plaza principal, la antigua maestranza, Teatro Toro, Mercado público.
1911/?	?	?	Alameda, calle 59, calle 14, calle de la zanja, Puente de La Viga en la calle del Toro	Inundaciones de hasta dos metros.
1936 /Jun	13	?	?	25.5 mm de lluvia acumulada en un día
1969/ Sep	12	Lluvia torrencial s/vientos y c/crecientes de marea.	Calle 14 (esquina de la viga), terrenos de la antigua planta eléctrica, Puente de los Perros, La Alameda, Estación Tamarindo, La Zanja de San Martín, los acalchés de Santa Lucia. La Ría. Acumulación de agua en el valle "Reparto de Kalá" y alrededores, igual situación en los costados de la carretera Campeche-Mérida.	Inundaciones de 2.5 metros aprox., evacuación de personas, con pérdida de pertenencias. 71.5 mm de lluvia acumulada en un día. Asentamientos el terreno en los alrededores de los préstamos del Ferrocarril del Sureste y su sistema ferroviario y el Puente de Piedra.
1981 /Ago	21	Frente	Av. Gobernadores	97.3 mm de lluvia acumulada en un día
1988/ Sep	14	Huracán Gilberto	Centro Sur e inundaciones extendidas por toda la ciudad	Aproximadamente de 5 a 6 mil hogares dañados entre Cd. del Carmen y Campeche. 525 km de caminos dañados. Pérdidas generales estimadas en 60 mil millones de pesos. Daños al Hospital General de Campeche, IMSS e ISSSTE por 3 mil 100 millones de pesos en instalaciones y equipo. Daños en infraestructura educativa y 1500 tomas de agua potable particular. Oleaje de tres metros ingreso de agua de mar a la ciudad en 450 m tierra adentro.

Tabla 21 (Continuación). Cronología detallada de las inundaciones ocurridas en la Cd. de Campeche.

Año/mes	Día	Fenómeno Meteorológico	Lugar	Características y/o efectos
1994/Jun	16	Lluvia	Av. Jaina, Av. Ruiz Cortines, Casa de Justicia, López Mateos, Zona de Ah Kim Pech, Planc Chac, Presidentes de México, Colonia México, Fidel Velásquez, Pablo García, Dzarbay.	Se generaron inundaciones a causa de las fuertes precipitaciones como consecuencia de una onda tropical, esto también originó la caída de 4 postes de Luz sobre la Av. Palmas
1994/ Sep	30	Depresión tropical	Av. Álvaro Obregón, Av. Gobernadores a la altura de las oficinas del Seguro Social.	Inundaciones a causa de una depresión tropical
1995/Jun	23	Lluvia	San Martín, La ría de San Francisco, Mercado Pedro Sainz de Baranda, La Alameda, el Circuito Baluartes, el IMSS, la central de autobuses, Av. López Mateos y Gobernadores.	Resultó afectada la calle 49, al igual que la unidad habitacional Solidaridad. Se registraron inundaciones que penetraron en casas y varias familias resultaron afectadas por la pérdida de muebles y otras propiedades.
1995/Jun	24	Lluvia	Cd. Concordia	Resultó afectada Cd. Concordia a causa de inundaciones, las cuales rebasaron aceras y penetraron en casas.
1995/ Sep	30	Tormenta tropical Opal	Inundación generalizada en la ciudad	En la ciudad: 15 mil damnificados en albergues, 10 muertos, inundaciones generalizadas
1995/ Oct	30	Huracán Roxana	Inundación generalizada en la ciudad	En la ciudad: 15 mil damnificados en albergues, inundaciones generalizadas. 154 mm en un día
1999/ Jun	15-16	Lluvia	Calle 45 del barrio de Guadalupe, Privada del Sol, Solidaridad Urbana, Fidel Velásquez, Avenida López Mateos, la periferia del mercado Pedro Sainz de Baranda, Plan Chac, Colonia Cumbres	Resultaron afectadas la calle 45 del barrio de Guadalupe, Privada del Sol, Solidaridad Urbana, Fidel Velásquez, Avenida López Mateos, la periferia del mercado Pedro Sainz de Baranda, Plan-Chac, Colonia Cumbres La precipitación del día 15 (41 mm) y la del 15 (35.1 mm) superó los 60 mm que se presentaron durante el huracán Opal (sic).
2002/ Sep	24	Huracán Isidoro	La Ría, Planc Chac, Presidentes, Fracciorama 2000, Héroe de Nacozari, Unidad Deportiva del IMSS, El Carmelo, Fovissste Belén, Parque infantil de Moch Cohuó, Plazuela del Palacio Legislativo, Minas, Parque San Martín Santa Lucía y La Esperanza	Cayeron bardas y árboles. Inundó casas. Causó deslaves. El mar se desbordó.
2004/ Jun	15	Lluvia	Av. Jaina, Ruiz Cortines, Casa de Justicia, López Mateos, Parte de la zona de Ah Kim Pech, Plan Chac, Presidentes de México, Fidel Velásquez, Pablo García y Dzarabay.	Inundaciones generalizadas con 50 mm acumulados en el día

- De la muralla a la línea de bajamar existían 150 m
- De la muralla y hasta dos baras (1.68 m) de profundidad, 283 m de distancia horizontal
- De la muralla y hasta cinco baras (4.2 m) de profundidad, 600 m de distancia horizontal
- Con la letras :

  A.- La ciudad

  B.- Fuerte de San Román (demolido)

  C.-Fuerte de la Eminencia (demolido)

  D.-Anclaje de las embarcaciones.

  E.- Galeones que saben guardar costas

En el plano se ubica incluso el desagüe natural de la Ría y las profundidades máximas de la Bahía de Campeche en 17 baras.

Los registros documentales de las inundaciones y de los cambios históricos en el ámbito urbano de la ciudad de Campeche, permiten ubicar y caracterizar la intensidad y la recurrencia de las inundaciones, identificando las áreas criticas por la altura del agua o por su permanencia. Igualmente al conocer los cambios ambientales significativos en el ambiente costero se induce la dinámica y cobertura espacial original donde los procesos generadores de inundaciones se desarrollan. Así se ubican terrenos ganados al mar, canalización o modificación de drenes naturales y sustitución de coberturas permeables por impermeables. Estos indicadores finalmente se reflejan en los mapas anexos de: *Zonificación de la amenaza ordinaria en el área urbana y suburbana de Campeche* y *Zonificación de la amenaza extraordinaria en el área urbana y suburbana de Campeche*.



4 Modelo Espacial Inundaciones de Origen Continental

Para entender la amenaza de inundaciones en áreas urbanas se integran las interrelaciones ponderadas entre factores físico-geográficos y el estudio probabilístico de los fenómenos hidrometeorológicos detonadores. Los factores físico-geográficos toman como base el concepto de drenaje de cuencas naturales interceptadas por áreas urbanas, cuyo análisis responde a patrones hidrológicos particulares aplicables parcialmente a cuencas naturales típicas. Asimismo dentro de las cuencas interceptadas se presenta lo que se conoce como cuenca vertiente real, que se refiere a la identificación de condiciones atípicas específicas, como zonas cársticas naturalmente permeables y la creciente expansión de superficies impermeables urbanas.

La severidad de las inundaciones en zonas costeras cársticas bajas como en la que se encuentra la ciudad de Campeche, tiene como factores detonantes, los inherentes al fenómeno perturbador de origen hidrometeorológico, como la intensidad de las lluvias torrenciales ordinarias, las lluvias extraordinarias debidas a perturbaciones atmosféricas tropicales, la sobrelevación del nivel del mar (huracanes y cambio climático global) y los relacionados con la capacidad o incapacidad del terreno para absorber los excedentes o aporte críticos de agua. Ambas condicionantes se combinan para diferenciar espacialmente la amenaza de inundación o inundabilidad del terreno, delimitando en la práctica unidades del terreno potencialmente colectoras o dispersoras de las precipitaciones pluviales. En los dos siguientes flujogramas se muestra la ruta metodológica del análsis (Figs. 13 y 14).

El estudio incluye un modelaje espacial y un modelaje matemático probabilístico de las inundaciones. El modelaje espacial incorpora criterios espaciales de todas las caracterís-

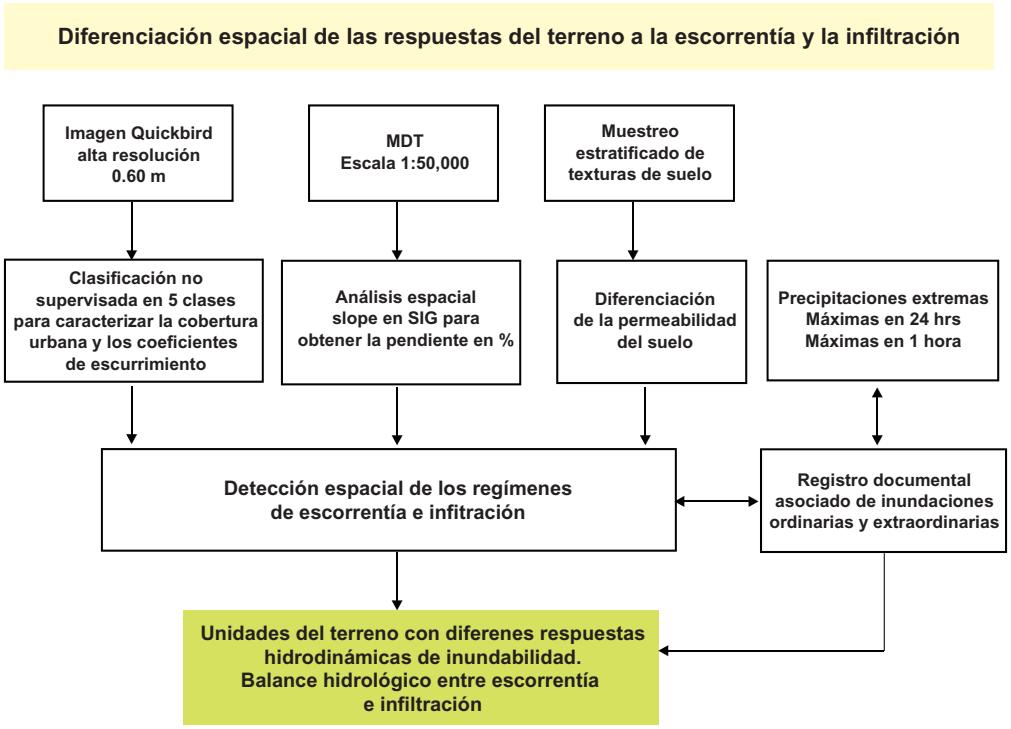


Figura 13. Flujograma metodológico de las unidades del terreno y el régimen meteorológico local.

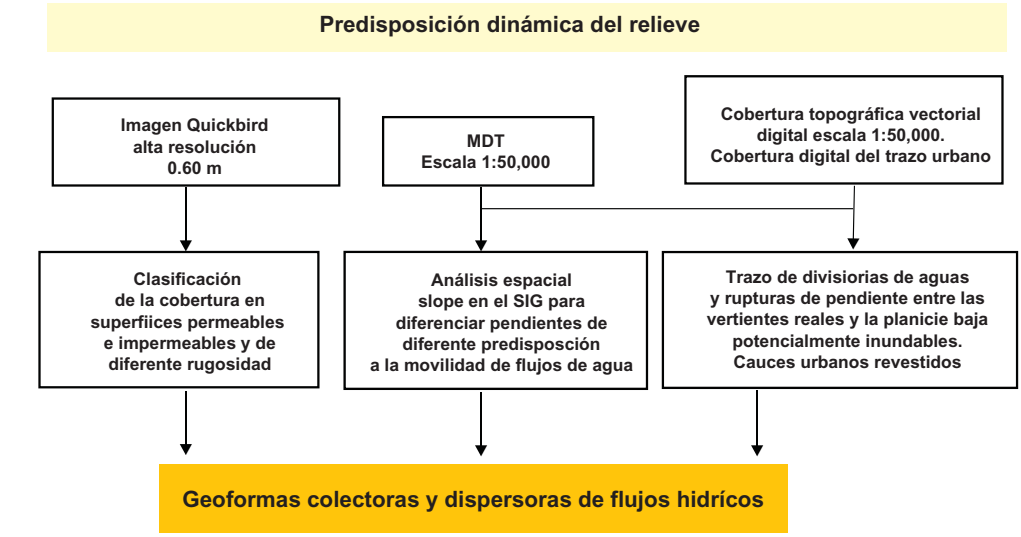


Figura 14. Flujograma metodológico de la diferenciación específica del relieve en cuencas interceptadas.

ticas relevantes del terreno que condicionan su inundabilidad. Se basa en un conjunto de decisiones ponderadas en donde se ocupa la teoría heurística bayesiana, que consiste en deducir las causas de los fenómenos según la repetitividad y regularidad de los comportamientos observados en el pasado. Se ocupan reglas universales del comportamiento del terreno

ante la saturación hídrica y la permeabilidad del suelo, la rugosidad del terreno, el estudio de las características morfométricas del relieve y su correlación histórico-estadística con eventos meteorológicos y oceánicos que han presentado excesos inmanejables de agua.

A través del modelaje matemático probabilístico se conoce el comportamiento temporal de los fenómenos perturbadores y los periodos de retorno de sus efectos destructivos. Permite valorar en su justa dimensión la probabilidad de que eventos extremos se repitan en el futuro, sin sobreestimar los fenómenos de gran magnitud, ni minimizar la importancia de las lluvias torrenciales de temporada.

Predisposición Dinámica del Relieve

La predisposición dinámica del relieve se refiere a la facilidad o inhibición que presenta el terreno ante la movilidad de escorrentías superficiales. Considera la delimitación de unidades del terreno con distintos grados de susceptibilidad a la inundación en función de los niveles de inhibición o incremento de la escorrentía y la infiltración. El término integral que caracteriza el momento en que la escorrentía cede ante la inundación o inmovilización semi-permanente de las aguas, es la inundabilidad.

Este factor es sumamente relevante sobre todo ante la ocurrencia de lluvias intensas que se concentran en periodos de tiempo cortos y en cuencas donde el balance natural entre la escorrentía y la infiltración se han alterado. Los factores geomorfohidrológicos más relevantes a considerar son:

- **Sistemas de cimas (susceptibilidad mínima a las inundaciones) y depresiones (susceptibilidad máxima a las inundaciones)**. La susceptibilidad general del terreno a las inundaciones en Campeche, se concentra en las planicies bajas acumulativas palustres y de coraza calcárea. Coinciden con los niveles de base locales potencialmente captadores de escurrimientos, los niveles altitudinales por debajo de los 10 msnm y pendientes menores a los 2º de inclinación. Aparecen en la cartografía anexa como planicie baja potencialmente inundable.
- **Cauces urbanos revestidos y puntos de confluencia**. Asociada con el coeficiente de escurrimiento máximo se identifican los cauces revestidos (calles pavimentadas) potencialmente captadores de agua. Este concepto es similar al de densidad de disección aplicado en cuencas hidrográficas no interceptadas. Los cauces que en la naturaleza colectan las escorrentías superficiales, también se presentan en zonas urbanas como calles con orientación y pendiente favorables a los escurrimientos. La diferen-

cia en realidad radica en la naturaleza del revestimiento y la geometría de los cauces, que en el caso de las calles que se trazan sobre los lomeríos, es de una permeabilidad prácticamente cero, incrementando exponencialmente la energía cinética de los flujos e inhibiendo en su totalidad la infiltración.

Su importancia radica en ubicar los puntos de confluencia o lugares donde por el trazo urbano concurren una o mas calles potencialmente captadoras de agua de escorrentía, que se convierten rápidamente en puntos críticos para las inundaciones rápidas y de niveles de agua críticos. De esta forma ponderando la longitud y el orden de los cauces se ubican puntualmente las áreas críticas donde la acumulación del agua es rápida y de volúmenes considerables.

Los puntos de confluencia más importantes en la ciudad de Campeche se enlistan a continuación y se ubican en el mapa anexo denominado ***Cauces revestidos*** y ***puntos de confluencia***.

Listado de Puntos de Confluencia		
1.Calle 20 con 7	2. Calle 7 con 18	3. Calle 7 con Andador Prol. de la calle 7
4.Calle 14 con 9	5. Calle 12 con 17	6. Calle 10 con 15
7.Calle 8 con 15 A	8. Calle 6 / 11 y 13	9. Calle 6 con 11
10.Calle 9 con 6	11. Av. José López Portillo con 18	12. Av. José López Portillo / 5 y 3
13.Av. José López portillo/ Prolongación Pedro Moreno y calle s/n	14. Prolongación Pedro Moreno con Vicente Guerrero	15. Av. José López Portillo/Embotelladora PEPSI
16. Privada 2 de la Calle 18 esquina con Calle 18(2)	17. Prolongación Montecristo con José A. Torres	18. José A. Torres con Progreso
19. Prolongación Abasolo / Luis Donaldo Colosio y José A. Torres	20. Andador Victoria con Luis Donaldo Colosio	21. 20 D e Nov. / Av. Luis Donaldo Colosio y s/n
22. Av. Luis Donaldo Colosio con Jalisco	23. Calle Ecuador con la segunda privada de Ecuador	24.Av. López Portillo
25. Av. Concordia con 16 de Septiembre	26. Alberto Trueba con Eduardo Mena	27. Eduardo Lavalle / circuito Pablo García Este y Joaquín Acereto
28. Circuito Pablo García Este / 10 este y 11 Este	29. Circuito Pablo García Este con 8 Este	30. Circuito Pablo García Este con Av. Concordia
31. Privada de la 18 con calle 1 A	32. Calle 1 con 20 de Nov.	33 .Calle 1 con 14
34. Calle San Luis con Álvaro Obregón	35.Carretera Antigua Campeche - Mérida con andador Cangrejo	36. Calle 23 con 116
37. Calle 27 con 10	38. Calle 12 con 27	39. Calle Castellot / 27 y 29
40. Calle 25 / Juliancito y San Julián	41.Av. Circuito Construcción con Mercedes	42.Av. Circuito Construcción con Calle sol
43.Calle González Curi con Azucena	44.Privada Josefa Ortiz de Domínguez con Josefa Ortiz de Domínguez	45.Calle Santa Rosa con Felipe Carrillo puerto
46.Calle Socorro con San Manuel	47.Calle Azufre con s/n	48.Av. CTM con Oro
49. Av. CTM con Plata	50.Calle Topacio con Malaquita	51.Palmas con carretera antigua a Hampolol
52.Circuito Construcción con 108	53. Calle 110 con 108	54. Calle 108 con Villa Cabra
55. Villa Cabra con 104	56. Calle 5 con Villa Cabra	57. Calle 14 con 5 Alta peligrosidad. Confluencia múltiple

- **Geometría del relieve (pendientes cóncavas, convexas, rectas)**. A nivel nacional se ha observado que las inundaciones más relevantes por su magnitud (extensión territorial) e intensidad, están asociadas a cuencas endorreicas (niveles de base cóncavos), planicies fluviales (pendientes rectas) y planicies bajas cóncavas palustres o costeras. En la ciudad de Campeche es necesario diferenciar el microrelieve para identificar la geometría local de las geoformas. Sin embargo, los indicadores indirectos de pendientes cóncavas y convexas se ven reflejados en los tirantes de inundación a nivel de colonia o barrio. En las áreas donde los tirantes son 0 cm o cercanos a cero, las pendientes son convexas y donde los tirantes alcanzan niveles extraordinarios se presentan pendientes cóncavas. Esto se puede verificar en los mapas de: Zonificación de la amenaza ordinaria en el área urbana y suburbana de Campeche y Zonificación de la amenaza extraordinaria en el área urbana y suburbana de Campeche.
- **Pendientes (umbrales de la inclinación del terreno y rupturas de pendiente)**. Para la ciudad de Campeche se establecieron dos grupos de pendientes en porcentaje: 20% y 40%. Ambas son resultado del arreglo fisiográfico entre la estructura geológica subregional y la evolución cárstica del relieve durante el cuaternario. Los lomeríos presentan cimas planas de pendientes subhorizontales y solo las rupturas de pendiente de los flancos de los pliegues-bloque muestran inclinaciones del 40%.
- **Diferenciación de los tipos de cobertura urbana** según sus características naturales y/o artificiales y su susceptibilidad a las inundaciones presentan mayor o menor rugosidad u oposición a las escorrentías o la infiltración. La energía cinética del agua se incrementa o inhibe según la proporción relativa de superficies lisas o cubiertas con vegetación.

Balance Hidrológico entre las Escorrentías Pluviales y los Ritmos de Infiltración.

El balance de los niveles y permanencias de aguas pluviales en los hidrosistemas urbanos depende de la estrecha relación entre el agua que escurre y la que se infiltra. Para las inundaciones de corta duración son más relevantes los ritmos de los escurrimientos que la infiltración, sin embargo en condiciones donde la lluvia se prolonga durante varios días como en el caso de los huracanes la permanencia si está determinada por la capacidad de absorción del suelo.

La relación proporcional entre superficies impermeables y permeables es un aspecto fundamental en zonas urbanas donde se han modificado los regímenes de escorrentía e infiltración. Se puede pasar de un 10% de escorrentía y un 50% de infiltración en el medio natural a un 50% de escorrentía y un 15% de infiltración en zonas urbanas. Esto significa

que en términos de amenaza por inundación el incremento de superficies permeables (Plunk *et al.*, *1990*; Arnold *et al.*, 1996; Kent *et al.*, 2003) de forma indiscriminada, incrementa exponencialmente la peligrosidad. Así lo han demostrado el método para el cálculo racional de la escorrentía y el USACE Storm model aplicados por la Towson University en Maryland (EUA) bajo picos de tormentas repetibles en 10 años para áreas controladas en diversas condiciones de urbanización (Fig. 15). Sin embargo, en ciudades pequeñas donde todavía se presentan espacios de transición o de crecimiento urbano hacia zonas rurales, se pueden mantener áreas alternas permeables asociadas a las condiciones originales del suelo.

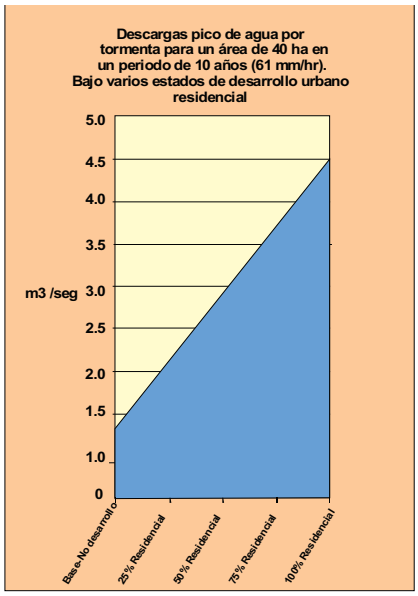


Figura 15. Relación entre las descargas de agua y los porcentajes de superficies impermeables.

En función de los ritmos de infiltración se pueden diferenciar las superficies permeables de las impermeables. La impermeables incluyen construcciones de concreto (casas, edificios, aceras) y pavimentos asfaltados multicapa y las permeables las áreas destinadas a usos urbano con vegetación escasa o sin vegetación y las áreas con arborizados y pastos en distintas proporciones. Estas superficies son hidrológicamente activas, lo que significa que ante terrenos de una inclinación moderada generan escorrentía e inhiben infiltración. Las zonas con distintas permeabilidades una vez saturadas de agua, responden con distintas velocidades a la permanencia de los excesos de agua, según la textura de los suelos. En la siguiente tabla (Tabla 22) se muestran una reinterpretación para Campeche de los tipos de superficies permeables e impermeables, el tipo de cobertura en zonas urbanas y los datos disponibles de valores de infiltración inicial según la ecuación de Horton (Birmingham *et al.*, 1999).

De los anteriores grupos texturales y sus valores de infiltración y rugosidad se deducen los siguientes potenciales de escurrimiento-infiltración:

- Suelos con bajo potencial de escurrimiento-permeabilidad alta. presentan altas velocidades de infiltración aun en condiciones de saturación. Son suelos de textura gruesa (arenas, gravas y arenas gruesas, corazas calcáreas muy fracturadas) con drenaje bueno a muy bueno y permeabilidades alta a muy alta.
- Suelos de medio potencial de escurrimiento-permeabilidad media.- presentan velocidades medias de infiltración en condiciones de saturación y su drenaje varia de medio a alto. Son suelos de profundidad media a profundos de textura media –fina a media

Tabla 22. Interpretación de los promedios de infiltración

Infiltración/ Permeabilidad	Cobertura	Textura	Drenaje vertical	Ecuación de Horton Rango (media) en mm/hr
Rápida/Alta	Barreras arenosas y planicies de cordones litorales. Áreas destinadas a uso urbano con vegetación escasa y suelos arenosos	Permeable Arenosa Areno-limosa. Suelos arenosos no compactados	Perfecto	
			No compactado	110-3710 (990)
			Compactado	3-2200 (380)
Moderada/Media	Áreas destinadas a uso urbano con vegetación escasa o sin vegetación y las áreas con arborizados y pastos en distintas proporciones	Franco-arenosa Franca Franco-arcillosa-arenosa	Bueno a moderado	(725)
Lenta(Media-Baj	Yahom–acalché. Zonas de transición entre lomeríos y bajos extendidos o confinados. Áreas s/urbanizar de limos y arcillas con diferentes grados de compactación	Franco-arcilloso Franco-arcillo Arcillosa-arenosa Suelos semihidromórficos	Imperfecto Suelos arcillosos no compactados	64 -1500 (460)
Muy lenta/Baja	Acalchés. Suelos hidromórficos	Arcillosa saturada	Pobre o muy pobre	0-1200 (86)
Nula	Construcciones de concreto (casas, edificios, aceras) y pavimentos asfaltados multicapa	Impermeable	Nulo	0 teórico

gruesa (franco arenosos, franco arcillo-limosos, franco limosos y limos y de permeabilidad media.

- Suelos de regular potencial de escurrimiento-permeabilidad media a baja.- presentan velocidades bajas de infiltración generalmente poco profundos y con una capa impermeable que impide el movimiento de agua hacia abajo. Dichos suelos presentan texturas medias a finas (franco arcillosos, arcilloso-limosos y arcillo arenosos) y su permeabilidad varia de media a baja.
- Suelos alto potencial de escurrimiento-permeabilidad baja. - son suelos de textura fina (arcillas expandibles) y presentan horizontes casi impermeables cerca o en la superficie y algunas veces los niveles freáticos son muy someros. El drenaje superficial es lento y la velocidad de infiltración en condiciones de saturación es muy baja; por lo tanto su permeabilidad es baja. En zonas urbanas corresponde con construcciones de concreto (casas, edificios, aceras) y pavimentos asfaltados multicapa.

En el primer análisis prospectivo dentro de la ciudad de Campeche se han encontrado dos patrones urbanos generalizados de permeabilidad-infiltración: el de las zonas antiguas y el de las modernas. El patrón de permeabilidad para las zonas antiguas de Campeche (Fig.16) corresponde a los Barrios de San Román, Guadalupe, San Francisco, San José y Santa Ana. Presentan una relación promedio de proporción del 35% (0.632 ha.) de cobertura vegetal

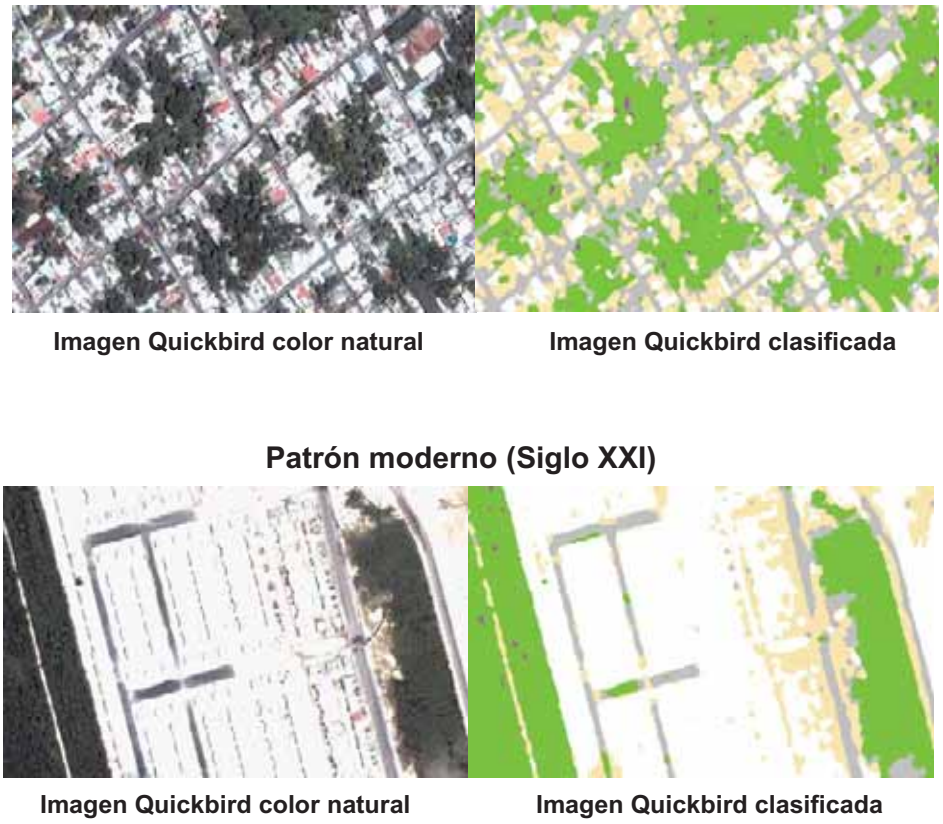


Figura 16. Patrones típicos representativos de superficies impermeables.

de permeabilidad alta y coeficiente de escurrimiento bajo por manzana de tamaño promedio (1.807 ha.). Esta proporción reduce sustancialmente los tiempos de permanencia y los tirantes de inundación. Por el contrario las colonias modernas tienden a impermeabilizar todas las superficies permeables reduciendo dramáticamente los ritmos de infiltración. El caso mas representativo es el fraccionamiento Siglo XXI.

Coeficiente de Escorrentía

El coeficiente de escorrentía crece con la intensidad y con la duración de la precipitación. La naturaleza del suelo tiene gran importancia en su cálculo. En terrenos sin urbanizar, se aconseja adoptar un coeficiente de escorrentía bajo, lo que conducirá a la obtención de un pequeño caudal de aguas pluviales a evacuar. A mayor pendiente mayor coeficiente de escorrentía. A partir del conocimiento del coeficiente de escorrentía y de sus ritmos de inhibición su pueden ubicar unidades del terreno:

- De bajo coeficiente rodeadas de unidades del terreno con alto coeficiente, lo que determina altas susceptibilidad a las inundaciones.
- De bajo coeficiente rodeadas de unidades del terreno con bajo coeficiente y en planicies bajas acumulativas lo que determina susceptibilidad de media a alta dependiendo de los ritmos de infiltración.

Estos coeficientes son especialmente relevantes para inundaciones ordinarias que ocurren entre minutos y horas. A diferencia de las lluvias no necesariamente torrenciales pero si persistentes, que se prolongan durante días (huracanes), saturando los suelos. Los estudios realizados se han enfocado principalmente a grandes extensiones de terreno, para dar soluciones a grandes cuencas. Estos resultados no son aplicables a zonas urbanas con áreas de captación pequeñas, especialmente cuando se presentan condiciones irregulares, como la existencia de obstáculos urbanísticos; edificaciones y calles que no siguen la dirección tanto vertical como horizontal del flujo natural del agua.

Los diferentes coeficientes de escurrimiento han sido validados experimentalmente mediante modelos matemáticos en Estados Unidos, España y algunas ciudades de México como Monterrey. Los valores que corresponden al tipo de cobertura urbana en Campeche y representan al movimiento relativo del agua sobre el terreno, se muestran en la siguiente tabla (Tabla 23).

Tabla 23. Coeficientes de escurrimiento identificados en la ciudad de Campeche (K)

Tipo de cobertura	Pendiente en %	K
Áreas con arborizados arbustos y pastos en composición dominante o secundaria	0-20	0.2
	20-40	0.25
	40-100	0.27
	> 100	0.30
Zonas residenciales y estructuras urbanas (promedio ponderado)	No relevante	1.0
Calles asfaltadas	No relevante	0.9
Áreas sin urbanizar (vegetación escasa)	0-20	0.25
	20-40	0.30
	40-100	0.35
	> 100	0.37

En áreas urbanas y suburbanas los coeficientes de escurrimiento resumen el concepto del balance hidrológico entre las escorrentías pluviales y los ritmos de infiltración antes explicado. Reflejan la inundabilidad del terreno sobre unidades del terreno homogéneas delimitadas bajo criterios de inhibición de la escorrentía y de la infiltración.

El mapa anexo de *Susceptibilidad del terreno a las inundaciones en el Área Urbana y Suburbana de Campeche* considera tres niveles de susceptibilidad que reflejan al mismo tiempo una valoración indirecta del riesgo, debido a su correlación con el uso del suelo urbano.

Los niveles de susceptibilidad consideran

Alto	Coeficientes de escurrimiento con valores de 1 y 0.9 que corresponden con **zonas residenciales y estructuras urbanas (promedio ponderado) y calles asfaltadas**. Sin uso urbano se presentan en suelos de textura fina (arcillas expandibles) y horizontes casi impermeables cerca o en la superficie y algunas veces los niveles freáticos son muy someros. El drenaje superficial es lento y la velocidad de infiltración en condiciones de saturación es muy baja; por lo tanto su permeabilidad es baja. Rangos de infiltración (Horton) bajo y muy bajo entre 0 y 86 mm/hr.
Medio	Coeficientes de escurrimiento con valores entre 0.25 y 0.37 que corresponden con **áreas sin urbanizar (vegetación escasa)**.Presentan velocidades medias de infiltración en condiciones de saturación y su drenaje varia de medio a alto. Son suelos de profundidad media a profundos de textura media-fina a media gruesa (franco arenosos, franco arcillo-limosos, franco limosos y limos) y de permeabilidad media. Rangos de infiltración (Horton) medio 460 y 725 mm/hr.
Bajo	Coeficientes de escurrimiento con valores de 0.2 y 0.3 que corresponden a **zonas con arborizados, arbustos y pastos en composición dominante o secundaria**. Presentan altas velocidades de infiltración aun en condiciones de saturación. Son suelos de textura gruesa (arenas, gravas y arenas gruesas, corazas calcáreas muy fracturadas) con drenaje bueno y permeabilidad alta. Rangos de infiltración (Horton) alto y medio entre 725 y 990 mm/hr.

Evaluación de la Amenaza de Inundación

El estudio de los riesgos naturales es tan amplio como amplias son las interacciones entre los fenómenos naturales peligrosos o perturbaciones de origen natural y la dinámica de las sociedades humanas. En este marco general y precisando los límites y alcances de la perspectiva geográfica del problema, se parte del concepto de "peligrosidad del lugar", utilizado a partir de la década de los 50 (Calvo, 1984) para explicar, cómo las amenazas naturales, concebidas como peligros latentes y/o potenciales asociados con fenómenos físicos de origen natural, tienen una manifestación en un espacio específico y en un tiempo determinado.

La evaluación de la amenaza considera la severidad con la que un fenómeno perturbador ha ocurrido en el pasado y la probabilidad de que efectos destructivos similares se presenten en el futuro. Técnicamente se expresa como la probabilidad de exceder la ocurrencia de un evento con un nivel de severidad, en un sitio específico y en un periodo de tiempo dado. Una inundación es considerada significativa o severa cuando los tirantes y sus permanencias interrumpen los servicios básicos, dañan la infraestructura pública y privada e interrumpen el abasto y la comunicación vía terrestre, acuática o aérea.

Para predecir la probabilidad de que se presente un evento de una u otra intensidad durante un periodo de exposición, es necesario contar con información histórica completa

y confiable, tanto del número de eventos que han ocurrido en el pasado, como de su intensidad. La intensidad es un concepto referido a los grados y formas en que se manifiesta un fenómeno perturbador dentro de su zona de efectación. Se verifica en campo para diferenciar las zonas potencialmente afectables según su nivel de amenaza y está íntimamente relacionada con la susceptibilidad del terreno.

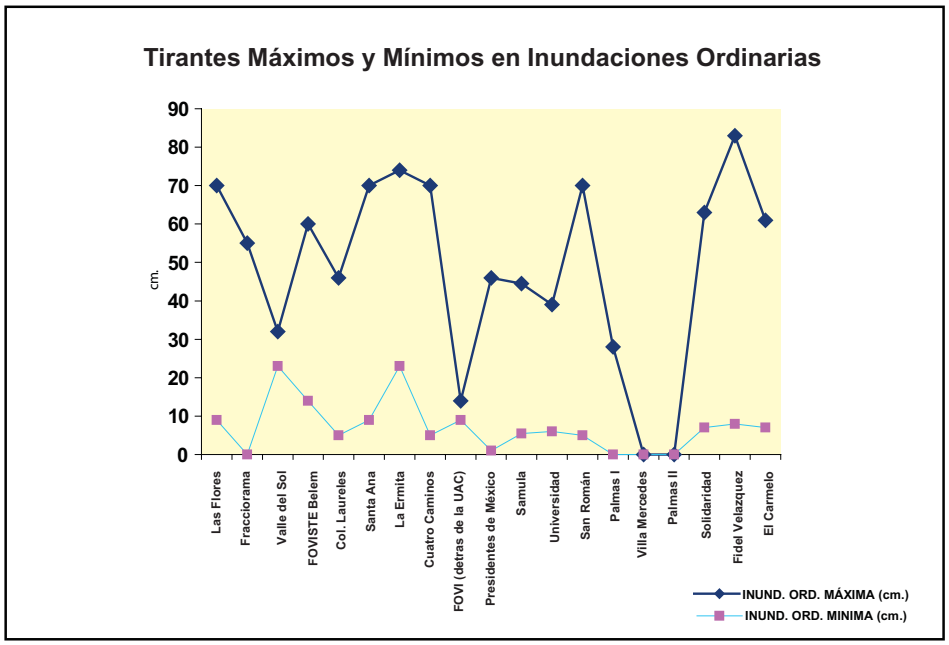
Para evaluar las intensidades promedio y extremas en cuanto a inundaciones en la ciudad de Campeche se realizaron 388 muestreos estratificados georefenciados (GPS Garmin GPS map 76) en campo, ubicando dos o mas puntos representativos por cuadra, sobre las planicies bajas potencialmente inundables. En cada punto se registraron tirantes ordinarios y extraordinarios así como su permanencia y datos morfométicos y morfográficos asociados, como la pendiente en grados, la forma de la pendiente (cóncava, recta o convexa) y la orientación preferente de los flujos por gravedad. Se buscó eliminar la subjetividad utilizando evidencias físicas directas, informantes clave y correlaciones históricas y meteorológicas.

Los muestreos puntuales fueron extrapolados espacialmente en el Sistema de Información Geográfica Arcview 8.3 mediante el modelo Inverse Distance Weight (IDW) que parte del principio de que la predicción de la localización depende de la reducción del peso o importancia del valor a medida que se incrementa la distancia. Este principio respeta la ley geográfica de Tobler (1976) que explica que todo está relacionado entre si, pero los objetos mas cercanos se encuentran siempre más relacionados que los distantes.

Al final se obtiene información areal ponderada que refleja la intensidad por cobertura de afectación a partir de datos puntuales de los tirantes observados durante inundaciones ordinarias y extraordinarias (huracanes), y se expresa cartográficamente en dos mapas *Zonificación de la amenaza ordinaria en el área urbana y suburbana de Campeche* y *Zonificación de la amenaza extraordinaria en el área urbana y suburbana de Campeche*.

Los datos obtenidos de tirantes ordinarios y extraordinarios en centímetros, se muestran por barrios y colonias en los siguientes gráficos (Fig. 17). El gráfico de inundaciones ordinarias muestra importantes diferencias numéricas entre los valores máximos y mínimos de los tirantes observados. Este comportamiento demuestra la variabilidad en la expresión espacio-temporal de los datos y por lo tanto el diferente comportamiento hidrometeorológico de las precipitaciones (lluvias torrenciales tropicales). Por arriba de tirantes de 50 cm resultan afectadas durante la temporada de lluvias: Las Flores, Fracciorama, Belem, Santa Ana, La Ermita, Cuatro Caminos, Solidaridad , Fidel Velásquez y El Carmelo.

Por otra parte la variabilidad de los tirantes extremos durante las inundaciones extraordinarias es mínima. Esto se explica debido a que los aportes pluviales se mantienen durante varios días saturando el suelo y propiciando por tanto situaciones generalizadas de inun-



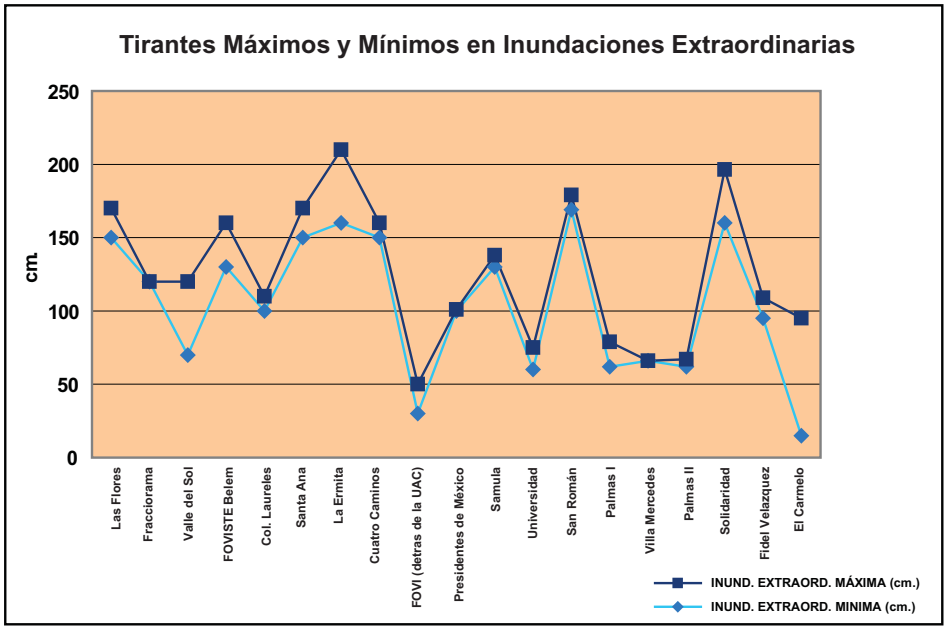


Figura 17. Tirantes máximos y mínimos en inunadaciones ordinarias y extraordinarias.

dación con más de 100 cm de tirantes en: Las Flores, Fracciorama, Valle del Sol, Belem, Laureles, Santa Ana, La Ermita, Cuatro Caminos, Presidentes de México, Solidaridad , Fidel Velásquez y El Carmelo.



5 Modelo Probabilistico y Espacial Inundaciones de Origen Marino y Continental

Antecedentes

México es uno de los países con mayor longitud de línea de costa en el mundo, ésta tiene alrededor de 11 222 km sin contar los perímetros de las islas. El área litoral mexicana en contacto con esta línea de costa cubre 3,149,920 km^2. Diecisiete estados de la república tienen contacto con la costa, entre los que se cuenta un total de 167 municipios costeros en los que habitan más de diez millones de personas.

Al menos una vez cada cinco años, mas del 70% de la costa mexicana esta expuesta al ataque de ciclones tropicales, éstos pueden acercarse a la línea de costa, o bien, penetrar tierra adentro, generando severas inundaciones, ya sea por marea de tormenta o por lluvias intensas, sin dejar de considerar el efecto que produce el viento ciclónico sobre las estructuras que se encuentren al nivel mar o en tierra.

Los recursos pesqueros de la zona aledaña a la ciudad de Campeche juegan un papel importante en la economía de la región, sus costas albergan diversas especies de gran demanda nacional e internacional que actualmente se exportan a los Estados Unidos, lo que en presencia de ciclones tropicales esta actividad se ve severamente afectada, debido al cierre de puertos dadas las malas condiciones que puedan presentarse como consecuencia de un fenómeno meteorológico

Otras actividades, que no solo son de importancia para la región, sino también para el país son las siguientes:

- Cerca del 80% de las exportaciones nacionales salen del país a través de la actividad portuaria.
- El 70% de las reservas probadas de petróleo están debajo del fondo marino, por lo que la extracción del hidrocarburo depende de plataformas marinas.
- Más del 60% del turismo internacional que visita México, tiene como destino algún sitio playero.
- Alrededor del 50% de la generación nacional de energía se realiza en plantas que requieren agua para sus sistemas de enfriamiento, esto obliga a que se sitúen cerca de la costa.

En virtud de la importancia económica de la zona litoral y de los impactos negativos tanto en pérdida de vidas humanas como en infraestructura y actividades económicas ocasionados por ciclones tropicales, tales como Gilberto (1988), Roxana (1995) e Isidoro (2002), es necesario realizar estudios que permitan tanto a las autoridades como a los ingenieros, contar con herramientas que les permitan planear, evaluar y diseñar tanto las estructuras como el desarrollo de las actividades marítimas y tierra adentro.

En los siguientes incisos se presentan los modelos empleados y la metodología, los cuales se han empleado en estudios previos (por ejemplo, Rivera *et al.*, 2004). Así mismo, se presentan los resultados y las conclusiones más relevantes.

Modelos

En este apartado se presenta una descripción general de los modelos numéricos empleados para la estimación de los campos de viento, presiones, altura de ola e inundación por marea de tormenta.

Modelo Paramétrico de Ciclones

El modelo paramétrico de ciclones esta compuesto por módulos de presión, altura de ola y viento. El modelo en su conjunto es una modificación del Hydromet-Rankin Vortex Model (Holland, 1980; y Bretchsneider, 1990).

El módulo de presión está gobernado por la siguiente ecuación:

$$P_t = P_0 + (P_N - P_0)^{e-R/r}$$

donde P_0 es la presión en el centro del huracán, P_r es la presión a una distancia radial r, P_N es la presión normal, y R es el radio ciclostrófico. Las presiones están dadas en mb y las distancias en km.

El gradiente máximo de velocidad del viento U_R (en $km.h^{-1}$), para un ciclón estacionario puede calcularse como

$$Ur=21.8\sqrt{P_N-P_0}-0.5fR$$

donde f es el parámetro de fuerza de Coriolis, $f=2\omega\sin\phi$, ω es la velocidad angular de la Tierra,$\omega=0.2618rad/h$ y ϕ es la latitud. La velocidad del viento sostenida a diez metros sobre el nivel del mar, W, (en $km.h^{-1}$), por un ciclo de movimiento a una distancia r desde su centro

Modelo de Marea de Tormenta

Descripción del Modelo

El objetivo de este modelo es el cálculo de la variación de la elevación de la superficie libre del mar, inducida por la acción del viento y la disminución o aumento en la presión atmosférica, en este caso, generados por un ciclón tropical.

Las expresiones que gobiernan un fluido tridimensional Newtoniano, son las bien conocidas ecuaciones de Navier-Stokes:

$$\rho\frac{\delta\bar{v}}{\delta\tau}+\rho(\bar{v}.\overline{\nabla})\,v=\rho\bar{g}-\text{grad}(p)+\mu\nabla^2\bar{v}+\frac{1}{3}\mu\,\text{grad}(\text{div}\bar{v})$$

y la de continuidad:

$$\frac{\delta u}{\delta x}+\frac{\delta v}{\delta y}+\frac{\delta w}{\delta z}=0$$

Donde g es la aceleración debida a la gravedad, ρ la densidad del agua, μ la viscosidad dinámica, *t* el tiempo y *u*, *v* y *w* las componentes de la velocidad en las direcciones x, y, z, respectivamente.

Condiciones Iniciales y de Trontera

Las condiciones iniciales son la sobrelevación del agua y las velocidades en las direcciones x e y en el dominio del modelo para el instante , a saber

$$Z_{t=0}=Z_0(x,y)$$
$$U_{t=0}=U_0(x,y)$$
$$V_{t=0}=V_0(x,y)$$

Sin embargo las funciones Z_0, U_0, y V_0 normalmente no son conocidas a priori, por lo que se asumen iguales a cero, y dado que el movimiento modelado es periódico se obtiene una solución estable después de simular varios ciclos.

Fronteras de Tierra

En general, se establece que la velocidad normal es cero. En soluciones numéricas algunas veces se establece que la velocidad en el dominio pueda ser distinta de cero, esta consideración se puede tomar para absorber errores de discretización.

Cuando no se consideran los términos disipativos en el sistema, una condición deslizante puede ser impuesta, la cual no restringe la velocidad tangencial aplicada.

Cuando existen los términos disipativos en el sistema, en la dinámica de fluidos viscosos, una hipótesis viscosa cerca de una pared sólida es adoptada, estableciendo que tanto la velocidad normal como tangencial, son asumidas como cero en la frontera

Fronteras de Tierra Móviles

Cuando se presentan mareas de tormenta o meteorológicas, ocurre una inundación, la cual debe ser considerada dentro del cálculo, en este caso las condiciones de frontera sobre la línea de costa no cambian, la única consideración que debe establecerse es que el muro vertical mencionado en el párrafo anterior cambia de posición durante todo el tiempo de modelado la velocidad normal a la frontera es suficientemente pequeña, ésta puede ser considerada como cero, imaginando una pared virtual vertical ubicada en la frontera, ésta puede estarse moviendo durante el proceso de cálculo.

Fronteras Abiertas

Para delimitar el dominio computacional, una frontera artificial tiene que ser establecida. En esta frontera es necesario establecer la sobrelevación que se genera por efecto de aumento o caída de presión atmosférica más el incremento de marea astronómica en caso de que existiera.

La frontera en mar abierto es una línea ficticia que separa una porción del mar del dominio de análisis, esta línea puede en ocasiones ser recta o bien, puede tomar cualquier forma, esto dependerá del dominio requerido a analizar.

En una frontera abierta, la componente de la corriente normal a cualquier arista de una malla es Un, dicha velocidad es calculada de la siguiente manera

$$Un = \frac{C}{H}\varsigma$$

donde

$$C = \sqrt{g \times h}$$

La sobrelevación del nivel medio del mar en la frontera abierta es obtenida a partir de la siguiente expresión:

$$\eta = \eta^T + \eta^M$$

donde h^T es la elevación debida a las mareas astronómicas y η^M es la elevación debida a efectos meteorológicos (vientos ciclostróficos y caída de presión atmosférica por efecto de ciclones tropicales o frentes fríos).

Condición de Frontera en el Fondo del Mar

La condición de frontera en el fondo está dada por los esfuerzos cortantes debidos a la fricción en el fondo del mar, asimismo las velocidades horizontales en el fondo son asumidas como cero, es necesario evaluar dichos esfuerzos a una distancia Dz medida a partir del fondo. Los esfuerzos cortantes en el fondo se pueden evaluar mediante una función cuadrática de las velocidades horizontales, de ahí que la relación de éstas puede ser expresada de la siguiente manera.

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2}}{C_b}$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2}}{C_b}$$

donde C_b es el coeficiente de fricción de Chezy del fondo, ρ es la densidad del agua, *ub* y *vb* son las velocidades en la direcciones *x* e *y* cerca del fondo (alrededor de 1.0 m), el valor de *Cb* depende de la rugosidad, profundidad y del material del fondo, éste varía entre 45 y 70 $m^{1/2}s^{-1}$ o bien puede ser evaluado a partir de la ecuación de Manning

$$C = H^{1/6} n^{-1}$$

donde n varía entre 0.015 y 0.04

Estas ecuaciones son las que se han empleado para estimar la sobrelevación del nivel medio del mar debido a la presencia de ciclones. La solución del sistema se ha realizado con un esquema en diferencias finitas del tipo implícito de dirección alternante (ADI por sus siglas en inglés).

Modelo de Propagación de Ondas

Hipótesis

El modelado de la propagación del oleaje se realiza bajo las siguientes hipótesis:

Fluido

- No viscoso
- Incompresible
- Densidad constante

Flujo

- Irrotacional
- Estacionario

Dinámicas

- Presión constante en la superficie libre
- No se considera la acción del viento
- No se consideran efectos de fuerza de Coriolis

Contornos

- Las variaciones verticales del fondo son pequeñas comparadas con la longitud de onda

Descripción del Modelo

El problema de la propagación de ondas sobre batimetría irregular es tridimensional e involucra complicadas condiciones de contorno no lineales. Para la simplificación de este problema Berkhoff (1972) desarrolló un modelo promediado verticalmente con en el que pueden estimarse las propiedades de las ondas progresivas lineales. Este modelo se conoce como la ecuación de la pendiente suave la que, en función del desplazamiento de la superficie libre $\eta(x,y)$, puede escribirse como

$$\nabla(ccg\nabla\eta)+\sigma 2\frac{C_g}{c}=0$$

donde

$$\nabla=\frac{\delta}{\delta x_i}\ i=1,2$$

c celeridad de la onda

c_g celeridad de grupo

La profundidad del agua queda definida por una función h(x,y), la cual se relaciona con σ, la frecuencia angular, mediante la ecuación

$$\sigma^2= gktankh$$

en la que g es la aceleración debida a la gravedad y k es el número de onda local. Desde este punto de vista, el perfil de la onda propagándose viene dado por

$$\eta = A(x,y)\, e^{i\sigma t}$$

siendo la amplitud compleja con información sobre la fase y la amplitud real de la onda.

Metodología

Con el fin de cumplir con el objetivo planteado al inicio de este texto, se realizaron los siguientes trabajos:

- Recopilación y actualización de la base de datos de huracanes
- Calibración de los modelos
- Análisis estadístico
- Análisis de marea de tormenta

Los cuales se detallan a continuación.

Base de Datos

El Instituto de Ingeniería de la UNAM cuenta con un registro histórico de ciclones tropicales, que cubre un período de 1949 a 2004, éste fue construido con datos publicados por la NOAA de los Estados Unidos. Los boletines que publica dicho organismo contienen información de: fecha (día, mes y año), presión central de la tormenta en milibares y referida a su posición geográfica (latitud y longitud), velocidad máxima del viento sostenida (duración mínima de un minuto) medida a diez metros sobre la superficie libre del mar en km/h, dirección de la traslación y radio ciclostrófico del ciclón tropical.

En algunas ocasiones, los registros históricos no cuentan con ciertos valores que son necesarios para la implementación de los modelos numéricos, tal es el caso de la presión atmosférica que no está registrada en años anteriores a 1979, para cubrir este problema fue necesario determinar las expresiones paramétricas y , mismas que son aplicables para las vertientes del Pacífico y del Atlántico respectivamente.

$$P_o = 1019.08 - 0.182 V_v - 0.0007175 V_v^2$$

$$P_o = 1017.45 - 0.1437 V_v - 0.00088 V_v^2$$

Donde P_0 es la presión central del huracán en milibares y *Vv* es la velocidad del viento en km/h con duración mínima de un minuto reportada en los boletines meteorológicos.

En algunos boletines tampoco se reporta el radio ciclostrófico por lo que también se determinó una ecuación que permitiera estimar dicho parámetro en función de la presión central del ciclón, dicha ecuación es

$$R=0.4875P_0-413.01$$

Siendo R el radio ciclostrófico en kilómetros y P_0 la presión central en milibares. La ecuación solo es válida para presiones mayores a 888 mb.

Lo único que restaba para completar la base de datos era contar con toda la información confinada en una malla estadística, cuya resolución es de 1/12º por 1/12º. Para tal efecto se interpoló linealmente toda la información, esto fue necesario debido a que los boletines reportan la información cada seis horas y en ocasiones un huracán puede trasladarse hasta 2º, en ese lapso, con lo que no se satisface la resolución de la malla.

A partir de la base de datos es posible analizar directamente la vulnerabilidad oceanográfica, en este caso se decidió cruzar la información del número de ciclones tropicales que ocurren dentro de la malla estadística con las horas totales de afectación y la intensidad de los ciclones clasificados según se acercan a menos de 5º, 1º y los que tocan tierra.

Con base en lo anterior se obtiene la tabla 24.

Por lo que respecta a la intensidad de los ciclones, se han clasificado según la escala sidor-Simpson (TD = Depresión tropical, TT = Tormenta Tropical, y la intensidad de los huracanes se clasifica de 1 a 5). Es interesante remarcar que al menos tres ciclones al año se acercan a la costa mexicana, afectando el litoral por cerca de 59 horas.

Calibración de los Modelos

Modelo Paramétrico de Ciclones

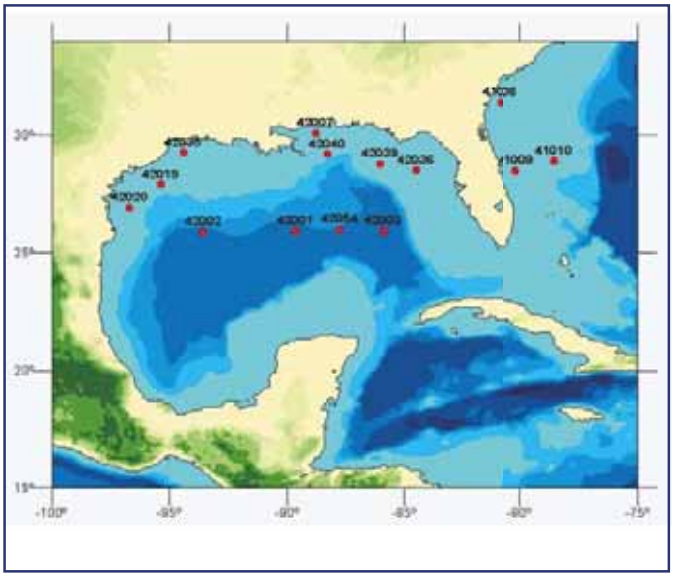
Para calibrar éste, se utilizó la información de 29 ciclones, cuya trayectoria ocurrió a menos de 3º de al menos una de las diez boyas que el Data Buoy Center (NDBC) de la NOAA tiene en el Golfo de México, (los números de identificación de estas boyas son: B41009, B41010, B42001, B42002, B42003, B42007, B42020, B42036, B42039 y B42040; ver http: //seaboard.ndbc.noaa.gov/) (Fig.18).

Los resultados del modelo (presión, altura de ola y velocidad del viento) se muestran en la figura 19, para los huracanes Floyd e Irene. Los datos medidos corresponden a los de la boya 41009 para el 08-10/09/1999 y el 15-17/10/1999, respectivamente.

Tabla 24. Promedios anuales de horas de afectación y número de huracanes para el Océano Atlántico.

Intensidad	Océano Atlantico		México					
			Tierra		1°		5°	
	I (h)	N	*I*(h)	N	*I*(h)	N	*I*(h)	N
DT	497.77	0.02	14.72	0.45	27.85	0.34	85.58	0.30
TT	763.36	4.11	9.17	0.36	25.58	0.72	101.89	1.53
1	324.34	2.40	1.58	0.13	5.77	0.23	27.06	0.58
2	136.19	1.13	1.13	0.08	3.51	0.11	13.36	0.23
3	77.77	1.23	0.45	0.04	2.26	0.08	9.40	0.26
4	52.30	1.00	0.45	0.08	1.92	0.11	7.81	0.26
5	7.70	0.32	0.11	0.02	0.79	0.09	3.62	0.17
Total	**1859.43**	**10.21**	**27.62**	**1.15**	**67.70**	**1.68**	**248.72**	**3.34**

I es la afectación promedio (h); N es el número de huracanes



Para la presión mínima, la velocidad del viento máxima y la altura de ola máxima, considerando los 29 huracanes, las desviaciones estándar resultaron de 9 mb, 6.3 km/h y 2.4 m, respectivamente.

Es de notar que aunque el modelo paramétrico presenta ciertas diferencias respecto de los valores medidos, en general ofrece una muy buena representación de los fenómenos asociados a la ocurrencia de un ciclón tropical.

Modelo de Marea de Tormenta

El efecto que puede ocasionar el viento y la caída de la presión atmosférica, sobre el nivel medio del mar, puede ser de dimensiones catastróficas, es por eso necesario contar con las herramientas necesarias que permitan mitigar los efectos destructivos de un ciclón tropical a lo largo de la línea de costa.

La ciudad de Campeche ha sido azotada por fenómenos meteorológicos de gran escala, que han dejado a su paso perdidas de vidas humanas y materiales. Para este estudio se presenta la modelación de la marea de tormenta por efecto de dos ciclones tropicales, que da-

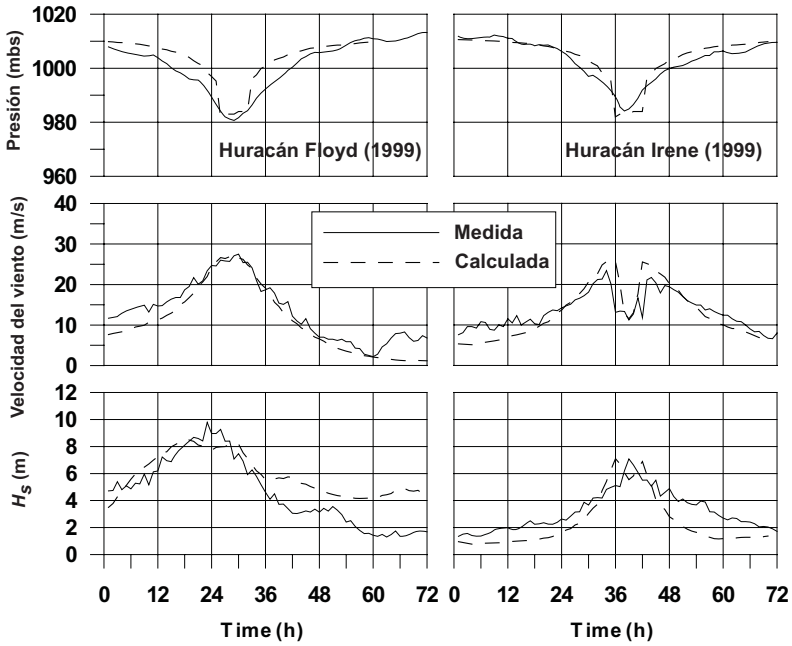


Figura 19. Comparación entre los datos medidos y calculados (NDBC, 41009)

das las características de sus trayectorias, se han seleccionado, éstos son, el ciclón tropical Carmen (1974) e Isidoro (2002) cuyas trayectorias se muestran en las figuras 20 y 21 .El desarrollo de la marea de tormenta para cada uno de los casos se describe a continuación.



Figura 20. Trayectoria del Ciclón Tropical Carmen



Figura. 21. Trayectoria del Ciclón Tropical Isidoro

Caso Ciclón Tropical Carmen

La evolución de la marea de tormenta para este se caso se muestra en las figuras 22, 23 y 24 donde se aprecia la influencia que tuvo dicho ciclón sobre la ciudad de Campeche, presentándose una máxima sobrelevación de 0.6 m e intensidades máximas de corrientes de 0.6 m/s, tal y como se muestra en las figuras arriba mencionadas, la figura 22 representa la sobrelevación del nivel medio cuando el fenómeno se aproxima a la ciudad de Campeche,

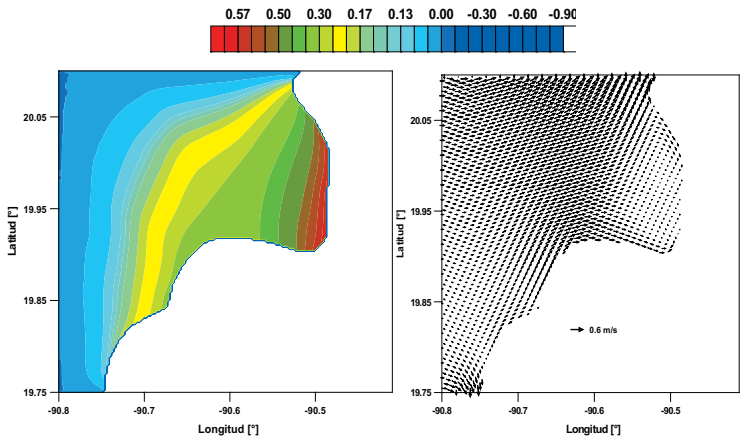


Figura 22. Marea de tormenta y velocidades de corriente, antes del arribo del ciclón tropical Carmen a la ciudad de Campeche

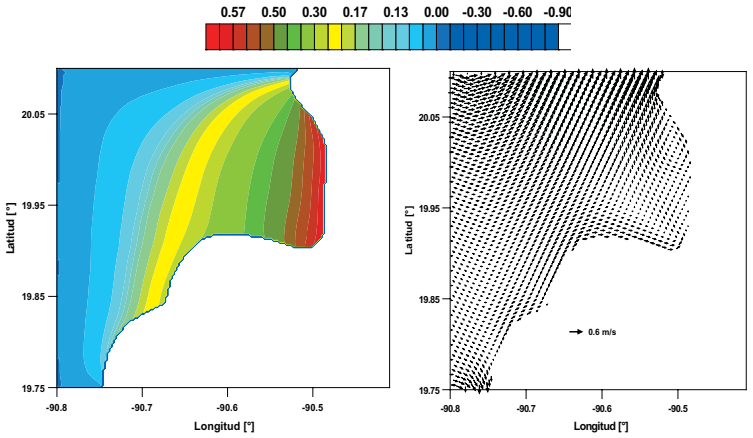


Figura 23. Marea de tormenta y velocidades de corriente, en el arribo del ciclón tropical a la ciudad de Campeche

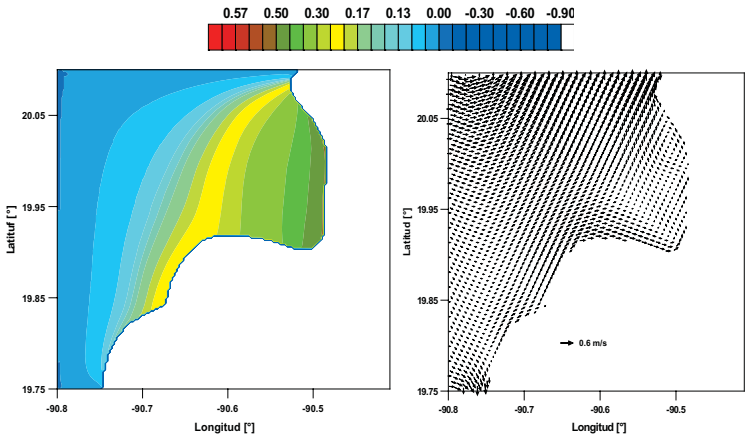


Figura 24. Marea de Tormenta y velocidades de corriente, cuando el ciclón tropical se aleja de la ciudad de Campeche

la figura 23 se muestra la máxima sobrelevación, cuando el ciclón se encuentra sobre la ciudad de Campeche, y la figura 24 cuando el ciclón se aleja e inicia el decaimiento de la marea.

Caso Ciclón Tropical Isidoro

Uno de los ciclones tropicales mas devastadores que ha sufrido el estado de Campeche, es el ciclón tropical Isidoro, que presentó rachas de viento que oscilaron desde los 85 km/h, hasta los 205 km/hr, según registros del Servicio Meteorológico Nacional. Dicho meteoro, al tocar tierra sobre la península de Yucatán se clasificó Clase III, sin embargo éste se estacionó sobre la Península de Yucatán, lo cual lo debilitó a depresión tropical, no obstante, el fenómeno continuó generando fuertes fluctuaciones en el nivel del mar, dadas las características de la incidencia del viento ciclostrófico sobre la línea de costa, lo que ocasionó la marea de tormenta que se muestra en las figuras 25, 26 y 27, donde se aprecia la gran extensión de la marea, presentándose una máxima sobrelevación de alrededor de los 2.15 m; en la figura 25 se aprecia el inicio del desarrollo de la marea, la figura 26 muestra cuando se presenta la máxima y la figura 27 el decaimiento de la misma.

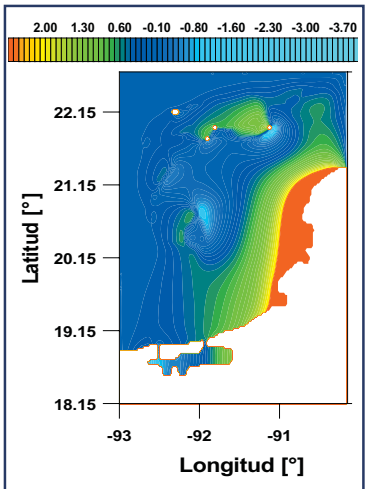


Figura 25. Marea de tormenta y velocidades de corriente, antes del arribo del ciclón tropical Isidoro a la Península de Yucatán.

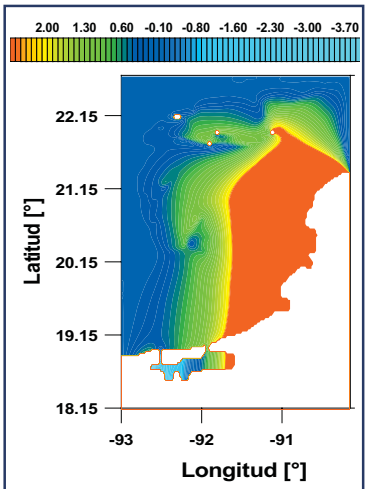


Figura 26. Marea de tormenta, en el momento de estacionarse sobre la Península de Yucatán el ciclón tropical Isidoro.

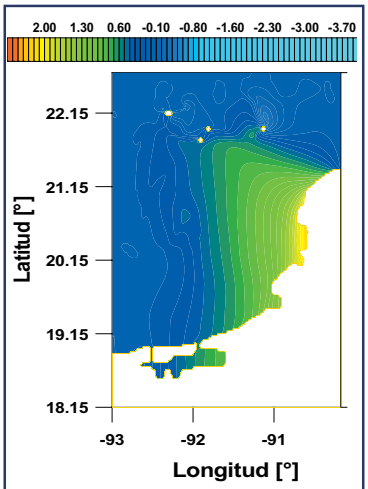


Figura 27. Marea de tormenta cuando el ciclón tropical Isidoro se aleja de la Península de Yucatán.

Análisis Estadístico

Para la generación de todos los mapas en que se muestran los efectos de los ciclones tropicales (presión, viento, oleaje e inundación por marea de tormenta) se llevaron a cabo los siguientes pasos.

Se seleccionó un área de estudio, que tomara como origen de sistema de referencia la Ciudad de Campeche y a partir de ésta se tomaron en cuenta 500 km de radio, que es aproximadamente la zona de influencia de un ciclón tropical. En la tabla 25 se presenta el área de estudio

Tabla 25. Área de estudio para la ciudad de Campeche

Punto	Longitud	Latitud
Inferior derecho	-88°0´0˝	18°0´0˝
Superior derecho	-88°0´0˝	23°0´0˝
Superior izquierdo	-93°0´0˝	23°0´0˝
Inferior izquierdo	-93°0´0˝	18°0´0˝

Se analizó la base de datos de ciclones tropicales (corregida y completada) del Océano Atlántico de 1949 a 2004 para determinar que ciclones han penetrado en el área de estudio.

Los resultados de esta búsqueda se muestran en las tablas 26 y 27: la primera muestra cuantos ciclones por intensidad han afectado la zona de estudio, mientras que en la segunda se presenta la lista los 52 ciclones correspondientes, con el año, número de identificación, nombre e intensidad máxima alcanzada en el área de estudio.

A partir de los datos proporcionados por las tablas 26 y 27, se agruparon los ciclones tropicales por año, para poder llevar a cabo el análisis estadístico. En la figura 28 se presenta un ejemplo de las trayectorias de ciclones presentados en el océano atlántico para en año 1988.

Tabla 26. Clasificación de los huracanes en la zona de estudio

Número de huracanes presentados en la zona de estudio: 52						
Número de huracanes por clase						
Depreseión Tropical	Tormenta Tropical	Huracán Clase 1	Huracán Clase 2	Huracán Clase 3	Huracán Clase 4	Huracán Clase 5
20	20	4	5	1	2	0
Número de horas de afectación total por clase						
Depreseión Tropical	Tormenta Tropical	Huracán Clase 1	Huracán Clase 2	Huracán Clase 3	Huracán Clase 4	Huracán Clase 5
552	594	168	126	42	36	

Tabla 28. Huracanes que se presentaron en la zona de estudio de 1949 a 2004

ID	Año	Nombre	Int	ID	Año	Nombre	Int	ID	Año	Nombre	Int
747	1949	S/ NOMBRE	2	946	1969	LAURIE	1	1141	1990	DIANA	2
759	1950	ITEM	2	955	1970	ELLA	3	1167	1993	ARLENE	1
766	1951	CHALIE	4	957	1970	GRETA	1	1173	1993	GERT	2
770	1953	GEORGE	2	963	1971	CHLOE	1	1196	1995	OPAL	3
787	1955	S/ NOMBRE	2	965	1971	EDITH	2	1198	1995	ROXANNE	3
813	1956	HILDA	4	974	1972	AGNES	1	1204	1996	DOLLY	2
815	1956	JANET	4	982	1973	BRENDA	2	1234	1998	MITH	2
818	1956	S/ NOMBRE	1	993	1974	CARMEN	3	1246	1999	KATRINA	1
819	1956	ANNA	1	1001	1975	CAROLINE	1	1254	2000	GORDON	1
822	1956	DORA	2	1003	1975	ELOISE	2	1258	2000	KEITH	2
824	1956	FLOSSY	2	1043	1979	HENRI	2	1265	2001	CHANTAL	1
831	1957	ESTHER	1	1045	1980	ALLEN	6	1286	2002	ISIDORE	5
856	1960	ABBY	1	1052	1980	HERMINE	2	1291	2003	BILL	1
898	1964	S/ NOMBRE	1	1118	1988	DEBBY	1	1292	2003	CALUDETTE	2
899	1965	S/ NOMBRE	1	1121	1988	FLORENCE	0	1301	2003	LARRY	1
903	1965	DEBBIE	1	1121	1988	FLORENCE	2				
913	1966	INEZ	6	1122	1988	GILBERT	4				
917	1967	BEULAH	4	1129	1989	CHANTAL	1				
921	1967	FERN	2	1136	1989	JERRY	2				

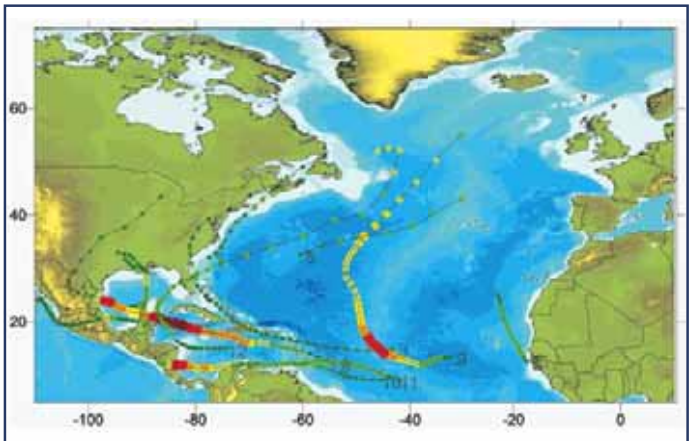


Figura 28. Trayectorias de los ciclones presentados en el Océano Atlántico para 1988.

Para cada ciclón tropical, se aplicaron los modelos matemáticos para determinar los valores de los campos de presión, viento, altura de ola y período a lo largo de la trayectoria del fenómeno a un intervalo de 36 minutos. El modelo matemático de inundación por marea de tormenta se alimenta de los resultados de los modelos de presión y de viento, pero por la precisión requerida en estos casos, el intervalo de cálculo se redujo a 15 minutos.

A manera de ejemplo, en las figuras 29 y 30 se muestran los campos de presión y viento calculados por los modelos numéricos, éstos corresponden al ciclón tropical Gilbert (1988), que ha sido el de mayor intensidad que se ha presentado en el país.

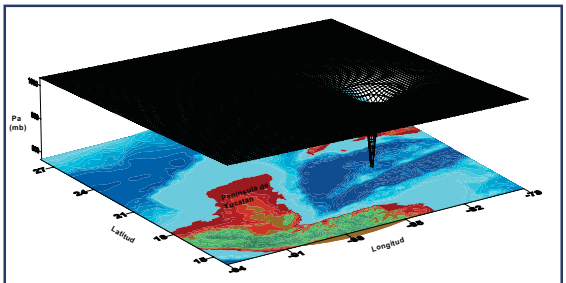


Figura 57. Campo de presiones generado en un momento dado.

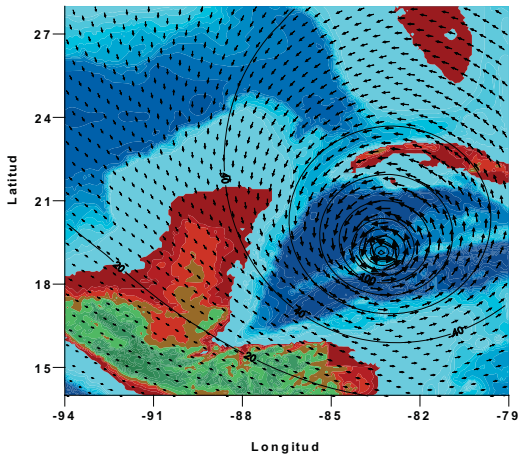


Figura 30. Campo de vientos en un momento dado.

Al calcular los campos de presión, viento, altura de ola y período a lo largo de la trayectoria de cada ciclón, se van acumulando los valores máximos de cada uno de los parámetros. En la figura 31 se presenta como ejemplo el campo de velocidades máximas de vientos generados por el ciclón tropical Gilberto (1988).

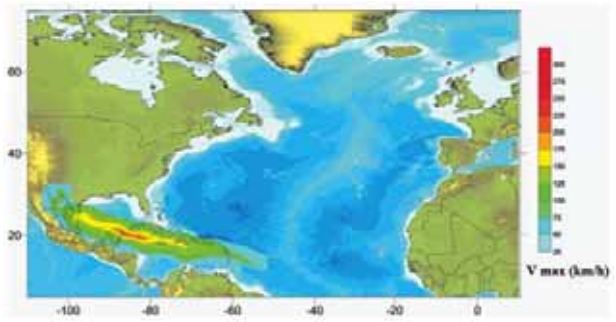


Figura 31. Campo de vientos máximos generados para un huracán.

Al terminar del cálculo de todos los mapas de los huracanes correspondientes a un año, se genera un mapa de vientos máximos acumulados para todo el año (Fig.32).

En este punto, se tienen mapas anuales de valores extremos para todos los parámetros de cálculo: viento, oleaje, presión e inundación por marea de tormenta.

Para cada nodo de la malla de cálculo se realiza un análisis estadístico, empleando la distribución extremal de Gumbel, ecuación , la cual permite obtener los valores de cada parámetro para los diferentes períodos de retorno, así como la probabilidad de ocurrencia y el período de retorno para cada intensidad del ciclón tropical.

$$G(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{(\chi - \lambda)}{\delta}\right)\right]$$

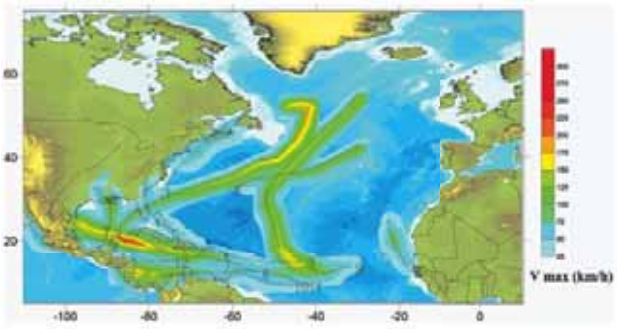


Figura 32. Mapa de vientos máximos acumulados para todo el año 1988.

Aplicando la distribución de Gumbel a todos los puntos de la malla se pueden generar los mapas extremales de probabilidad de ocurrencia y período de retorno para cada clase de ciclón tropical; y mapas de oleaje, viento, presión e inundación por marea de tormenta para cada período de retorno calculado.

A partir del análisis general de los datos extremales de viento para toda el área de estudio se puede encontrar el período de retorno y la probabilidad de ocurrencia para cada clase de huracán en toda la región.

donde λ y δ son conocidos como los parámetros de localización y escala, respectivamente.

Para la validación del uso de la distribución de Gumbel, se analizó el ajuste de los valores calculados a los de la distribución teórica para diversos puntos de control, (Fig. 33), en el Golfo de México y Mar Caribe. En la figura 34 se muestra este ajuste para el caso de oleaje.

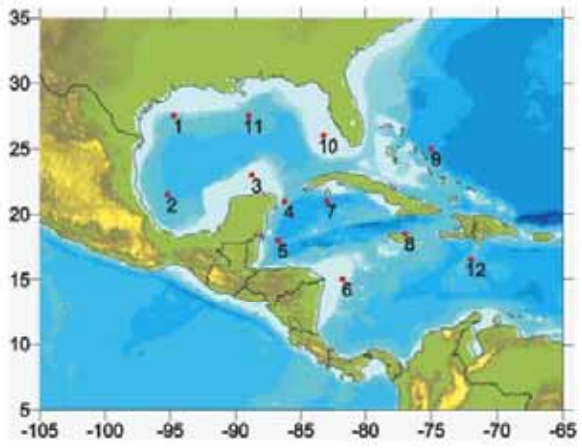


Figura 33. Puntos de control para la distribución de Gumbel en el Golfo de México y Mar Caribe.

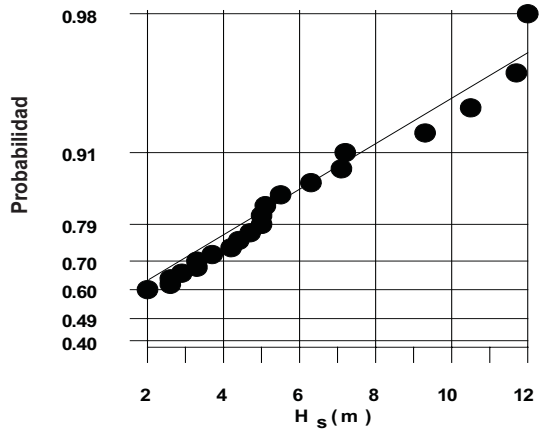


Figura 34. Ajuste de la distribución Gumbel para oleaje.



6 Resultados

En este apartado se muestran, como resultados finales, los mapas generados según lo expuesto en los capítulos anteriores.

Campo de Viento

Cuando se lleva a cabo un análisis estadístico es necesario contar con una muestra confiable de datos, que permita establecer con suficiente claridad el comportamiento de un evento, así pues para el caso que nos ocupa, y dada la importancia de la calidad que deben tener los resultados, es necesario que el área de estudio cuente con suficientes ciclones tropicales, de considerar únicamente un radio de 50 km alrededor de la ciudad de Campeche se podría constatar que en esa área la presencia de ciclones tropicales es escasa, lo cual generaría resultados no confiables.

La figura 35 muestra las máximas intensidades de viento calculadas mediante los modelos numéricos antes mencionados, los cuales utilizan la información de la base de datos histórica de ciclones tropicales de 1949 a 2004. En ésta se aprecia que debido a la poca ocurrencia de ciclones tropicales de gran intensidad, en la zona de estudio, no se producen velocidades de viento de mas de 100 km/hr, para un período de retorno de 10 años, no así, para períodos de 25, 50 y 100 años, en los cuales se presentarían en la zona aledaña a la ciudad de Campeche, intensidades de viento máximas de 120, 150 y 175 km/hr respectivamente. (Figs. 36, 37 y 38).

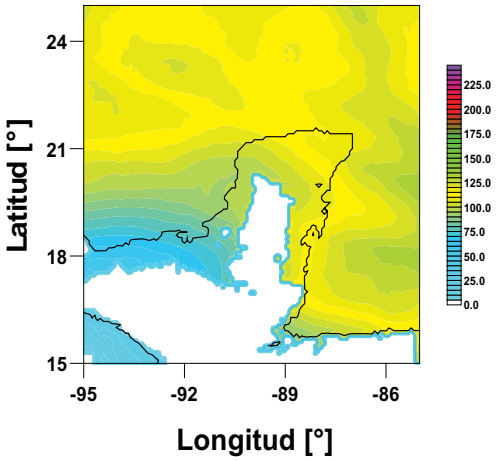


Figura 35. Intensidad de viento para un período de retorno T = 10 años.

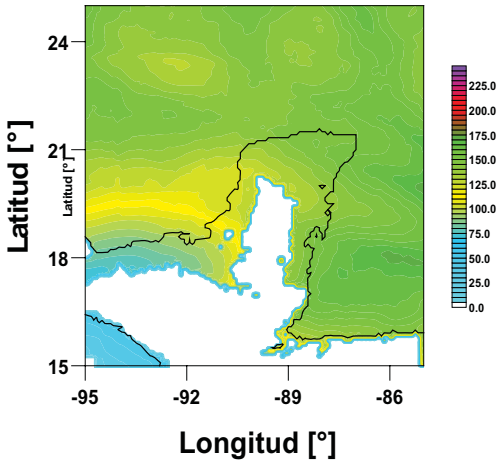


Figura 36. Intensidad de viento para un periodo de retorno T = 25 años.

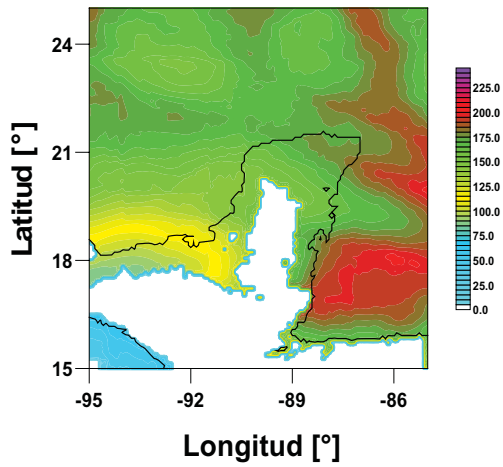


Figura 37. Intensidad de viento para un período de retorno T = 50 años.

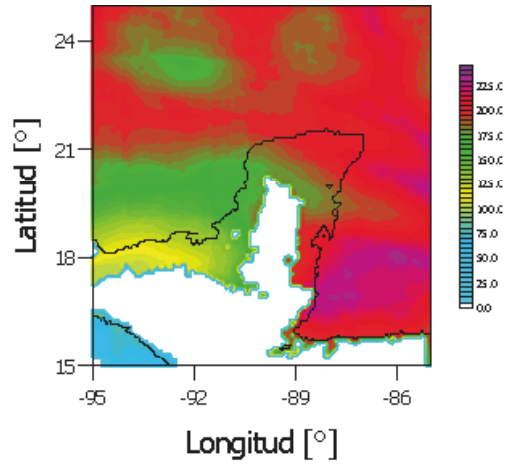


Figura 38. Intensidad de viento para un período de retorno T = 100 años.

Cabe aclarar que los resultados presentados son probabilísticos, que están basados en el registro histórico de ciclones tropicales, sin embargo con base en ellos, es posible generar herramientas que permitan tomar decisiones, ya sean de prevención o de alertamiento temprano en presencia de ciclones tropicales.

Campo de Oleaje

La figura 39 muestra las máximas alturas de ola calculadas mediante los modelos numéricos antes mencionados, utilizando la información de la base de datos de ciclones tropicales de

1949 a 2004. En esta se aprecia que debido a las características batimétricas y a la poca ocurrencia de ciclones tropicales de gran intensidad, no se producen olas de más de 10 metros en la zona aledaña a la Ciudad de Campeche.

En las figuras 40 a 43 se observa el oleaje calculado con la distribución de probabilidad de Gumbel para periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años, en las cuales se observa que para un período de retorno de 100 años, se puede llegar a presentar una altura de ola máxima de 15 m, lo cual concuerda con las ilustraciones de campos de viento arriba descritas.

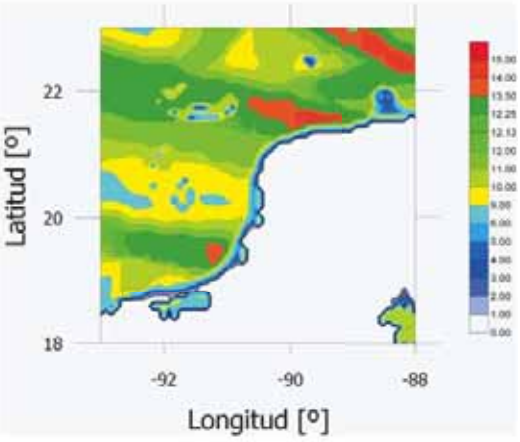


Figura 39. Altura de ola máximas calculadas para la zona de análisis.

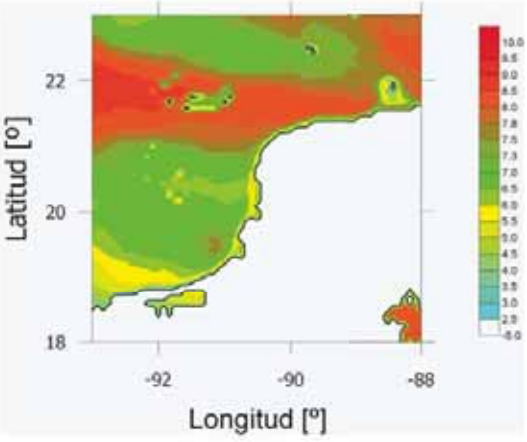


Figura 40. Campo de oleaje, periodo de retorno de 10 años.

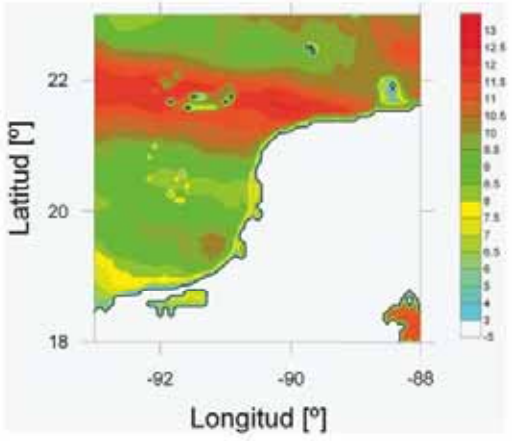


Figura 41. Campo de oleaje, periodo de retorno de 25 años.

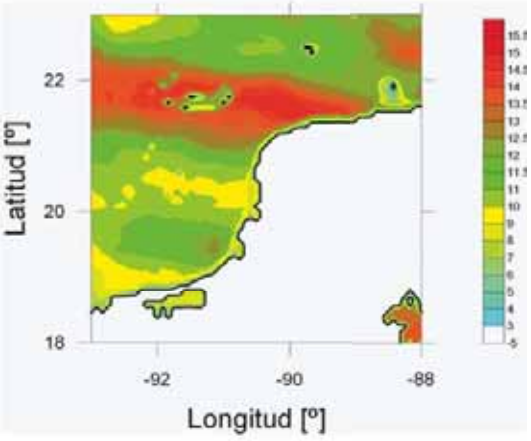


Figura 42. Campo de oleaje, periodo de retorno de 50 años.

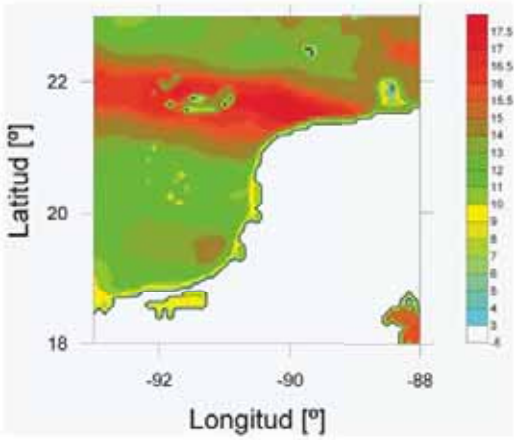


Figura 43. Campo de oleaje, periodo de retorno de 100 años.

Modelaje Matemático de la Marea de Tormenta a Nivel Local

En este apartado se presenta la modelación matemática del fenómeno de marea de tormenta en la ciudad de Campeche cuando ésta fue afectada por los huracanes Carmen (1974) e Isidoro (2002). Se determinan los patrones y la magnitud de las velocidades, así como la sobrelevación del nivel medio del mar para diferentes instantes de tiempo.

Se presenta también las descripciones matemáticas del modelo de marea de tormenta y del sistema de generación de malla, así como la definición de los datos necesarios para evaluar el fenómeno de marea de tormenta en la Ciudad de Campeche.

Descripción del Modelo

El modelo desarrollado resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en la vertical por medio de un esquema de volumen finito, trabajando sobre una malla de tipo jerárquica (Quadtree).

Descripción del Sistema de Mallado

En este apartado se presenta el tipo de mallas utilizado, el cual, es del tipo jerárquico, lo que permite definir de antemano zonas de alto interés (*p.e.* una ciudad, una zona determinada de la costa) donde se resuelven las ecuaciones de gobierno con una gran definición y zonas con bajo interés donde no es necesario una gran resolución en los resultados, esto permite mejorar el tiempo de cómputo notablemente sin menosprecio de la calidad de los resultados obtenidos.

Las mallas no-estructuradas, discretizan el dominio computacional en elementos planos o prismáticos. La provisión de una malla de alta calidad con fronteras adecuadas es de importancia para la solución numérica de cualquier flujo, ya sea en dos o tres dimensiones, para una eficiencia computacional, es importante que el generador de malla sea automático y rápido, que facilite el remalleo, que permita un refinamiento local de la malla en regiones de interés, tales como en las líneas de costa, donde es importante saber la evolución espacial y temporal del nivel medio del mar, o bien, en cualquier otro lugar donde los gradientes de

velocidad sean altos. El esfuerzo de muchos investigadores ha estado dirigiéndose hacia el desarrollo de generadores de mallas, los cuales presten atención a reunir los requerimientos antes mencionados.

Las mallas jerárquicas ofrecen la flexibilidad de generar mallas no-estructuradas, donde la información es almacenada en un árbol de datos. Las mallas Quadtree son mallas bidimensionales con cuadriláteros en su interior, mientras que las mallas Octree son tridimensionales con hexaedros en su interior, en ambos casos, las mallas son generadas a partir de una subdivisión recursiva para todo el dominio de análisis. Cada subdivisión produce cuatro nuevos cuadriláteros u ocho nuevos hexaedros, según sea el caso. Las mallas son irregulares, éstas contienen paneles de diferente tamaños, así es posible tener alta resolución en las cercanías de las fronteras y una robustez en el resto del dominio.

Una malla Quadtree ha sido seleccionada para este trabajo debido a que éstas tienen una estructura de árbol, lo que permite un acceso rápido a la información de las celdas, son rápidas de generar y tienen aplicaciones de adaptabilidad, además, las mallas Quadtree pueden ser generadas automáticamente sobre cualquier frontera, no importa cuan compleja o irregular ésta sea, y puede proporcionar regiones de muy alta resolución donde sea requerido, la única limitante que tienen, son los recursos de computo con los que se cuente.

En este proyecto un sistema de malleo Quadtree es empleado.

Los principales beneficios de este tipo de malla son:

- Computacionalmente eficientes en su construcción
- Pueden ser generados sobre cualquier dominio
- Las ecuaciones de gobierno no requieren transformación
- Una malla de alta densidad es automáticamente generada a lo largo de la frontera, o bien, en cualquier otro lugar de interés.
- Proporciona una estructura ordenada de datos, para la discretización de las ecuaciones de gobierno.

Existen dos inconvenientes en el uso de este tipo de mallas

- Nodos colgantes son producidos en la interfase entre celdas de distinto nivel
- Con base en el punto de arriba es necesario llevar a cabo una regularización de la malla.

Los nodos colgantes requieren interpolaciones complicadas cuando se discretizan las ecuaciones de gobierno, los cálculos de interpolación son simplificados mediante la especificación de un máximo nivel de diferencia, éste debe de ser de uno entre celdas adyacentes, esto es verificado después de que la malla Quadtree ha sido generada. La malla Quadtree

es por lo tanto considerada en dos partes, generación Inicial, la cual, se lleva a cabo sobre los puntos sembrados y la regularización de ésta, donde la malla es refinada hasta que se cumpla la relación 2:1 entre celdas adyacentes.

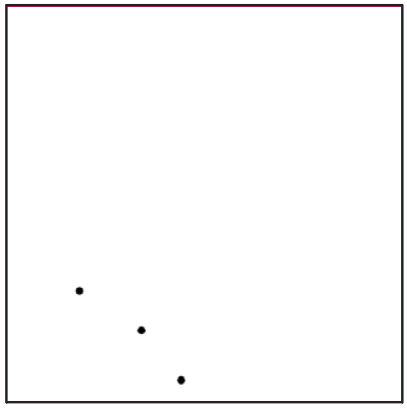


Figura 44. Dominio de cálculo.

Las mallas Quadtree son primeramente generadas reescalando el dominio físico dentro de un dominio cuadrado unitario. El cuadrado unitario es entonces dividido en cuatro cuadrantes, obligatorios, cada cuadrante es dividido recursivamente en cuatro cuadrantes adicionales, hasta que un criterio de subdivisión sea alcanzado. El dominio de flujo es discretizado de tal manera que el máximo nivel de refinamiento, dependa del número de puntos sembrados. Para mostrar mejor el algoritmo de la generación de la malla se presenta el siguiente ejemplo de un simple sembrado de puntos. Considerando el dominio cuadrado unitario que contiene tres puntos sembrados, sobre los que se refinara la malla, el dominio es inicialmente dividido en cuatro cuadrantes como se muestra en la figura 44, cada panel es revisado, si el panel contiene dos punto sembrados, entonces éste es dividido en otros cuatro paneles hasta que en cada panel quede como máximo un punto sembrado o se haya alcanzado el nivel máximo de subdivisión deseado, posteriormente se realiza el mismo procedimiento con los puntos sembrados 2 y 3, la figura 45 presenta la malla jerárquica final.

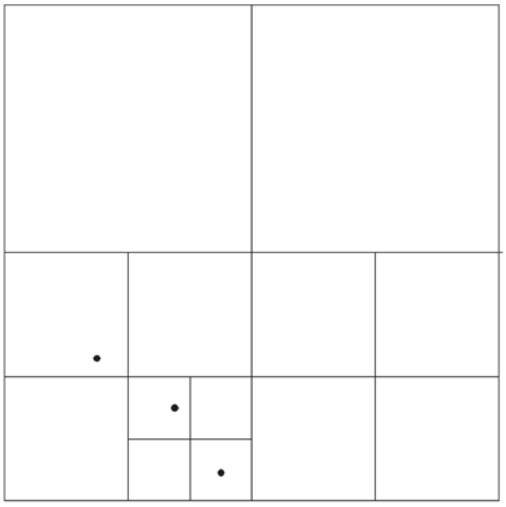


Figura 45. Malla jerárquica construida alrededor de 3 puntos.

Caso de Aplicación

Para ejemplificar lo anteriormente mencionado se aplica este sistema de malla quadtree a la península de Yucatán, (Figs. 46 y 47). Se observa la adaptabilidad de las mallas quadtree, a lo largo de la costa y una robustez hacia zonas mas profundas, desde luego también es apreciable que existen tamaños de celdas que podrían generar difíciles interpolaciones, para atacar este problema ha sido necesario que las mallas quadtree tengan que ser balanceadas, para tener una relación 2:1.

Esta malla tiene un nivel de refinamiento de 12 y se adapta a profundidades menores o iguales a 50 m., el ancho de la celda mínimo es de 500 m y el máximo es de 80000 m, para

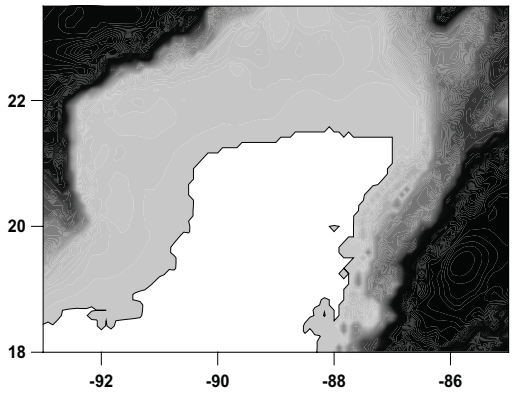


Figura 46. Batimetría de la Península de Yucatán..

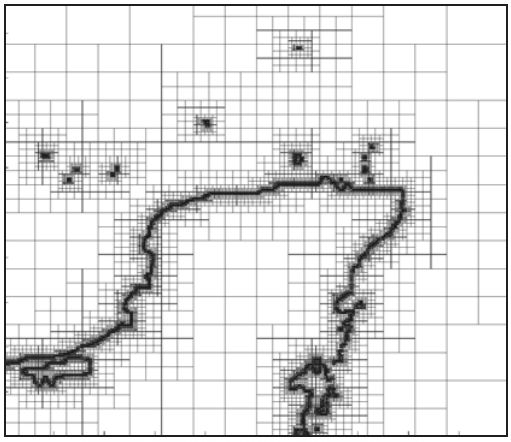


Figura 47. Malla Quadtree para la Península de Yucatán.

una malla estructurada uniforme se requerirían 98304 celdas pero aquí solo se han generado 19216 celdas.

Si se trabajara con una malla estructurada se requeriría una gran cantidad de celdas para poder obtener una precisión adecuada en las cercanías de las costas, no así con las mallas jerárquicas, mediante las cuales, el costo de computo puede reducirse considerablemente.

La regularización ha sido implementada de forma tal que garantice una proporción máxima entre celdas vecinas de 2:1. La malla Quadtree ha sido validada en dos casos reales, éste es robusto, confiable y eficiente.

Modelación de los Huracanes Carmen (1974) e Isidoro (2002)

Diversos fenómenos son analizados bajo dos enfoques, el primero de ellos es mediante un modelo analítico, el cual, permite obtener una solución continua del fenómeno, sin embargo fenómenos tales como el oleaje y la marea de tormenta, requieren de soluciones analíticas complejas, que requieren de altos costos computacionales, lo que para el caso que nos ocupa sería ineficiente, el segundo corresponde a la implementación de un modelo numérico realizado por el grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, el cual permite obtener resultados con una alta precisión en regiones de interés. Para lograr una buena representación del fenómeno es necesario contar con información física confiable, tales como, la rugosidad del fondo marino, información atmosférica (Presión atmosférica y velocidad e intensidad del viento) y desde luego la batimetría debe ser de alta definición.

A continuación se describe cada uno de los datos necesarios para poder evaluar el fenómeno de marea de tormenta.

Batimetría

La batimetría a detalle de la Bahía de Campeche fue obtenida en los meses de enero y febrero del presente año

Para modelar adecuadamente un fenómeno físico se debe contar con datos que tengan una calidad tal que puedan ser utilizados fielmente por los modelos numéricos disponibles.

Actualmente el Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM (GICP-UNAM) cuenta con un modelo numérico que permite calcular la inundación por marea de tormenta generada por un huracán en una determinada zona geográfica, dentro de los datos que son necesarios tener se encuentran (a) base de datos de los huracanes que cruzan la zona de estudio y (b) batimetría de la zona de estudio.

Con respecto a la información de la base de datos de los huracanes, esta ya se ha obtenido, actualmente la base de datos de huracanes abarca el periodo 1949-2004 tanto para el océano Atlántico como para el océano Pacífico. Con respecto a la batimetría de la Ciudad de Campeche, este ha sido el principal inconveniente, ya que no se contaba con la información de manera digital que permitiera ser utilizada por el modelo numérico.

Para subsanar este inconveniente se realizaron las siguientes tareas:

- Campaña de campo para realizar la batimetría de la Ciudad de Campeche entre la Base de la Secretaria de Marina (cerca de Lerma-Campeche) y la estructura de abrigo conocida como “el Embutido”.
- Digitalización de los planos disponibles, tanto de la Secretaria de Marina como de la National Imagery and Mapping Agency.

A continuación se describe cada una de las tareas anteriores.

Campaña de campo

El objetivo general de esta campaña era recabar la mayor cantidad de puntos posibles (entendiéndose como punto a la representación del fondo marino por tres coordenadas, una en la dirección X, otra en la dirección Y y otra representando la profundidad) de la zona costera comprendida entre la base de la Secretaría de Marina en Lerma-Campeche y la estructura de protección costera conocida popularmente como “El Embutido”.

Esta campaña se realizó del 26 al 29 de enero del 2005, por personal del Centro EPOMEX de la Universidad de Campeche, de la Secretaria de Marina y del GICP-UNAM.

Las fases de la campaña de campo fueron:

Instalación del Mareógrafo Valeport. El objetivo de esto es medir la variación del nivel del mar por efecto de la marea durante la campaña de campo, es importante esta medición para corregir los datos medidos por el ecosonda, en caso de no hacerse esta corrección, la profundidad de un punto estará afectada por la marea y se considera como una medición errónea. El mareógrafo se colocó en el muelle de PEMEX (Lerma), desde las 10:01 del día 28 de enero hasta las 13:23 del día 29 de enero, se tomaron medidas de la superficie libre cada 10 minutos. La figura 48 indica la marea astronómica durante la campaña de campo.

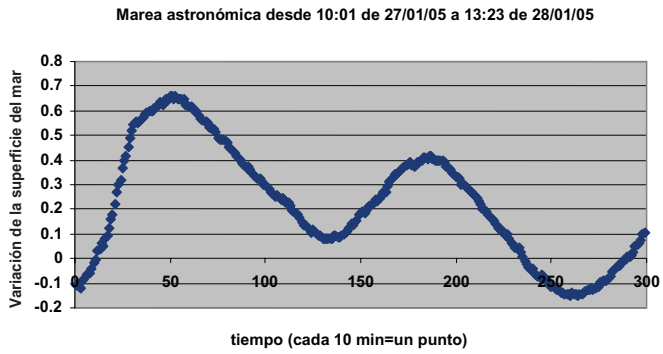


Figura 48. Marea astronómica medida en las instalaciones de PEMEX de Lerma-Campeche.

Medición de profundidades. Después de instalado el mareógrafo se procedió directamente a la realización de la batimetría, se dividió la zona de estudio en dos partes, sobre la primera se navegó el día 26 de enero, sobre la segunda el día 27.

Sobre la embarcación se instaló la ecosonda Midas Surveyor (que consta de dos partes, el transductor que mide la profundidad del fondo marino y el GPS que da las coordenadas geográficas del punto medido), al igual que el programa de navegación que permitiera recolectar los datos adecuadamente.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 49, donde la línea roja representa el primer recorrido y la verde el segundo.

La mayor profundidad medida fue de 3.75 metros (al final de la línea roja) la menor fue de 0.60 metros. Es importante hacer énfasis que no fue



Figura 49. Transectos de navegación de la campaña de Campo.

posible navegar cuando el fondo marino se encontraba a menos de esta cota, esto para evitar un encallamiento de la embarcación.

Realización del Mapa Batimétrico de la Zona de Campeche

Una vez medidos los puntos se procedió a corregir su profundidad con los datos de la marea y a digitalizar los puntos con profundidades comprendidas entre 0.60 y 0.00 metros, esta información se obtuvo de los planos de la zona de Campeche realizados por la Secretaria de Marina. Ya con los datos adecuados se creó la batimetría de la zona de estudio que se muestra en la figura 50.

La batimetría a detalle de la Ciudad de Campeche se encuentra en formato *.dxf con curvas batimétricas cada 0.25 metros, referida al nivel de pleamar media superior de la estación mareográfica de la Secretaría de Marina ubicada en Lerma-Campeche



Figura 50. Batimetría de la Ciudad de Campeche

Digitalización de Mapas Adicionales

Para completar la información batimétrica con cotas superiores a los 4 metros de profundidad es necesario digitalizar los mapas de National Imagery and Mapping Agency de la zona de Campeche.

Una vez que se obtenga el mapa batimétrico se utilizará como dato para modelar la inundación generada por la marea de tormenta de un huracán con una resolución tal que permita identificar claramente las zonas inundables en la ciudad de Campeche.

El fenómeno de marea de tormenta es de gran escala, llegándose a alcanzar longitudes de onda de hasta 700 km y alturas máximas registradas de 5.0 m. Para obtener un cálculo confiable en la zona que nos ocupa es necesario contar con un área de estudio que al menos sea equivalente al radio de influencia de un huracán, es por esto que fue necesario vincular la batimetría del Golfo de México, la cual tiene una baja resolución, con la batimetría realizada a detalle de la zona de estudio, las batimetrías vinculadas se muestran en la figura 51.

Con base en la batimetría general, se generó la malla jerárquica, tal como se indica en la Figura 52, ésta tiene una nivel 10 de refinamiento, cuenta con 4222 celdas, las cuales van desde 150 hasta 40000 m, se observa la gran cantidad de celdas cercanas a la Ciudad de Campeche (Figura 53), esta es la zona donde se desea estudiar con mas detalle la sobreelevación del nivel medio del mar y las velocidades producidas por el paso de un huracán.

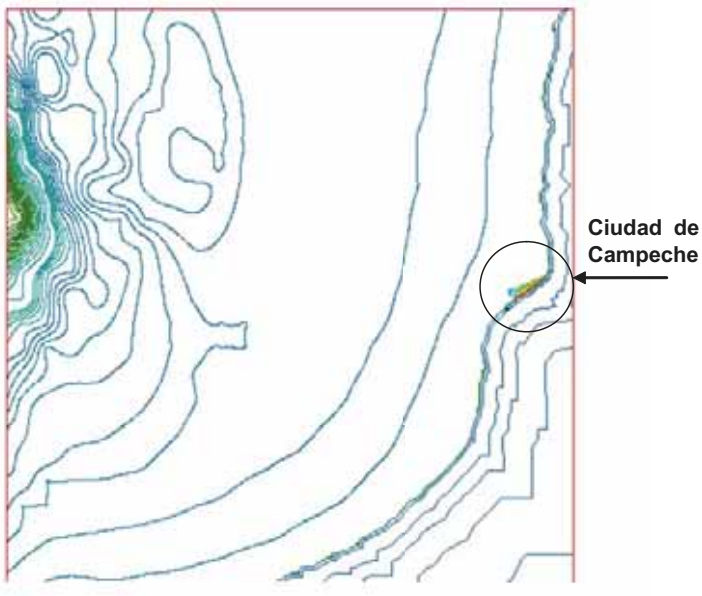


Figura 51. Batimetría general de la zona de estudio completada con la Bahía de Campeche.

Trayectorias de los Huracanes

La sobrelevación del nivel medio del mar está directamente influenciada por la dirección e intensidad del viento, presión atmosférica y la pendiente del fondo marino. Los dos casos que se presentan fueron considerados, dadas las características que ellos presentaron, el huracán Carmen, fue un huracán clase 2, en el instante en que cruza la ciudad de Campeche, generó rachas de vientos de

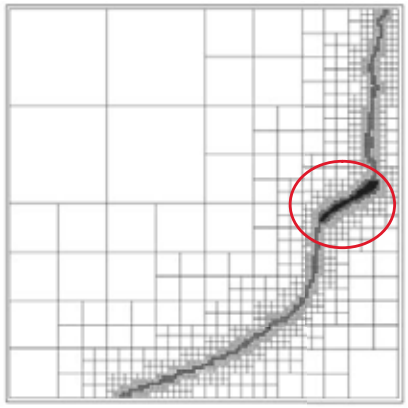


Figura 52. Malla jerárquica para la zona de estudio.

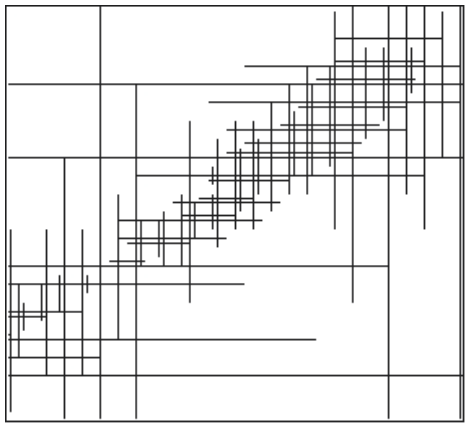


Figura 53. Submalla jerárquica para la ciudad de Campeche.

hasta 100 km/hr, sostuvo una trayectoria uniforme y aunque éste cruza la ciudad, la marea generada no es de gran intensidad. El huracán Isidoro a diferencia del primero fue un huracán clase 3, en el instante que cruza la costa del estado de Yucatán, con rachas de viento sostenido de 200 km/hr, sin embargo al cruzar la línea de costa, éste disminuye su intensidad drásticamente y permanece oscilando en tierra, lo que produjo que se generaran grandes daños tanto económicos como sociales.

Para cada uno de los huracanes analizados, es necesario definir la trayectoria, posición, intensidad de viento, magnitud de la presión atmosférica, velocidad y dirección de desplazamiento, cuando estos se encuentran en la zona de estudio, la Tabla 29 y 30 muestran las trayectorias y datos necesarios de los huracanes Carmen e Isidoro respectivamente.

Resultados Huracán Carmen (1974)

La Figura 54, indica la trayectoria del huracán Carmen y las horas de modelación 30,50 y 60, de las cuales se presentan los resultados.

Las Figura 55, 56 y 57 indican la sobrelevación por marea de tormenta para 30, 50 y 60 horas de modelación respectivamente.

La Figura 55, muestra la variación espacial de la marea de tormenta, cuando el ojo del huracán se encuentra a 100 km al sureste de la Ciudad de Campeche, como se aprecia, inicia un acumulamiento de agua a lo largo de la costa del estado de Campeche, dada la incidencia del viento, la magnitud de la marea de tormenta es de aproximadamente 40 centímetros en la Bahía de Campeche

Tabla 29. Trayectoria Huracán Carmen (1974)

Año	Mes	Dia	Hora	Latitud (°)	Longitud (°)	Vel. viento (km/h)	Presión (mb)	Vel. Desp. (km/h)	Angulo desp. (°)	Escala Saphir-Simpson
1974	9	1	6	17.5	-81.5	157.51	972	30.33	276.99	4
1974	9	1	12	17.7	-83.2	194.57	960	30.27	277.00	5
1974	9	1	18	17.8	-84.7	213.10	999	26.55	273.98	6
1974	9	2	0	18.0	-85.9	231.63	933	21.54	279.86	6
1974	9	2	6	18.4	-86.8	240.89	928	17.52	294.91	6
1974	9	2	12	18.6	-87.9	222.36	956	19.69	280.79	6
1974	9	2	18	18.8	-88.8	166.77	999	16.22	283.15	4
1974	9	3	0	19.1	-89.3	111.18	999	10.32	302.42	2
1974	9	3	6	19.3	-89.7	111.18	999	7.88	297.93	2
1974	9	3	12	19.6	-90.2	111.18	999	10.33	302.41	2
1974	9	3	18	19.9	-90.4	111.18	1000	6.60	327.09	2
1974	9	4	0	20.0	-90.7	101.92	999	5.58	289.33	2
1974	9	4	6	20.1	-90.8	92.65	999	2.56	316.22	2
1974	9	4	12	20.3	-91.0	92.65	999	5.11	316.27	2
1974	9	4	18	20.5	-91.0	101.92	995	3.69	359.30	2
1974	9	5	0	20.7	-90.9	92.65	999	4.06	24.62	2
1974	9	5	6	20.9	-90.9	101.92	999	3.69	359.25	2
1974	9	5	12	21.2	-90.8	120.45	985	5.78	16.67	3
1974	9	5	18	21.5	-90.7	120.45	999	5.78	16.59	3
1974	9	6	0	21.9	-90.5	120.45	983	8.10	24.31	3

En la Figura 56 el ojo del huracán está sobre la Ciudad de Campeche, en ésta se muestra la máxima sobrelevación calculada por el modelo numérico que es de 1.0 m.

En la Figura 57 el ojo del huracán está a 100 km al noroeste de la Ciudad de Campeche, la magnitud de la marea de tormenta es 60 centímetros, el huracán se aleja de las costas de Campeche y la elevación de la marea inicia su descenso.

La figuras 58 y 59 muestran el patrón de corrientes para la hora 50 de la simulación numérica, para toda la zona de estudio y para la Ciudad de Campeche respectivamente, la mayor velocidad de las corrientes inducidas por el huracán en la costa de la ciudad es de 1 m/s. Como se aprecia la dirección siguen un patrón constante en su dirección dada la uniformidad del desplazamiento del huracán Carmen.

Tabla 30. Trayectoria Huracán Isidoro (2002)

Año	Mes	Dia	Hora	Latitud (°)	Longitud (°)	Vel. viento (km/h)	Presión (mb)	Vel. Desp. (km/h)	Angulo desp. (°)	Escala Saphir-Simpson
2002	9	18	18	18.7	-78.6	83.39	1001	18.56	353.78	2
2002	9	19	0	19.3	-79.3	92.65	998	16.63	311.73	2
2002	9	19	6	19.7	-80.4	92.65	990	20.65	290.93	2
2002	9	19	12	19.9	-80.9	111.18	990	9.48	292.89	2
2002	9	19	18	20.4	-81.7	120.45	983	16.7	303.53	3
2002	9	20	0	20.7	-82.3	138.98	979	11.77	298.04	3
2002	9	20	6	21.1	-83	166.77	967	14.14	301.46	4
2002	9	20	12	21.5	-83.5	157.51	966	11.29	310.83	4
2002	9	20	18	21.8	-84	138.98	965	10.23	302.76	3
2002	9	21	0	22.1	-84.3	138.98	964	7.65	316.43	3
2002	9	21	6	22.3	-85.1	157.51	964	14.29	284.97	4
2002	9	21	12	22	-85.8	185.3	955	13.19	245.19	5
2002	9	21	18	21.9	-86.1	203.83	946	5.47	250.29	5
2002	9	22	0	22.1	-86.5	203.83	947	7.82	298.14	5
2002	9	22	6	22	-87.4	203.83	936	15.59	263.2	5
2002	9	22	12	21.9	-88.2	203.83	934	13.9	262.37	5
2002	9	22	18	21.6	-88.9	203.83	935	13.33	245.46	5
2002	9	23	0	21	-89.4	185.3	950	14.14	218.47	5
2002	9	23	6	20.6	-89.6	129.71	952	8.21	205.91	3
2002	9	23	12	20.1	-89.6	111.18	960	9.23	180.9	2
2002	9	23	18	20.3	-89.4	92.65	968	5.12	43.8	2
2002	9	24	0	20.5	-89.3	64.86	980	4.1	25.91	2
2002	9	24	6	21	-89.5	83.39	985	9.81	340.13	2
2002	9	24	12	21.7	-89.7	92.65	987	13.32	345.9	2

Resultados Huracán Isidoro (2002)

A continuación se presenta la trayectoria del Huracán Isidoro (Fig. 60) y las horas de modelación 65, 71 y 100 de las que se presentan los resultados marea de tormenta y corrientes (Figs. 61, 62 y 63).

La Figura 61 muestra una marea de tormenta de 2.4 metros en la ciudad de Campeche, para este instante de modelación el huracán está a 100km de la península de Yucatán

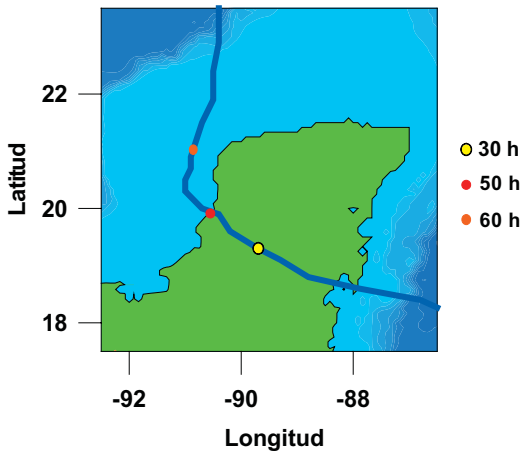


Figura 54. Trayectoria huracán Carmen y horas de presentación de resultados..

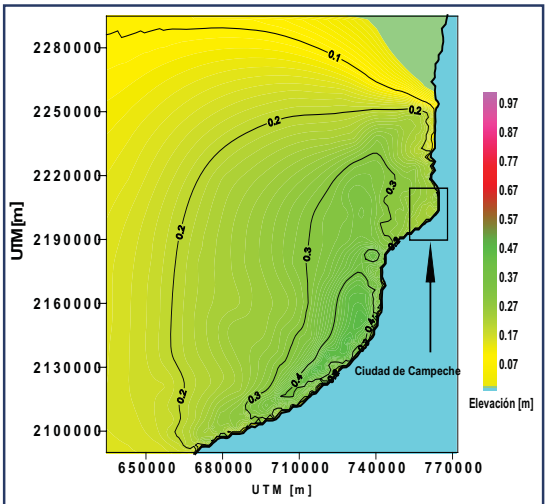


Figura 55. Marea de tormenta para el huracán Carmen, 30 h.

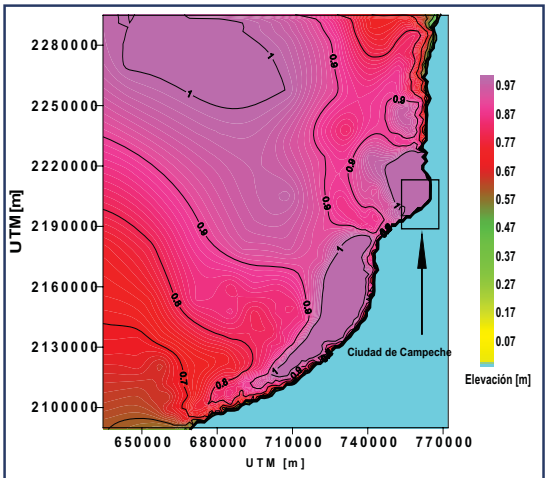


Figura 56. Marea de tormenta para el huracán Carmen, 50 h.

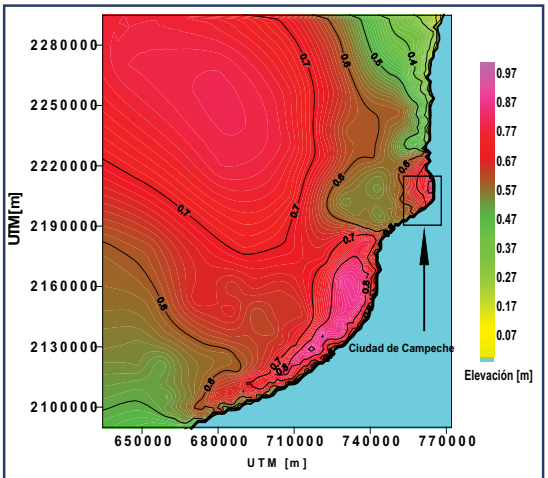


Figura 57. Marea de tormenta para el huracán Carmen, 60 h.

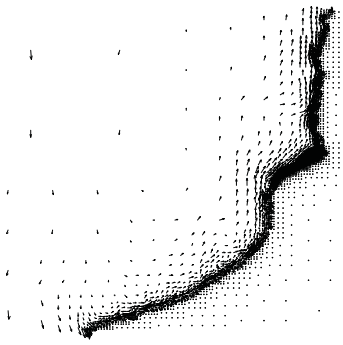


Figura 58. Patrón de corrientes para toda a zona de estudio, huracán Carmen, 50h

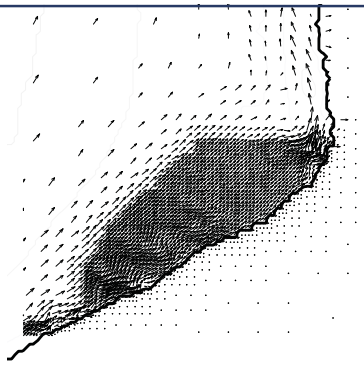


Figura 59. Patrón de corrientes para la ciudad de Camepche, huracán Carmen, 50h.

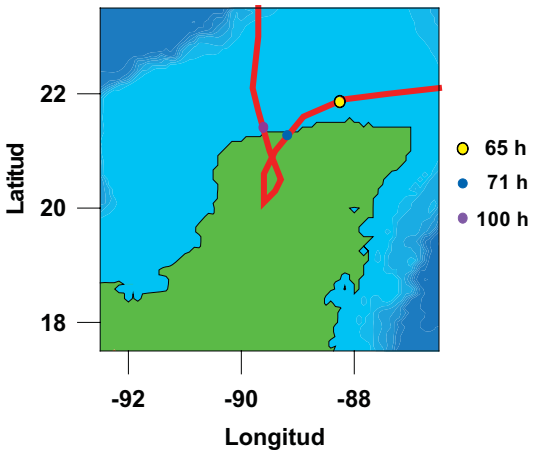


Figura 60. Trayectoria huracán Isidoro y horas de presentación de resultados.

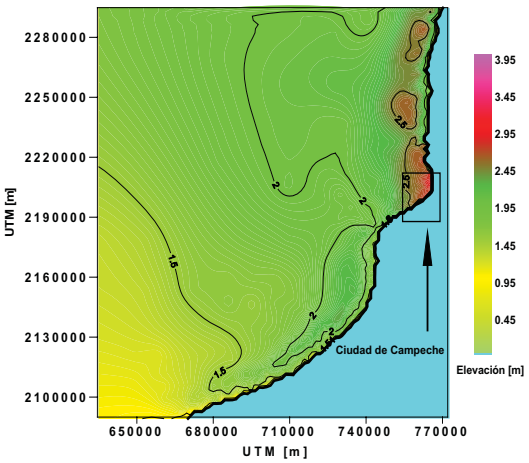


Figura 61. Marea de tormenta para el huracán Isidoro, 65 h.

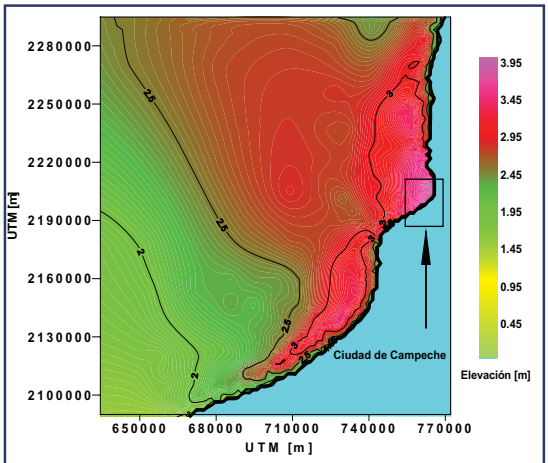


Figura 62. Marea de tormenta para el huracán Isidoro, 71 h.

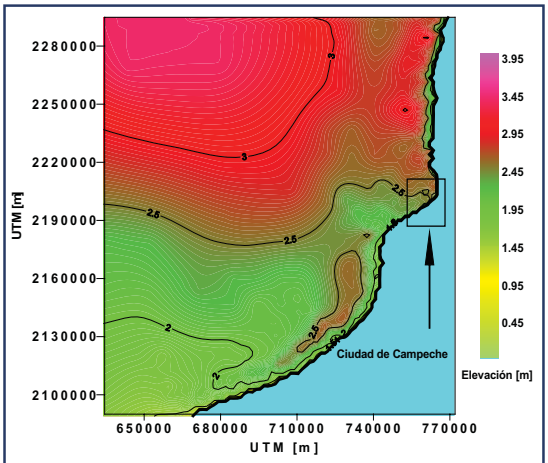


Figura 63. Marea de tormenta para el huracán Isidoro, 100 h.

La Figura 62 muestra una marea de tormenta de 3.95 metros, es la máxima sobreelevación presentada durante la modelación, corresponde al instante en que el huracán Isidoro está entrando a la península de Yucatán, con una intensidad 3 en la escala Saphir-Simpson

En la Figura 63 se observa una marea de tormenta de 2.0 metros en la Ciudad de Campeche, en este instante el huracán Isidoro se clasifica como tormenta tropical

Las figuras 64 y65 muestran el patrón de corrientes para la hora 71 de la simulación numérica, para toda la zona de estudio y para la Ciudad de Campeche respectivamente, la mayor velocidad de las corrientes inducidas por el huracán en la costa de la ciudad es de 2 m/s, La dinámica de flujo en detalle, en la costa de la Ciudad de Campeche se muestra en

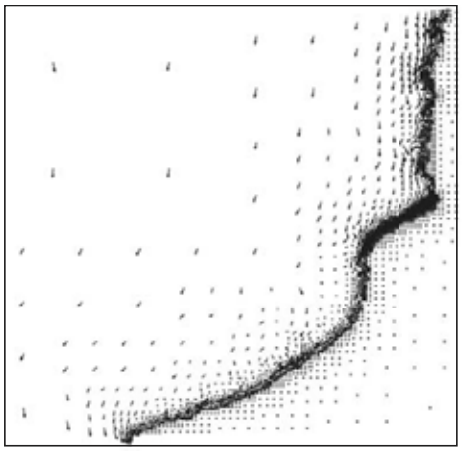


Figura 64. Patrón de corrientes para toda la zona de estudio, huracán Isidore, 71 h

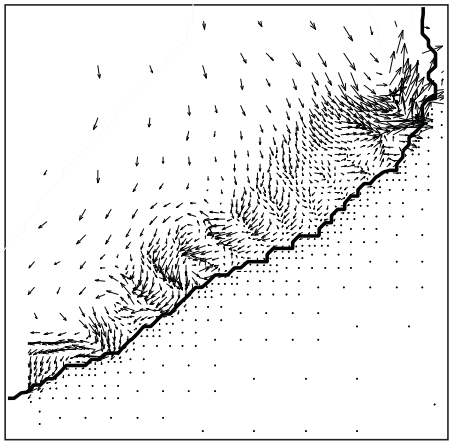


Figura 65. Patrón de corrientes para la ciudad de Campeche, huracán Isidore, 71 h.

la Figura 65, en ésta se aprecia que los vectores de velocidad tienen distintas direcciones, esto es una consecuencia de lo caótico que fue el comportamiento de este huracán, lo que no permitió que se estableciera una condición de flujo estable, como lo fue el huracán Carmen.

Relación de Cartografía Resultado del Estudio

Para discriminar áreas con distinta susceptibilidad a la inundación se aplicó en forma integral el modelaje espacial de los escenarios territoriales de la inundabilidad del terreno, la verificación histrico-documental y su validación en campo y el modelaje estadístico-probabilístico del comportamiento esperado de los fenómenos meteorológicos que provocan inundaciones. El modelaje espacial incorpora análisis multicriterio donde se consideran las diferencias en los coeficientes de escurrimiento según la cobertura, la permeabilidad relativa (proporción relativa de superficies permeables e impermeables) y la predisposición dinámica del terreno.

Para alcanzar los objetivos del presente estudio de se han generado a partir del modelo conceptual y metodológico desarrollados a lo argo de este proyecto un conjunto de 4 mapas a partir de los cuales se generan los escenarios de amenaza ante inundaciones en la ciudad de Campeche.

La cartografía incluye mapas con información parcial e información síntesis donde al final se integra la cartografía de susceptibilidad del terreno a las inundaciones según los eventos meteorológicos ordinarios, extraordinarios y de origen continental o marino. Son

mapas originalmente diseñados en escala 1:10,000.

La cartografía incluida es:

Zonificación de la Susceptibilidad del Terreno a las Inundaciones. Mapa síntesis de susceptibilidad del terreno a las inundaciones que considera, mediante un análisis multifactorial, la importancia ponderada de la predisposición dinámica del relieve, la permeabilidad del terreno y los coeficientes de escurrimiento. El polígono principal delimita los niveles de base locales o de planicies bajas acumulativas con altitudes menores de 10 msnm y pendientes menores del 20%. Al mismo tiempo a partir del concepto hidrológico integral permeabilidad-infiltración-coeficientes de escurrimiento, se determinan diferentes niveles de susceptibilidad a las inundaciones. Los criterios de ponderación se han expuesto a lo largo del estudio y se pueden consultar directamente en la información tabular de las coberturas diseñadas en el SIG (Sistema de Información Geográfica) Arc/info y Arcview. Se caracteriza espacialmente la amenaza de inundación a nivel local incluyendo áreas urbanas y suburbanas. Debido a la estrecha relación entre el uso del suelo urbano y los coeficientes de escurrimiento e infiltración, esta cobertura refleja de forma más o menos precisa los grados de amenaza y riesgo por inundación.

Zonificación de la Amenaza de Inundación Ordinaria. Este tipo de zonificación requiere de la identificación estadístico-probabilística de las precipitaciones que causan inundaciones significativas, es decir tirantes (niveles del agua) que provoquen incomunicación vía terrestre, aislamiento o afectación a zonas residenciales. Aunque en algunas zonas de la ciudad se han registrado inundaciones partir de 35 mm/hr, observando la recurrencia estadística generalizada, se decidió utilizar el criterio de lluvia diaria recurrente cada 5 años con menos de 100 mm. Para esta zonificación se utiliza el método de interpolación lineal en formato raster denominado IDW. Su algoritmo infiere, en función de los pesos relativos de los datos puntuales, una longitud promedio de escala a partir de la cual se evita tener picos de variación en la distribución del grid interpolado. Por otra parte incluye por defecto el concepto de anisotropía, que explica la distribución natural o tendencia de los fenómenos en su distribución espacial. Se utilizan 388 puntos de muestreo en campo o waypoints sobre áreas detectadas documentalmente (fuentes bibliográficas, hemerográficas e iconográficas) como de afectación recurrente por inundaciones.

Zonificación de la Amenaza de Inundación Extraordinaria.- A partir de la identificación estadística y probabilística de la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos (huracanes) se identificó al huracán Isidoro (2002) como el de mayor impacto hidrometeorológico asociado a las inundaciones. Aunque no destaca por su categoría

en la escala Saffir-Simpson (Int. 3) si representa de importancia notable en la acumulación diaria de precipitación. Alcanzó los 600 mm en 7 días, lo que representa el 60% del total promedio anual registrado desde 1921. Se utiliza el mismo sistema de interpolación que para la zonificación de la amenaza de inundación ordinaria. Se incluye igualmente el escenario probable de afectación recurrente cada 85 años de mas de 200 mm diarios que provocó una sobrelevación del nivel del mar de 2.15 m.

Superficies permeables e impermeables en el área urbana y suburbana de Campeche. Se identifican localmente las superficies permeables e impermeables asociadas a la planicies baja acumulativas potencialmente. Se incluyen todas las superficies impermeables de infiltración (teórica) nula y se agrupan diferenciándolas de las que presentan algún grado de permeabilidad. El resultado es un mapa de análisis parcial que permite identificar preliminarmente zonas bajo amenaza de inundación ordinaria.

Sistema de subcuencas interceptadas por el área urbana y suburbana de Campeche. aplicando el concepto de cuencas interceptadas se trazo el límite de la divisoria de aguas para las subcuencas que drenan directamente la ciudad y reconocen necesariamente la planicie costera. Se siguió la red de cimas incompletas y los niveles de base locales. El cálculo de los escurrimientos promedio por subcuenca se incluyen en el documento.

Cauces revestidos y puntos de confluencia. En este mapa se indican las calles que funcionan a manera de cauces y los 57 puntos de confluencia detectados como peligrosos en términos de acumulación torrencial de agua. La referencias para las cauces revestidos son los nivels de cimas y los niveles de base locales.



7 Conclusiones y Recomendaciones

- Se aprecia que los valores diarios máximos que se han registrado en la Estación Observatorio de Campeche, en los años 1995 y 2002 son los más grandes, y están muy cerca de las precipitaciones de periodos de retorno de 50 y 100 años, respectivamente. En particular en el año 2002, durante el paso del Huracán Isidoro, la precipitación máxima diaria en septiembre alcanzó 215.3 mm, lo cual corresponde a un período de retorno aproximado de 84 años. En las estaciones de China y Pocyaxum fue posible observar que los valores extrapolados para los diferentes periodos de retorno son muy grandes, sin embargo dichas estaciones se encuentran fuera del área de influencia de la Ciudad de Campeche, es por ello que no son de consideración para el estudio. Por tanto, se puede concluir, a partir de los datos disponibles, que la información de la estación Observatorio para periodos de retorno de 100 años la ciudad en partes bajas existe la posibilidad de una inundación por las precipitaciones que se pueden presentar.
- En la subcuenca Central se han calculado escurrimientos del orden de 12815.8 miles de m3 lo que representa un 30% más que el resto de las subcuencas lo que indica un mayor nivel de alerta e términos de amenaza de inundaciones. Un factor adicional que incrementa el nivel de amenaza en la subcuencas Central y Oeste es la presencia de suelos hidromórficos de texturas finas. Por el contrario la subcuenca Este presenta suelos automórficos(Leptosoles réndzicos) de buen permeabilidad.

- Se detectó que zonas urbanas con patrones de colonización antiguo, son intrínsecamente menos vulnerables a las inundaciones que las zonas con patrones de urbanización moderna. En las zonas antiguas a pesar de lluvias intensas se mantiene proporcionalmente el 35% de arborizados contra el 65% de superficies impermeables, redundando en infiltraciones de entre 725 y 900 mm/hr. Por el contrario en patrones de urbanización moderna donde los arborizados son escasos o nulos se observan entre 0 y 86 mm/hr, lo que implica un tasa de infiltración lenta y limitada en términos del desalojo de los excesos de lluvia.
- Los análisis estadísticos y probabilísticos muestran que la Ciudad de Campeche, históricamente no ha sido azotada por ciclones tropicales de gran escala, la categoría que mas se ha presentado es dos.
- El estudio de los campos de viento refleja que sobre la ciudad de Campeche se han presentado y podrían seguir presentándose velocidades entre los 100 y 150 km/h, esto puede deberse a las características geográficas en las que se encuentra la ciudad, ya que cercana a ella se encuentran lomeríos que sirven como factor de fricción para amortiguar la intensidad de un ciclón tropical.
- El oleaje está íntimamente ligado a la velocidad del viento y batimetría del lugar, así pues con base en el estudio del viento ciclónico y el nivel somero que caracteriza la zona se pudo constatar que las máximas alturas de ola para períodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años oscilan entre los 6.5 y 11 m, lo que aunado a la sobrelevación de marea de tormenta (2.15 m) pueden generarse severas inundaciones en la ciudad, con consecuencias graves para los asentamientos humanos a lo largo de la costa, siendo necesario realizar una revisión de las estructuras de protección costera con que se cuenta.
- Según los registros históricos es a partir de los 35 mm/hr que se presentan inundaciones significativas en la ciudad de Cammpeche, aunque las más frecuentes en términos estadísticos, han registrado valores por arriba de los 40 mm/hr.
- Los patrones de amenaza de inundación presentan modalidades localizadas y difusas. Localizadas extremas en Prado, Fracciorama, Valle del Sol, Belén, La Ermita, Laureles, Samulá, el Carmelo, Cuatro Caminos. Difusas en los sectores de los barrios antiguos.
- Las inundaciones de origen marino por sobrelevación del mar recurrentes en 85 años, sin que este periodo de retorno se determinístico, afecta zonas restringidas del malecón, los rellenos y la cuña de intrusión salina en la Ría.

- En general por sus tirantes extremos 1.70 m (San Román sur) repetibles en 85 años y su permanencia de 8 días de inundación en condiciones extremas, las inundaciones un Campeche no se consideran desastrosas en términos de su recurrencia y magnitud.
- Con base en los resultados obtenidos del modelo numérico de marea de tormenta a nivel local, se observa que las características que presente un fenómeno meteorológico, son determinantes en la dinámica del flujo, lo que constata, que el hecho de que un huracán cruce el punto de interés no significa que sea una condición que ponga en peligro de inundación a la ciudad de Campeche, como es el caso de huracán Carmen. En efecto, las características determinantes para que se presente una inundación son la intensidad y la dirección del viento. Tal es el caso de Huracán Isidoro que, aún estando retirado de la ciudad de Campeche, generó un viento cuya dirección fue perpendicular a línea de costa, lo que produjo una acumulación de agua (marea de tormenta) importante. Por otro lado, la forma y configuración geométrica de la bahía juegan también un papel importante, como se aprecia en los resultados, dado que existe una separación en el flujo, generando que el agua quede atrapada durante un determinado período de tiempo.
- Las características topográficas de la ciudad de Campeche, no son muy favorables para contrarrestar los efectos de un huracán, sino todo lo contrario. La máxima marea calculada por el modelo numérico es superior al nivel del malecón, lo que ocasionará que la marea tenga un avance sin muchas restricciones hacia la ciudad, por lo que todas las zonas que tengan una cota inferior a 3.5 son susceptibles a inundarse.
- Para mitigar los efectos de una marea de tormenta se recomienda:
  - Crear una de una playa artificial frente a la ciudad de Campeche, la cual cumpliría con objetivos de protección y de desarrollo de la ciudad.
  - Contar con desagües naturales o artificiales a cielo abierto, que permitan una rápida evacuación del agua, cuando el nivel de la marea de tormenta rebasa el nivel del malecón.
  - Realizar modificaciones al reglamento de construcciones, con la finalidad de que los nuevos asentamientos cumplan con ciertas condiciones de seguridad, para minimizar los daños producidos por una inundación.

Agradecimientos

El Centro EPOMEX agradece la cooperación incondicional de las autoridades del Municipio de Campeche, la Comisión Nacional del Agua por los valiosos datos meteorológicos y la Secretaría de Marina por el apoyo logístico en mar y los datos de mareas. Al Instituto de Ingeniería de UNAM, por su siempre profesional y oportuna colaboración con este Centro.

Referencias

Alexander D., 1991. Applied Geomorphology and the impact of Natural Hazards on the Built Environment. En: Natural Hazards 4. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. pp. 57-80.

Arnold C. L., Jr. y C. J. Gibbons. 1996. Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator. *Journal of the American Planning Association* 62(2): 243-258.

Birmingham R., Lantrip J., Harrison R. Dongsen y H. Xue, 1999. Infiltration Through Disturbed Urban Soils and Compost-Amended Soil Effects on Runoff Quality and Quantity. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and DevelopmentU.S. Environmental Protection Agency.

Calvo García-Tornel, F., 1984. La Geografía de los Riesgos. Geocrítica 54. Noviembre. Universidad de Barcelona. Barcelona, España. 39 p.

CNA, Gerencia Estatal Campeche, 2004. Precipitación máxima en un periodo de una hora (1970 -2004): Observatorio Meteorológico de Campeche.

Colegio de Postgraduados/SARH, 1982. Manual de conservación del suelo y del agua. 2ª Ed. Colegio de postgraduados Chapingo/SARH, México.

Gumbel, E. J. 1959. Statistics of extremes. New York, Columbia Univ. Press.

Bedient, P.B., y W.C. Huber, 1992. Hydrology and Floodplain Analysis. New York: Addison Wesley Publishing Co.

Berkhoff, J. 1972. Computation of combined Refraction-Diffraction. Proc. 13 International Conference in Coastal Engineering.

Booij, N. 1981. Gravity waves on water with non-uniform depth and current Tesis Doctoral. Technical University of Delft

Bretschneider, C.L., 1990. Tropical Cyclones. Handbook of Coastal and Ocean Engineering, Gulf Publishing Co., Vol. 1, 249-370

Holland, G.L., 1980. An analytical model of wind and pressure profiles in hurricanes. Monthly Weather Review, 108, 1212-1218.

Kent B. Barnes, John M. Morgan III, y M. C. Roberge. 2003. Impervious surfaces and the quality of natural and built environments. Department of Geography and Environmental Planning. Towson University .Baltimore, Maryland.

Kingma N. C.,1990. Natural Hazards Geomorphological Aspects of Floodhazard. Preliminary edition. International Insttute for Aerospace Survey and Earth Science. ITC. Enschede, The Netherlands. 100p

Kirby, J & Dalrymple. 1983. A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of Stokes waves. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 136

Kirby, J.T. 1986. A general equation for waves over ripple beds. *Journal of Fluid Mechanics* Vol. 162

Kirby, J. T., y R.A. Dalrymple, 1994. Combined Refraction/Diffraction Model REF/DIF 1, Version 2.5. Documentation and User's Manual, CACR-94-22, University of Delaware, Newark.

López-Ramos, E., 1973. Estudio geológico de la península de Yucatán. Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, Vol. 25, p 76.

Lugo Hubp , Aceves Quesada, y Espinasa-Pereña, 1992. Rasgos geomorfológicos mayores de la península de Yucatán. *Revista del Instituto de Geología*. 10(2): 143-150.

Maidment, D. R.1993. Handbook of Hydrology. McGraw-Hill Inc,1384 p

Maskrey A. (compilador), 1993. Los desastres no son naturales. La RED (Red de estudios sociales), ITDG (Intermediate Technology Development Group).Tercer Mundo Editores, Colombia. 166 p.

McCuen R.H.1998. Hydrologic Design and Analysis; Prentice Hall, New Jersey, 814 p.

Periódico Tribuna de Campeche

Plunk, D. E., K. Morgan, *et al.* 1990. Mapping impervious cover using Landsat TM data. *Journal of Soil and Water Conservation*: 589-591.

Radder, A.C. 1979. "On the parabolic equation method for water-wave propagation." *Journal of Fluid Mechanics* Vol. 95.

Rivera-Arriaga, E., G. Palacio Aponte, G. 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. 158p.

Tobler, W. R.,1976. Spatial interaction patterns. *Journal of Environmental Systems*, 6: 271-301.

El Municipio de Campeche en colaboración con el Centro de Ecología, Pesquería y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX) de la Universidad Autónoma de Campeche, realizó un estudio para evaluar los riesgos por inundaciones, establecer estrategias de planificación para el desarrollo urbano y para coadyuvar en la protección de los ciudadanos y sus bienes.

Los resultados, se ponen a disposición de la comunidad a través de la presente obra, a efecto de dar a conocer el fenómeno de las inundaciones en Campeche en lo relativo a su génesis, áreas de afectación, intensidad y recurrencia histórica. Mediante, estudios del relieve y de los regímenes de infiltración y escurrimiento del terreno se identifican zonas susceptibles a las inundaciones de origen continental y marino; asimismo, se presenta una clasificación de la intensidad y las alturas promedio alcanzadas por el agua en temporadas de lluvias y huracanes y la recurrencia de los fenómenos meteorológicos que ocasionan inundaciones.

El documento también incluye en su contenido cinco mapas que dan a conocer el comportamiento espacial de las inundaciones ordinarias y extraordinarias en Campeche, así como las zonas susceptibles a inundaciones y a la permeabilidad del terreno.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CAMPECHE

H. AYUNTAMIENTO DE CAMPECHE 2003- 2006

ISBN 968-5722-36-6