



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

ESTIMACIÓN DE MAREA DE TORMENTA Y OLAJE INDUCIDOS POR CICLONES
TROPICALES EN MARES MEXICANOS

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JOSÉ RAFAEL MEZA PADILLA

TUTOR
CHRISTIAN MARIO APPENDINI ALBRECHTSEN, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F. JUNIO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Pedrozo Acuña Adrián
Secretario: Dr. Torres Freyermuth Alec
Vocal: M. en C. Appendini A. Christian M.
1^{er.} Suplente: Dra. Enriquez Ortiz Cecilia E.
2^{d o.} Suplente: Dr. López González José

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: LABORATORIO DE INGENIERÍA Y PROCESOS COSTEROS. UNIDAD ACADÉMICA SISAL, YUCATÁN. MÉXICO.

TUTOR DE TESIS:

CHRISTIAN MARIO APPENDINI ALBRECHTSEN

FIRMA

(Segunda hoja)

“From birth, man carries the weight of gravity on his shoulders. He is bolted to earth. But man has only to sink beneath the surface and he is free.”

Jacques-Yves Cousteau

A ti Renatta Jamille, por ser la energía que hace vibrar mi ser para mejorar cada día y dejar en tus manos un lugar digno de llamar madre tierra.

Agradecimientos

A Christian Appendini por su honesta amistad y apoyo incondicional a lo largo de varios proyectos permitiendo un agradable ambiente laboral y aportando en cada ocasión a una excelente formación académica. Gracias Christian, por este proyecto y los que vienen

A mi esposa e hija por toda la paciencia y cariño que me han brindado. Les agradezco su constancia a mi lado a pesar de todas las horas que no les dedique a ustedes por estar trabajando.

Al apoyo incondicional de mis padres en León, Guanajuato. Que a pesar de la distancia siempre me han brindado su apoyo, consejos y experiencia con gran amor.

Al Dr. Adrián Pedrozo Acuña por su apoyo con el proyecto 3337: “Acciones para la gestión del riesgo por inundación en la cuenca baja de los ríos Pánuco y Tamesí” y siempre haber estado supervisando mi labor.

A la Dra. Graciela B. Raga por su apoyo con el proyecto IAI-SGP-CRA2048: “Landfalling of Tropical Cyclones in the EPAC basin” y haber permitido mi participación en los cursos de primavera sobre ciclones tropicales durante 2013, 2014 y 2015.

Al Dr. Rodolfo Bolaños Sánchez y a Henrik Kofoed Hansen por haberme abierto las puertas del Ports & Offshore Technology Department en las oficinas centrales de DHI en Dinamarca y su apoyo con el proyecto XWiWA: “Extreme Winds and Waves for design of offshore wind turbines. Coupling atmosphere and wave modeling for design and operation in coastal zones”.

Al Dr. Alejandro Hinojosa por su apoyo con el Proyecto: “Vulnerabilidad costera al oleaje y mareas de tormenta ante escenarios de aumento del nivel del mar”.

Al M. en C. Christian Appendini por su apoyo con el proyecto CONAGUA 4378: “Catálogo de eventos de oleaje y marea de tormenta para ciclones tropicales en costas mexicanas”.

A los sinodales de esta tesis, Dr. Pedrozo-Acuña Adrián, Dr. Torres-Freyermuth Alec, M. en C. Appendini Christian, Dra. Enriquez-Ortiz Cecilia y Dr. López-González José por el valioso tiempo que le dedicaron a este trabajo con la finalidad de mejorarlo.

A todos los integrantes del Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros en la Unidad Académica de Sisal por contribuir en mi formación académica y brindarme su ayuda siempre que fue requerida.

Este trabajo fue posible debido al apoyo del CONACYT para mis estudios de posgrado (No. de CVU 555771)

Productos asociados al trabajo de tesis

- (2015) Meza-Padilla R, Appendini C, Pedrozo-Acuña A (aceptado), Hurricane induced waves and storm surge modeling for the Mexican coast. Special Issue from Physics of Estuaries & Coastal Seas (PECS-2014) in Ocean Dynamics (Springer)
- (2015) Meza-Padilla R, Appendini C, Pedrozo-Acuña A, González-Villareal F (aceptado), Evaluación de la marea de tormenta en sitios con escasez de datos: río Panuco, México. Revista Iberoamericana del agua. Elsevier Editorial System.
- (2015) Poster titulado: Interaction of tsunamis and tropical cyclones. Coastal Sediments: Understanding and Working with Nature. San Diego, U.S.A.
- (2015) Presentación oral titulada: Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones en Mares Mexicanos. IX Congreso Internacional AMIP: Los puertos Mexicanos y su conectividad. Veracruz, México.
- (2014) Presentación oral titulada: Vulnerabilidad costera al oleaje y marea de tormenta ante escenarios de aumento del nivel del mar. Reunión Anual de la UGM. Puerto Vallarta, México
- (2014) Poster titulado: Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en Mares Mexicanos. Reunión Anual de la UGM. Puerto Vallarta, México
- (2014) Presentación oral titulada: Hurricane induced waves and storm surge modeling for the Mexican coast. 17th Ed. Of Physics of Estuaries and Coastal Seas. Porto do Galinhas, Brazil.
- (2014) Poster titulado: Hurricane induced waves and storm surge modeling for the Mexican coast. Young Coastal Scientists and Engineers Conference – North America. Newark, U.S.A.
- (2013) Presentación oral titulada: Storm surge estimation due to the incidence of simultaneous tropical cyclones in México. 31st Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. San Diego, U.S.A.
- (2013) Presentación oral titulada: Estimación de marea de tormenta basada en huracanes sintéticos. Reunión Anual de la UGM. Puerto Vallarta, México.
- (2013) Presentación oral titulada: Modelación numérica de marea de tormenta con ciclones tropicales sintéticos por medio de diferentes modelos paramétricos. 3er Simposio: Conocimiento de los Recursos Costeros del Sureste de México. Mérida, México.

Contenido

Agradecimientos	IV
Productos asociados al trabajo de tesis	V
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	3
1.2. Objetivos	5
2. Ciclones tropicales en México	7
2.1. Eventos Históricos	7
2.2. Eventos sintéticos.....	9
2.3. Climatología de ciclones tropicales en México	12
3. Generación de campos de viento y presión atmosférica	15
4. Modelación numérica de oleaje y marea de tormenta	18
4.1. Modelo espectral de oleaje.....	19
4.2. Modelo hidrodinámico.....	20
4.3. Mallas computacionales y batimetrías.....	22
4.4. Configuración y validación de modelos	26
4.4.1. Oleaje	26
4.4.2. Hidrodinámico	29
5. Climatología de oleaje y marea de tormenta en México	33
5.1. Golfo de México y Caribe Mexicano	33
5.1.1. Oleaje	33
5.1.2. Marea de tormenta	36
5.2. Pacífico Mexicano.....	39
5.2.1. Oleaje	39
5.2.2. Marea de tormenta	42
6. Evaluación de valores extremos.....	46
6.1. Descripción de la función de distribución	48
6.2. Caracterización de eventos extremos en los principales puertos de México	49
6.3. Caracterización de eventos extremos en mares mexicanos	56
7. Conclusiones.....	60
8. Referencias.....	62



Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos

APENDICE A. Teoría sobre la marea de tormenta 67
 A.1. Interacción entre marea astronómica y marea meteorológica 69
 A.2. Interacción marea meteorológica con desembocadura de ríos 70
 APENDICE B. Teoría sobre el oleaje 71
 APENDICE C. Eventos históricos modelados..... 73
 APENDICE D. Ajustes de la función de distribución en los puertos del Golfo de México..... 77
 APENDICE E. Ajustes de la función de distribución en los puertos del Pacífico Mexicano 87
 APENDICE F. Mapas de diferentes periodos de retorno a 2, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 100, 250, 500 y 1,000 años en los mares mexicanos..... 98

Lista de Figuras

Figura 1 - Ejemplo de 100 huracanes sintéticos mostrando su intensidad y trayectoria en el a) Pacífico Oriental (panel superior) y en el b) Atlántico Norte (panel inferior).....	11
Figura 2 - Histogramas de frecuencia de la comparación de eventos sintéticos contra históricos para la velocidad del viento al entrar a tierra en el a) Atlántico y en el b) Pacífico. El ciclo anual en el c) Atlántico y en el d) Pacífico, así como la posición de entrada a tierra acorde a longitud en el e) Atlántico y en el f) Pacífico. Finalmente, la posición de entrada a tierra acorde a latitud para el g) Atlántico y el h) Pacífico.	13
Figura 3 - Campo de vientos asimétrico debido a la sumatoria de la componente ambiental de fondo y la componente axi-simétrica propia del huracán.	16
Figura 4 - Campos de viento y presión atmosférica generados en base a la formulación de Emanuel & Rotunno (2011) y Holland (1980) respectivamente para los CPO (panel superior) y los CAN (panel inferior). En el panel superior las tonalidades muestran la presión atmosférica mostrando el efecto del barómetro invertido y en el panel inferior las tonalidades muestran la velocidad del viento donde se percibe la asimetría en el campo de vientos debido a la componente ambiental de fondo.....	17
Figura 5 - Diagrama de fricción del viento. En el eje x- la velocidad del viento (m/s) y en el eje y- el coeficiente de fricción del viento.....	21
Figura 6 - Batimetrías utilizadas para los dominios computacionales. a) Pacífico Mexicano para los CPO y b) Golfo de México y Mar Caribe para los CAN.	23
Figura 7 - Mallas no estructuradas con resolución variable utilizadas en este estudio. a) Malla del Pacífico Mexicano mostrando en el recuadro rojo un detalle del refinamiento en las localidades próximas a los puertos de Manzanillo y Puerto Vallarta. b) Malla del Golfo de México y Mar Caribe mostrando en el recuadro rojo un detalle del refinamiento en la localidad próxima al puerto de Veracruz.	25
Figura 8 - Diagrama de trabajo para el modelo espectral de oleaje.....	26
Figura 9 - Comparativa de propagación de oleaje modelado mostrando el efecto manguera de jardín. En el panel superior se modelo el oleaje con 36 direcciones, mientras que en el panel inferior solamente con 10 denotando una mala propagación dentro del Golfo de México.	28
Figura 10 - Diagrama de trabajo para el modelo hidrodinámico.....	29
Figura 11 - Registro del nivel del mar en Cabo San Lucas antes de que Odile (2014) entrara a tierra como un huracán categoría 3.....	31
Figura 12 - Ubicación geográfica de las tres localidades seleccionadas para comparar los valores de marea de tormenta obtenidos por SLOSH y MIKE21 HD FM durante el huracán Ike (2008) en Texas.	32
Figura 13 – Series temporales de marea de tormenta obtenida de los modelos SLOSH y MIKE 21 HD FM para la entrada a tierra de Ike (2008) en la bahía de Galveston, Texas en tres sitios distintos. En el panel superior se muestra la localidad fuera de costa por donde paso el ojo del huracán, en el panel medio se muestra la localidad próxima a la barra litoral en el frente costero y en el panel inferior la localidad en la bocana de la bahía de Galveston.....	32

Figura 14 - Mapa de la media correspondiente a la altura de ola significativa máxima generada por los CAN 34

Figura 15 - Mapa de la desviación estándar correspondiente a la altura de ola significativa máxima generada por los CAN..... 35

Figura 16 - Mapa del percentil 99 correspondiente a la altura de ola significativa máxima generada por los CAN..... 36

Figura 17 - Mapa de la media correspondiente al nivel del mar máximo generada por los CAN 37

Figura 18 - Mapa de la desviación estándar correspondiente al nivel del mar máximo generada por los CAN 38

Figura 19 - Mapa del percentil 99 correspondiente al nivel del mar máximo generada por los CAN 39

Figura 20 - Mapa de la media correspondiente a la altura de ola significativa generada por los CPO 40

Figura 21 - Mapa de la desviación estándar correspondiente a la altura de ola significativa generada por los CPO..... 41

Figura 22 - Mapa del percentil 99 correspondiente a la altura de ola significativa generada por los CPO 42

Figura 23 - Mapa de la media correspondiente al nivel del mar máximo generado por los CPO 43

Figura 24 - Mapa de la desviación estándar correspondiente al nivel del mar máximo generado por los CPO 44

Figura 25 - Mapa del percentil 99 correspondiente al nivel del mar máximo generado por los CPO 45

Figura 26 - Mapa de envolventes máxima para el evento 0595 de los CPO. En el panel izquierdo se muestra la marea de tormenta y en el panel derecho la altura de ola significativa. La línea negra muestra la trayectoria y los puntos verdes la ubicación del vórtice con una resolución temporal de una hora. 46

Figura 27 - Mapa de envolventes máxima para el evento 1034 de los CAN. En el panel izquierdo se muestra la marea de tormenta y en el panel derecho la altura de ola significativa. La línea negra muestra la trayectoria y los puntos verdes la ubicación del vórtice con una resolución temporal de una hora. 47

Figura 28 - Principales puertos de México. Extraído de (<http://sct.gob.mx/>) 50

Figura 29 - Distribuciones WBL y GEV ajustadas a marea de tormenta (a, b) y altura de ola significativa (c, d) para dos localidades en el Golfo de México: Tampico (a, c) y Campeche (b, d). . 52

Figura 30 - Distribuciones WBL y GEV ajustadas a marea de tormenta (a, b) y altura de ola significativa (c, d) para dos localidades en el Pacífico: Guaymas (a, c) y Puerto Chiapas (b, d). 52

Figura 31 - Altura de ola significativa (a, b) y nivel del mar (c, d) para un periodo de retorno de 100 años usando la distribución GEV (a, c) y Weibull (b, d) para el Golfo de México y Mar Caribe. 57

Figura 32 - Altura de ola significativa (a, b) y marea de tormenta (c, d) para un periodo de retorno de 100 años usando la distribución GEV (a, c) y Weibull (b, d) para el Pacífico Mexicano..... 57

Figura 33 - Comparación de mapas de marea de tormenta con un periodo de retorno de 250 años para el Golfo de México y Caribe Mexicano entre Duran, G. (2010) en el panel izquierdo y este estudio en el panel derecho..... 59

Figura 34 - Esquema de la entrada a tierra de un huracán visto en planta. Adaptado de Boon (2014) 68

Figura 35 - Skew surge registrado en Hampton Roads, Virginia por el huracán Isabel en 2003. Extraída de Boon 69

Figura 36 - Flujo inverso del río Mississippi durante más de 24 horas durante el huracán Isaac (2012). Extraído del U.S. Geological Survey (www.usgs.gov) 70

Figura 37 - Esquema de una onda en teoría lineal del oleaje 71

Figura 38 - Obtención de la presión mínima en función de la velocidad máxima para el Atlántico (1851 - 2013) 75

Figura 39 - Obtención de la presión mínima en función de la velocidad máximas para el Pacífico (1949 - 2013). 76

Lista de Tablas

Tabla 1 - Desglose de ciclones tropicales que tocaron tierra en México acorde a la categoría máxima alcanzada por el huracán en Golfo de México y Caribe Mexicano durante el periodo 1980 a 2013. 7

Tabla 2 – Desglose de ciclones tropicales que tocaron tierra en México acorde a la categoría máxima alcanzada por el huracán en el Pacífico durante el periodo 1980 a 2013. 8

Tabla 3 - Configuración utilizada en el modelo MIKE 21 SW para la modelación del oleaje..... 27

Tabla 4 - Configuración utilizada en el modelo MIKE 21 HD FM para la modelación hidrodinámica 30

Tabla 5 - Ubicación geográfica de las localidades próximas a os puertos analizados en el Golfo de México y Caribe Mexicano. 50

Tabla 6 – Ubicación geográfica de las localidades próximas a los puertos analizados en el Pacífico Mexicano..... 51

Tabla 7 - Periodos de retorno específicos para marea de tormenta en los principales puertos en el Golfo de México y Caribe Mexicano. 53

Tabla 8 - Periodos de retorno específicos para oleaje en los principales puertos en el Golfo de México y Caribe Mexicano. 54

Tabla 9 - Periodos de retorno específicos para marea de tormenta en los principales puertos del Pacífico Mexicano 55

Tabla 10 - Periodos de retorno específicos para oleaje en los principales puertos del Pacífico Mexicano..... 55

Tabla 11 - Componentes de la marea de tormenta 67

Tabla 12 - Eventos históricos modelados en el Golfo de México y Mar Caribe 73

Tabla 13 - Eventos históricos modelados en el Pacífico..... 74

Abstract

Extreme waves and water levels along the Mexican coast are associated with tropical cyclones and are a main factor of damage to coastal infrastructure. Several authors have characterized surge levels and waves based on historical events. However, the limited number of events in the record cast some doubt on the reliability of results from an extreme value analysis with this information. To overcome this problem, we used 3,100 synthetic events to force a third generation wave model and a hydrodynamic model to obtain a robust database to characterize extremes in Mexican seas. Return periods were estimated through an extreme value analysis of this information at each mesh element, enabling the identification of the spatial variability of water levels and wave height. The results show that the highest waves are expected at the eastern side of the Yucatan peninsula and the northern coast of the Gulf of Mexico, while highest storm surge in the northern part of the Yucatan Peninsula. As for the Pacific, the highest waves and storm surge values are expected from the southern tip of the Baja California peninsula towards to 18° of latitude. Highest storm surge values are expected in the Gulf of Mexico than in the Pacific.

Keywords: tropical cyclones, storm surge, waves, Mexico, extreme value analysis

Resumen

Tanto en el Golfo de México y Mar Caribe como en el Océano Pacífico, cada año existe la posibilidad de pérdidas materiales y humanas debido a los efectos de un huracán. Los principales factores que producen daños en la infraestructura costera de México son el oleaje y la marea de tormenta. Varios autores han caracterizado estos fenómenos en base a información histórica, sin embargo, los registros tienen limitaciones en cuanto a su extensión temporal (pocos eventos en un periodo determinado) y geográfica (pocas localidades cuentan con la información).

Para resolver esto, se han utilizado un total de 3,100 ciclones tropicales sintéticos basados en un modelo estadístico/determinista de generación, propagación y disipación de ciclones tropicales. Con la información de cada evento, se generaron los campos de viento por medio de un modelo radial del perfil de vientos. Esta información se utilizó para forzar un modelo de oleaje de tercera generación y un modelo hidrodinámico basado en las ecuaciones de continuidad, conservación de masa y cantidad de movimiento, a fin de generar una base de datos robusta con valores de superficie libre y altura significativa del oleaje a consecuencia de estos fenómenos naturales en los mares mexicanos.

A partir de un total de 6,200 simulaciones (3,100 para marea de tormenta y 3,100 para oleaje), se realizó un análisis de valores extremos con la finalidad de establecer la probabilidad de ocurrencia para distintos periodos de retorno. En base a los resultados, se encontró que en el Atlántico el oleaje y marea de tormenta de mayor altura se presentan en la península de Yucatán y la parte norte del Golfo de México, mientras que en el Pacífico en la zona sur de Baja California Sur y entre los estados de Sinaloa y Guerrero. Este estudio permite establecer criterios de diseño para diferentes tipos de infraestructura en las costas mexicanas, así como una ayuda para establecer zonas vulnerables al oleaje y la inundación costera. Cabe señalar que en no se incluyen las descargas fluviales, pluviales, run-up y efectos del cambio climático, los cuales no son despreciables para los periodos de retorno de oleaje y marea de tormenta estudiados.

Palabras clave: ciclones tropicales, marea de tormenta, oleaje, México, análisis de valores extremos

1. Introducción

México es uno de los pocos países en el mundo que esta sujeto a la entrada a tierra de huracanes en dos areas distintas de ciclogénesis: El Pacífico Oriental y el Atlántico Norte. Como resultado, México es vulnerable a los huracanes, los cuales incluyen lluvia, viento, oleaje y marea de tormenta. Durante las últimas décadas, México ha sufrido daños extremos debido a la inundación tierra adentro, deslaves, inundación costera y erosión de playas. De hecho, el país ha sufrido el embate de ciclones tropicales de manera simultánea como en el 2013 cuando las tormentas tropicales Ingrid (Golfo de Mexico) y Manuel (Pacífico) entraron a tierra con una diferencia temporal de dieciocho horas (Pedrozo-Acuña et al. 2014). Es evidente que la evaluación de la probabilidad de ocurrencia de ciclones tropicales en México es una prioridad para la planeación del desarrollo costero y prevención de desastres en el país.

El oleaje y la marea de tormenta generados por ciclones tropicales son los factores de mayor destrucción cuando el evento entra a tierra (Dube et al. 2010), siendo la principal causa de desastres en la zona costera alrededor del mundo. Mientras que en México la lluvia generada por la tormenta es la principal fuente de daño, debido a la inundación pluvial y los deslaves (Breña-Naranjo et al. sometido), el oleaje y la marea de tormenta no se pueden descartar. Por ejemplo, el huracán Wilma (2005) removió aproximadamente siete millones de metros cúbicos de arena en las playas de Cancún, dando como resultado una pérdida económica estimada en un billón de dólares debido al turismo y un programa de generación de playas valuado en cincuenta millones de dólares (Silva-Casarin et al. 2012). Cabe mencionar que la descarga de los ríos se puede ver directamente afectado por la marea de tormenta, la cual puede actuar como un tapón hidráulico impidiendo el desfogue del río (Medellín et al. 2013). Incluso puede llegar a revertir el flujo como sucedió en el río Mississippi durante el huracán Isaac (2012) por más de 24 horas (Stewart 2013). Aunado a ello, este efecto puede empeorar la inundación en las planicies próximas a los deltas de los ríos debido a una baja capacidad de drenaje (Pedrozo-Acuña et al. 2012).

De hecho, en los cuerpos de agua semi-cerrados como la Laguna de Términos, la Bahía de Chetumal y la reserva de Sian Ka'an, los efectos de la marea de tormenta se amplifican. Sin embargo, brindan mayor protección del oleaje extremo. Los humedales y pantanos propensos a la inundación por tormentas en el Golfo de México cubren en su mayoría el estado de Tabasco (complejo deltaico de Grijalva-Mezcalapa-Usumacinta), norte de Tamaulipas (río Bravo) y Veracruz (río Papaloapan). A su vez, en el Océano Pacífico se encuentran los valles y planicies fértiles de Sonora, cerca de Ciudad Obregón y las llanuras de Magdalena, al suroeste de Ciudad Constitución en Baja California Sur. Esto denota la vulnerabilidad de la franja costera a lo largo del litoral mexicano en ambas cuencas.

Así pues, si se considera que el oleaje y la marea de tormenta inducidos por ciclones tropicales son una pieza clave de los desastres en la zona costera, la caracterización de dichos eventos es prioritaria para la planeación, manejo y mitigación de estos fenómenos hidrometeorológicos. Para realizar esta caracterización se han utilizado comúnmente los eventos históricos, por ejemplo, Panchang et al. (2013) usan huracanes históricos para caracterizar el oleaje extremo en el Golfo de México mientras que otros autores han usado eventos históricos para caracterizar eventos extremos en regiones específicas (Meza-Padilla et al. sometido; Wang & Oey 2008; Appendini et al. 2014a; Appendini et al. 2014b). Sin embargo, los datos históricos de ciclones tropicales son escasos y por lo general no constituyen una base de datos representativa para el análisis de valores extremos, lo que ha llevado a la generación de otras bases de datos como son los de Vickery et al. (2000) y Emanuel et al. (2006). En particular, Emanuel et al. (2006) propone una metodología basada en eventos sintéticos para sobrellevar la información limitada de los datos históricos. Dicha metodología se basa en las propiedades físicas de la generación, propagación y disipación de ciclones tropicales para generar eventos sintéticos que permita tener una base de datos robusta y apta para caracterizar eventos extremos en base a ajustes de funciones de distribución. Como resultado, este tipo de eventos sintéticos se han utilizado para caracterizar valores extremos de viento (Emanuel & Jagger 2010) y marea de tormenta (Lin et al. 2010), así como proveer efectos de cambio climático sobre la intensidad de ciclones tropicales (Emanuel et al. 2008) y marea de tormenta (Lin et al. 2012). En el caso de la marea de tormenta, Lin et al. (2014) demuestran como la base de datos de ciclones tropicales históricos puede sobreestimar la marea de tormenta debido a su limitación temporal al compararla con registros paleolíticos de huracanes, derivados de los depósitos acarreados tierra adentro por el fenómeno, mientras que la base de datos de eventos sintéticos al contar con una mayor frecuencia de eventos extremos provee estimaciones que concuerdan con los registros paleotempestológicos. Por ende, esta metodología ha demostrado ser útil para caracterizar los eventos extremos en periodos a largo plazo.

En México, la determinación de niveles máximos de marea de tormenta ha sido principalmente por medio de la reproducción numérica de eventos históricos (Ruíz-Martínez et al. 2009; Posada-Vanegas et al. 2011; Martínez-Martínez, R. 2014). Mientras que esto produce información de utilidad por las razones mencionadas con anterioridad, en este trabajo se desarrollan nuevas estimaciones basadas en 3,100 eventos sintéticos generados en el Atlántico Norte y Pacífico Oriental (1,550 en el Golfo de México y Caribe Mexicano – referido a partir de ahora como Ciclones del Atlántico Norte –CAN–, y 1,550 en el Océano Pacífico – referido a partir de ahora como Ciclones del Pacífico Oriental –CPO–. La intensidad y trayectoria de cada evento esta controlada por factores ambientales como el potencial de intensidad, la profundidad de la capa de mezcla en el océano y los vientos ambientales (Emanuel et al. 2006). Todos los eventos generados tocan tierra en la República Mexicana y

sus características (trayectoria, velocidad de vientos, radio máximo, presión central y presión exterior) fueron utilizadas para generar los campos de viento de cada evento y así poder forzar los modelos de oleaje e hidrodinámica que como resultado proveen valores de altura de ola significativa (H_s) y nivel del mar debido a la marea de tormenta (NM). De los resultados obtenidos se extraen los valores máximos por evento en cada nodo de la malla computacional, los cuales fueron ajustados a la función de distribución generalizada de valores extremos (GEV) y a la función de distribución tipo Weibull (WBL) para generar mapas de periodo de retorno de altura de ola significativa y marea de tormenta para diferentes periodos de retorno.

Los resultados de este estudio pretenden proveer una mejor estimación de los niveles extremos (oleaje y marea de tormenta) inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos y contribuir al desarrollo apropiado de criterios de diseño con la finalidad de mitigar la pérdida de vidas humanas y bienes materiales debido a estos fenómenos hidrometeorológicos.

1.1. Antecedentes

A nivel nacional, el oleaje y la marea de tormenta han sido estudiados previamente desde distintas perspectivas, como son los fenómenos atmosféricos que los generan, sus efectos en la columna de agua, y la interacción que se da entre ambos fluidos (océano-atmosfera). También se han analizado las bases de datos históricas para determinar los parámetros de diseño de las defensas costeras en México, analizando la distribución espacial de los huracanes en los Mares Mexicanos. Algunos ejemplos de los estudios realizados en las últimas décadas son:

- ✓ Desarrollo de un modelo numérico para la predicción de oleaje en tiempo real (Silva 1997).
- ✓ Desarrollo de un modelo de cálculo de los parámetros de oleaje en función de datos de viento (Silva 1996).
- ✓ Análisis de riesgo oceanográfico por huracanes en el Pacífico Mexicano (Silva et al. 2001).
- ✓ Climatología de la entrada a tierra de huracanes y tormentas tropicales en México (Jáuregui, 2003).
- ✓ Variabilidad y entrada a tierra en costas mexicanas de huracanes el Pacífico Tropical Oriental (Martínez & Cavazos, 2014).
- ✓ Análisis de parámetros de oleaje y espectro direccional por vientos extremos (Montoya et al., 2013).
- ✓ Niveles de superficie libre extremos inducidos por el oleaje en el borde de la laguna arrecifal de Puerto Morelos (Torres-Freyermuth et al., 2012).

- ✓ Reducción del esfuerzo del viento debido al oleaje profundo (swell) en condición de fuertes vientos (Nava et al. 2012).

Sin embargo, para incorporar en contexto este trabajo, a continuación se mencionan los trabajos relacionadas al tema de investigación. Bautista, E. (2001), desarrolla una herramienta numérica para evaluar la sobreelevación de la superficie libre generada por huracanes con anchos de celda constantes. Al final del estudio, se compara con datos medidos del huracán Gilberto (1988) en Cancún. Se concluye que la aproximación numérica se aproxima a los datos históricos. Entre las futuras líneas de investigación mencionadas en este trabajo se encuentra la incorporación de mallas anidadas y el oleaje.

Romero, E. (2003), contempla el análisis de marea de tormenta y la circulación inducida por ciclones tropicales provenientes del Pacífico Tropical, que afecten las costas de la bahía de La Paz y la región de Los Cabos, Baja California Sur. El modelo utilizado es en 2D (integrado en vertical) llamado Wes Implicit Flooding Model (WIFM) junto con el Standard Project Hurricane (SPH), modelos creados por el Coastal Engineering Research Centre. Se estudian 8 huracanes históricos y 2 hipotéticos con vientos máximos de 250 km/h y presión mínima de 920 milibares. Como resultados se tiene que la Bahía de La Paz es más vulnerable a la marea de tormenta que Los Cabos. Los huracanes que más afectan a La Paz son los que penetran al Mar de Cortés, mientras que la morfología en Los Cabos inhibe este fenómeno. Se destaca que hacen falta más puntos de medición (estaciones mareográficas) y que la información obtenida es puntual. Es decir, no permite cuantificar la magnitud de la marea de tormenta en toda la región.

Por otro lado, Bautista, E. (2005), analiza tres casos hipotéticos de una onda larga propagándose en un canal con características como ancho y profundidad variables, la circulación del flujo sobre una cuenca circular y posteriormente se analizan los huracanes Carmen (1974) e Isidoro (2002) para la región de Campeche utilizando mallas jerárquicas (Quadrees). La comparación de los casos analíticos con la solución numérica prueba la validez del modelo con un porcentaje de error menor al 10%. Se concluye que el hecho de que un huracán cruce sobre el punto de interés, no quiere decir que sea vulnerable a la inundación (e.g. el huracán Carmen al cruzar Campeche), sino que influyen la intensidad y dirección del viento como Isidore, que tuvo vientos normales a la costa de Campeche, ya que esto incrementa la dimensión de la marea de tormenta.

Posteriormente, Durán, G. (2010), analiza los huracanes históricos de 1949 a 2009 en el Golfo de México y Mar Caribe utilizando mallas jerárquicas. Utiliza dos modelos, el primero es la hibridación de un modelo paramétrico con uno de previsión de oleaje por viento para determinar los campos de presión y vientos del ciclón (HURAC). El segundo es un modelo hidrodinámico para calcular los niveles del mar. Se extraen los máximos anuales de 119 eventos y se ajustan a la distribución de Weibull para obtener los mapas de periodo de retorno de marea de tormenta en el Golfo de México y Mar Caribe. Entre las futuras líneas de investigación se encuentra

incluir el Océano Pacífico y mejorar la resolución de las mallas en la presencia de gradientes de profundidad pronunciados.

Finalmente, Martínez-Martínez, R. (2014), analiza frentes fríos, tsunamis y ciclones tropicales. Para evaluar los efectos de ciclones tropicales se usa la base de datos Atlantic HURDAT2 y NE/NC Pacific HURDAT2 a partir de 1949 y hasta el 2012. Se tomaron sólo aquellos puntos del ciclón tropical que estuvieron a menos de 500 km de cada punto de estudio, así como la categoría con la que llegaron. Se calculó la velocidad y dirección del viento, así como la presión atmosférica para determinar la marea de tormenta asociada cuando la dirección del viento tiene componentes que inciden sobre la costa, de acuerdo a las características de cada sitio; y el oleaje con su altura de ola y periodo en aguas profundas y run-up. El cálculo del regimen extremal para determinar los periodos de retorno se hizo de acuerdo a la distribución de Gumbel para determinar las cotas de inundación (suma de marea de tormenta y run-up). Se concluye que la región menos vulnerable a marea de tormenta es Baja California y Sonora, pero es la región con mayor rango de mareas y es necesario tomarlas en cuenta. Aunado a ello, estos dos estados son de los que menor porcentaje de población tienen en los municipios costeros. Por otro lado, la zona de mayor peligro es la península de Yucatán, ya que es vulnerable a la marea de tormenta (Yucatán) y el oleaje (Quintana Roo). Súmese el hecho de que en Campeche y Quintana Roo más del 75% de la población se encuentra en municipios costeros, condición que incrementa el riesgo por inundación.

En base a la información recabada, se tiene que la fuente principal de datos es histórica con un periodo máximo de 63 años (1949 – 2012), donde algunos se enfocan a una región en particular (de mayor ocurrencia ciclónica). Si bien para algunas localidades específicas los datos históricos pueden ser suficientes para caracterizar la zona, a nivel nacional no es suficiente y esto conlleva a un análisis limitado o muy generalizado. Aunado a ello, el estudio de oleaje inducido por ciclones tropicales ha sido escaso, lo cual da cabida a este estudio.

1.2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es estimar valores de oleaje y marea de tormenta inducidos por ciclones tropicales para distintos periodos de retorno a partir de eventos sintéticos e históricos. El uso de eventos sintéticos permite caracterizar el oleaje y la marea de tormenta para distintos periodos de retorno en zonas donde la escasez de datos no permite realizar un análisis pertinente de valores extremos. A su vez, permiten complementar los limitados datos históricos para obtener una mejor evaluación de eventos extremos en el país a fin, e incrementar la confiabilidad en los valores de diseño. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Obtención de ciclones tropicales sintéticos para el litoral mexicano a partir de la metodología de Emanuel (2006) y Emanuel et al. (2006, 2008), incluyendo

- información de trayectoria, intensidad, radio de vientos máximos y presión mínima para cada evento.
2. Generación de campos de vientos a partir de los eventos sintéticos en (1) utilizando la metodología de Emanuel & Rotunno (2011) y Holland (1980).
 3. Simulaciones con modelos numéricos espectrales de oleaje e hidrodinámica para obtener valores de altura de ola significativa y nivel del mar para cada evento.
 4. Extracción del oleaje y marea de tormenta máximo registrado en las series temporales de (3).
 5. Análisis de valores extremos para la base de datos obtenida en (4) para obtener valores de oleaje y sobreelevación del mar para distintos periodos de retorno en Mares Mexicanos.

2. Ciclones tropicales en México

Como se describe anteriormente, los ciclones tropicales representan un peligro en las zonas costeras, aunque también son un agente que transporta la humedad a distintas partes del país. Sin embargo, para la planeación y diseño en la zona costera, es el poder destructivo de estos eventos lo que se debe analizar, en particular las fuertes ráfagas de viento, lluvias intensas, sobre elevación del mar y el oleaje extremo superpuesto con mayor capacidad de intrusión tierra adentro. A continuación, se describen brevemente los eventos históricos que han afectado al país en ambas cuencas, haciendo énfasis en las regiones más vulnerables y en los eventos que más impacto han tenido. Posteriormente, se presenta una descripción de los eventos sintéticos (generación, propagación y disipación) y su climatológica en base a los eventos sintéticos al compararla con la base de datos histórica.

2.1. Eventos Históricos

Como se mencionó, México se ve afectado por ciclones tropicales que provienen del Atlántico y del Pacífico. En base a la información disponible y de dominio público publicada por el centro de servicios costeros de la NOAA (*NOAA Coastal Services Center - <http://coast.noaa.gov/hurricanes/>*), durante el período de 1980 a 2013, en el Golfo de México se presentaron 92 tormentas y depresiones tropicales, 48 huracanes de categoría 1 a 3 y 23 huracanes de categoría 4 a 5. Por otro lado, en el Pacífico se presentaron 315 tormentas y depresiones tropicales, 218 huracanes de categoría 1 a 3 y 92 huracanes de categoría 4 a 5. A continuación se muestra el desglose de los eventos que tocaron tierra en los diferentes estados costeros de México.

Tabla 1 - Desglose de ciclones tropicales que tocaron tierra en México acorde a la categoría máxima alcanzada por el huracán en Golfo de México y Caribe Mexicano durante el periodo 1980 a 2013.

Estado	Tormenta/Depresión Tropical	Categoría 1 a 3	Categoría 4 a 5
Tamaulipas	10	4	3
Veracruz	16	9	1
Tabasco	2	0	1
Campeche	6	9	3
Yucatán	3	5	4
Quintana Roo	8	12	6
Total	45	39	18

Es importante destacar que en la tabla anterior hay eventos como el huracán Mitch (1998) que afectó varios estados de la República Mexicana y por ende el conteo del mismo evento aparece en el estado afectado, en este caso, Tabasco, Campeche y

Yucatán. A su vez, varios de los huracanes que entran a Quintana Roo cruzan la península y afectan a Campeche por lo cual el mismo evento aparece en ambos estados.

En el Atlántico se ven mayormente afectados Quintana Roo y Tamaulipas mientras que en el Pacífico son Baja California Sur y Sinaloa como se muestra en la siguiente tabla

Tabla 2 – Desglose de ciclones tropicales que tocaron tierra en México acorde a la categoría máxima alcanzada por el huracán en el Pacífico durante el periodo 1980 a 2013.

Estado	Tormenta/Depresión Tropical	Categoría 1 a 3	Categoría 4 a 5
Baja California	0	1	1
Baja California Sur	11	12	8
Sonora	2	6	4
Sinaloa	8	12	4
Nayarit	0	1	1
Jalisco	1	6	0
Colima	1	1	1
Michoacán	4	1	0
Guerrero	0	3	0
Oaxaca	9	2	0
Chiapas	2	1	0
Total	38	46	19

Por lo tanto, durante los últimos 33 años ha existido mayor incidencia de ciclones tropicales en el Pacífico que en el Atlántico, pero en el Golfo de México y Caribe Mexicano los eventos son más intensos al tocar tierra (vea Jáuregui, 2003).

Las trayectorias de los CPO tienen un patrón a lo largo de la temporada. Según Romero Vadillo (2003) se pueden clasificar de la siguiente forma:

1. Viajan paralelos a costas mexicanas. Predominan las tormentas tropicales y huracanes categoría 1. La mayor frecuencia de estas trayectorias se presenta en agosto y septiembre.
2. Viajan en dirección noroeste desde su formación y recurvan hacia el noreste entre las latitudes 20 y 25 norte. En su mayoría son huracanes categoría 1 y dominan en el mes de septiembre.
3. Viajan paralelos a la costa e ingresan justo por el Golfo de California. Suelen ser tormentas tropicales y huracanes categoría 1. Son los eventos menos frecuentes y se pueden presentar en los meses de agosto, septiembre y octubre con una mayor probabilidad de ocurrencia en septiembre.

4. Los huracanes que se alejan de las costas mexicanas adentrándose al Pacífico entre las latitudes 20 y 25 Norte. Se han observado desde julio hasta septiembre y se presentan con frecuencia huracanes categoría 2, ya que siguen alimentándose de las aguas cálidas del océano en vez de perder fuerza al entrar a tierra.

Estas no son tendencias definidas, ya que las trayectorias e intensidades de un huracán dependen de un gran número de factores atmosféricos y oceánicos.

Por otro lado, en el Atlántico se tiene que la tendencia es:

1. Las tormentas más severas entran por la parte del Caribe Mexicano. Estos huracanes se forman desde la parte oriente de Barbados y se intensifican a lo largo del Caribe. La intensidad de arribo y las características de la Península de Yucatán le permiten afectar al estado de Yucatán y Campeche e intensificarse nuevamente en el Golfo de México para impactar el estado de Tamaulipas o Veracruz. En su mayoría en el mes de septiembre.
2. Los ciclones que viajan con trayectoria dominante de este a oeste e incrementando latitud hasta adentrarse al Golfo de México dónde debido a cambios en las condiciones atmosféricas como pueden ser frentes fríos, las trayectorias sufren una desviación hacia el sur y entran a tierra en la parte baja del Golfo de México. Los estados más vulnerables son Campeche y Yucatán. La mayor frecuencia de estas trayectorias se presenta próxima al fin de la temporada de huracanes e inicios del invierno. Ejemplo de ello son Roxanne (1995), Isidore (2002) y Stan (2005)
3. Las tormentas débiles que se forman dentro del Golfo de México frente a las costas de Campeche y Tabasco. En algunos casos se pueden llegar a intensificar como Ingrid en 2013 e impactar fuertemente el litoral al norte del país. Se encuentran desde junio hasta octubre.
4. Los eventos que se forman en el Golfo de Tehuantepec y atraviesan la sierra entre Chiapas y Oaxaca para salir nuevamente hacia el Golfo de México. La gran parte de estas tormentas no cuenta con la suficiente energía desde su generación para atravesar la sierra y sucumben antes de entrar al Golfo de México. Estos eventos ocurren entre agosto y octubre.

2.2. Eventos sintéticos

Los eventos sintéticos son una alternativa viable para la caracterización de los eventos extremos de una región, ya que su naturaleza se encuentra ligada estrictamente a la física del fenómeno, lo cual le permite considerar escenarios que aún no se han presentado históricamente.

La génesis de los eventos se realiza a través del sembrado de vórtices de manera aleatoria, que si bien en un principio se basó en las estadísticas históricas de zonas

de génesis (Emanuel 2006; Emanuel et al. 2006), posteriormente se decidió hacerlo de manera indiscriminada a fin de poder incluir efectos del cambio climático (Emanuel et al. 2008). Los vórtices se distribuyen en todo momento, sin importar latitud, temporada, temperatura superficial del océano u otros factores. La única condición existente es que las tormentas no se pueden formar si se encuentran dentro de los primeros 2 grados de latitud (Norte y Sur) respecto al ecuador. Los vórtices no se convierten en ciclones tropicales necesariamente, de hecho, la mayoría sucumbe a un bajo potencial de intensidad, baja entropía en la tropósfera media y a un alto corte vertical del viento (Emanuel, et al., 2008). Únicamente los vórtices que desarrollan velocidades de al menos 21 m/s son los que se convierten en ciclones tropicales.

Una vez realizada la ciclogénesis, las trayectorias son determinadas por medio del modelo beta y de advección propuesto por Marks (1992), en el cual se asume que la tormenta se desplaza con relación a los vientos medios ambientales de la tropósfera más una corrección debido al cambio de la fuerza de Coriolis por la latitud (efecto beta). La trayectoria de la tormenta se obtiene como el promedio ponderado de las variables atmosféricas que se encuentran entre los niveles a 250 y 850 hPa, obtenidos de 30 años del reanálisis atmosférico del National Centre for Environmental Prediction (NCEP).

La intensidad de los campos de viento se obtiene utilizando un modelo determinístico acoplado océano-atmósfera conocido como CHIPS por sus siglas en inglés (Coupled Hurricane Intensity Prediction System). Este modelo utiliza como condiciones de frontera información del estado termodinámico y el esfuerzo de corte vertical del viento obtenidos de estadísticas de modelos globales, temperatura y humedad relativa de la tropósfera media, asignando la entropía media mensual a 600 hPa del modelo global a la variable de entropía en el modelo CHIPS. También utiliza la temperatura superficial del océano y la estructura térmica de las capas superiores.

Utilizando dicha metodología, se generaron un total de 1,550 huracanes para el Golfo de México y Mar Caribe, y un total de 1,550 huracanes para el Pacífico Mexicano, dando un total de 3,100 eventos sintéticos utilizados en este estudio. Estos eventos fueron generados y proporcionados por el Dr. Kerry Emanuel del Massachusetts Institute of Technology. En la siguiente figura, se ilustran cien eventos sintéticos por cuenca.

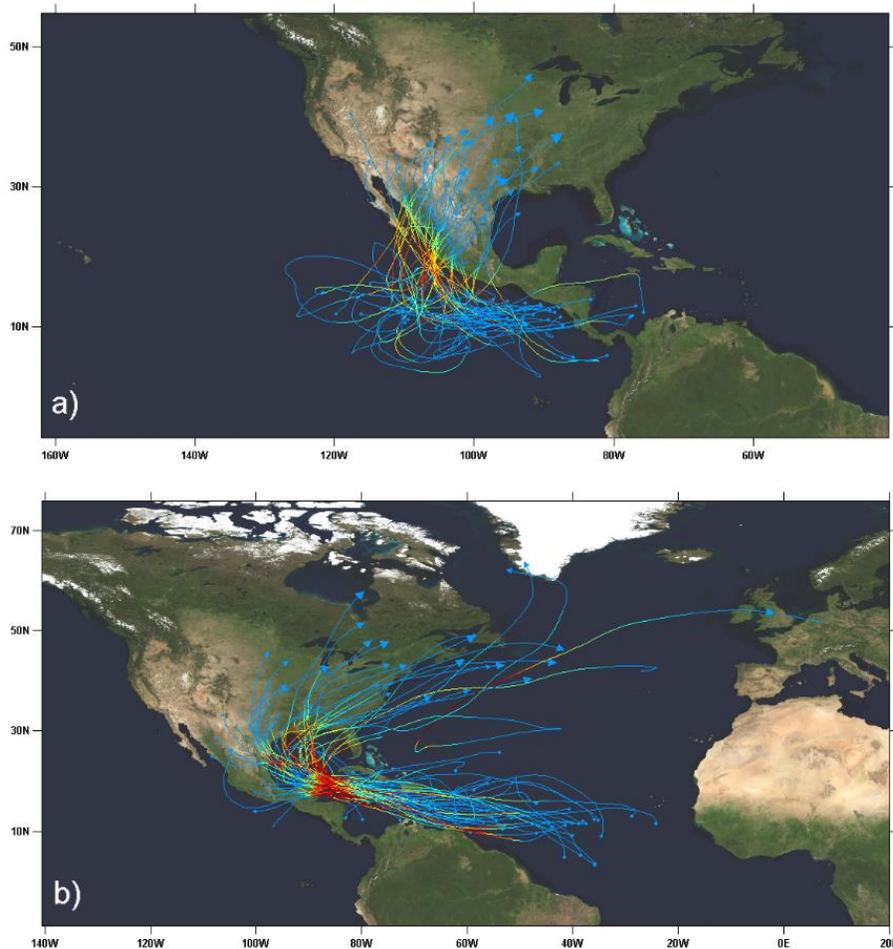


Figura 1 - Ejemplo de 100 huracanes sintéticos mostrando su intensidad y trayectoria en el a) Pacífico Oriental (panel superior) y en el b) Atlántico Norte (panel inferior).

Cada uno de los 3,100 eventos sintéticos utilizados en este estudio cuenta con la siguiente información:

- ✓ Distribución temporal (Año, mes, día y hora)
- ✓ Latitud (grados)
- ✓ Longitud (grados)
- ✓ Velocidad máxima de vientos (m/s)
- ✓ Radio de vientos máximos (km)
- ✓ Presión central (milibares)
- ✓ Presión atmosférica fuera de la influencia del ciclón tropical (milibares)

La fecha y hora asignada a cada evento se debe a que fueron generados y controlados en base a las características reales de la atmósfera entre 1980 y 2010. Esto es, acorde a las medias varianzas y covarianzas del reanálisis del NCAR. La información enlistada con anterioridad, nos permite generar los campos de viento por medio de modelos paramétricos que después sirven para forzar los modelos hidrodinámicos y de oleaje.

2.3. Climatología de ciclones tropicales en México

Para validar los eventos sintéticos, se comparan con la base de datos histórica de HURDAT2 (<http://www.nhc.noaa.gov/data/>) en el periodo de 1980 a 2010, ya que desde 1980 se aplican técnicas de medición satelital y los datos se consideran más confiables (Mann & Emanuel 2006; Landsea 2007) y además es el período utilizado para la generación de los eventos sintéticos.

La comparación se muestra en la Figura 2 para la velocidad del viento, el ciclo anual y la posición de entrada a tierra. Considerando que la base de datos histórica es limitada (~30 años) en comparación con las bases de datos sintéticas que cubren el mismo periodo con una mayor cantidad de eventos, se espera que los histogramas difieran. A pesar de ello, muestran un patrón similar indicando que los eventos sintéticos, aunque sean muchos más, siguen las características físicas de los eventos históricos.

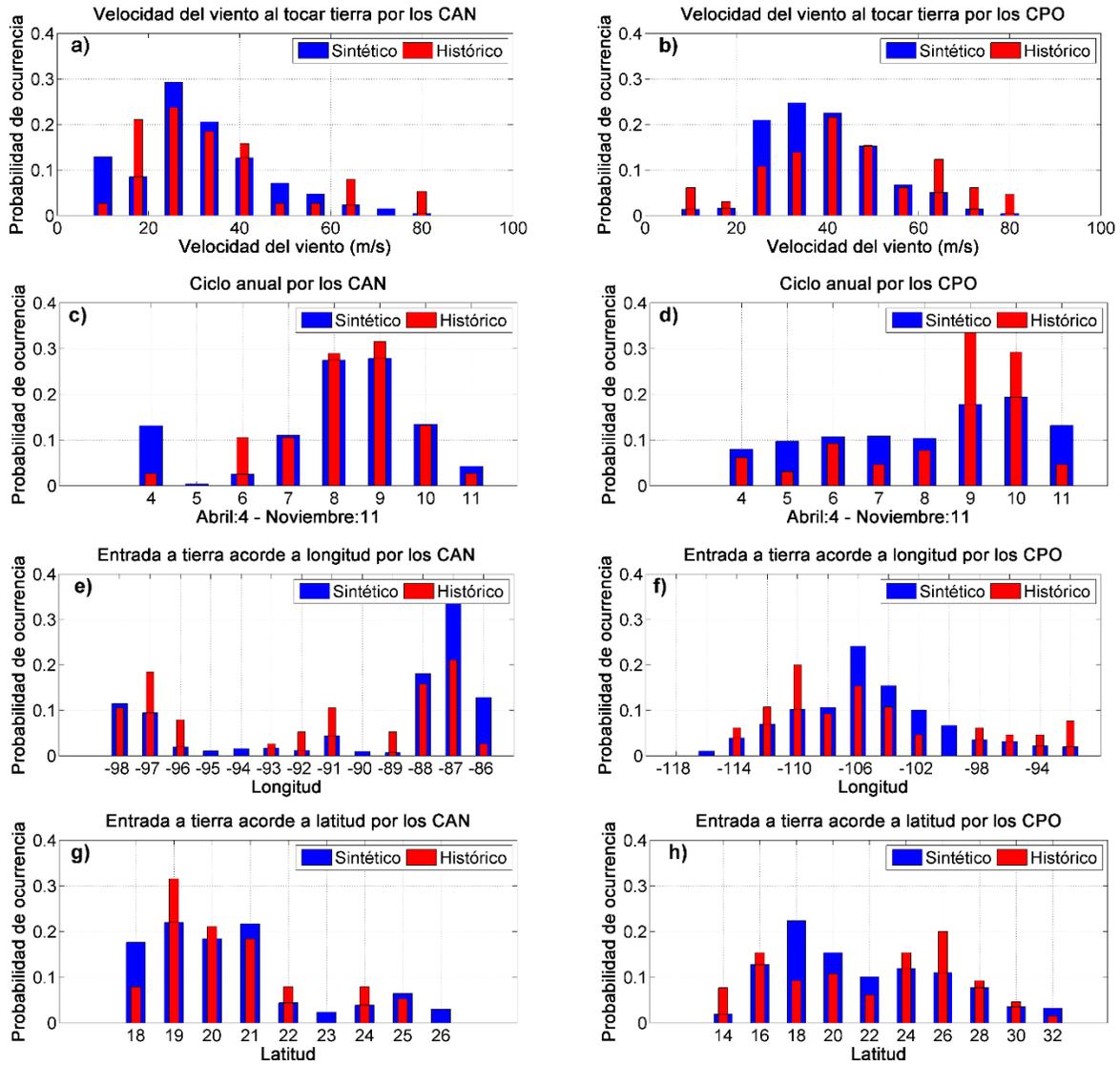


Figura 2 - Histogramas de frecuencia de la comparación de eventos sintéticos contra históricos para la velocidad del viento al entrar a tierra en el a) Atlántico y en el b) Pacífico. El ciclo anual en el c) Atlántico y en el d) Pacífico, así como la posición de entrada a tierra acorde a longitud en el e) Atlántico y en el f) Pacífico. Finalmente, la posición de entrada a tierra acorde a latitud para el g) Atlántico y el h) Pacífico.

Otro aspecto importante en la comparación de históricos contra sintéticos es que en los treinta años del periodo histórico, muchas áreas en el Golfo de México (entre las latitudes 23 a 26 norte y longitudes 95 a 90 oeste) no experimentaron la entrada a tierra de huracanes. Mientras que los eventos sintéticos muestran que esta región es susceptible a ciclones tropicales, a pesar de observar lo contrario en el registro histórico. Por lo tanto, el uso de ciclones tropicales sintéticos representa una base de datos confiable para el cálculo de parámetros de diseño a largo plazo como ha



Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos

sido hecho por autores como Emanuel & Jagger (2010), Klima et al. (2012) y Lin et al. (2012).

De igual forma, nótese que en ambos casos (históricos y sintéticos) los huracanes más intensos en el Atlántico tocan tierra en Quintana Roo y Tamaulipas mientras que en el Pacífico Oriental son los que entran por Baja California Sur y Sinaloa. Las tormentas más débiles en ambas bases de datos se presentan dentro del Golfo frente a las costas de Tabasco y en el Golfo de Tehuantepec que recurvan a temprana edad hacia tierra en el Atlántico y Pacífico respectivamente.

3. Generación de campos de viento y presión atmosférica

En el LIPC del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se han realizado varios estudios relacionados al uso de modelos paramétricos para la generación de campos de viento para ciclones tropicales para su uso en la modelación de oleaje, entre ellos los trabajos de Robles-Díaz (2012) y Ruíz-Salcines (2013). En ellos, se han evaluado los modelos de Young & Sobey (1981), Holland (1980), Emanuel & Rotunno (2011), Depperman (1947), Jelesnianski et al. (1992) y Emanuel (2004). Si bien en el trabajo de Robles-Díaz (2012) solamente se probaron los primeros 3 modelos paramétricos mencionados, sin definir cual tiene los resultados más próximos a lo medido por boyas, en el trabajo de Ruiz-Salcines (2013) se estableció que el modelo paramétrico de Emanuel & Rotunno (2011) muestra mejor correlación con las observaciones.

Acorde a Lin y Chavas (2012), el campo de vientos utilizado para forzar los modelos numéricos es la resultante de la suma de dos componentes:

- ✓ Componente ambiental de fondo.
- ✓ Componente axi-simétrica.

La componente ambiental de fondo se asocia a la velocidad de traslación de la tormenta basándose en dos suposiciones: el movimiento de la tormenta es principalmente debido a la advección del viento en la troposfera libre próximo a la tormenta (Chan, 2005) y que la fricción de la superficie causa una desviación (en magnitud y dirección) en la componente ambiental de fondo. De esta manera, la componente ambiental de fondo es desacelerada por el factor alpha (Powell et al., 2003) y rotada en contra de las manecillas del reloj por un ángulo beta (Bretschneider, 1972) en la troposfera libre que advecta la tormenta acorde a la teoría de la capa límite de Ekman. Los valores utilizados en este estudio son $\alpha = 0.55$ y $\beta = 20^\circ$ y fueron seleccionados en base al estudio realizado por Lin & Chavas (2012).

La componente axi-simétrica se asocia a la geometría radial de la tormenta, acorde a Emanuel & Rotunno (2011), está en función de la estratificación térmica de los flujos de salida en base a una escala pequeña de turbulencia que limita el número de Richardson a un valor crítico constante. Esta suposición permite derivar las ecuaciones descritas a detalle en Emanuel & Rotunno (2011) para determinar la variación del flujo de salida en términos del momento angular. Como resultado, la predicción de la estructura del vórtice y su intensidad, coinciden bien con ciclones tropicales simulados en modelos físicos usando modelos axi-simétricos. Esta relación está dada por:

$$V(r) = \frac{2r \left(R_m V_m + \frac{1}{2} f R_m \right)}{R_m^2 + r^2} - \frac{fr}{2} \quad (Ec. 3.1)$$

donde, $V(r)$ es la velocidad del viento en un radio determinado, r es el radio existente entre el vórtice de la tormenta y cada nodo computacional, R_m es el radio de vientos máximos, V_m es la velocidad de vientos máximos y f es el parámetro de Coriolis dado por $2\Omega \sin\varphi$ ($\Omega = 7.292 \times 10^{-5} \frac{rad}{seg}$; $\varphi = \text{latitud}$).

Ambas componentes se pueden ilustrar de la siguiente manera

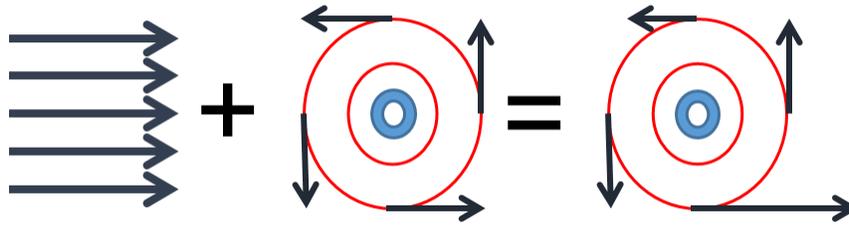


Figura 3 - Campo de vientos asimétrico debido a la sumatoria de la componente ambiental de fondo y la componente axi-simétrica propia del huracán.

Para obtener la presión atmosférica se utiliza el estudio basado en Holland (1980), el cual es una extensión del modelo propuesto por Schloemer (1954). Este modelo se basa en una relación exponencial negativa en el que los perfiles radiales del huracán son normalizados para eliminar variaciones debido a las diferencias entre la presión atmosférica y la presión central de la tormenta y asemejan hipérbolas rectangulares. Al tomar los antilogaritmos y acomodar los términos matemáticos, la ecuación que describe la presión en cualquier punto alrededor del ojo del huracán está dada por:

$$P_r = P_c + (P_n - P_c) \exp\left(-R_{mw}/r\right)^B \quad (Ec. 3.2)$$

donde P_r es la presión atmosférica en radio determinado r , P_c es la presión en el vórtice de la tormenta, P_n es la presión existente fuera de la influencia del huracán, R_{mw} es el radio de vientos máximos y B es el parámetro de forma propuesto por Holland (1980).

Utilizando la información de los eventos sintéticos en las formulaciones anteriores, es posible obtener campos de presión atmosférica y vientos (ver Figura 4) para cada paso de tiempo del evento sintético y usarlos como mapas espacio-temporales para forzar los modelos hidrodinámicos y de oleaje.

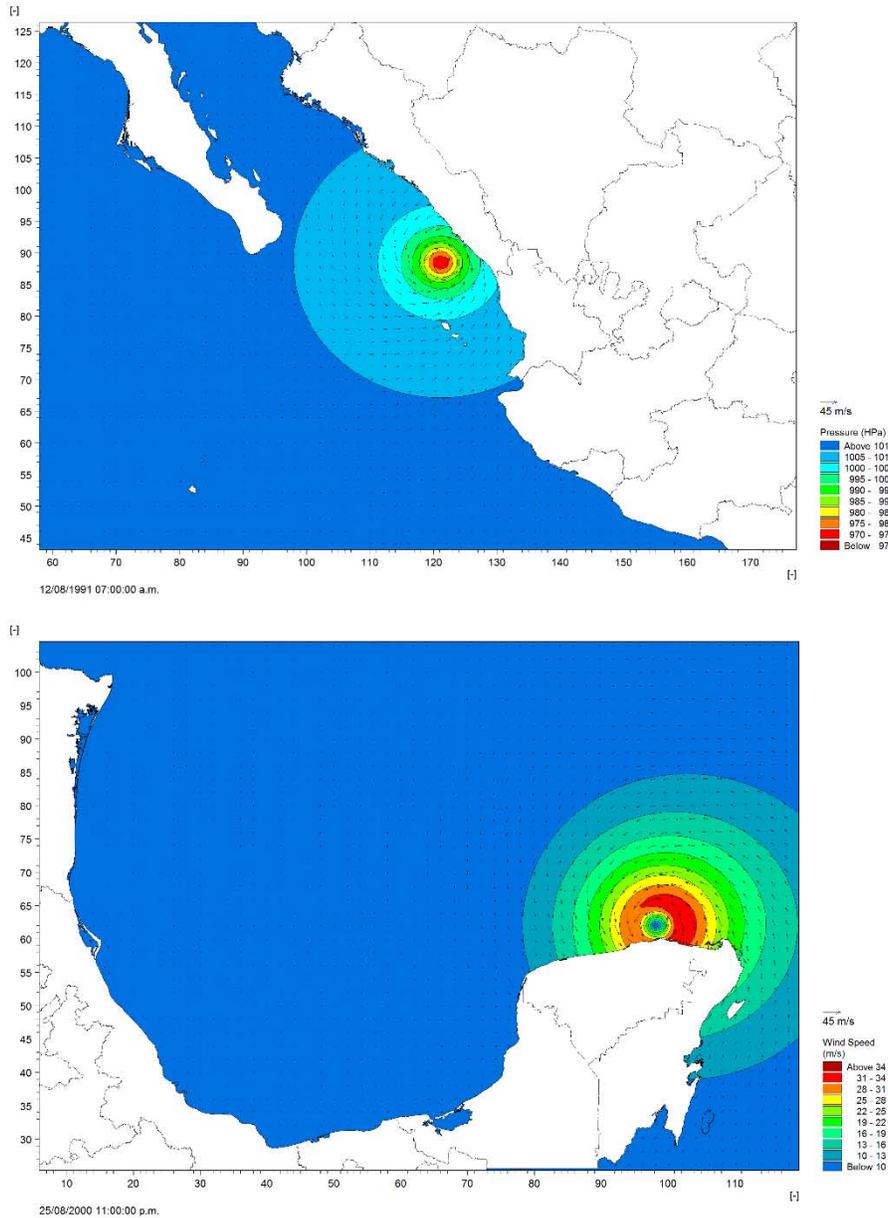


Figura 4 - Campos de viento y presión atmosférica generados en base a la formulación de Emanuel & Rotunno (2011) y Holland (1980) respectivamente para los CPO (panel superior) y los CAN (panel inferior). En el panel superior las tonalidades muestran la presión atmosférica mostrando el efecto del barómetro invertido y en el panel inferior las tonalidades muestran la velocidad del viento donde se percibe la asimetría en el campo de vientos debido a la componente ambiental de fondo

De esta manera se generaron un total de 3,100 campos de viento y presión atmosférica (1,550 por cuenca) considerando una resolución espacial aproximada de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (longitud, latitud), con una resolución temporal de 1 hora, durante toda la duración de cada uno de los eventos.

4. Modelación numérica de oleaje y marea de tormenta

La modelación numérica ejecutada en este proyecto se lleva a cabo utilizando los modelos disponibles del software MIKE desarrollado por el Danish Hydraulic Institute (DHI - <http://www.dhigroup.com/>) basados en mallas no estructuradas. Para la modelación hidrodinámica se emplea el modelo MIKE 21 HD-FM y para la modelación espectral del oleaje se emplea el modelo de oleaje de tercera generación MIKE 21 SW.

El modelo de oleaje simula el crecimiento, transformación y decaimiento del oleaje generado por viento (*sea*) y oleaje de mar profundo (*swell*) tanto fuera de costa como en el litoral. Las principales características son:

- ✓ Crecimiento del oleaje debido a la acción del viento
- ✓ Interacción no lineal entre olas
- ✓ Disipación debido al descrestamiento (*whitecapping*)
- ✓ Disipación debido a la fricción de fondo
- ✓ Disipación por asomeramiento induciendo la rotura del oleaje
- ✓ Refracción y difracción debido a variaciones batimétricas
- ✓ Interacción oleaje – corriente

El modelo hidrodinámico se basa en las ecuaciones RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) para flujos incompresibles bajo las suposiciones de Boussinesq y presión hidrostática. Por lo tanto, consiste de ecuaciones que describen continuidad, momento, temperatura, salinidad y densidad dentro de un esquema de turbulencia finita y puede ser acoplado a otros modelos (no incluidos en este estudio) para resolver:

- ✓ Transporte de sedimentos
- ✓ Derrame de hidrocarburos
- ✓ Calidad del agua
- ✓ Transporte de materiales cohesivos
- ✓ Trayectoria de partículas
- ✓ Inundación

A continuación se da una breve descripción de los modelos, posteriormente se definen las mallas computacionales utilizadas y finalmente la configuración y validación utilizada.

4.1. Modelo espectral de oleaje

Este modelo incluye dos tipos de formulaciones, la formulación paramétrica direccionalmente desacoplada, y una formulación totalmente espectral. El modelo se basa en la ecuación de conservación de la acción del oleaje descrita por Komen et al. (1994) y Young (1999). A continuación se presenta una breve descripción de la formulación empleada, la cual está descrita a detalle en Sorensen et al. (2004).

El MIKE 21 SW está formulado en términos de la dirección del oleaje θ , la frecuencia angular relativa σ , donde la densidad de acción $N(\sigma, \theta)$, está relacionada a la densidad de la energía $E(\sigma, \theta)$, por medio de

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (Ec. 4.1.1)$$

En aplicaciones a gran escala, la ecuación de balance de la acción del oleaje se formula en coordenadas esféricas, donde la evolución del espectro del oleaje en una posición está dado por su latitud ϕ , longitud λ , en un instante t de la siguiente forma

$$\frac{\delta N}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta \phi} c_{\phi} N + \frac{\delta}{\delta \lambda} c_{\lambda} N + \frac{\delta}{\delta \sigma} c_{\sigma} N + \frac{\delta}{\delta \theta} c_{\theta} N = \frac{S}{\sigma} \quad (Ec. 4.1.2)$$

donde la fuente de energía S , representa una sobre posición de distintas funciones fuente que describen los múltiples fenómenos físicos descritos por

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (Ec. 4.1.3)$$

Donde S_{in} , representa la energía del viento transferida de manera lineal y no lineal de acuerdo a Janssen (1989, 1991) y Janssen et al. (1989), S_{nl} representa las interacciones no lineales ola-ola definidas por Hasselmann & Hasselmann (1985) y Hasselmann et al. (1985), S_{ds} representa la disipación de la energía debido al descrestamiento (*whitecapping*) descrito en Komen et al. (1994), S_{bot} es la disipación de la energía por fricción de fondo descrita por Johnson & Kofoed-Hansen (2000) y S_{surf} representa la disipación de la energía por rotura descrita por Battjes & Janssen (1978) y Eldeberkly & Battjes (1996).

Es importante mencionar que este modelo se ha utilizado de manera satisfactoria en el área de estudio para modelar eventos extremos en el Golfo de México (Appendini et al. 2013), la intensificación del clima marítimo (Appendini et al. 2014b) y el potencial energético en el Mar Caribe (Appendini et al. 2015). En base a estos estudios es que se establecen los parámetros utilizados para la modelación numérica de este proyecto.

La discretización de las ecuaciones de gobierno se realiza utilizando el método de volúmenes finitos centrado en la celda, tanto para el espacio geográfico como el espectral. La integración en el tiempo se basa en una aproximación de paso fraccional aplicando un esquema de secuencia múltiple explícito para la propagación de la acción del oleaje.

4.2. Modelo hidrodinámico

El modelo hidrodinámico es un sistema general de modelación numérica para la simulación de los niveles y flujos del mar en estuarios, bahías y zonas costeras. Simula flujos no estacionarios en dos dimensiones (integrado en la vertical) en fluidos por medio de la conservación de masa y momento. Las ecuaciones que describen los flujos y las variaciones del nivel del mar son:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (\text{Ec. 4.2.1})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q \\ - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \quad (\text{Ec. 4.2.2}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_p \\ - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \quad (\text{Ec. 4.2.3}) \end{aligned}$$

Donde $h(x, y, t)$ es la profundidad ($= \zeta - d, m$), $d(x, y, t)$ es la profundidad (m) variando en el tiempo, $\zeta(x, y, t)$ es la superficie libre (m), $p, q(x, y, t)$ son los flujos de densidad en las direcciones x- e y- ($m^3/s/m$) $= (uh, vh)$; (u, v) = velocidades promediados en la vertical en las direcciones x- e y-, $C(x, y)$ es la resistencia de Chezy ($m^{1/2}/s$), g es la aceleración gravitacional (m/s^2), $f(V)$ es el factor de fricción por viento, $V, V_x, V_y(x, y, t)$ son las componentes de velocidad del viento en las direcciones x- e y- (m/s), $\Omega(x, y)$ es el parámetro de Coriolis dependiente de la latitud (s^{-1}), $p_a(x, y, t)$ es la presión atmosférica ($kg/m/s^2$), ρ_w es la densidad del agua (kg/m^3), x, y son las coordenadas espaciales (m), t es el tiempo (s) y $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ son las componentes de los esfuerzos cortantes efectivos.

En la modelación hidrodinámica de este estudio existen parámetros que controlan las variaciones del nivel del mar como son la fricción en el fondo y en la superficie libre. El esfuerzo en el fondo $\bar{\tau}_b$, se determina por medio de la siguiente ley cuadrática

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho_o} = C_f \bar{u}_b |\bar{u}_b| \quad (\text{Ec. 4.2.4})$$

donde C_f es el coeficiente de arrastre, \bar{u}_b es la velocidad del flujo por encima del fondo y ρ_w es la densidad del agua. El coeficiente de arrastre en términos del número de Manning es

$$C_f = \frac{g}{\left(Mh^{\frac{1}{6}}\right)^2} \quad (Ec. 4.2.5)$$

Donde g es la aceleración gravitacional, h es la profundidad y M es el número de Manning, el cual se estima a partir de la longitud en la rugosidad del fondo (k_s) y se define como

$$M = \frac{25.4}{k_s^{\frac{1}{6}}} \quad (Ec. 4.2.6)$$

El valor utilizado se encuentra dentro del rango propuesto por DHI (2012) para ambientes marinos.

Por otro lado, el término de la fricción del viento ($f(v) \cdot V \cdot V_x$) se determina acorde a Smith & Banke (1975) por medio de la siguiente parametrización y como se muestra en la Figura 5

$$f(v) = \begin{cases} f_0 & \text{para } V < V_0 \\ f_0 + \frac{V - V_0}{V_1 - V_0} \cdot (f_1 - f_0) & \text{para } V_0 \leq V \leq V_1 \\ f_1 & \text{para } V > V_1 \end{cases} \quad (Ec. 4.2.7)$$

donde $f_0 = 0.00063$, $V_0 = 0 \text{ m/s}$ y $f_1 = 0.00260$, $V_1 = 30 \text{ m/s}$

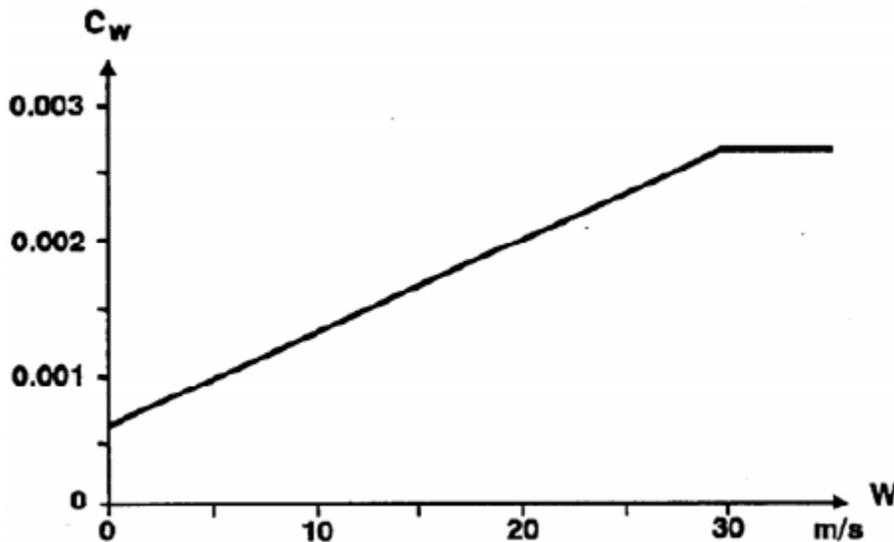


Figura 5 - Diagrama de fricción del viento. En el eje x- la velocidad del viento (m/s) y en el eje y- el coeficiente de fricción del viento.

Los valores utilizados para este estudio se encuentran dentro de la parametrización propuesta por DHI (2014a), la información a detalle de todas las ecuaciones que ejecuta el modelo se encuentran en DHI (2014a).

El periodo de simulación fue variando acorde al evento modelado, mientras que el paso de tiempo puede tener un valor mínimo de 0.01 segundos y un máximo de 1800 segundos en un esquema de integración de secuencia múltiple. Cada paso de tiempo está definido acorde al valor del CFL (número de Courant-Friedrich-Levy). La integración en el tiempo y la discretización en el espacio es de orden bajo, con un algoritmo rápido considerando un valor crítico de 0.80 para el CFL. Los detalles de cada parámetro se enlistan en la sección de configuración del modelo.

4.3. Mallas computacionales y batimetrías

Se establecieron dos diferentes dominios, uno para los CAN y otro para los CPO. La batimetría empleada en ambos dominios es la ETOPO 1 (Amante & Eakins 2009) complementada con información de cartas náuticas en zonas costeras y levantamientos batimétricos locales en donde existía dicha información (e. g. Progreso, Sisal, Veracruz y Tuxpan en el Golfo de México¹), vea Figura 6.

¹ Las mediciones en Tuxpan, Ver. fueron proporcionadas por Roberto Uribe de la Comisión Federal de Electricidad, en Veracruz, Ver. por Sokaris de la Luz Aranda de la Administración Portuaria Integral, en Sisal, Yuc. Por el Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros y en Progreso, Yuc. Por Ismael Mariño del CINVESTAV.

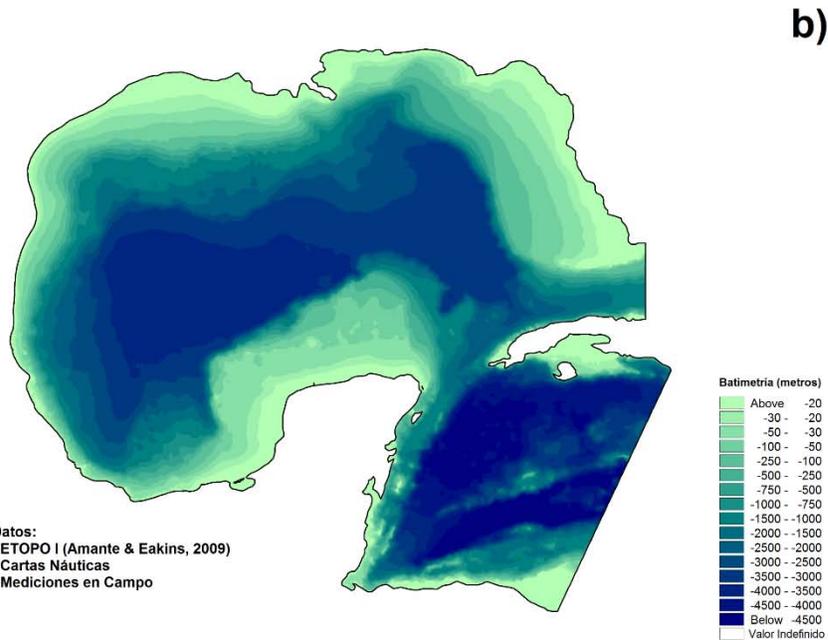
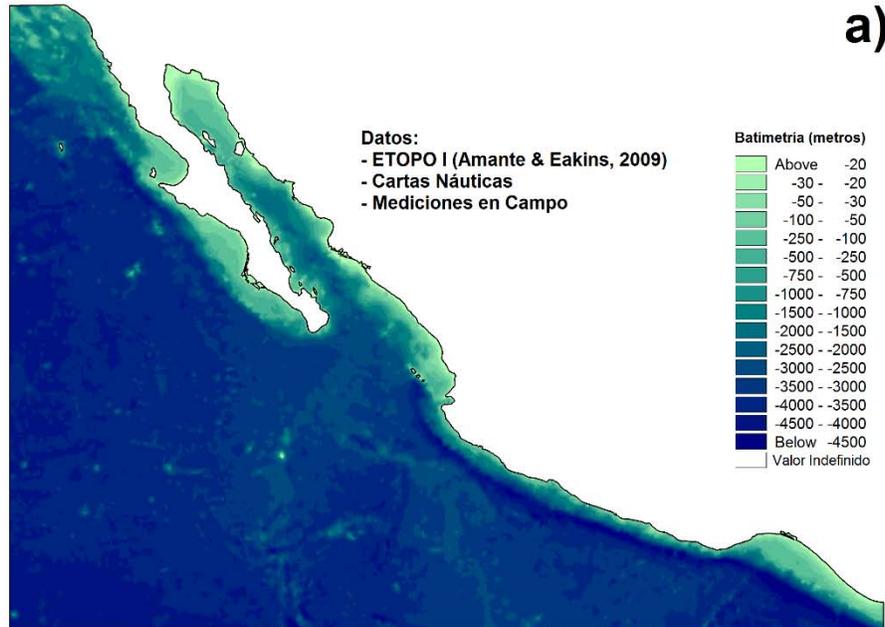


Figura 6 - Batimetrías utilizadas para los dominios computacionales. a) Pacífico Mexicano para los CPO y b) Golfo de México y Mar Caribe para los CAN.

Es importante aclarar que la línea de costa utilizada como límite para la malla computacional es la línea de costa obtenida del World Vector Shoreline de la NOAA con una resolución de 1:250,000 (esto indica que una pulgada en el mapa representa 250,000 pulgadas en la realidad). Al generar las mallas, esta resolución fue modificada para tener una resolución de la costa de 10 km y hasta de 1 km en

las zonas costeras donde se encuentran las Administraciones Portuarias Integrales (API), a fin de no tener elementos demasiado pequeños que limiten la velocidad de cómputo de los modelos. A pesar de que la línea de costa del World Vector Shoreline es la mejor información disponible, contiene errores de hasta 500 m, con lo cual la malla de cálculo en ocasiones puede cortarse en cotas batimétricas por debajo del nivel cero, así como por encima de éste. Es debido a esto, que al generar la batimetría existen zonas con valores positivos, como la zona del Golfo de Tehuantepec o el Alto Golfo de California.

Se emplean mallas no estructuradas para ambas cuencas (Golfo de México y Caribe Mexicano y Pacífico Mexicano) que varía de una resolución gruesa fuera de la costa (i.e. ± 10 km entre nodos) hasta una resolución más fina (i.e. ± 1 km) próxima al litoral donde se encuentran los principales puertos de México (vea Figura 7). El uso de mallas flexibles no estructuradas permite focalizar la mayor resolución a la zona de interés dejando el resto del modelo con un espaciamiento amplio con la finalidad de mejorar el rendimiento computacional.

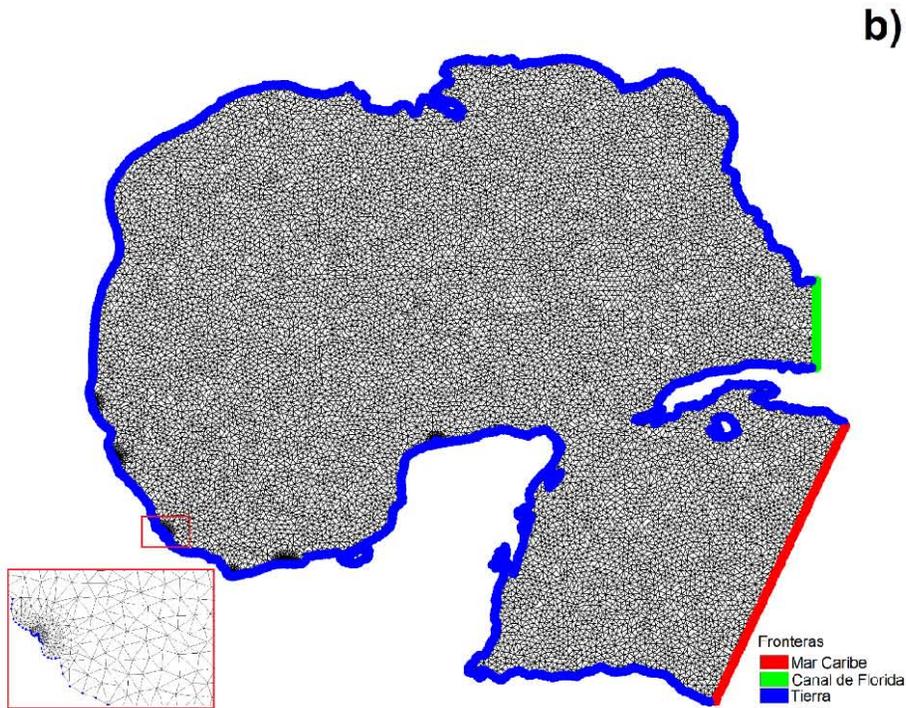
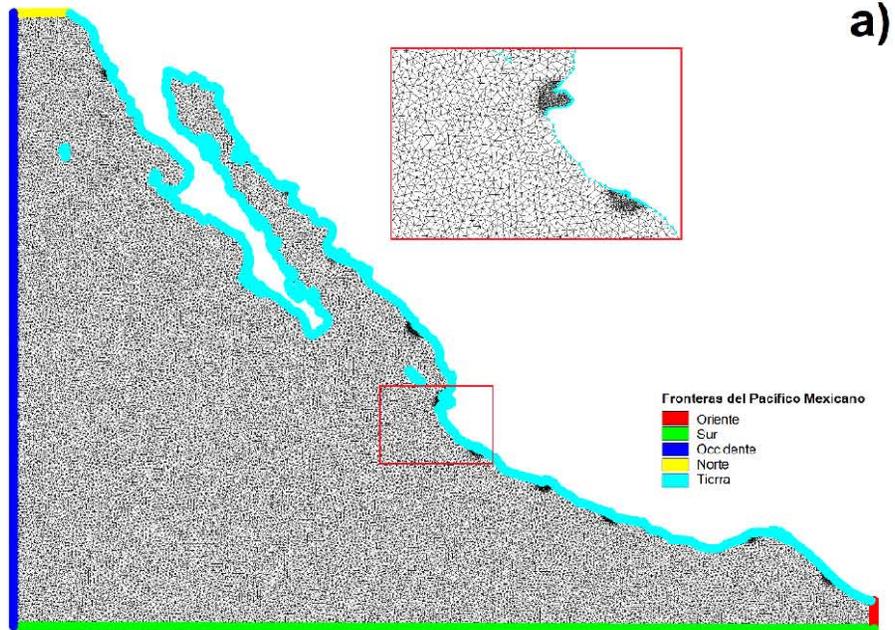


Figura 7 - Mallas no estructuradas con resolución variable utilizadas en este estudio. a) Malla del Pacífico Mexicano mostrando en el recuadro rojo un detalle del refinamiento en las localidades próximas a los puertos de Manzanillo y Puerto Vallarta. b) Malla del Golfo de México y Mar Caribe mostrando en el recuadro rojo un detalle del refinamiento en la localidad próxima al puerto de Veracruz.

4.4. Configuración y validación de modelos

En esta sección se describe de manera concisa la metodología aplicada para la modelación numérica por medio de un diagrama y posteriormente se muestran en una tabla los valores utilizados para cada parámetro. Finalmente se explica la validación de los modelos.

4.4.1. Oleaje

A continuación, se muestra un diagrama de flujo sobre la operación del MIKE 21 SW y posteriormente se enlista a manera de tabla todos los parámetros utilizados.

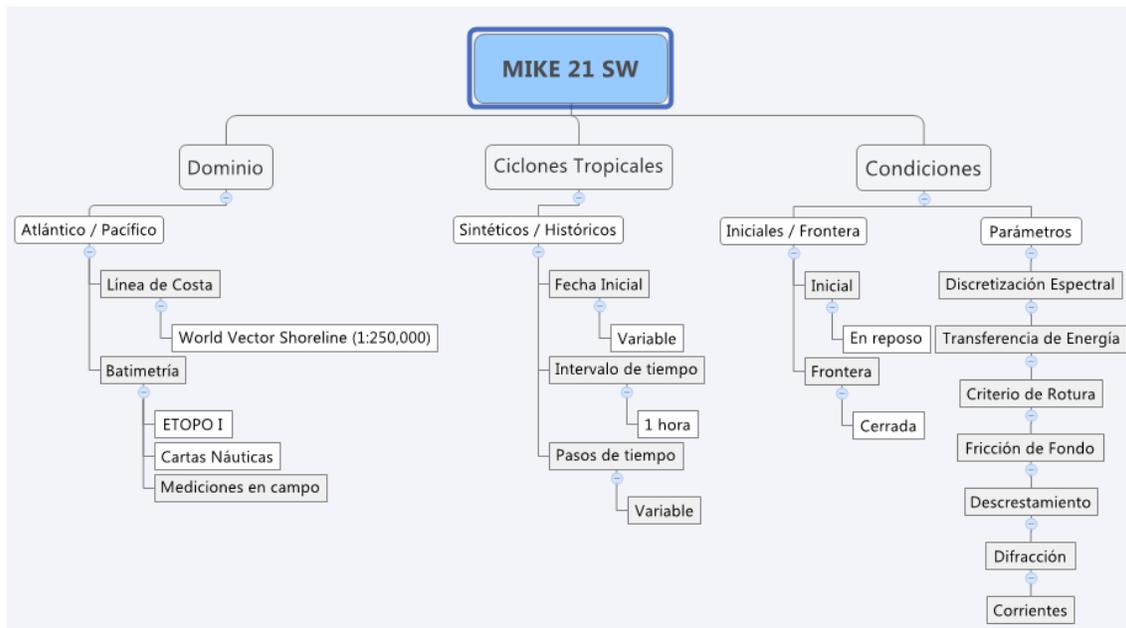


Figura 8 - Diagrama de trabajo para el modelo espectral de oleaje

Tabla 3 - Configuración utilizada en el modelo MIKE 21 SW para la modelación del oleaje

Parámetro	Valor utilizado
Dominio CPO	Batimetría del Pacífico 22,170 nodos y 42,948 elementos
Dominio CAN	Batimetría del Golfo de México y Mar Caribe 14,584 nodos y 28,225 elementos
Tiempo	Pasos de tiempo: Dependiente del evento Intervalo de tiempo: 1 hora Fecha Inicial: Dependiente del evento
Ecuaciones básicas	Formulación Espectral: Completa Formulación del tiempo: No estacionario
Discretización espectral	Tipo: Logarítmica Número de frecuencias: 17 Frecuencia mínima: 0.05 Hz Factor de frecuencia: 1.1
Discretización direccional	Tipo: Rosa de 360 grados Número de direcciones: 18
Tipo de solución	De orden bajo con algoritmo rápido
Viento	Dependiente del evento Interacción océano-atmósfera: Acoplado Parámetro de Charnock: 0.01
Transferencia de energía	Incluida con interacciones cuádruples
Criterio de Rotura	Ruessnik et al. (2003) Gamma: Valor constante de 0.80 Alpha: Valor constante de 1.0
Fricción del fondo	Modelo: Rugosidad de Nikuradse Valor: Constante de 0.04
Descrestamiento	Modelo: Whitecapping Coeficiente de disipación C_{dis} : Constante de 3.5 Coeficiente de disipación Δ_{dis} : Constante de 0.6
Condiciones iniciales	Tipo: Espectro de formula empírica Formulación: JONSWAP Fetch Growth Expression
Condiciones de frontera	Cerradas
Salidas	Altura de ola significativa Periodo medio Periodo pico Dirección media del oleaje Componentes de velocidad del oleaje Potencia del oleaje

El modelo fue calibrado en tres fases. En primer lugar se estudió la resolución espectral y direccional necesaria para evitar el fenómeno de “manguera de jardín” (garden sprinkler effect) el cual se representa gráficamente en la Figura 9. El objetivo es obtener una buena propagación del oleaje con la resolución que esto implique sin obtener los mismos resultados pero de manera ineficiente debido a una mayor resolución incrementando los tiempos de modelado innecesariamente. Posteriormente, el oleaje fue calibrado a través de los parámetros relativos a descrestamiento (*whitecapping*) en circunstancias de vientos de baja intensidad (calmas y Nortes) empleando el campo de vientos del reanálisis CFSR. Finalmente, se calibró en presencia de vientos intensos (huracanes) a través de la limitación del crecimiento del espectro, estableciendo un límite de saturación en la energía del espectro, en relación con la intensidad del viento. La metodología empleada para la calibración se encuentra descrita a detalle en Ruiz-Salcines (2013).

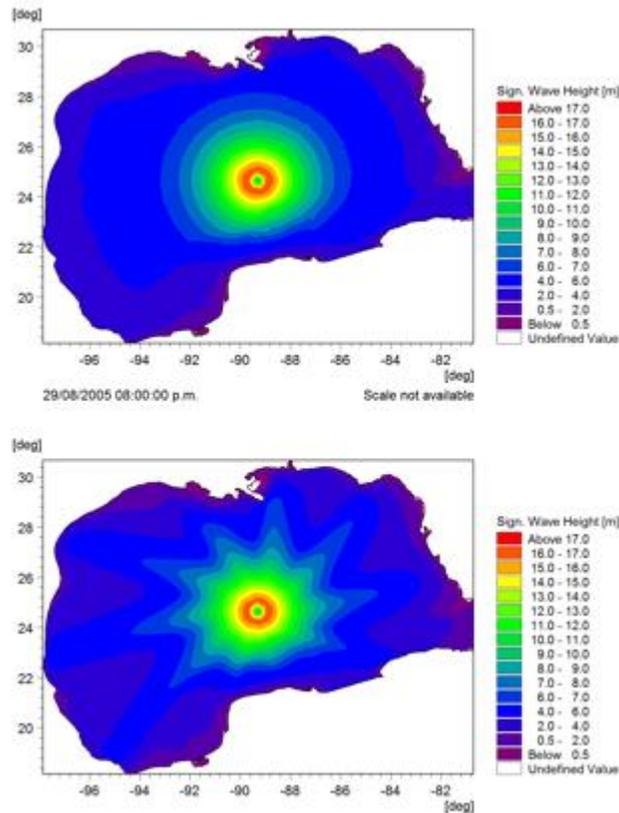


Figura 9 - Comparativa de propagación de oleaje modelado mostrando el efecto manguera de jardín. En el panel superior se modela el oleaje con 36 direcciones, mientras que en el panel inferior solamente con 10 denotando una mala propagación dentro del Golfo de México.

4.4.2. Hidrodinámico

A continuación, se muestra un diagrama de flujo sobre la operación del MIKE 21 HD FM y posteriormente se enlista a manera de tabla todos los parámetros utilizados.

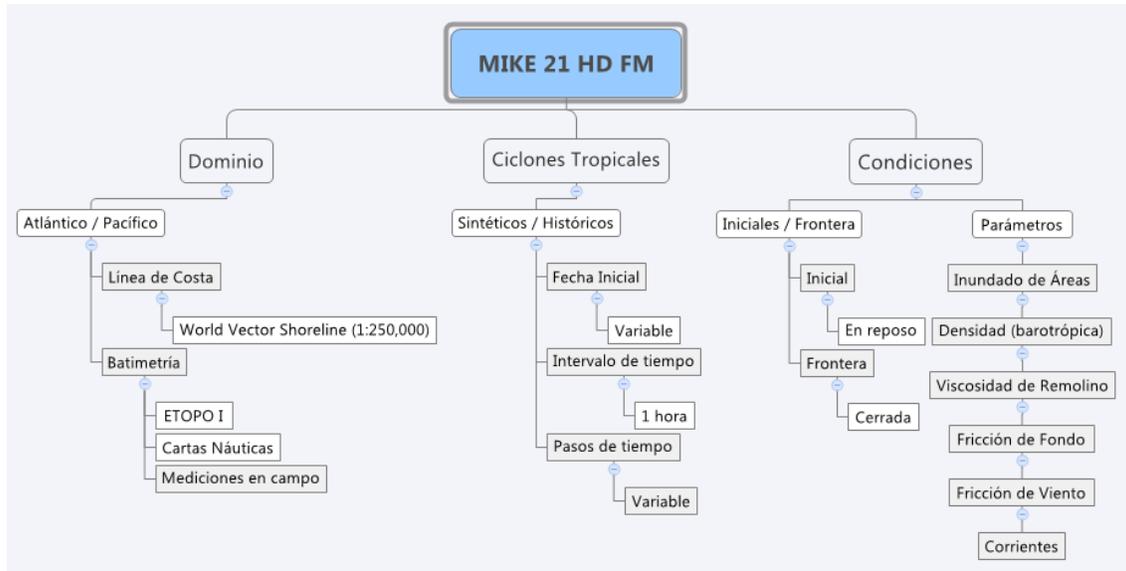


Figura 10 - Diagrama de trabajo para el modelo hidrodinámico

Tabla 4 - Configuración utilizada en el modelo MIKE 21 HD FM para la modelación hidrodinámica

Parámetro	Valor utilizado
Dominio CPO	Batimetría del Pacífico 24,397 nodos y 47,194 elementos
Dominio CAN	Batimetría del Golfo de México y Mar Caribe 15,871 nodos y 30,675 elementos
Tiempo	Pasos de tiempo: Dependiente del evento Intervalo de tiempo: 30 minutos Fecha Inicial: Dependiente del evento
Tipo de solución	De orden bajo con algoritmo rápido
Profundidad	Sin corrección
Inundado y secado de áreas	Profundidad de secado: 0.005 m Profundidad de inundado: 0.05 m Profundidad de mojado: 0.1 m
Densidad	Barotrópica
Viscosidad turbulenta	Tipo: Smagorinsky Valor: Constante de 0.28
Fricción del fondo	Tipo: Número de Manning Valor: Constante de $60 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
Fuerza de Coriolis	Variable en el dominio
Viento	Dependiente del evento
Fricción del viento	Tipo: Variación lineal acorde a la velocidad Velocidad: 7.5 m/s con fricción de 0.0012 Velocidad: 27.5 m/s con fricción de 0.0024
Condiciones iniciales	Nivel del mar en reposo
Condiciones de frontera	Nivel del mar y velocidades en reposo
Salidas	Superficie libre Magnitud y dirección de la corriente Velocidad del viento Dirección del viento Presión atmosférica

Para la validación del modelo hidrodinámico se realizó una búsqueda de registros del nivel del mar a lo largo del litoral mexicano para simular cualquier ciclón tropical histórico que haya podido ser medido por alguna estación. Desafortunadamente, no se encontraron suficientes datos disponibles. Incluso en los registros más recientes, como la entrada a tierra de Odile en Baja California Sur, donde se aprecia que horas antes de que el vórtice entre a tierra, el mareógrafo pierde la señal y no hay medición disponible.

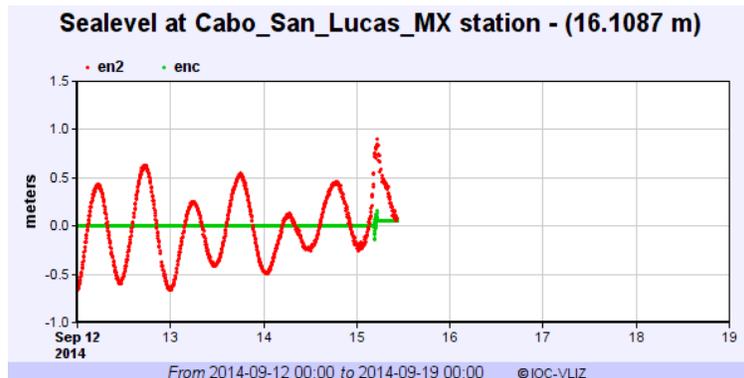


Figura 11 - Registro del nivel del mar en Cabo San Lucas antes de que Odile (2014) entrara a tierra como un huracán categoría 3.

De forma alternativa, se simuló el huracán Ike (2008), ya que fue un huracán intenso estudiado extensamente desde hace muchos años y se cuenta con muchos registros y mediciones. Por lo que se comparó con los resultados del modelo SLOSH y datos medidos en varias estaciones a lo largo de la bahía de Galveston, Texas. Este modelo (SLOSH) ha sido evaluado ampliamente en las costas del Golfo de México en Estados Unidos. Como ejemplo, el estudio de Glahn et al. (2009) presenta una evaluación del modelo SLOSH en el cual se comparan 570 mediciones de mareógrafos y marcas de agua para 13 huracanes distintos, mostrando resultados satisfactorios con una precisión de $\pm 20\%$.

Al considerar que ambos modelos (SLOSH y MIKE21 HD FM) toman en cuenta los mismos parámetros (tamaño de la tormenta, presión atmosférica, velocidad de traslación, trayectoria e intensidad de los vientos) y omiten las mismas variables (descarga de ríos, inundación por lluvia e impacto del oleaje sobre la marea de tormenta), se consideró adecuado utilizar los resultados obtenidos para el huracán Ike, como base de validación en los parámetros del modelo MIKE 21 HD FM. En la Figura 12 se muestra la trayectoria del huracán en naranja y los símbolos rojos indican la ubicación de las tres estaciones seleccionadas (02: Costa afuera justo sobre el ojo del huracán, 06: Barra litoral frente a la zona costera y 11: Bocana de la bahía de Galveston) para la extracción de series temporales a fin de comparar los valores de marea de tormenta obtenidos por los modelos (SLOSH y MIKE 21 HD FM) como se muestra en la Figura 13. Se puede observar que en los tres puntos, ambos modelos coinciden temporalmente con el pico máximo de marea de tormenta.



Figura 12 - Ubicación geográfica de las tres localidades seleccionadas para comparar los valores de marea de tormenta obtenidos por SLOSH y MIKE21 HD FM durante el huracán Ike (2008) en Texas.

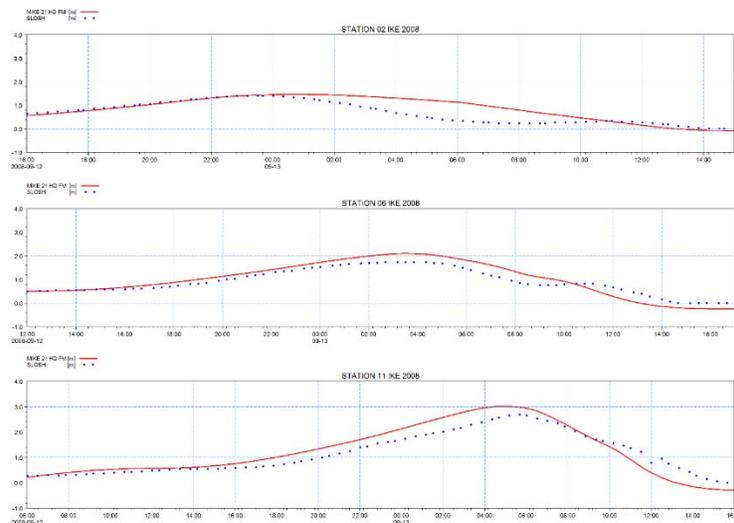


Figura 13 – Series temporales de marea de tormenta obtenida de los modelos SLOSH y MIKE 21 HD FM para la entrada a tierra de Ike (2008) en la bahía de Galveston, Texas en tres sitios distintos. En el panel superior se muestra la localidad fuera de costa por donde paso el ojo del huracán, en el panel medio se muestra la localidad próxima a la barra litoral en el frente costero y en el panel inferior la localidad en la bocana de la bahía de Galveston.

La marea astronómica no se incluyó en ninguna simulación con el fin de evaluar exclusivamente la sobre elevación del nivel del mar debido a los campos de viento y presión atmosférica de cada ciclón tropical sintético. Por lo tanto, el nivel de referencia es el nivel medio del mar (cota cero).

5. Climatología de oleaje y marea de tormenta en México

Tras haber modelado 1,550 eventos por cuenca y para cada modelo (HD y SW), se tiene un total de 6,200 simulaciones. 3,100 simulaciones que arrojan valores de altura de ola significativa y 3,100 simulaciones que arrojan valores del nivel del mar para los CAN y los CPO. En la primera sección se describe la climatología obtenida por medio de los eventos sintéticos para el Golfo de México y Caribe Mexicano y en la segunda sección para el Pacífico Mexicano.

5.1. Golfo de México y Caribe Mexicano

Para proveer un esquema general de la climatología de los eventos sintéticos, a continuación se presentan el régimen medio, la desviación estándar y el régimen extremal representado por el percentil 99 para el oleaje y la marea de tormenta respectivamente.

5.1.1. Oleaje

El oleaje generado por ciclones tropicales en esta región del país repercute principalmente al litoral expuesto al Caribe, ya que recibe el embate frontal de tormentas fuertes que tienen un largo periodo de maduración e intensificación desde su génesis. Como se muestra en la Figura 14, toda la franja litoral de Quintana Roo está expuesta al oleaje intenso a excepción del frente costero protegido por Cozumel, donde se percibe una disminución en la altura de ola debido a la difracción debido a la presencia de la isla. La media muestra mayores magnitudes en la región próxima a Cancún para posteriormente dirigirse hacia la costa norte del estado de Tamaulipas. La geometría litoral de la península de Yucatán permite que las costas de Campeche, Tabasco y parte de Veracruz reciban oleajes de menor magnitud.

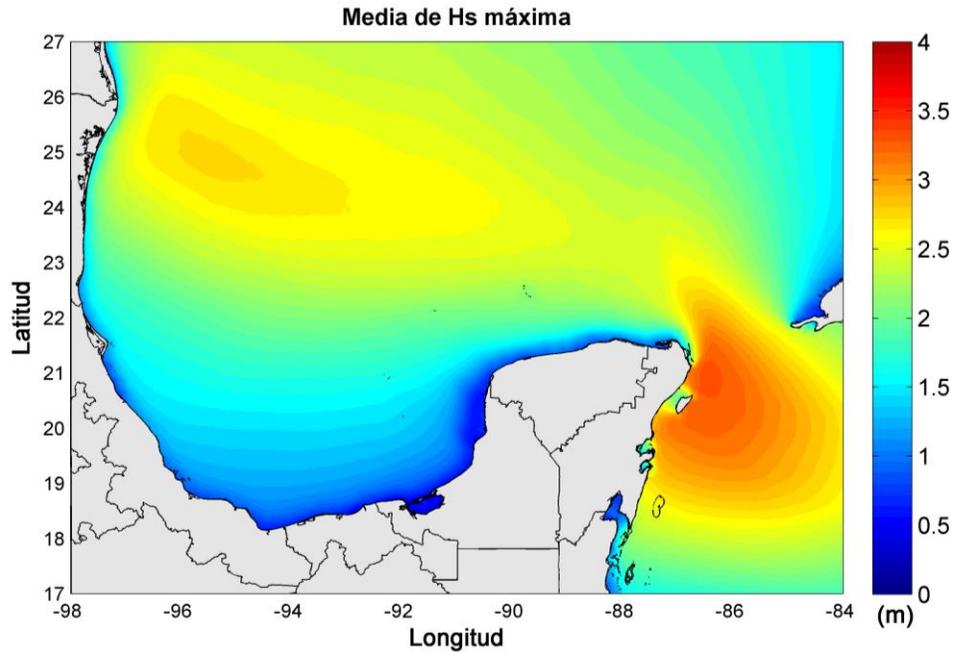


Figura 14 - Mapa de la media correspondiente a la altura de ola significativa máxima generada por los CAN

En la Figura 15, la desviación estándar muestra una mayor dispersión bien acentuada en las costas de Quintana Roo (indicando valores alejados de la media) tras una atenuación en la parte central del Golfo para posteriormente intensificarse al sur de Texas y el norte de Tamaulipas. Dentro del Golfo de México se tienen alturas de ola de menor tamaño debido a ciclones tropicales entre las latitudes 18°N y 23°N

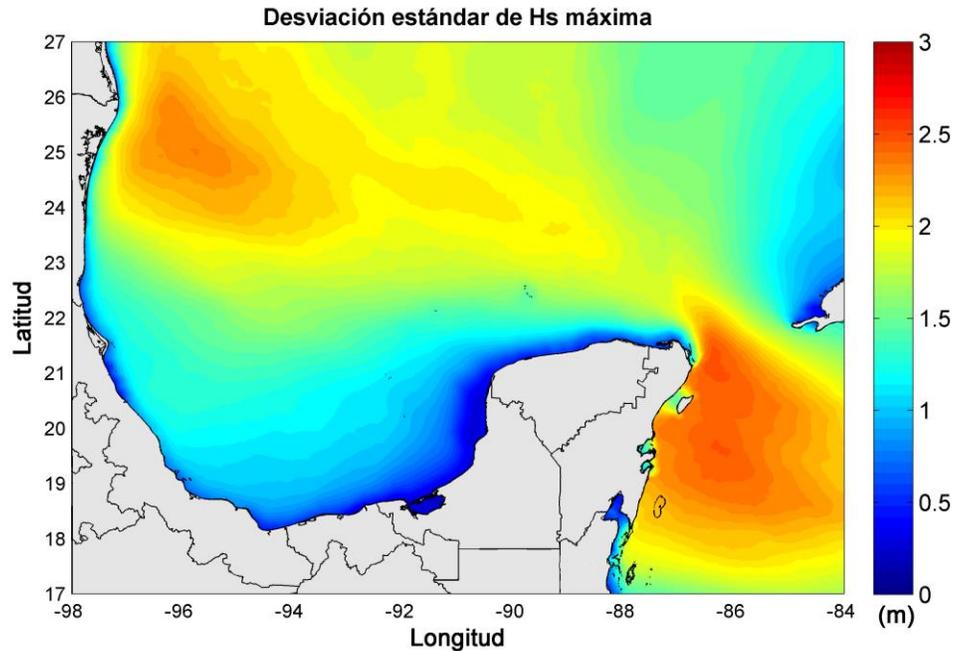


Figura 15 - Mapa de la desviación estándar correspondiente a la altura de ola significativa máxima generada por los CAN

Finalmente, el mapa de máximos (caracterizado por medio del percentil 99) de la Figura 16 muestra una clara intensificación en el frente costero de Quintana Roo con valores superiores a los 10 metros. A su vez, la restricción geográfica que se da entre las costas mexicanas y cubanas, muestran que en el canal de Yucatán se encuentran los valores más altos. Aunado a ello, se percibe claramente que la región norte del Golfo de México (a partir de los 23°N) tiene una mayor frecuencia de valores máximos asociados con la trayectoria de los huracanes que ingresan al Golfo de México a través del Mar Caribe y que las menores alturas de ola se registran en el estado de Campeche.

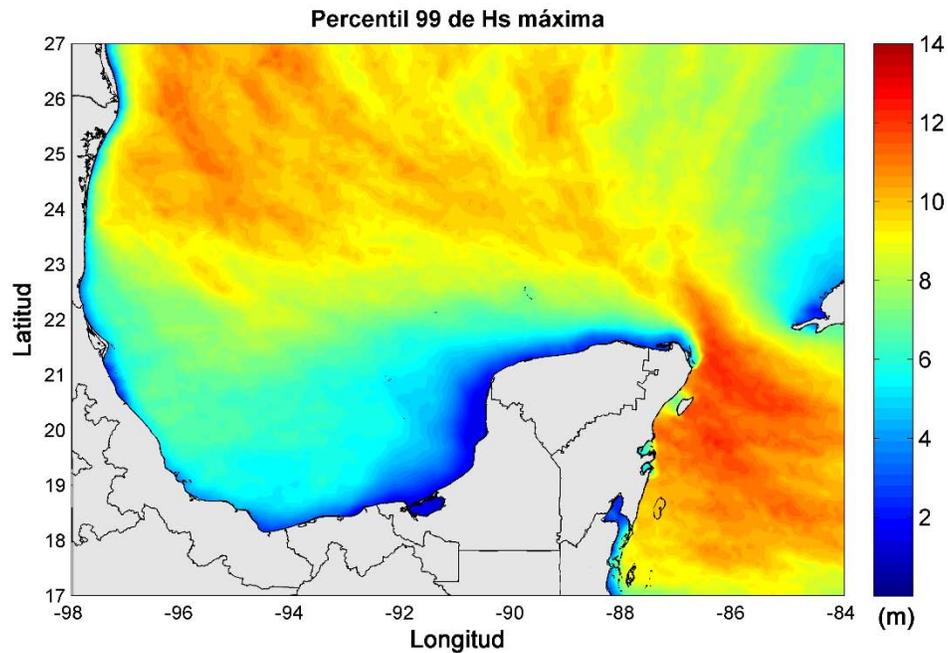


Figura 16 - Mapa del percentil 99 correspondiente a la altura de ola significativa máxima generada por los CAN.

5.1.2. Marea de tormenta

En cuanto a marea de tormenta se refiere, las condiciones batimétricas cambian las regiones de valores máximos y como muestra la Figura 17, la región más vulnerable a sobreelevación del nivel del mar debido a ciclones es la bahía de Chetumal. Como es de esperarse, la plataforma continental frente a la península de

Yucatán muestra que toda la región somera del estado de Yucatán y parte de Campeche se encuentran expuestos a la marea de tormenta.

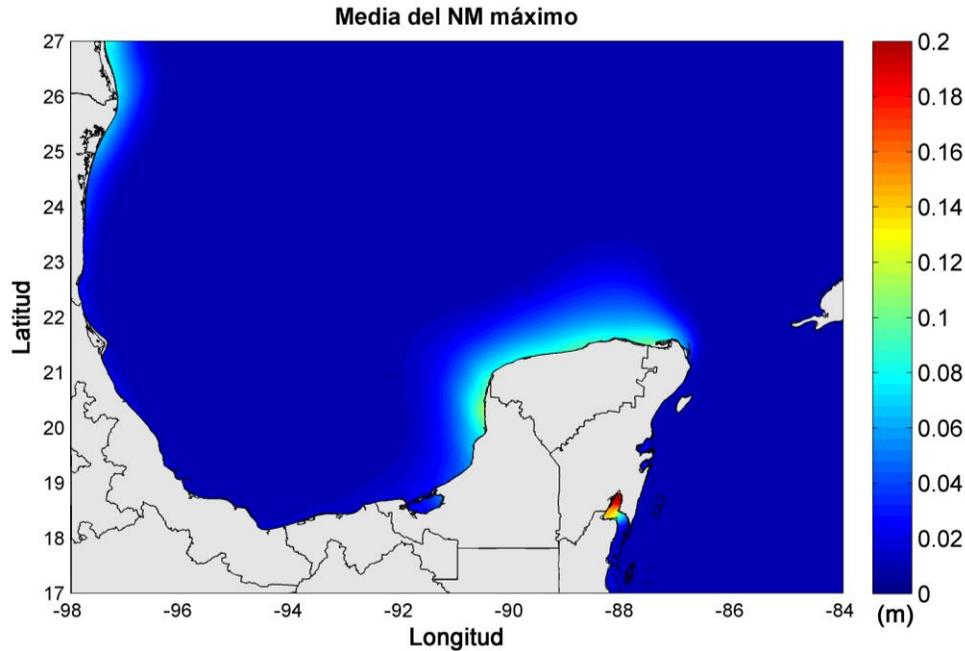


Figura 17 - Mapa de la media correspondiente al nivel del mar máximo generada por los CAN

La desviación estándar (vea Figura 18) indica puntualmente que las regiones con valores más alejados de la media son el litoral campechano que cubre desde Campeche hasta Celestún, el litoral de Quintana Roo que cubre la isla de Holbox y finalmente la bahía de Chetumal.

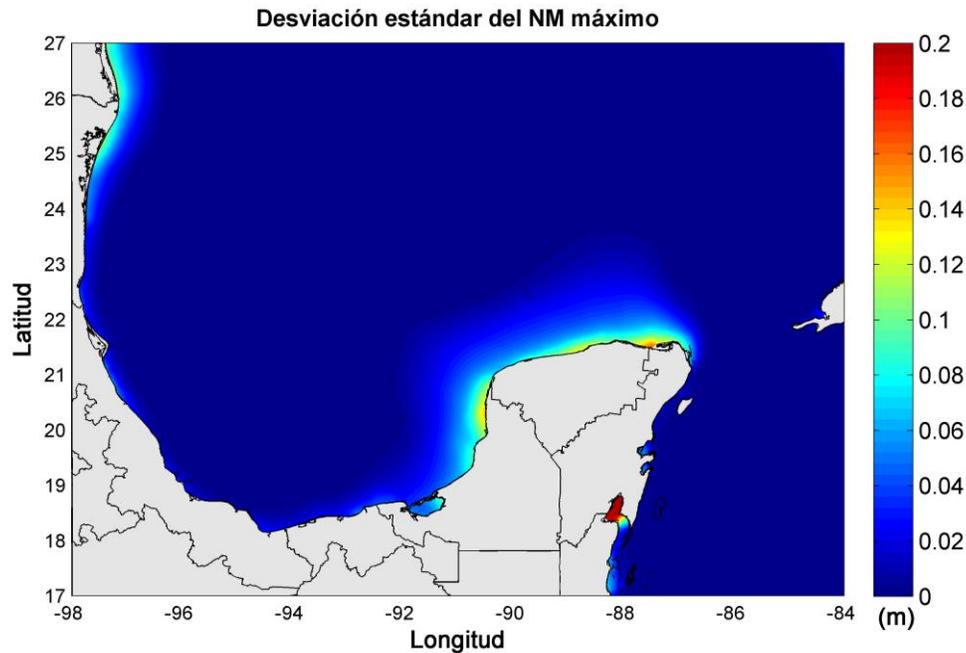


Figura 18 - Mapa de la desviación estándar correspondiente al nivel del mar máximo generada por los CAN

Finalmente la Figura 19 que corresponde a los valores máximos muestra que de las tres secciones identificadas anteriormente (por medio de la desviación estándar), se tiene que los máximos registrados se encuentran en la franja litoral del puerto de Campeche hacia Celestún y en la bahía de Chetumal. Esto tiene sentido si se considera que la mayoría de las tormentas intensas (superior a categoría 3) que cruzan la península de Yucatán, cuentan con la capacidad de intensificarse nuevamente en el Golfo y afectar la sonda de Campeche.

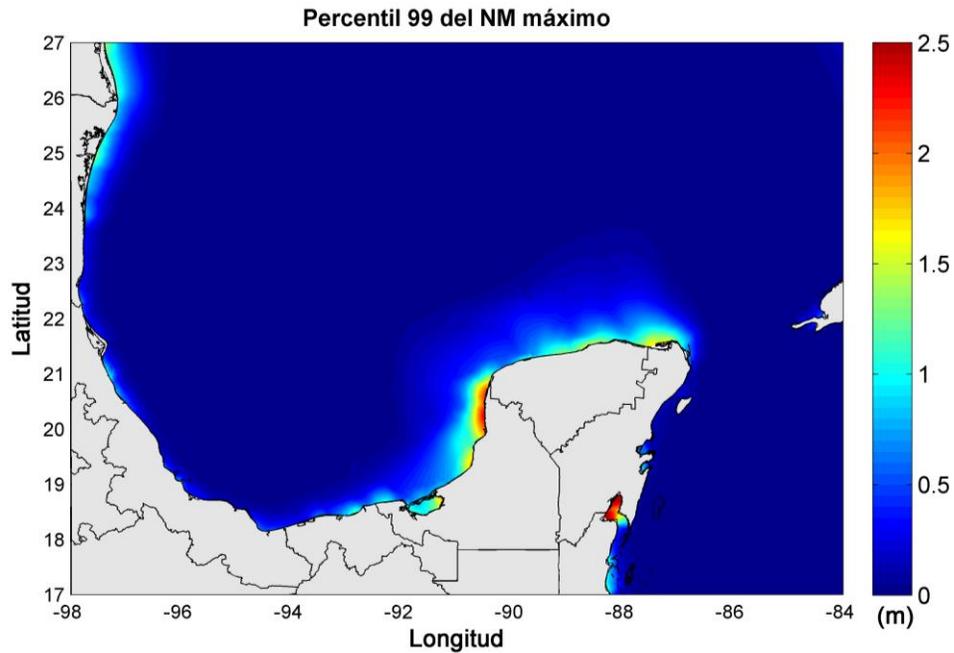


Figura 19 - Mapa del percentil 99 correspondiente al nivel del mar máximo generada por los CAN

5.2. Pacífico Mexicano

En esta sección, se presentan el régimen medio, la desviación estándar y el régimen extremo representado por el percentil 99% para el oleaje y la marea de tormenta, pero ahora para la costa oeste del país.

5.2.1. Oleaje

La media de alturas de ola significativa muestra que entre las latitudes 16°N y 22°N, así como las longitudes 110°W a 100°W se encuentra la región con valores de mayor magnitud. A su vez, se tiene una dispersión hacia la boca del Golfo de California indicando que en la entrada al Mar de Cortés se espera oleaje intenso, no es el máximo, pero si tiene capacidad de intrusión hacia las costas de Sinaloa y Baja California Sur. Acorde a la media, los valores más altos próximos al litoral Mexicano se encuentran en los estados de Jalisco y Colima.

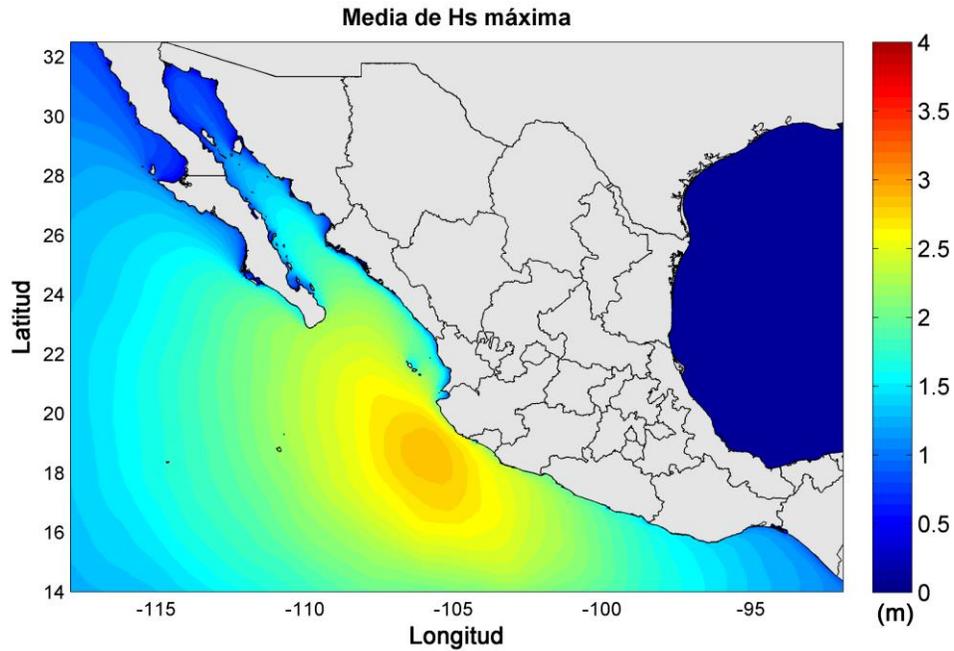


Figura 20 - Mapa de la media correspondiente a la altura de ola significativa generada por los CPO

El mapa de desviación estándar (vea Figura 21), confirma las observaciones anteriores en el mapa de valores medios. Se tiene una mayor dispersión de datos frente a las costas de Jalisco y Colima, seguidas por Nayarit y Michoacán. La intrusión de oleaje en el Mar de Cortés decrece a partir de los 26°N entre la frontera de Sonora y Sinaloa y al sur decrece en las costas de Oaxaca y Chiapas. La región con valores de oleaje más lejanos a la media se encuentra aproximadamente en los 18°N, 105°W.

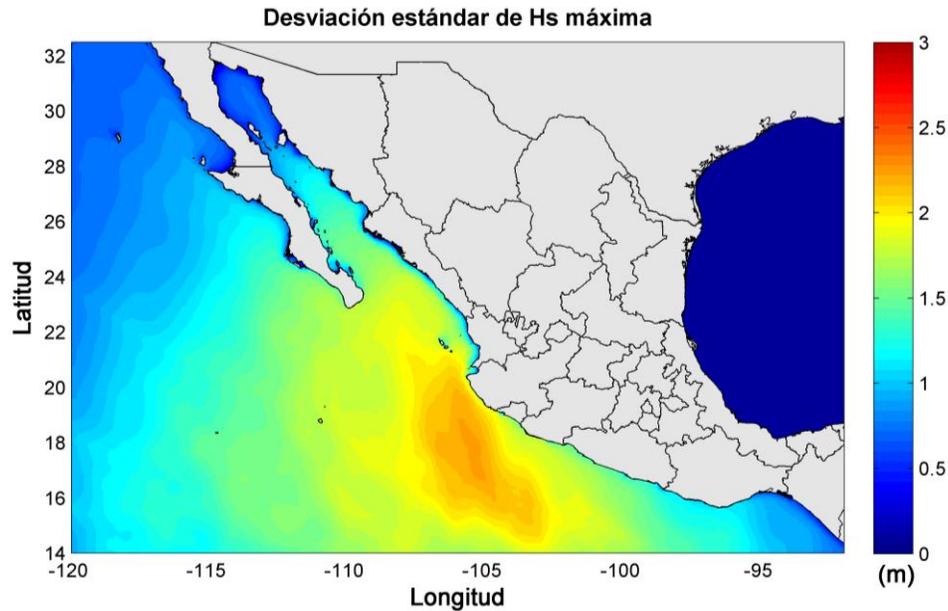


Figura 21 - Mapa de la desviación estándar correspondiente a la altura de ola significativa generada por los CPO

La caracterización de valores de oleaje máximo por medio del percentil 99 como se indica en la Figura 22, muestra un recurve en sentido horario hacia la entrada al Mar de Cortés dejando evidentemente expuesta la punta de Baja California Sur a oleajes intensos de mar profundo, el cual en este estudio, se encuentra limitado por las fronteras del dominio computacional. La región más cálida en el mapa se encuentra frente a las costas de Jalisco y dispersa su intensificación hacia el oeste en dirección de Isla Socorro. El mapa de máximos indica que los estados con mayor posibilidad de presentar oleaje de gran magnitud debido a ciclones tropicales son Michoacán, Colima, Jalisco, Nayarit y Baja California Sur. Por otro lado, los estados menos expuestos son Chiapas, Oaxaca, Baja California y Sonora.

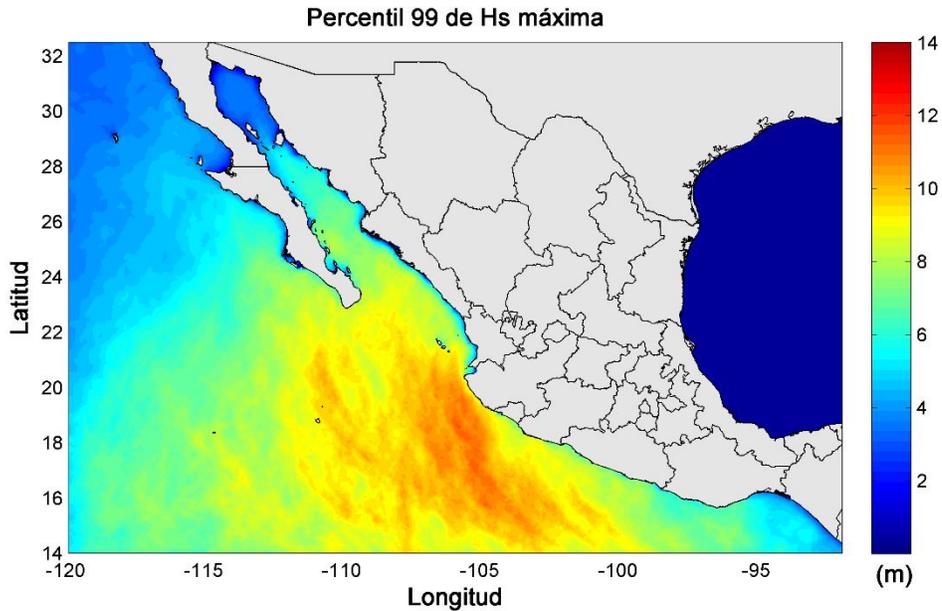


Figura 22 - Mapa del percentil 99 correspondiente a la altura de ola significativa generada por los CPO

De lo anterior, se desprende que los resultados muestran concordancia con la climatología de ciclones tropicales presentada en la sección 2.

5.2.2. Marea de tormenta

Debido a la batimetría dominante en el Pacífico mexicano, la sobreelevación del mar por tormenta no suele ser un factor determinante en la inundación lo cual es evidente en la Figura 23 donde se muestran los valores medios obtenidos. Sin embargo, se identifica que las costas de Sinaloa, Nayarit y la costa oeste de Baja California Sur son vulnerables a este fenómeno.

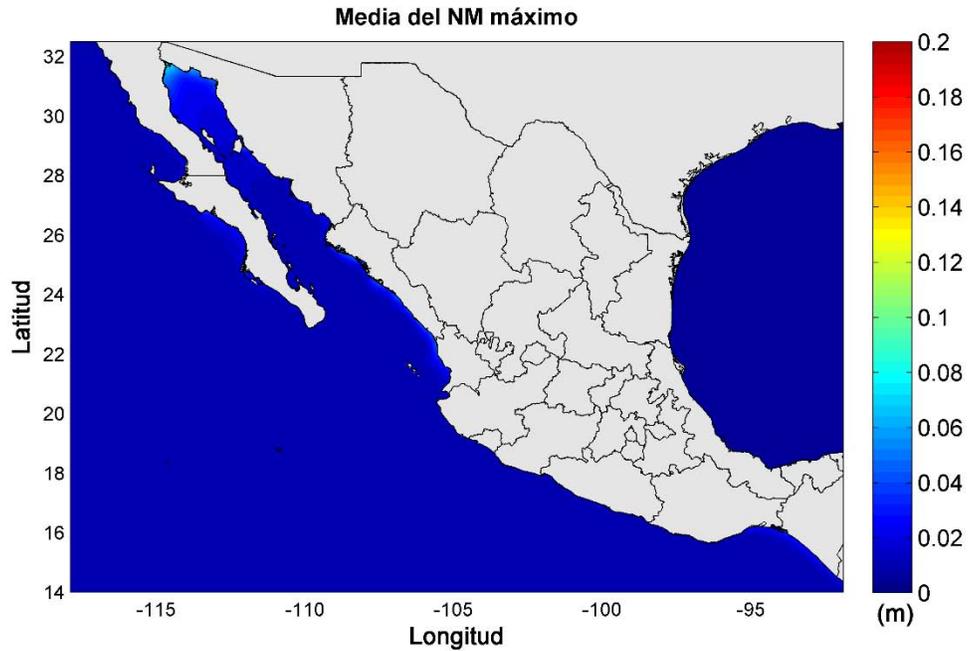


Figura 23 - Mapa de la media correspondiente al nivel del mar máximo generado por los CPO

El mapa de desviación estándar confirma lo anterior indicando que los valores más alejados de la media se encuentran en esta región (costa oeste de Baja California Sur, la costa norte de Nayarit y la costa de Sinaloa). Sin embargo, también destacan tonalidades más cálidas en la región norte del Mar de Cortés y en el Golfo de Tehuantepec. Si bien la parte norte del Mar de Cortés no es la más expuesta a marea de tormenta por ciclones tropicales, si se sabe que es una región con un rango de mareas muy amplio por lo que los resultados obtenidos se deben de tomar en consideración. En el Golfo de Tehuantepec se presenta una plataforma continental que se extiende hacia el sureste hasta las costas de Costa Rica la cual se caracteriza por profundidades más someras en comparación con el resto del Pacífico, por lo que muestra vulnerabilidad al fenómeno en la región. Cabe destacar que los fenómenos hidrometeorológicos que pudiesen llegar a afectar las costas de Chiapas, son de baja intensidad por lo que no cuentan con la capacidad de generar mareas de tormenta como las que se presentan en el Golfo de México.

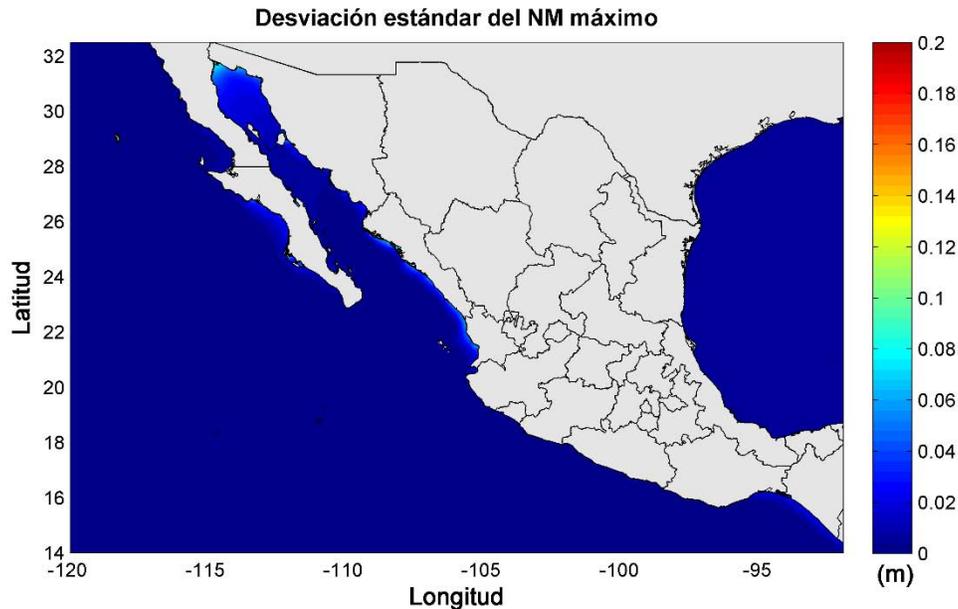


Figura 24 - Mapa de la desviación estándar correspondiente al nivel del mar máximo generado por los CPO

De hecho, el mapa de valores máximos reafirma las observaciones anteriores indicando que las costas de Nayarit y Sinaloa son las que presentan mayor litoral expuesto a marea de tormenta por huracanes intensos en el Pacífico, donde algunos de ellos recurvan hacia continente e ingresan al Mar de Cortés. Los huracanes que hacen tierra en México tras la longitud 110°W pueden generar mareas de tormenta de importancia en la costa oeste de Baja California Sur en las regiones próximas a Comondú y Constitución. Es importante destacar que la importancia del fenómeno en esta región no indica mayor probabilidad de riesgo, ya que es uno de los estados menos habitados en la franja costera de México. Los valores máximos en el Golfo de Tehuantepec se asocian a tormentas de baja intensidad (inferiores a categoría 2), pero que tienen la capacidad de apilar agua considerablemente en las costas de Chiapas. En la región norte del Mar de Cortés, se cree que interfieren los valores de entrada al dominio computacional entre la línea de costa del World Vector Shoreline y los datos batimétricos disponibles, ya que el error inducido puede representar en la modelación regiones más someras de lo que realmente son indicando valores de tormenta (dependiente directamente de la batimetría) mayores de lo que pudieran ser. Sin embargo, se resalta en la importancia que tiene un fenómeno de esta índole en un rango de mareas amplio.

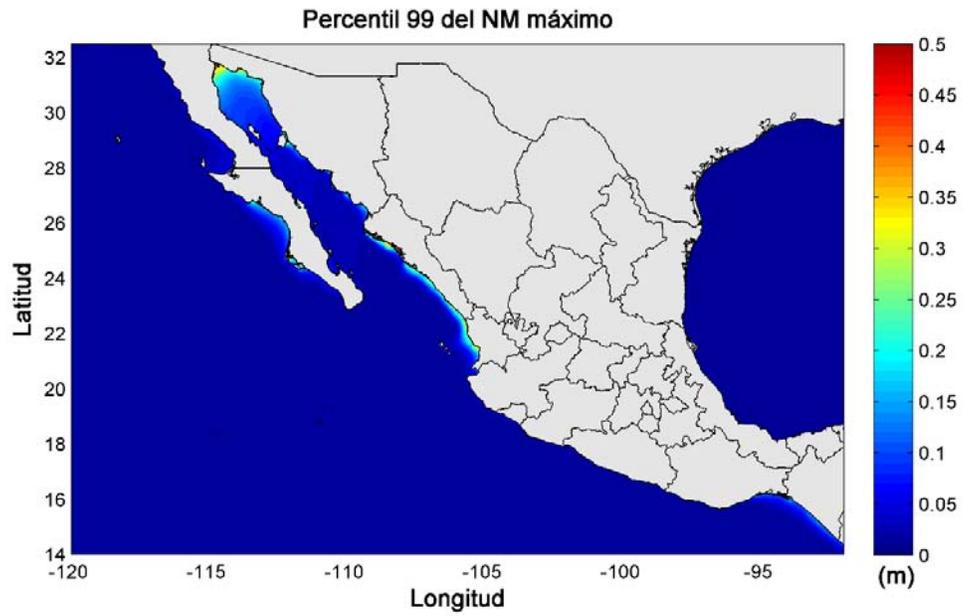


Figura 25 - Mapa del percentil 99 correspondiente al nivel del mar máximo generado por los CPO

6. Evaluación de valores extremos

Para poder trabajar en la evaluación de valores extremos en primer lugar es necesario extraer de cada serie temporal el valor máximo obtenido en cada elemento de la malla computacional para cada tormenta modelada. De esta forma se obtienen las envolventes de valores máximos para cada evento dando como resultado mapas de altura de ola significativa máxima y nivel del mar máximo para cada tormenta, dando un total de 6,200 mapas de valores máximos.

Esta información es muy útil para otras aplicaciones como Appendini et al. (En proceso), sin embargo, a manera de ejemplo se muestran a continuación los valores de altura de ola significativa máxima y nivel del mar máximo para los huracanes 0595 y 1034 haciendo tierra en el Pacífico y Atlántico respectivamente. Los campos de viento de estos eventos corresponden a la Figura 4.

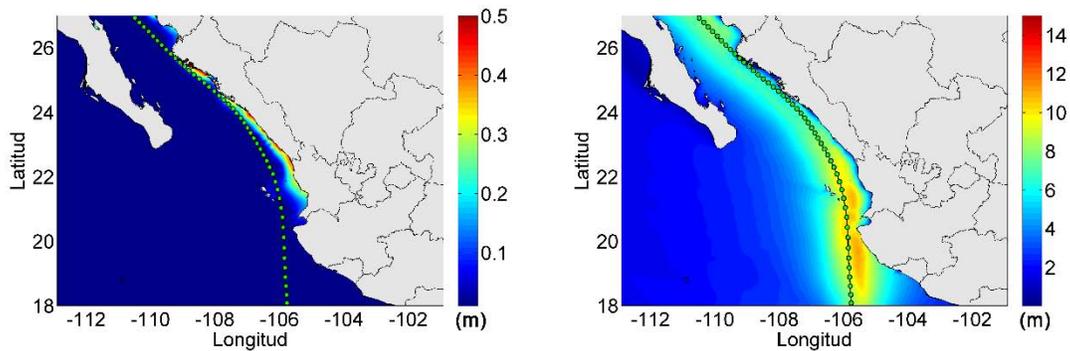


Figura 26 - Mapa de envolventes máxima para el evento 0595 de los CPO. En el panel izquierdo se muestra la marea de tormenta y en el panel derecho la altura de ola significativa. La línea negra muestra la trayectoria y los puntos verdes la ubicación del vórtice con una resolución temporal de una hora.

En la Figura 26 se percibe que un huracán viajando paralelo a las costas de Sinaloa e introduciéndose al Mar de Cortés tiene la capacidad de generar incrementos de marea meteorológica de hasta medio metro a lo largo de todo el estado. Este pico máximo puede tener repercusiones si sucede durante mareas vivas en pleamar por ejemplo. A su vez, se muestra que el oleaje intenso se focaliza en Jalisco y Nayarit y se atenúa conforme incrementa su desplazamiento latitudinal.

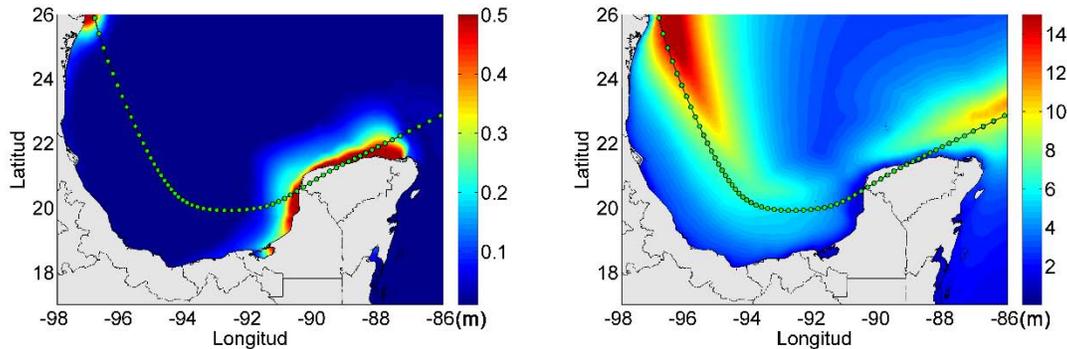


Figura 27 - Mapa de envolventes máxima para el evento 1034 de los CAN. En el panel izquierdo se muestra la marea de tormenta y en el panel derecho la altura de ola significativa. La línea negra muestra la trayectoria y los puntos verdes la ubicación del vórtice con una resolución temporal de una hora.

En el Golfo de México, huracanes como el mostrado en la Figura 27 denotan la vulnerabilidad del estado de Yucatán y Campeche a la marea de tormenta, mientras que ejemplifican apropiadamente la propagación del oleaje intenso en aguas profundas en la región central del Golfo hacia las costas de Veracruz, Tabasco y Campeche. En este caso en particular se presentan oleajes próximos a Quintana Roo y Yucatán que oscilan en los 8 metros de altura para posteriormente incrementar a valores incluso superiores a los 14 metros en la región norte de Tamaulipas.

Al extraer los 1,550 mapas de envolvente máxima para el nivel del mar y la altura de ola significativa para ambas cuencas, se obtiene una matriz con los valores máximos de cada variable en cada cuenca para todos los eventos simulados y entonces se puede realizar el análisis de valores extremos correspondiente para cada elemento, y así generar los mapas de periodo de retorno como se describe a continuación.

El propósito del análisis de eventos extremos es tener estimaciones confiables de que un valor exceda cierto límite en un intervalo de tiempo definido. Generalmente se buscan valores que exceden los datos observados, por ello se recurre al siguiente procedimiento:

- ✓ Seleccionar una función de distribución paramétrica apropiada
- ✓ Verificar que la curva de la distribución represente correctamente a la muestra
- ✓ Extrapolar la función de distribución

En la actualidad, los métodos más utilizados en el análisis de valores extremos son la función de distribución de valores extremos generalizada (*GEV – Generalized Extreme Value*) y la distribución generalizada de Pareto (*GPD – Generalized Pareto*)

Distribution). Sin embargo, este estudio se enfoca en la GEV, porque esta función combina a las funciones de Gumbel, Fréchet y Weibull en una sola función de distribución, permitiéndole gran estabilidad y adaptación a cualquier muestra (Coles 2001).

Bajo este esquema, la distribución de máximos requiere que las muestras sean independientes y distribuidas idénticamente (i.i.d.). Es decir, que sean representativas de la muestra general y que el valor máximo este dado por

$$M_n = \max(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (\text{Ec. 6.1})$$

Donde n es el tamaño de la muestra y x son los valores observados de la serie de datos a utilizar en el análisis. Si la distribución de M_n converge con valores grandes de n (i.e. si existe $a_n > 0, b_n$ y una función no degenerativa $G(x)$) se tiene que

$$F^n\left(\frac{x - b_n}{a_n}\right) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} G(x) \quad (\text{Ec. 6.2})$$

Donde la distribución límite $G(x)$ puede ser cualquiera de las funciones de distribución mencionadas con anterioridad. Por otro lado, los datos empíricos se ordenan de mayor a menor, asignándole a cada dato una probabilidad empírica (Weibull) de acuerdo a la siguiente expresión

$$p_i = \frac{i}{n + 1} \quad (\text{Ec. 6.3})$$

Donde p_i es la probabilidad empírica de cada dato, i es el orden que le corresponde a cada valor ordenado y n es el número de datos en la muestra.

6.1. Descripción de la función de distribución

La distribución de valores extremos generalizada (GEV) descrita por Coles (2001), se puede expresar por medio de la siguiente ecuación

$$GEV = \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{z - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{\xi}}\right\} \quad (\text{Ec. 6.1.1})$$

Donde μ es el parámetro de ubicación, σ es el parámetro de escala, ξ es el parámetro de forma y la muestra se representa por medio de z . Esta función no fue aplicada al vector de valores máximos de cada elemento que compone la malla computacional, pero si se le aplico al vector obtenido tras aplicar un umbral determinado.

La selección del umbral está basada en Arns et al. (2013), quienes consideran que la aproximación por medio de la técnica de los percentiles es un método apropiado para eludir selecciones subjetivas del umbral e inducir error. Basándose en un análisis de sensibilidad, se selecciona el percentil 98 y el percentil 99 como los umbrales para los valores máximos del nivel del mar y altura de ola significativa

respectivamente. Los percentiles se seleccionaron de forma distinta para cada parámetro con la finalidad de reducir el peso de la cola inferior de los datos y obtener mejores ajustes a la función de distribución. El análisis de valores extremos se llevó a cabo para cada elemento de la malla computacional basándose en los resultados obtenidos de los huracanes históricos y sintéticos simulados, como es propuesto por Meza-Padilla et al. (Sometido).

Al aplicar la GEV a los datos obtenidos se obtuvo que en algunos casos la curva ajustada a los datos empíricos tiende a extrapolar a valores extremos poco probables. De esta manera, se decidió probar con la función de distribución de Weibull, ya que ha sido aplicada a estudios similares en la misma zona de estudio (Posada-Vanegas et al. 2011; Duran 2010). Acorde a Coles (2001) esta función se puede describir de la siguiente forma

$$WBL = \frac{b}{a} \left(\frac{z}{a}\right)^{b-1} \exp^{-\left(\frac{z}{a}\right)^b} \quad (Ec. 6.1.2)$$

Donde b y a son los parámetros de forma y escala respectivamente, mientras que la muestra está representada por z . Para todos los puertos analizados en la siguiente sección, se ajustaron las funciones de WBL y GEV a los datos empíricos.

6.2. Caracterización de eventos extremos en los principales puertos de México

A fin de caracterizar los diferentes periodos de retorno en todo el litoral mexicano, se seleccionaron localidades próximas a los principales puertos de México, 11 en el Pacífico y 10 en el Golfo de México. Acorde a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), los puertos bajo Administración Portuaria Integral Federal (API-F) se muestran en la Figura 28 indicados por medio de un círculo azul con una estrella blanca. Se seleccionaron las localidades próximas a estos puertos a excepción de Ensenada debido a su latitud y baja exposición a ciclones tropicales. Además, se agregaron algunas localidades (debido a su interés económico/turístico) en ambas cuencas. Se ubicó el elemento en la malla computacional más próximo a la ubicación geográfica de cada uno de los puertos en el Golfo de México y Pacífico Mexicano como se muestra en la

Tabla 5 y la Tabla 6 respectivamente. Posteriormente, se realizó un análisis extremal para cada uno de estos nodos evaluando dos diferentes funciones de distribución (Weibull y Generalizada de Valores Extremos), los resultados se muestran en los Apéndices D y E para el Golfo de México y el Pacífico respectivamente.



Figura 28 - Principales puertos de México. Extraído de (<http://sct.gob.mx/>)

Tabla 5 - Ubicación geográfica de las localidades próximas a os puertos analizados en el Golfo de México y Caribe Mexicano.

Número	Código	Puerto	Coordenadas		Profundidad (metros)
			Longitud	Latitud	
1	TCO	Tampico	-97.79	22.25	4
2	TXP	Tuxpan	-97.31	20.97	2
3	VER	Veracruz	-96.13	19.21	2.3
4	CTZ	Coatzacoalcos	-94.49	18.15	2.0
5	PAR	Paraíso	-93.20	18.44	7.0
6	CAR	Cd. Carmen	-91.82	18.67	3.2
7	CAM	Campeche	-90.54	19.84	5.0
8	PRO	Progreso	-89.66	21.28	2.4
9	CUN	Cancún	-86.81	21.19	14.3
10	CHE	Chetumal	-88.27	18.49	5.1

Tabla 6 – Ubicación geográfica de las localidades próximas a los puertos analizados en el Pacífico Mexicano.

Número	Código	Puerto	Coordenadas		Profundidad (metros)
			Longitud	Latitud	
1	CHI	Pto. Chiapas	-92.42	14.72	5.0
2	SCR	Salina Cruz	-95.19	16.16	1.8
3	ACA	Acapulco	-99.86	16.85	4.9
4	LCR	Lázaro C	-102.19	17.91	3.9
5	ZLO	Manzanillo	-104.32	19.09	18.8
6	VTA	Pto. Vallarta	-105.23	20.62	4.2
7	MAZ	Mazatlán	-106.39	23.15	16.0
8	TOP	Topolobambo	-109.11	25.58	10.0
9	GYM	Guaymas	-110.81	27.91	5.0
10	LPZ	La Paz	-110.30	24.18	10.0
11	CSL	Los Cabos	-109.93	22.87	5.0

Dado que la marea de tormenta es muy sensible a la batimetría y la geometría litoral, la escasez de información topo-batimétrica a detalle implica considerar los resultados obtenidos con precaución. A modo de ejemplo, en la Figura 29 y en la Figura 30, se muestran las funciones de WBL y GEV para los puertos de Tampico y Campeche usando los datos de los CAN y para los puertos de Guaymas y Puerto Chiapas usando los datos de los CPO respectivamente. Estos sitios fueron seleccionados como muestra de los resultados obtenidos más al norte y sur del país.

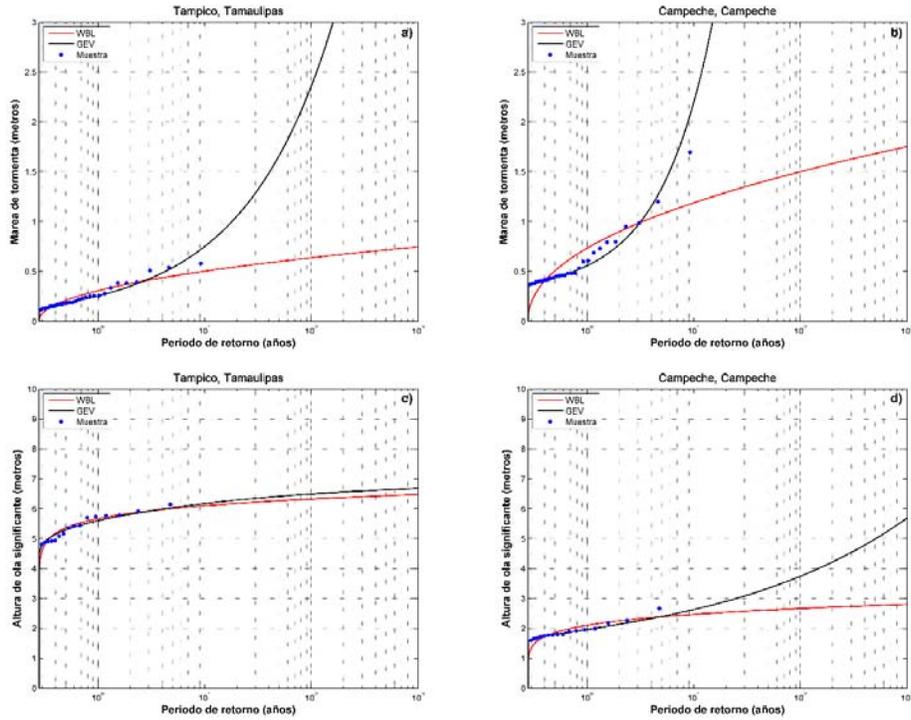


Figura 29 - Distribuciones WBL y GEV ajustadas a marea de tormenta (a, b) y altura de ola significativa (c, d) para dos localidades en el Golfo de México: Tampico (a, c) y Campeche (b, d).

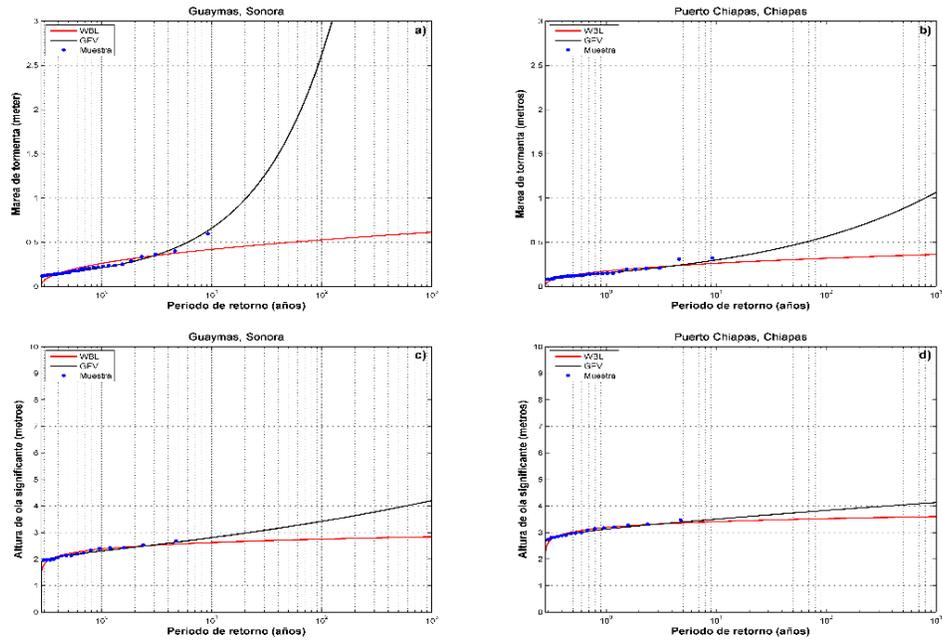


Figura 30 - Distribuciones WBL y GEV ajustadas a marea de tormenta (a, b) y altura de ola significativa (c, d) para dos localidades en el Pacífico: Guaymas (a, c) y Puerto Chiapas (b, d).

Es evidente que en ambas figuras hay gran discrepancia entre las funciones de distribución ajustadas. Esto es particularmente cierto para el caso de valores con baja probabilidad (e.g. periodo de retorno de 1,000 años) y para los casos de marea de tormenta. De hecho en ambos casos, el comportamiento de la cola de la distribución es completamente diferente, indicando un escenario más extremo para los valores ajustados a la GEV.

De hecho, en cuanto a marea de tormenta se refiere, la GEV muestra un buen ajuste para los puertos de Guaymas y Campeche, pero en ambos casos un periodo de retorno superior a 200 años ya arroja resultados teóricos que se alejan de la realidad por muy catastrófico que sea el escenario (e.g. marea de tormenta superior a 30 metros). La región con menor diferencia entre ajustes es Chiapas y las que mayor discrepancia presentan son Guaymas y Tampico. Respecto al oleaje se tiene que las funciones se ajustan de manera muy similar para las regiones de Tampico y Chiapas (litoral expuesto a mar abierto), mientras que mayor variabilidad se presenta en Campeche y Guaymas (ubicadas en regiones cóncavas a lo largo de la geometría litoral).

Lo que es evidente es que la función de WBL no crece exponencialmente hacia valores irreales, sino que mantiene un crecimiento paulatino a partir del valor más extremo. Lo más relevante al analizar todas estas localidades en conjunto, es que un análisis de valores extremos es completamente dependiente de su ubicación geográfica y cuan extensa es.

A continuación se muestran los valores obtenidos de marea de tormenta y oleaje para periodos de retorno específicos en los puertos de México (ambas cuencas).

Tabla 7 - Periodos de retorno específicos para marea de tormenta en los principales puertos en el Golfo de México y Caribe Mexicano.

Periodo de Retorno (años)	Golfo de México y Caribe Mexicano									
	Marea de tormenta (metros)									
	TCO	TXP	VER	CTZ	PAR	CAR	CAM	PRO	CUN	CHE
2	0.23	0.28	0.17	0.14	0.14	0.19	0.55	0.71	0.35	1.20
5	0.34	0.45	0.29	0.29	0.25	0.30	0.82	0.99	0.44	1.55
10	0.41	0.55	0.37	0.39	0.32	0.37	0.97	1.14	0.48	1.73
15	0.44	0.60	0.41	0.45	0.36	0.40	1.04	1.21	0.50	1.82
20	0.46	0.63	0.44	0.49	0.39	0.43	1.09	1.26	0.52	1.87
30	0.49	0.68	0.47	0.55	0.42	0.46	1.16	1.33	0.54	1.95
50	0.52	0.73	0.52	0.62	0.47	0.49	1.24	1.40	0.56	2.03
100	0.57	0.80	0.57	0.72	0.53	0.54	1.34	1.50	0.58	2.13
250	0.62	0.89	0.64	0.84	0.60	0.59	1.46	1.61	0.61	2.26
500	0.65	0.95	0.69	0.93	0.65	0.63	1.54	1.68	0.63	2.34
1,000	0.69	1.01	0.74	1.02	0.70	0.67	1.62	1.76	0.65	2.42

De la tabla anterior se tiene que con un periodo de retorno de 100 años, la región más vulnerable a marea de tormenta es Chetumal, seguida de Progreso y Campeche, lo cual concuerda con la información analizada en la sección 5.

En cuanto al oleaje, para el periodo de retorno de 100 años se tiene que la región más vulnerable es Campeche, seguida de Cancún y Tampico. A pesar de que Campeche no es una región expuesta directamente al embate de ciclones tropicales como Cancún y Tampico, el giro ciclostrofico propio de un huracán tiene la capacidad de generar oleajes de mar profundo normales a las costas de esta región y afectarla con oleaje extremo.

Tabla 8 - Periodos de retorno específicos para oleaje en los principales puertos en el Golfo de México y Caribe Mexicano.

Periodo de Retorno (años)	Golfo de México y Caribe Mexicano									
	Altura de ola significativa (metros)									
	TCO	TXP	VER	CTZ	PAR	CAR	CAM	PRO	CUN	CHE
2	3.91	1.67	0.81	1.00	1.35	1.54	3.49	2.54	3.98	3.76
5	5.93	3.31	1.28	1.87	2.48	2.66	6.47	4.39	6.61	4.56
10	7.08	4.43	1.56	2.45	3.22	3.35	8.40	5.53	8.20	4.95
15	7.67	5.05	1.70	2.77	3.63	3.73	9.46	6.15	9.05	5.14
20	8.07	5.48	1.80	2.98	3.90	3.98	10.19	6.56	9.62	5.26
30	8.59	6.07	1.93	3.28	4.28	4.32	11.18	7.12	10.38	5.42
50	9.21	6.81	2.08	3.64	4.74	4.73	12.38	7.80	11.29	5.60
100	9.98	7.77	2.28	4.11	5.34	5.26	13.95	8.67	12.46	5.81
250	10.92	9.00	2.52	4.71	6.09	5.92	15.93	9.75	13.90	6.06
500	11.58	9.91	2.69	5.15	6.64	6.39	17.37	10.53	14.93	6.23
1,000	12.20	10.79	2.85	5.57	7.17	6.85	18.76	11.28	15.91	6.38

Como es de esperarse debido a la información analizada con anterioridad, la marea de tormenta en la

Tabla 9 no representa una amenaza para las costas del Pacífico debido a sus condiciones batimétricas. Sin embargo, destaca que para un periodo de retorno de 100 años la región con magnitudes mayores es Topolobambo, seguida de Guaymas y Mazatlán. Esto indica que el litoral de continente en la entrada al Mar de Cortés es la región que puede sufrir afectaciones debido a la marea de tormenta.

Tabla 9 - Periodos de retorno específicos para marea de tormenta en los principales puertos del Pacífico Mexicano

Periodo de Retorno (años)	Pacífico Mexicano										
	Marea de tormenta (metros)										
	CHP	SCR	ACA	LCR	ZLO	VTA	MAZ	TOP	GYM	LPZ	CSL
2	0.14	0.15	0.09	0.03	0.11	0.18	0.27	0.51	0.20	0.14	0.02
5	0.19	0.20	0.13	0.05	0.14	0.21	0.33	0.71	0.29	0.18	0.02
10	0.22	0.22	0.15	0.05	0.16	0.23	0.36	0.82	0.34	0.21	0.02
15	0.23	0.24	0.16	0.06	0.17	0.24	0.38	0.87	0.37	0.22	0.02
20	0.24	0.24	0.17	0.06	0.17	0.24	0.39	0.91	0.39	0.23	0.02
30	0.26	0.25	0.18	0.06	0.18	0.25	0.40	0.95	0.41	0.24	0.02
50	0.27	0.27	0.19	0.07	0.18	0.26	0.42	1.01	0.44	0.25	0.02
100	0.29	0.28	0.20	0.07	0.19	0.27	0.43	1.08	0.47	0.26	0.02
250	0.31	0.30	0.21	0.07	0.20	0.28	0.45	1.16	0.51	0.28	0.03
500	0.32	0.31	0.22	0.08	0.21	0.29	0.47	1.21	0.54	0.29	0.03
1,000	0.34	0.32	0.23	0.08	0.22	0.29	0.48	1.26	0.57	0.30	0.03

Los periodos de retorno analizados en la Tabla 10 para los puertos de la costa oeste, muestran que las mayores magnitudes en un periodo de retorno de 100 años se encuentran en La Paz, seguida de Topolobambo y Manzanillo. De esta información, destaca que las tres localidades se encuentran dentro de bahías con bocanas superiores a los 5 km.

Tabla 10 - Periodos de retorno específicos para oleaje en los principales puertos del Pacífico Mexicano

Periodo de Retorno (años)	Altura de ola significativa (metros)										
	CHP	SCR	ACA	LCR	ZLO	VTA	MAZ	TOP	GYM	LPZ	CSL
2	0.91	0.89	0.89	1.11	5.18	1.96	0.71	3.08	2.39	3.26	1.33
5	2.36	2.03	1.40	1.42	6.34	3.27	1.17	5.78	3.84	6.02	2.06
10	3.52	2.88	1.70	1.58	6.91	4.06	1.45	7.55	4.69	7.81	2.47
15	4.23	3.38	1.86	1.66	7.18	4.48	1.60	8.52	5.14	8.78	2.69
20	4.74	3.73	1.96	1.71	7.36	4.76	1.70	9.18	5.43	9.45	2.83
30	5.46	4.22	2.10	1.78	7.58	5.14	1.84	10.10	5.83	10.37	3.02
50	6.39	4.83	2.27	1.86	7.84	5.60	2.00	11.21	6.31	11.47	3.24
100	7.68	5.67	2.48	1.95	8.16	6.18	2.20	12.65	6.91	12.92	3.53
250	9.42	6.76	2.73	2.06	8.52	6.90	2.45	14.49	7.65	14.74	3.87
500	10.76	7.59	2.91	2.13	8.76	7.41	2.64	15.82	8.18	16.06	4.11
1,000	12.11	8.41	3.08	2.20	8.99	7.90	2.81	17.12	8.68	17.35	4.34

Por otro lado, es evidente que el análisis de valores extremos realizado con ambas distribuciones es muy sensible a los valores máximos observados en la muestra a

la cual se ajustan y además a cualquier variación dentro de los parámetros de ajuste. Es por ello que aún no existe un criterio unificado en cuanto a análisis extremos se refiere y la selección de los procedimientos se mantiene subjetiva. De los resultados obtenidos destaca que cada región debe ser analizada independientemente.

6.3. Caracterización de eventos extremos en mares mexicanos

El procedimiento descrito en la sección anterior se puede replicar a lo largo de todo el dominio computacional. Es decir, realizar un ajuste de valores extremos a cada una de las series de tiempo obtenido en cada nodo computacional. Al aplicar el ajuste de valores extremos es posible obtener los valores de oleaje y marea de tormenta para distintos periodos de retorno. Al juntar los valores obtenidos en cada nodo, es posible generar mapas con los valores de oleaje y marea de tormenta correspondientes. Sin embargo, la limitante que representa el ajuste de la función de distribución a resultados poco fiables ha sido detectada por varios autores, como Irish et al. (2011), quienes aplican la distribución de GEV, pero recalculan los valores usando la distribución de Gumbel para los casos en los que el valor de la distribución a un periodo de retorno de 1000 años excede en un 75% el valor máximo de la muestra. A pesar de que se intentó una aproximación similar para generar los mapas de periodo de retorno para ambas cuencas, los resultados muestran discrepancias y sobreestiman los valores en determinadas regiones. Como consecuencia, se decidió hacer los mapas por separado utilizando las funciones de GEV y WBL (vea Figura 31 y Figura 32).

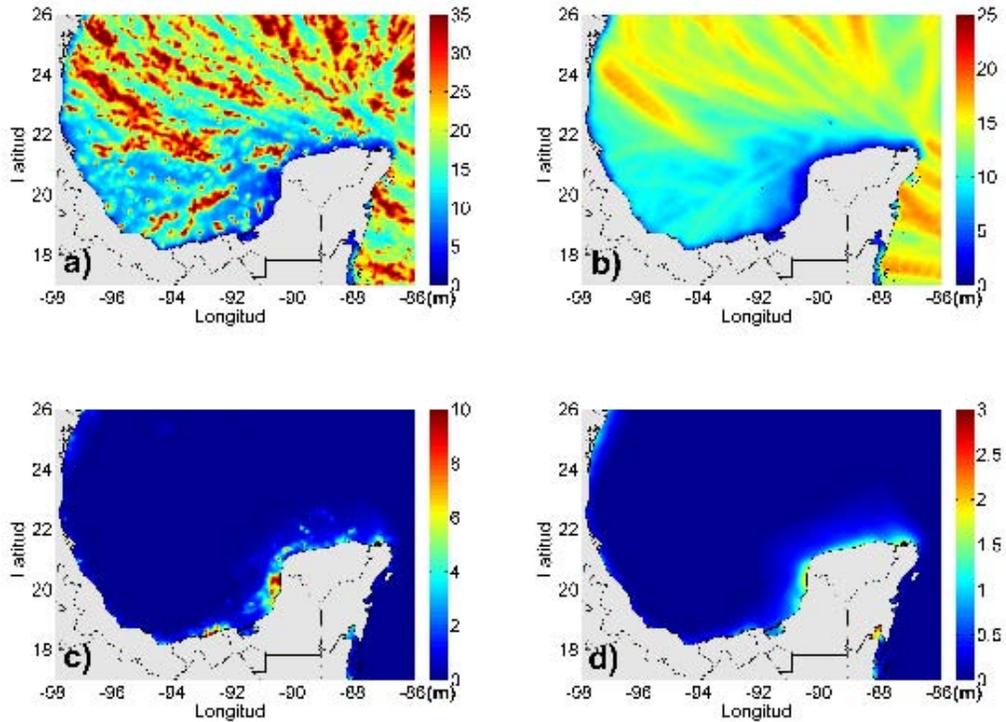


Figura 31 - Altura de ola significativa (a, b) y nivel del mar (c, d) para un periodo de retorno de 100 años usando la distribución GEV (a, c) y Weibull (b, d) para el Golfo de México y Mar Caribe.

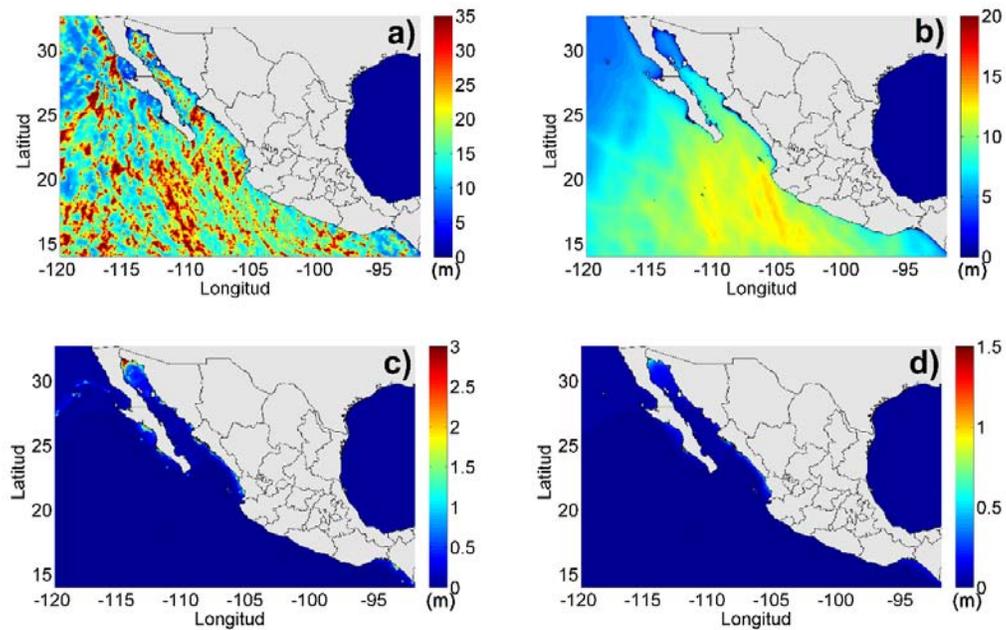


Figura 32 - Altura de ola significativa (a, b) y marea de tormenta (c, d) para un periodo de retorno de 100 años usando la distribución GEV (a, c) y Weibull (b, d) para el Pacífico Mexicano.

Los mapas de nivel del mar para un periodo de retorno 100 años muestran áreas con patrones poco probables de ocurrir en la naturaleza, tanto en el Pacífico como en el Golfo de México. Por otro lado, la distribución Weibull muestra patrones más uniformes. Una situación similar se encuentra en los resultados de altura de ola significativa en ambas cuencas. Como resultado, los mapas utilizando la distribución Weibull se consideran más adecuados incluso si los valores son subestimados (considerando un análisis a gran escala). Nuevamente, se hace hincapié en la importancia de analizar localidades específicas y se enfatiza el riesgo de generalizar una sola metodología a una región.

Al analizar los mapas de oleaje generados con la distribución de Weibull resaltan las trayectorias de los huracanes. Esto se debe principalmente a que a pesar de la variabilidad de cada evento, los trayectos más intensos dejan una secuela de valores máximos que van marcando los vectores de cada nodo computacional y al generar los mapas son evidentes las secuencias espacio-temporales. Aunado a ello, la caracterización de extremos por medio de los percentiles limita el número de datos en la muestra, por lo que al comparar los mapas que cubrían todos los eventos y únicamente los extremos superiores al umbral, se percibió que al contemplar toda la muestra no son evidentes las trayectorias, pero al darle peso a la cola inferior se subestiman los valores máximos ajustados a la función de distribución.

Al comparar los resultados obtenidos por Durán, G. (2010) con los de este estudio para un periodo de retorno de 250 años como se muestra en la Figura 33, se percibe una concordancia con los valores que afectan la costa norte de Campeche, pero hay discrepancia con los resultados mostrados en Quintana Roo. Dado que la marea de tormenta es un fenómeno costero, los resultados de este estudio no arrojan valores cercanos a 2 metros como se muestra en Durán, G. (2010) en la región fuera de costa de Quintana Roo, ya que ésta cuenta con grandes profundidades permitiendo la recirculación de la masa de agua y así, evitando su apilamiento.

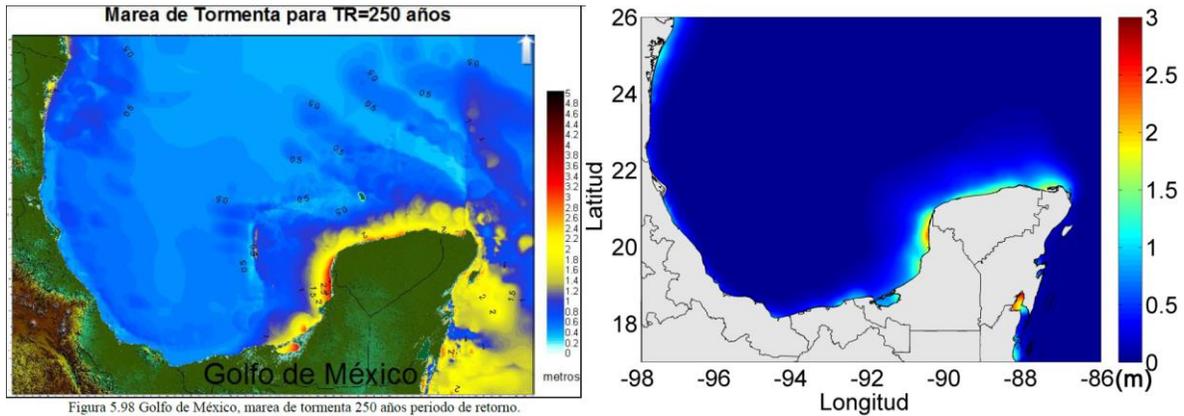


Figura 5.98 Golfo de México, marea de tormenta 250 años periodo de retorno.
 Figura 33 - Comparación de mapas de marea de tormenta con un periodo de retorno de 250 años para el Golfo de México y Caribe Mexicano entre Duran, G. (2010) en el panel izquierdo y este estudio en el panel derecho.

Martínez-Martínez, R. (2014) indica niveles cercanos a 3.00 m para un periodo de retorno de 100 años en el norte de Baja California y Sonora, mientras que en Yucatán el mismo periodo de retorno arroja cotas de inundación superiores a 6.00 m y de 10.00 m en la región de la Riviera Maya. En el resto del país las cotas de inundación para un periodo de retorno de 100 años oscilan entre 1.75 y 6.00 metros. Dado que las variables entre ambos estudios difieren, no se pueden comparar los resultados directamente para cada región, pero si se pueden identificar las zonas más vulnerables en el país y la información entre ambos estudios concuerda.

Los mapas resultantes para todos los periodos de retorno realizados utilizando la distribución de Weibull, se muestran en el Apéndice F.

7. Conclusiones

En este trabajo se utilizaron ciclones tropicales históricos y sintéticos con la finalidad de caracterizar condiciones climáticas extremas de oleaje y marea de tormenta en el Pacífico y en el Golfo de México y Mar Caribe. Los eventos sintéticos se utilizaron para compensar la falta de información histórica de ciclones tropicales en México y generar una base de datos robusta que permita una mejor estimación de eventos extremos. Esta base de datos permite evaluar correctamente áreas con escasez de registros históricos. Se utilizaron un total de 3,100 eventos sintéticos tocando tierra en México (dividido en ambas cuencas), los cuales reproducen las tendencias estadísticas en base a eventos históricos en ambas cuencas.

A partir de los eventos sintéticos e históricos, se generaron los campos de viento de cada evento a partir de un modelo paramétrico. Esta información se utilizó para forzar un modelo de tercera generación de oleaje y un modelo hidrodinámico, ambos de malla flexible, y así obtener valores de altura de ola significativa y sobre elevación del nivel del mar en todo el dominio computacional, para cada evento. Los resultados fueron analizados para hacer una evaluación de los niveles extremos del nivel del mar y del oleaje, el cual se caracterizó por medio del percentil 99 (clima extremo).

Se realizó un análisis de valores extremos para cada uno de los elementos del dominio computacional, aplicando las funciones de distribución Weibull (WBL) y la distribución generalizada de valores extremos (GEV). Al analizar nodos específicos (en este caso, localidades próximas a los principales puertos de México), se descubrió que la distribución de GEV genera patrones poco fiables. En el caso de la altura de ola significativa, la distribución de GEV y WBL muestran resultados similares. Sin embargo, existen resultados más confiables al ajuste de la función GEV, dado que contempla tres funciones de distribución distintas y se considera una función dinámica que busca el mejor acoplamiento a la muestra. De la función de distribución de Weibull se percibió que no traza el ajuste por encima del valor máximo de la muestra, sino que a partir de ese punto presenta un crecimiento paulatino.

Se encontró que en el Atlántico el oleaje y marea de tormenta de mayor altura se presentan en la Península de Yucatán y la parte norte del Golfo de México, mientras que en el Pacífico en la zona sur de Baja California Sur y entre los estados de Sinaloa y Guerrero.

Una de las conclusiones más importantes de este trabajo es que el análisis de valores extremos debe ser focalizado a una región específica, de hecho, Romero, E. (2003) hace la misma conclusión. Esto se debe a que las funciones de ajuste son muy sensibles a los datos y es importante probar distintos ajustes para seleccionar el que mejor se ajusta a los datos. Al realizar este proceso a zonas extensas, es necesario automatizar los ajustes, con lo cual no puede existir una supervisión del ajuste realizado en cada nodo. Sin embargo, la función Weibull puede ser

considerada para zonas extensas, que a pesar de subestimar los valores extremos, presenta patrones homogéneos al generar mapas de valores extremos.

Es importante aclarar que los resultados obtenidos para oleaje y marea de tormenta han sido analizados de manera independiente (la modelación numérica no se realizó de manera acoplada), a pesar de que en la naturaleza suceden de manera conjunta con otras variables que no se incluyeron como las descargas fluviales y pluviales, la sobreelevación por la acumulación del agua en la costa debido al oleaje de tormenta (*run-up*) y los efectos del cambio climático por lo que es necesario extender este análisis a estas otras variables para considerar una valoración integral del riesgo por inundación en la zona costera.

Dentro de las limitantes de este trabajo se encuentran las detectadas por Durán, G. (2010), falta de calidad en la información topo-batimétrica para aproximar a la realidad las simulaciones dentro del dominio computacional y una red de mareógrafos funcional durante el paso de los huracanes para que se puedan validar los modelos numéricos. Sin embargo, se extiende la base de datos al incorporar los eventos sintéticos para mejorar la calidad de los resultados y se incorpora la vertiente del Pacífico.

La técnica presentada en este trabajo utilizando eventos sintéticos representa un avance significativo para determinar niveles de diseño en base a marea de tormenta y oleaje en comparación de las aproximaciones tradicionales que emplean ecuaciones paramétricas para su definición.

8. Referencias

Amante C, Eakins BW (2009), *ETOPO I. Arc-minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis*. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophys. Data Center, NOAA.

Appendini CM, Torres-Freyermuth A, Oropeza F, Salles P, López J, Mendoza ET (2013), *Wave modeling performance in the Gulf of Mexico and Western Caribbean: Wind reanalysis assessment*. *App. Ocean Res.* 39. 20-30. doi: 10.1016/j.apor.2012.09.004.

Appendini CM, Urbano-Latorre CP, Figueroa B, Dagua-Paz CJ, Torres-Freyermuth A, Salles P (2015), *Wave Energy potential assessment in the Caribbean Low Level Jet using wave hindcast information*. *App. Energy.* 137. 375-384. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.10.038.

Appendini CM, Pedrozo-Acuña A, Valle-Levinson A (2014a), *Storm surge at a western Gulf of Mexico site: Variations on Tropical Cyclone Arlene*. *Int. J. River Basin Manag.* 1-8. doi: 10.1080/15715124.2014.880709

Appendini CM, Torres-Freyermuth A, Salles P, et al. (2014b), *Wave climate and trends for the Gulf of Mexico: A 30 year hindcast*. *J. Clim.*

Appendini CM, Rosengaus-Moshinsky M, Meza-Padilla R, Camacho V, *Rapid wave and storm surge warning system for tropical cyclones in Mexico*. In prep

Arns A, Wahl T, Haigh ID, et al. (2013), *Estimating extreme water level probabilities: A comparison of the direct methods and recommendations for best practice*. *Coastal Eng.* 81: 51-66. doi: 10.1016/j.coastaleng.2013.07.003

Battjes JA, Janssen JP (1978), *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*. *Proceedings of the 16th international conference on coastal engineering, Vol I.* 569-587.

Bautista E (2001), *Modelo hidrodinámico para predicción de sobreelevación del nivel del mar generado por huracanes*. Tesis de maestría en Ingeniería Civil (Hidráulica). Facultad de Ingeniería UNAM. México

Bautista E (2005), *Marea de tormenta inducida por ciclones tropicales*. Tesis de doctorado en Ingeniería Civil (Hidráulica). Facultad de Ingeniería UNAM. México

Boon J (2014), *The three faces of Isabel. Storm surge, storm tide and sea level rise*. Virginia Institute of Marine Science VIMS. Retrieved from the World Wide Web (http://www.vims.edu/research/units/labgroups/faces_of_isabel/index.php) on September 2014

Breña-Naranjo JA, Pedrozo-Acuña A, Jiménez-López S, López-López M, *Evaluating the contribution of tropical cyclones to rainfall in México*. *Phy. Chem. Earth*. Under revision.

Bretschneider CL (1972), *A non-dimensional stationary hurricane wave model, paper presented at the Offshore Technology Conference, Am. Inst. Of Min., Metal. And Pet. Engineering. Houston, Texas.*

Chan, J. C. (2005), *The Physics of Tropical Cyclone Motion*. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 37, 99 – 128, doi:10.1146/annurev.fluid.37.061903.175702.

Coles S (2001), *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. 208

Depperman CE (1947), *Notes on the origin and structures of Philippine typhoons*. Bull. Am. Met. Soc. 28. 399-404

DHI (2012), *MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation*. Horsholm, Denmark.

DHI (2014), *MIKE 21 SW, Spectral Wave Module. Scientific Documentation*. Horsholm, Denmark.

DHI (2014a), *MIKE 21 Flow Model – Hydrodynamic Module. Scientific Documentation*. Horsholm, Denmark.

Dube SK, Murty TS, Feyen JC, et al. (2010), *Storm Surge modeling and applications in coastal areas*. In: Chan JCL, Kepert JD (eds) *Glob. Perspect. Tropical Cyclones from Scientific Mitigation*. World Cientific Publishing Co. Pte. Ltd. Hackensack, N.J., pp 363-406.

Durán G (2010), *Análisis de peligro por marea de tormenta en el Golfo de México. Tesis de maestría en Ingeniería Civil (Hidráulica)*. Instituto de Ingeniería UNAM. México

Eldeberkly Y, Battjes JA (1996), *Spectral modeling of wave breaking: Application to Boussinesq Equations*. *Jor. Geophys. Res.* 101(C1): 1253-1264

Emanuel K (2004), *Tropical Cyclone Energetics and Structure. Atmospheric Turbulence and Mesoscale Meteorology*. Fedorovich E, Rotunno R, Stevens B, Eds. Cambridge University Press, pp 280.

Emanuel K (2006), *Climate and Tropical Cyclone Activity: A New Model Downscaling Approach*. *J. Clim.* 4797-4803.

Emanuel K, Ravela S, Vivant E, Risi C (2006), *A Statistical Deterministic Approach to Hurricane Risk Assessment*. *Bull. Am. Met. Soc.* 87: 299-314. doi: 10.1175/BAMS-87-3-299

Emanuel K, Sundararajan R, Williams J (2008), *Hurricanes and Global Warming: Results from Downscaling IPCC AR4 Simulations*. *Bull. Am. Met. Soc.* 89:347-367. doi:10.1175/BAMS-89-3-347

Emanuel K, Jagger T (2010), *On Estimating Hurricane Return Periods*, *J. Applied Meteorological Climatology* 49: 837-844. doi: 10.1175/2009JAMC2236.1

Emanuel K, Rotunno R (2011) *Self-Stratification of Tropical Cyclone Outflow: Part I: Implications for Storm Structure*. *J. Atm. Sci.* 68: 2236-2249. doi: 10.1175/JAS-D-10-05024.1

Geernaert GL, Plant WL (1990), *Surfaces waves and fluxes, Volume I – Current theory*, Kluwer Academic Pub. The Netherlands

Glahn B, Taylor A, Kurkowski N, Shaffer WA (2009), *The role of the SLOSH model in National Weather Service storm surge forecasting*. *Nat. Weather Dig.* 33, 14.

Hasselmann S, Hasselmann K (1985), *Computations and parametrizations of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part I: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral*. *J. Phys. Ocean.* 15. 1369-1377.

Hasselmann S, Hasselmann K, Allender JH, Barnett TP (1985), *Computations and parametrizations of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part II:*

Parametrizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *J. Phys. Ocean.* 15. 1378-1391.

Holland GJ, (1980), *An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes.* *Monthly Weather Review* 108:1212-1218

Irish JL, Resio DT, Divoky D (2011), *Statistical properties of hurricane surge along a coast.* *J. Geo. Res.* 116:C10007. doi: 10.1029/2010JC006626

Janssen PA (1989), *Wave-induced stress and the drag of the air flow over sea waves.* *J. Phys. Ocean.* 19. 745-754

Janssen PA, (1991), *Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting.* *J. Phys. Ocean.* 21. 1631-1642.

Janssen PA, Lionello P, Zambresky L (1989), *On the interaction of Wind and Waves.* *Phil. Trans. R. Soc. Lon. S. A. Math. Phys. Sci.* 329, 289-301. doi: 10.1098/rsta.1989.0077

Jáuregui E (2003), *Climatology of landfalling hurricanes and tropical storms in México.* *Atmósfera.* 193-204

Jelesnianski CP, Chen J, Shaffer WA (1992), *SLOSH: Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes.* Silver Spring MD, <http://slosh.nws.noaa.gov/sloshPub/pubs/SLOSH:TR48.pdf>

Johnson HK, Kofoed-Hansen H (2000), *Influence of bottom friction on sea surface roughness and its impact on shallow water wind wave modeling.* *J. Phys. Ocean.* 30. 1743-1756

Komen GJ, Cavaleri L, Donelan M, Hasselmann K, Hasselmann S, Janssen PA (1994), *Dynamics and modeling of ocean waves.* Cambridge U. Press

Klima K, Lin N, Emanuel K, et al. (2012), *Hurricane modification and adaptation in Miami Dade County, Florida* *Env. Sc. Tech.* 46: 636-642. doi: 10.1021/es202640p

Landsea CW (2007), *Counting Atlantic Tropical Cyclones Back to 1900.* *Eos, Trans. Am. Geo. U.* 88:197. doi: 10.1029/2007EO180001

Lin N & Chavas D (2012), *On hurricane parametric wind and applications in storm surge modeling.* *Journal of Geophysical Research*, 117, D09120, doi:10.1029/2011JD017126.

Lin N, Emanuel K, Smith J, Vanmarcke E (2010), *Risk assessment of hurricane storm surge for New York City.* *J. Geophys. Res.* 115:D18121. doi: 10.1029/2009JD013630

Lin N, Emanuel K, Oppenheimer M, et al (2012), *Physically based assessment of hurricane surge threat under climate change.* *Nat. Clim Change* 2: 462-467. doi: 10.1038/nclimate1389

Lin N, Lane P, Emanuel K, et al. (2014), *Heightened hurricane surge risk in northwest Florida revealed from climatological-hydrodynamic modeling and paleorecord reconstruction.* *J. Geophys. Res. Atm.* 119:8606-8623. doi: 10.1002/2014JD21584

Marks DG (1992), *The beta and advection model for hurricane track forecasting*

Mann ME, Emanuel K (2006), *Atlantic hurricane trends linked to climate change.* *Eos, Trans. Am. Geophys. Union* 87:233, 238, 241. doi: 10.1029/2006EO240001

Martínez-Sánchez JN, Cavazos-Pérez MT (2014), *Eastern Tropical Pacific hurricane variability and landfalls on Mexican coasts. Climate Research* 58(2). 221-234

Martínez-Martínez RE (2014), *Evaluación de cotas de inundación en el litoral mexicano por ciclones tropicales, frentes fríos y tsunamis. Tesis de maestría en Ingeniería Civil (Hidráulica). Instituto de Ingeniería UNAM. México*

Medellín G., Mariño-Tapia I., Pedrozo-Acuña A., Enríquez C., González-Villareal F. (2013), *Influencia de la marea en la hidrodinámica del sistema Mecoacán-Río González, México. Tecnología y Ciencias del Agua, Vol. IV, No. 2, pp. 71-90.*

Meza-Padilla R, Appendini CM, Pedrozo-Acuña A, González-Villareal F, *Storm surge assessment in areas with scarce data: Panuco River. México. Rev. Iberoamericana del Agua.*

Montoya-Ramírez RD, Osorio-Arias A, Ortiz Royero JC, Ocampo-Torres FJ (2013), *A wave parameters and directional spectrum analysis for extreme winds. Ocean Engineering*

Nava HF, Ocampo-Torres FJ, Hwang PA, Osuna-Canedo JP (2012), *Reduction of wind stress due to swell at high wind conditions. J. Geophys. Res.* 117

Panchang V, Jeong CK, Demirbilek Z (2013), *Analyses of Extreme Wave Heights in the Gulf of México for Offshore Engineering Applications. J. Offshore Mech. Art. Eng.* 135:031104-031104-15. doi: 10.1115/1.4023205

Pedrozo-Acuña A, Ruíz de Alegría-Arzaburu A, Mariño-Tapia I, et al. (2012), *Factors controlling flooding at the Tonalá river mouth (México). J. Flood Risk. Manag.* 5:226-244. doi: 10.1111/j.1753-318X.2012.01142.x

Pedrozo-Acuña A, Breña-Naranjo JA, Dominguez-Mora R (2014), *The hydrological setting of the 2013 floods in México. Weather* 69: 295-302.

Posada-Vanegas G, Durán-Valdez G, Silva-Casarín R, et al. (2011), *Vulnerability to coastal flooding induced by tropical cyclones. Coastal Eng. Proc. 1: Management* 19. doi: <http://dx.doi.org/10.9753/icce.v32.management.19>

Powell MD, Vickery PJ and Reinhold T (2003), *Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones. Nature*, 422, 279 – 283, doi:10.1038/nature01481.

Robles-Díaz L (2012), *Modelación paramétrica y numérica de viento y oleaje extremal, asociado a eventos de huracanes en el Atlántico Norte. Universidad de Cantabria*

Romero-Vadillo E (2003), *Modelación numérica de ondas de tormenta en la bahía de La Paz y Cabo San Lucas, Baja California Sur. Tesis de doctorado en Oceanografía Física en el Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional. México*

Rosengaus-Moshinsky M, Jiménez-Espinosa M, Vázquez-Conde MT (2002), *Atlas Climatológico de Ciclones Tropicales en México. Centro Nacional para la Prevención de Desastres. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.*

Ruíz-Martínez GR, Silva D, Pérez G, Posada G, Bautista G (2009), *Modelo híbrido para la caracterización del clima marítimo. Ingeniería Hidráulica en México. México*

Ruíz-Salcines P (2013), *Campos de viento para hindcast de oleaje: reanálisis, paramétricos y fusión. 84.*

Schloemer RW (1954), *Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okechobee, Fl.* Hydromet Rep. 31. 49 pp. Gov. Printing Office, No. C30.70:31

Serra S (1970), *Hurricanes and tropical storms of the west coast of Mexico.* Monthly Weather Rev. Vol. 99. 4. 302-308

Silva R (1996), *Desarrollo de un modelo de cálculo de los parámetros de oleaje en función de datos de viento.* Instituto de Ingeniería UNAM. México

Silva R (1997), *Desarrollo de un modelo numérico para la predicción de oleaje en tiempo real.* Instituto de Ingeniería UNAM. México

Silva R, Díaz G, Pedrozo-Acuña A, Salles P, Aguilar B (2001), *Oceanographic risk from hurricanes on the Mexican Pacific Coast.* 6th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting. 137-160

Silva R, et al. (2002), *Oceanographic vulnerability to hurricanes on the mexican coast.* ICCE. Coastal Engineering. 39-51

Silva R, Mendoza E (2012), *Zonificación del litoral mexicano.* En *Electricidad, CFD & Instituto de Ingeniería. U. Manual de Diseño de Obras Civiles: A.2.13. Hidráulica Marítima.* México. A. 13-3-1 – A. 13-4-68

Smith SD and Banke EG (1975), *Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed.* Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 06/1975; 101(429):665-673. Doi: 10.1002/qj.49710142920.

Stewart SR (2013), *Atlantic Hurricanes 2012: Northeastern United States devastated by Sandy.* Weatherwise 66: 28-39. doi: 10.1080/00431672.2013.781846

Sorensen OR, Kofoed-Hansen K, Rugbjerg M, Sorensen LS (2004), *A third-generation spectral wave model using an unstructured finite volume technique.* Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, New York. 894-906.

Torres-Freyermuth A, Mariño-Tapia I, Coronado-Mendez CA, Salles P, Medellín G, Mayoral A, Pedrozo-Acuña A, Silva-Casarín R, Candela-Pérez J, Iglesias-Prieto R (2012), *Wave-induced extreme water levels in the Puerto Morelos fringing reef lagoon.* Nat. Haz. & Earth Sys. Sc. 12(123). 3765-3773

Vickery PJ, Skerlj PF, Twisdale LA (2000), *Simulation of hurricane Risk in the U.S. using empirical track model.* J. Struct. Eng. 126:1222-1237. doi: 10.1061/ASCE.0733-9445.2000.126:10.1222

Wang DP, Oey LY (2008), *Hindcast of waves and currents in Hurricane Katrina.* Bull. Of Am. Met. Soc. 89:487-495

Wu, Jin (1994), *The sea surface is aerodynamically rough even under light winds,* Boundary Layer Meteo., 69, 149-158.

Wu, Jin (1980), *Wind stress coefficients over sea surface and near neutral conditions - A revisit,* Journal of Physical Oceanography, 10, 727-740.

Young IR, Sobey RJ (1981), *The Numerical prediction of tropical cyclone wind-waves*

Young IR (1999), *Wind generated ocean waves.* Elsevier Science. Oxford

APENDICE A. Teoría sobre la marea de tormenta

La marea de tormenta es precisamente un fenómeno que surge de la interacción entre el océano y la atmosfera. Es decir, la atmósfera induce en el cuerpo de agua una fuerza y éste responde con oscilaciones de diferentes periodos que puede variar de minutos a días, es por ello que se definen como ondas largas gravitatorias. Este fenómeno genera fuertes corrientes produciendo erosión, falla en estructuras y arrastre de objetos debido a las componentes meteorológicas que conforman el fenómeno, como se describen a continuación

Tabla 11 - Componentes de la marea de tormenta

Factor	Descripción	Fuerza
<i>Centro de baja presión</i>	Produce una succión sobre la superficie del mar haciendo que fluya la masa de agua hacia el centro de baja presión. Esto produce un incremento en la superficie libre sin importar la profundidad del sitio. Por cada hecto pascal (hPa) que decrece en el ojo del huracán, el nivel del mar incrementa aproximadamente un centímetro (WMO, 2011).	Baja
<i>Viento normal a la costa</i>	Ejerce una fuerza tangencial sobre la superficie libre. Esto produce una corriente en la misma dirección que el viento. Cuando la dirección del viento es normal al litoral y se aproxima al mismo, la reducción de profundidad produce una acumulación de masa de agua que busca balancear la fuerza tangencial del viento.	Alta
<i>Viento paralelo a la costa</i>	Cuando la corriente del flujo (generada por el viento) actúa en el hemisferio norte, debido a la fuerza de Coriolis hay una tendencia hacia la derecha de la corriente. Si la costa se encuentra al lado derecho de la dirección del viento, entonces genera una sobreelevación y a su izquierda una sub-elevación. En el caso del hemisferio sur el caso es opuesto.	Baja
<i>Lluvia y descarga de ríos</i>	Las lluvias torrenciales son de gran importancia si la zona costera en la que toca tierra el huracán se encuentra próxima a una descarga fluvial, ya que incrementa la cantidad de agua que puede ser desplazada por los vientos y el oleaje extremo.	Media
<i>Marea astronómica</i>	La marea de tormenta actúa sobre la marea astronómica, por lo que es un factor determinante dependiendo del rango de mareas de la zona (e.g. en la región norte del mar de Cortés el rango de mareas es bastante amplio, a diferencia de la Península de Yucatán donde es considerablemente menor). Esta componente puede representar incrementos, así como decrementos en la superficie libre.	Media

En general, la máxima marea de tormenta se presenta precisamente en la zona de vientos máximos. De la misma forma, la zona de impacto depende de sí los vientos van hacia la costa (sobre-elevación) o desde la costa (sub-elevación) como se muestra a continuación

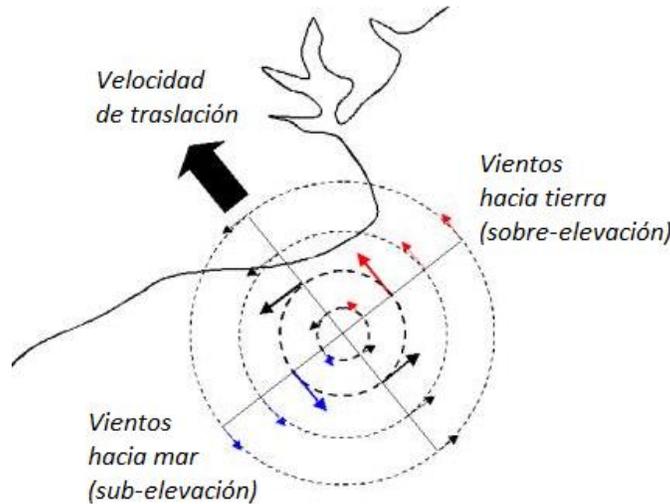


Figura 34 - Esquema de la entrada a tierra de un huracán visto en planta. Adaptado de Boon (2014)

La marea de tormenta es un fenómeno predominantemente costero, por lo que la variación de la superficie libre depende de varios factores como son

- ✓ Trayectoria del ciclón tropical
- ✓ Intensidad
- ✓ Velocidad de traslación
- ✓ Batimetría y geometría litoral
- ✓ Variaciones del nivel del mar debido a las mareas de la región.

Las condiciones batimétricas y a la geometría litoral son determinantes para la marea de tormenta. Así pues, cuando la batimetría próxima a la costa tiene suficiente profundidad, las corrientes superficiales generadas por el viento se disipan por medio de una corriente de retorno evitando que se apile la masa de agua en la costa. Mientras que en una región cuya pendiente es muy suave como en la Península de Yucatán, la intrusión del mar a continente es ineludible.

La principal característica de este tipo de ondas es que la longitud de onda es considerablemente mayor a la profundidad sobre la que viajan, entonces la celeridad esta descrita por

$$C = \sqrt{gh} \quad (\text{Ec. A. 1})$$

Donde C es la velocidad de la onda, g es la aceleración gravitacional y h es la profundidad. Es por ello que cuando la marea de tormenta viaja sobre aguas profundas, se propaga a una velocidad mayor que el ciclón tropical en la atmósfera. Conforme se aproxima a regiones más someras, la onda larga se va frenando con el fondo y su velocidad adquiere gradualmente la velocidad de traslación del huracán. Cuando ambas velocidades son idénticas, se produce una resonancia y la energía del ciclón tropical es transferida a la superficie libre del océano desarrollando la marea de tormenta.

A.1. Interacción entre marea astronómica y marea meteorológica

Esta interacción, de acuerdo a Horsburgh y Wilson (2007) produce un cambio de fase en la señal. Cuando ambas interactúan, la marea de tormenta aumenta la velocidad de la onda mareal, de tal forma que adelanta las mareas altas y bajas. El resultado es el incremento en el residuo no mareal durante la inundación mareal. La interacción alterna (disminuye e incrementa) el residual, especialmente para rangos de marea muy amplios. El *skew surge* (la diferencia entre la marea astronómica alta predicha y el nivel de superficie más alto registrado con desfase) es un buen diagnóstico de la marea de tormenta para sistemas operacionales como se muestra a continuación

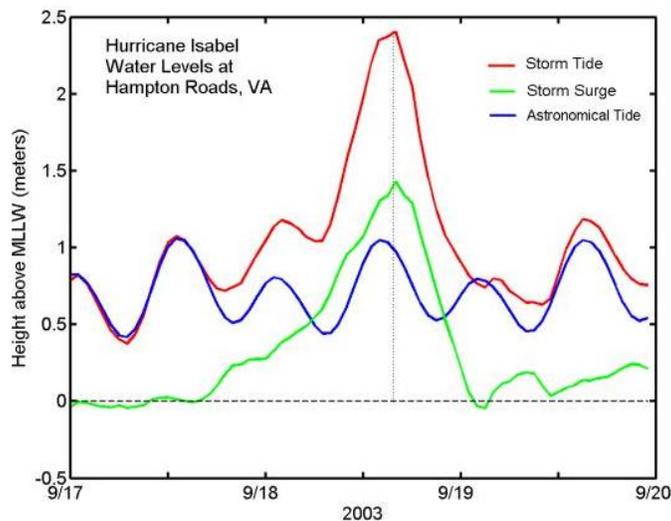


Figura 35 - Skew surge registrado en Hampton Roads, Virginia por el huracán Isabel en 2003.
Extraída de Boon

(2014)

La investigación realizada por Tang et al. (1996) realza la importante influencia de la fricción de fondo en la interacción entre marea y marea de tormenta. De hecho, juega un papel muy importante en cambios de marea fuertes y en las corrientes

generadas por la marea de tormenta. Cuando se presentan ambas ondas de la misma magnitud, la fricción generada por ambas ondas tiende a reducir el crecimiento de las mismas y por ende se presenta un decaimiento en la marea de tormenta. El efecto consecuente es un retraso de la onda conjugada con respecto a la predicha.

A.2. Interacción marea meteorológica con desembocadura de ríos

En regiones donde la influencia del agua dulce es dominante como en los deltas y la desembocadura de los ríos en el océano, la estratificación se ve influenciada por la acción del viento. La marea de tormenta puede causar el desplazamiento del agua menos densa en una región costera elevando el nivel de la superficie libre. Grandes gradientes horizontales y verticales en la densidad del fluido debido a diferentes parámetros (descarga del río, fricción del fondo, área de la desembocadura y pendiente del río) tienen la capacidad de modificar considerablemente la magnitud de la marea de tormenta. Por ejemplo, si la pendiente es relativamente suave, la marea de tormenta puede propagarse río arriba por varios kilómetros como sucedió en el río Mississippi durante el huracán Isaac (2012). El caudal de este río es aproximadamente de 125,000 pies cúbicos por segundo hacia el Golfo de México y a pesar de ello, durante el huracán el flujo se invirtió por más de 24 horas con flujos de hasta 185,000 pies cúbicos por segundo como se muestra a continuación

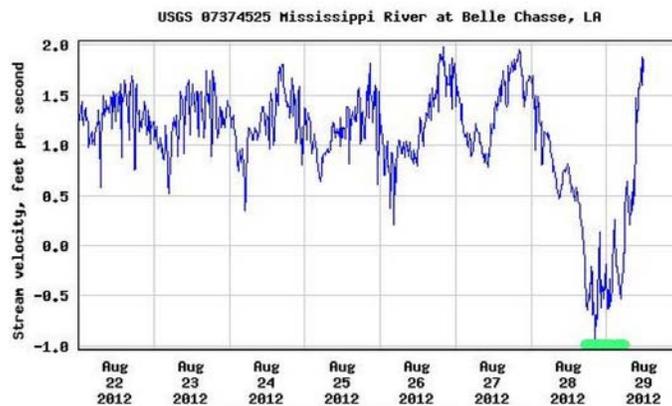


Figura 36 - Flujo inverso del río Mississippi durante más de 24 horas durante el huracán Isaac (2012). Extraído del U.S. Geological Survey (www.usgs.gov)

La marea de tormenta incremento el nivel medio del río hasta 8 pies al norte de Baton Rouge (~170 kilómetros tierra adentro) causando intrusión salina y la inundación de regiones desprotegidas (Demas, 2012). Esto puede causar una alta tasa de destrucción en la vegetación tierra adentro que no tolera la salinidad. Además, el continuo embate de las olas y el apilamiento de agua pueden ocasionar tapones hidráulicos que impiden el desfogue de los ríos (Pedrozo-Acuña 2012).

APENDICE B. Teoría sobre el oleaje

El oleaje es la respuesta de la superficie libre en el océano a las variaciones en las condiciones atmosféricas y se puede catalogar en dos grupos

- ✓ Fuerzas generadoras
 - Por su acción causan un desequilibrio en la superficie del mar generando oscilaciones. El viento y la presión son las principales fuerzas generadoras. Existen otras fuentes como sismos y fuerzas astronómicas que generan tsunamis y mareas respectivamente.
- ✓ Fuerzas restauradoras
 - Buscan que la superficie libre regrese a su equilibrio inicial. La principal fuerza actuante es la gravedad de la tierra.

Las olas generadas por el viento se empiezan a desarrollar en vientos con velocidades aproximadamente de un metro por segundo en la superficie, donde la energía del viento se transforma parcialmente en energía de oleaje debido a la cortante en la superficie. Conforme incrementa la altura de ola, la transformación de energía viento-oleaje es más efectiva debido a la rugosidad entre ambos fluidos.

Generalmente se caracteriza como una superficie irregular, en la cual se ven pequeñas crestas superpuestas sobre otras de mayor tamaño que viajan a diferentes velocidades y en diferentes direcciones. Dada la complejidad del fenómeno, se recurre a ciertas simplificaciones, lo que permite describir los cambios principales en el patrón de ondas. Estos se pueden clasificar en dos clases dependiendo de su dirección de propagación

- ✓ Ondas de cresta larga y ondas de cresta corta

Para analizarlo se considera que es un proceso estocástico, debido a su naturaleza aleatoria y generalmente se considera cuasi-estacionario para simplificar su estudio. Para que cumpla la condición de estacionalidad, se debe considerar un intervalo de tiempo en el que los cambios sean imperceptibles. A cada intervalo se le denomina estado de mar. La manera más sencilla de analizar el oleaje es por medio de la teoría lineal, ya que permite eliminar los términos no lineales facilitando la obtención de soluciones analíticas sencillas y puede utilizarse como base para encontrar otras soluciones por medio de la superposición. En el siguiente esquema se ejemplifica una onda como se estudia en teoría lineal

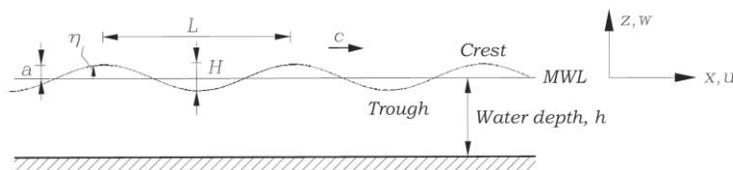


Figura 37 - Esquema de una onda en teoría lineal del oleaje

Donde H es la altura de ola, a es la amplitud de la onda, η es la superficie libre, L es la longitud de onda, $s = \frac{H}{L}$ es la pendiente de la onda, $c = \frac{L}{T}$ es la celeridad, T es el periodo, u es la velocidad horizontal de la partícula, w es la velocidad vertical de la partícula, $k = \frac{2\pi}{L}$ es el número de onda, $\sigma = \omega = \frac{2\pi}{T}$ es la frecuencia angular y h es la profundidad.

De la teoría de dinámica de fluidos se toma la ecuación de continuidad para un flujo incompresible de densidad constante dado por

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{Ec. B. 1})$$

Para un flujo irrotacional, se considera la ecuación de Laplace descrita por

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{Ec. B. 2})$$

De la segunda ley de Newton se tiene que para una partícula con masa m con fuerzas externas $\Sigma \bar{K}$ actuando sobre ella se tiene

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \bar{K} \quad (\text{Ec. B. 3})$$

La forma general de esta ecuación, es la ecuación de Navier-Stokes que para un flujo ideal se puede reducir a la ecuación de Euler, ya que las fuerzas viscosas se desprecian y se expresa como

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\text{grad}(p) + \rho \bar{g} + \text{fuerzas viscosas} \quad (\text{Ec. B. 4})$$

Para llegar a la ecuación que describe la superficie libre hay que considerar las condiciones de frontera. Entre ellas están la condición de frontera cinemática en el fondo, en la superficie libre, la condición de frontera dinámica en la superficie y la periodicidad en las fronteras laterales. Dado que las condiciones de frontera en la superficie no son lineales y la forma y posición de la superficie libre que queremos conocer es una de las incógnitas, hace falta considerar una simplificación matemática que se puede encontrar a detalle en Dean y Dalrymple (1991). Tras el proceso de simplificación matemática, se tiene una onda viajando descrita por

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(\omega t - kx + \psi) \quad (\text{Ec. B. 5})$$

Donde a es la amplitud, ω es la frecuencia, k es el número de onda y ψ es el ángulo de fase. El oleaje puede ser clasificado por su origen, peralte o incluso acorde a su profundidad. Si $\frac{h}{L} < \frac{1}{20}$ se habla de ondas en aguas someras y si $\frac{h}{L} > \frac{1}{2}$ se habla de ondas en aguas profundas.

APENDICE C. Eventos históricos modelados

El centro nacional de huracanes del servicio meteorológico nacional de Estados Unidos (NWS – NOAA) es el organismo encargado de poner a disposición la información de los ciclones tropicales que acontecen cada temporada. La base de datos, conocida como Best Track Data (HURDAT2) cubre el océano Atlántico y el Noreste del Pacífico en el periodo de 1851 a 2013 y 1949 a 2013 respectivamente. Es una base de datos con información cada seis horas que contiene la ubicación, vientos máximos, presión central y desde inicios del 2004, el tamaño de los ciclones tropicales. Esta información es de dominio público y está disponible en (<http://www.nhc.noaa.gov/data/>)

Se analizan todos los eventos que entraron a tierra en México desde depresiones tropicales hasta huracanes categoría 05 en el periodo de 1980 a 2013. Tras filtrar la información, se obtienen los siguientes eventos por cuenca.

Tabla 12 - Eventos históricos modelados en el Golfo de México y Mar Caribe

Eventos históricos modelados en el Golfo de México y Mar Caribe

(1980-2013) = 38 eventos

1	1980	HERMINE	20	2005	EMILY
2	1983	BARRY	21	2005	GERT
3	1988	DEBBY	22	2005	JOSE
4	1988	GILBERT	23	2005	STAN
5	1990	DIANA	24	2005	WILMA
6	1993	GERT	25	2007	DEAN
7	1995	GABRIELLE	26	2007	LORENZO
8	1995	OPAL	27	2008	DOLLY
9	1995	ROXANNE	28	2008	MARCO
10	1996	DOLLY	29	2010	ALEX
11	1998	MITCH	30	2010	HERMINE
12	2000	BERYL	31	2010	KARL
13	2000	KEITH	32	2011	ARLENE
14	2001	CHANTAL	33	2011	HARVEY
15	2002	ISIDORE	34	2011	NATE
16	2003	CLAUDETTE	35	2012	ERNESTO
17	2003	ERIKA	36	2013	BARRY
18	2003	LARRY	37	2013	FERNAND
19	2005	BRET	38	2013	INGRID

Los eventos en el Pacífico corresponden a la siguiente tabla



Tabla 13 - Eventos históricos modelados en el Pacífico

Eventos históricos modelados en el Pacífico

(1980-2013) = 65 eventos

1	1981	KNUT	34	1997	NORA
2	1981	LIDIA	35	1997	OLAF
3	1981	NORMA	36	1997	PAULINE
4	1981	OTIS	37	1997	RICK
5	1982	PAUL	38	1998	ISIS
6	1983	ADOLPH	39	1999	GREG
7	1983	TICO	40	2000	NORMAN
8	1984	NORBERT	41	2000	ROSA
9	1984	ODILE	42	2001	JULIETTE
10	1985	WALDO	43	2002	JULIO
11	1986	NEWTON	44	2002	KENNA
12	1986	PAINE	45	2003	CARLOS
13	1986	ROSLYN	46	2003	IGNACIO
14	1987	EUGENE	47	2003	MARTY
15	1989	COSME	48	2003	OLAF
16	1989	KIKO	49	2006	JOHN
17	1989	RAYMOND	50	2006	LANE
18	1990	RACHEL	51	2007	BARBARA
19	1992	LESTER	52	2007	HENRIETTE
20	1992	VIRGIL	53	2008	JULIO
21	1992	WINIFRED	54	2008	NORBERT
22	1993	BEATRIZ	55	2009	JIMENA
23	1993	CALVIN	56	2009	RICK
24	1993	HILARY	57	2010	GEORGETTE
25	1993	LIDIA	58	2011	JOVA
26	1994	ROSA	59	2012	CARLOTTA
27	1995	HENRIETTE	60	2012	NORMAN
28	1995	ISMAEL	61	2013	BARBARA
29	1996	ALMA	62	2013	JULIETTE
30	1996	BORIS	63	2013	MANUEL
31	1996	CRISTINA	64	2013	OCTAVE
32	1996	FAUSTO	65	2013	SONIA
33	1996	HERNAN			

Dado que en la base de datos HURDAT2 no siempre se tiene toda la información necesaria para generar paramétricamente los campos de viento, se procede a

complementar la información correspondiente a la presión central en función de la velocidad de vientos máxima. Este procedimiento se ha llevado a cabo por Silva et al. (2002) dando como resultado para el Atlántico y el Pacífico respectivamente las siguientes ecuaciones

$$P_0 = 1019.08 - 0.1820V_{max} - 0.0007175V_{max}^2 \text{ (Atlántico)} \quad (\text{Ec. C. 1})$$

$$P_0 = 1017.45 - 0.1437V_{max} - 0.00088V_{max}^2 \text{ (Pacífico)} \quad (\text{Ec. C. 2})$$

Donde P_0 es la presión central en el ojo del huracán en milibares y V_{max} es la velocidad máxima del viento promediado a un minuto en kilómetros por hora. Al ajustar dichas ecuaciones a la base de datos de HURDAT2 de 1851 a 2013 y de 1949 a 2013 en el Atlántico y en el Pacífico respectivamente, se obtienen las siguientes gráficas

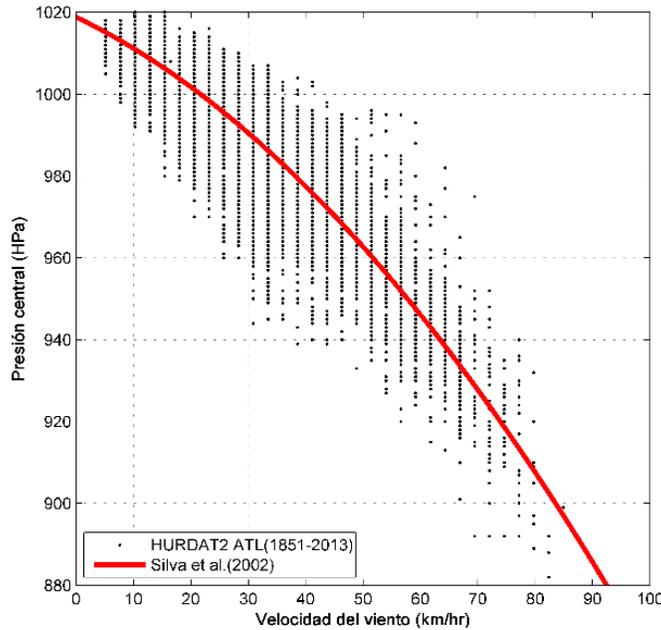


Figura 38 - Obtención de la presión mínima en función de la velocidad máxima para el Atlántico (1851 - 2013)

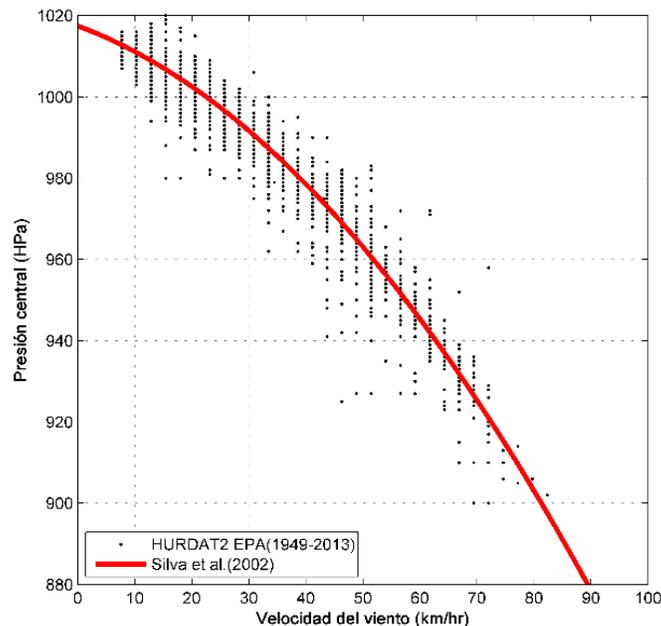


Figura 39 - Obtención de la presión mínima en función de la velocidad máximas para el Pacífico (1949 - 2013).

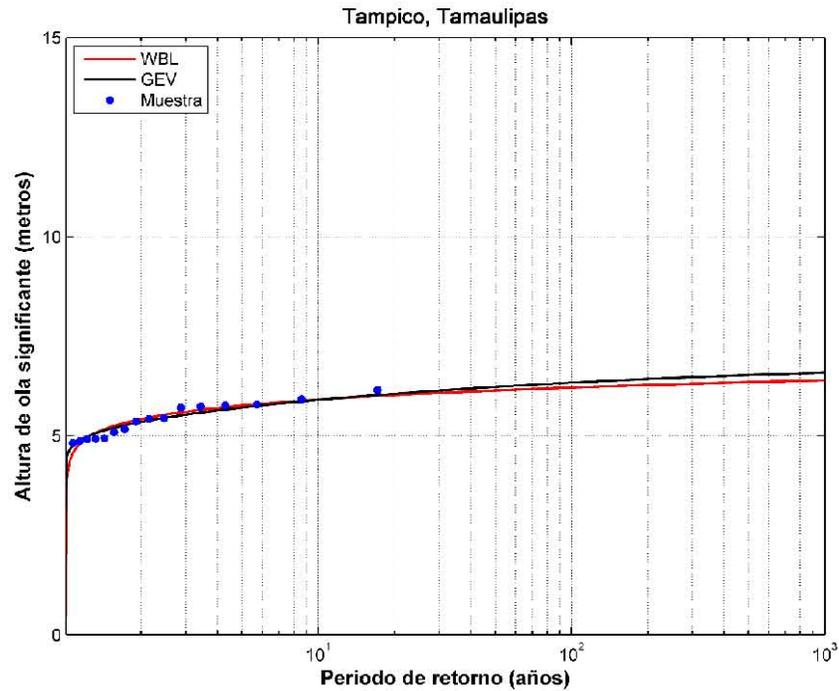
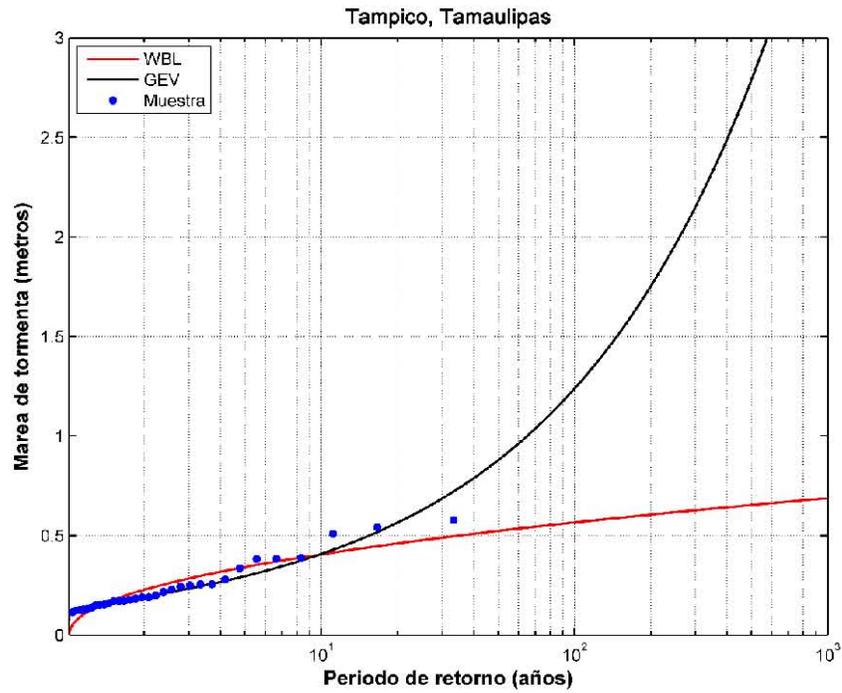
Aunado a ello, Silva et al. (2002) analizan 26 huracanes para determinar el radio de vientos máximos en función de la presión central por medio de la siguiente ecuación

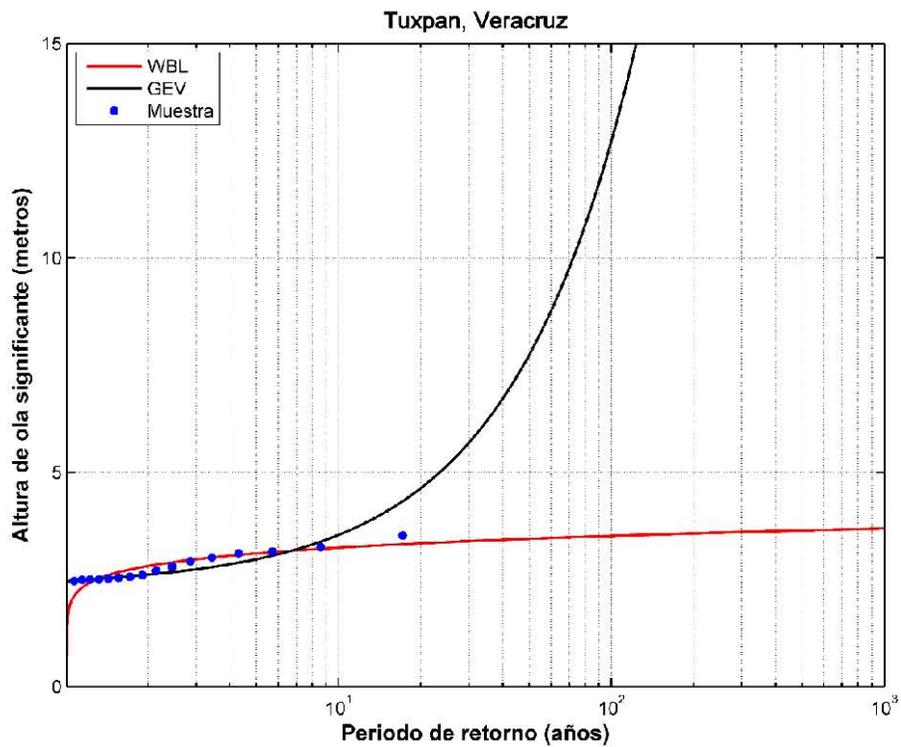
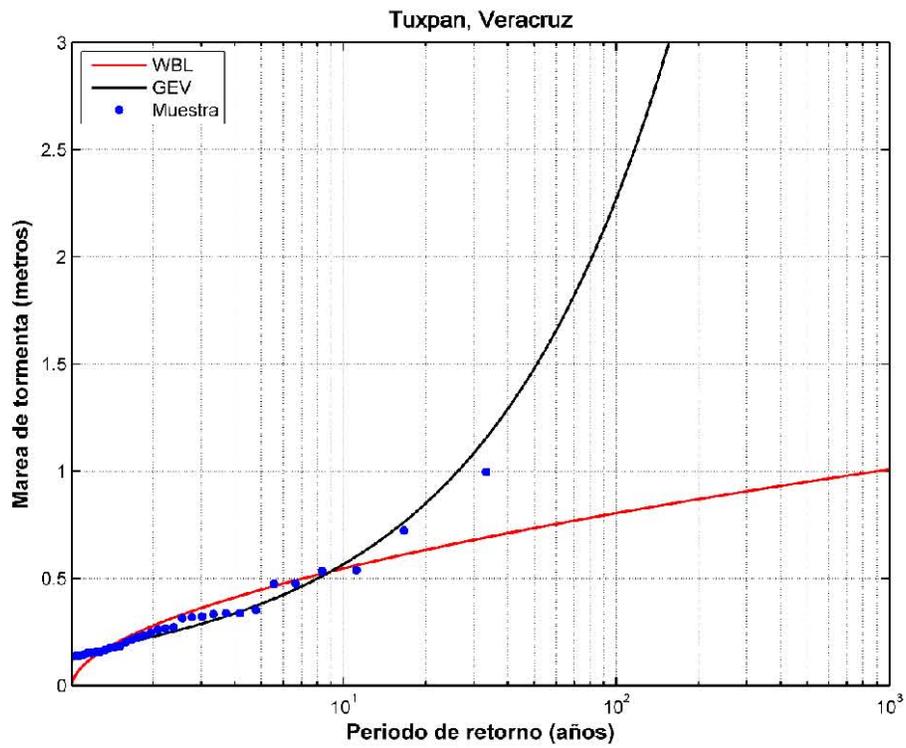
$$R_{max} = 0.478P_0 - 413.05 \quad (Ec. C. 3)$$

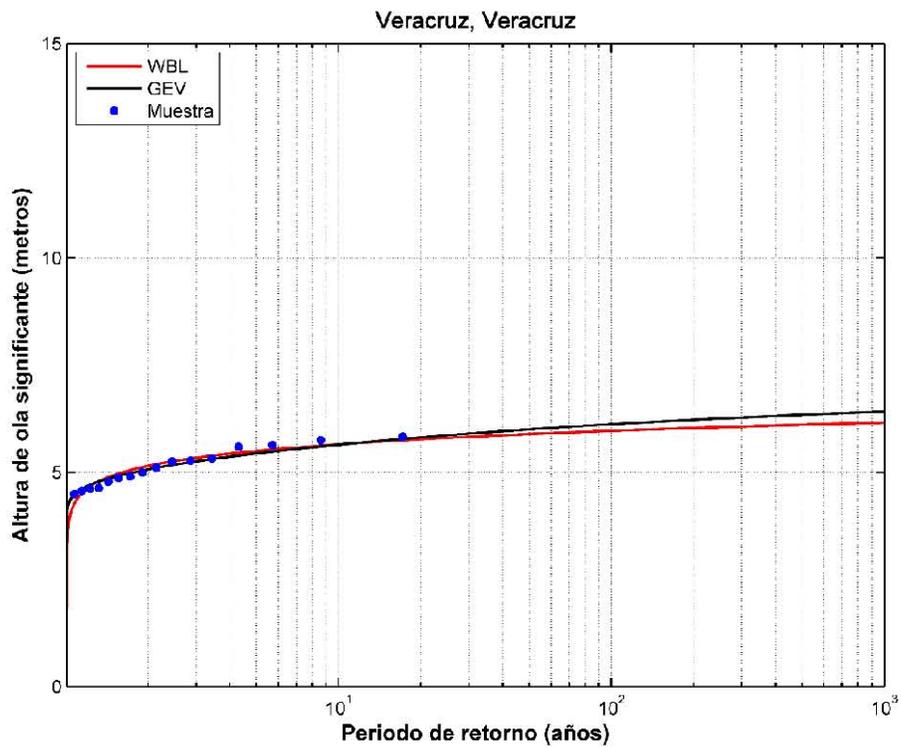
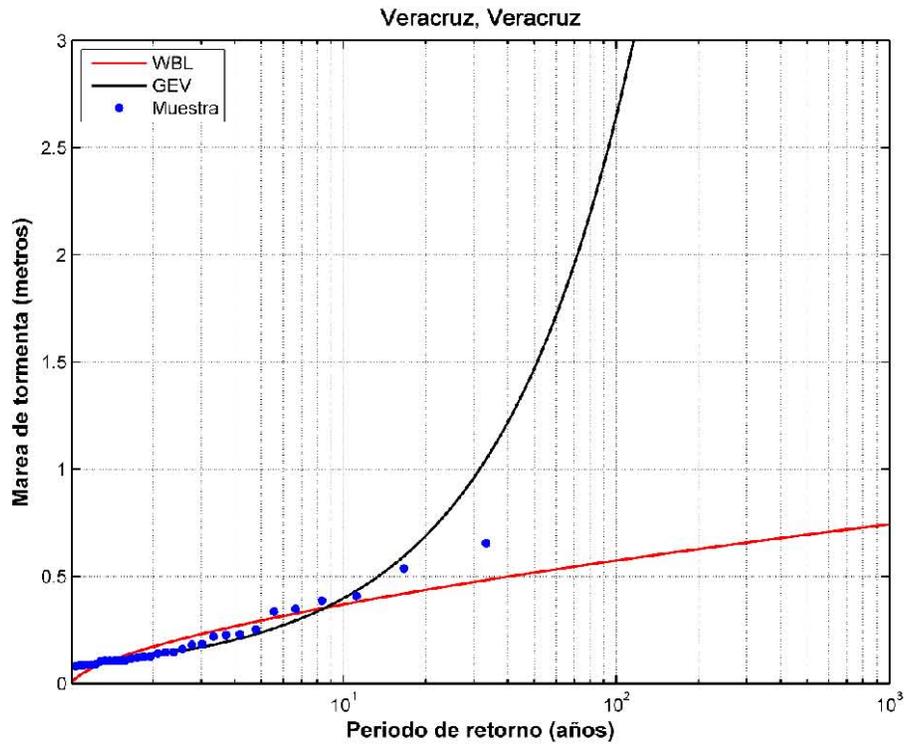
Donde R es el radio máximo de vientos dado en kilómetros y acorde a Martínez-Martínez R. (2014) puede tomar valores máximos y mínimos de 38 a 15 respectivamente para presiones centrales superiores a 880 milibares.

De esta forma, se generan un total de 65 campos de viento para el Pacífico y 38 para el Golfo de México, los cuales fueron utilizados para forzar los modelos numéricos (oleaje e hidrodinámica). Los resultados obtenidos se utilizan en conjunto con los eventos sintéticos para la caracterización de la climatología de ciclones tropicales en México así como para el análisis de valores extremos.

APENDICE D. Ajustes de la función de distribución en los puertos del Golfo de México



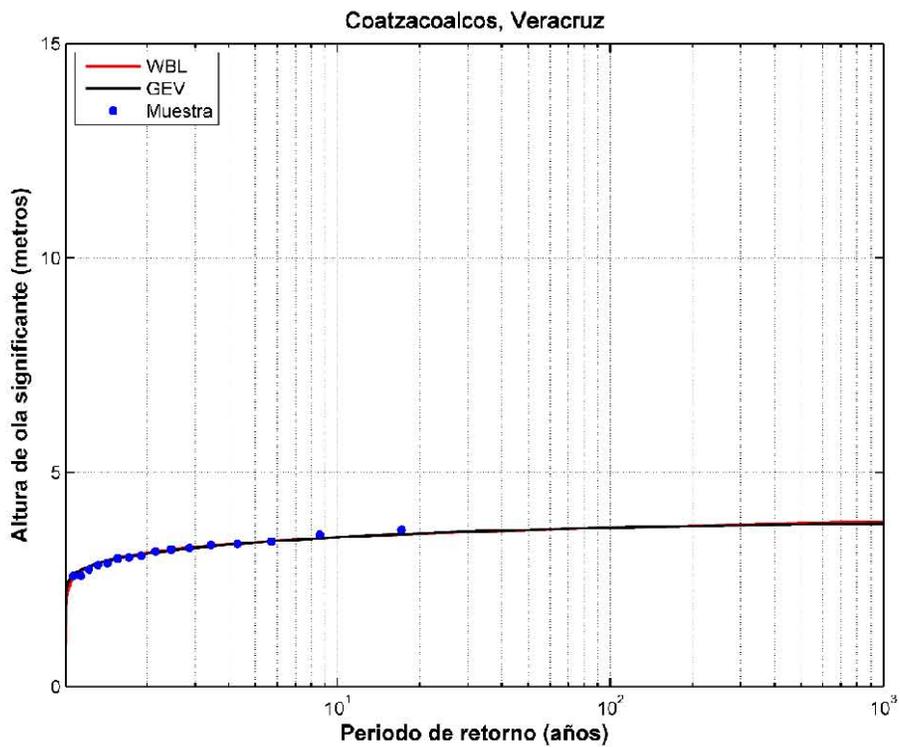
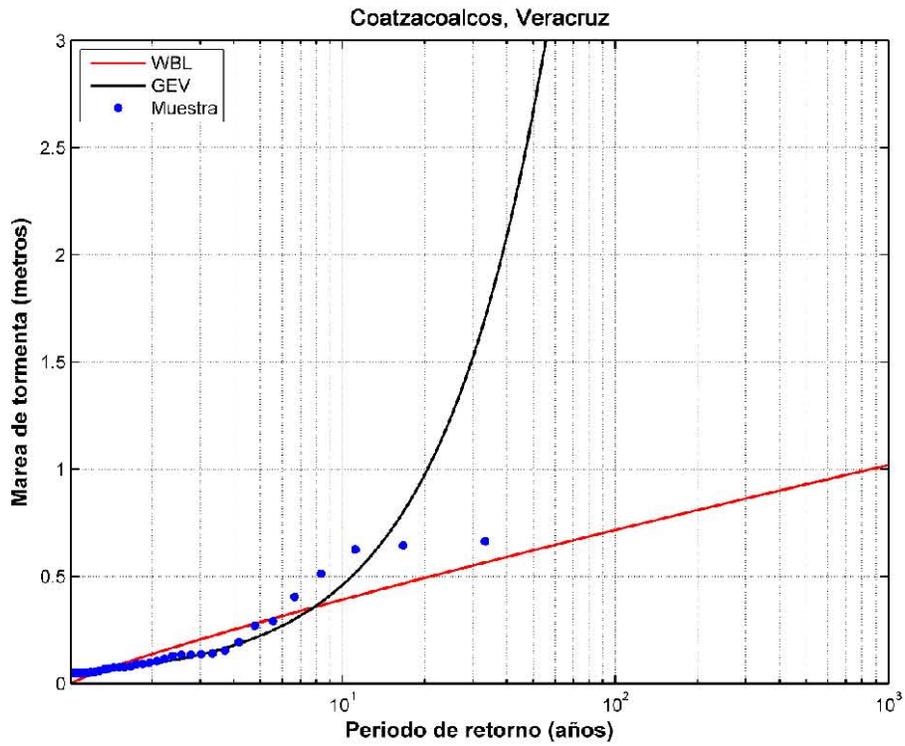


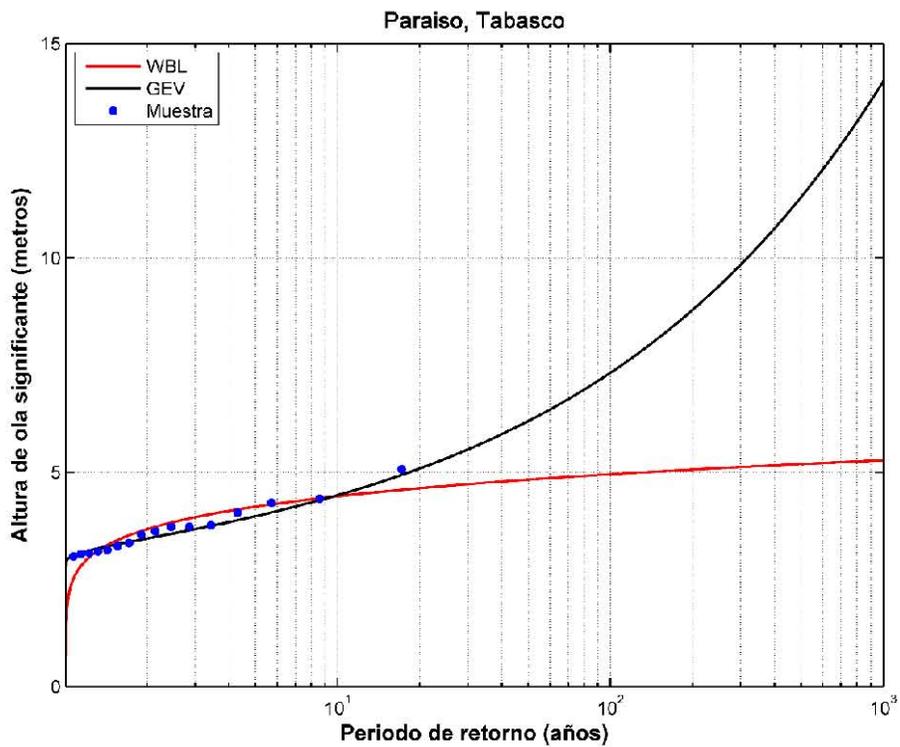
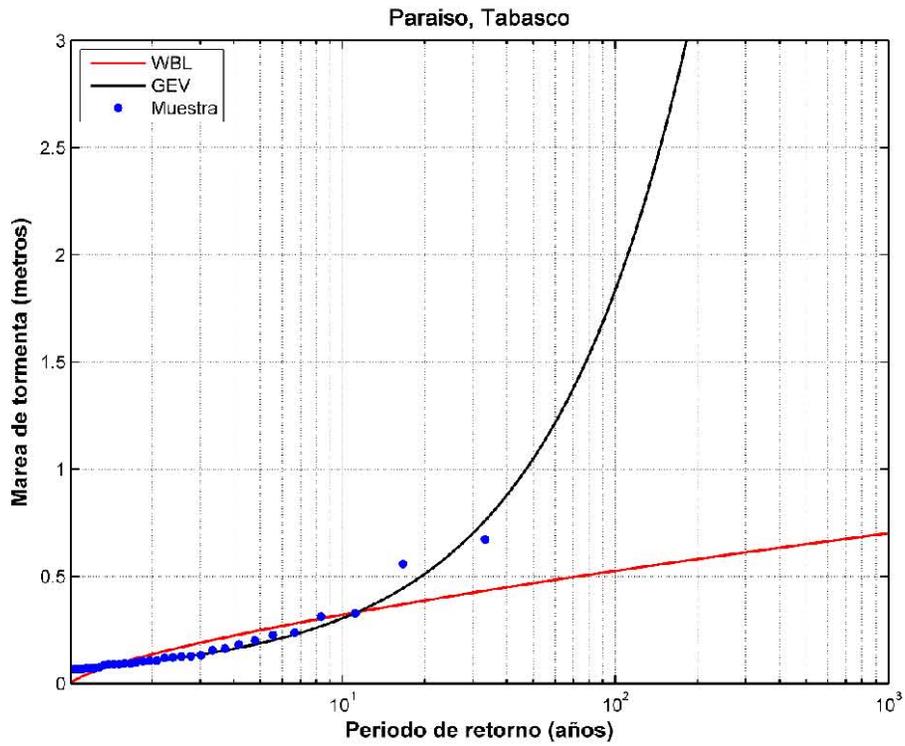




LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos

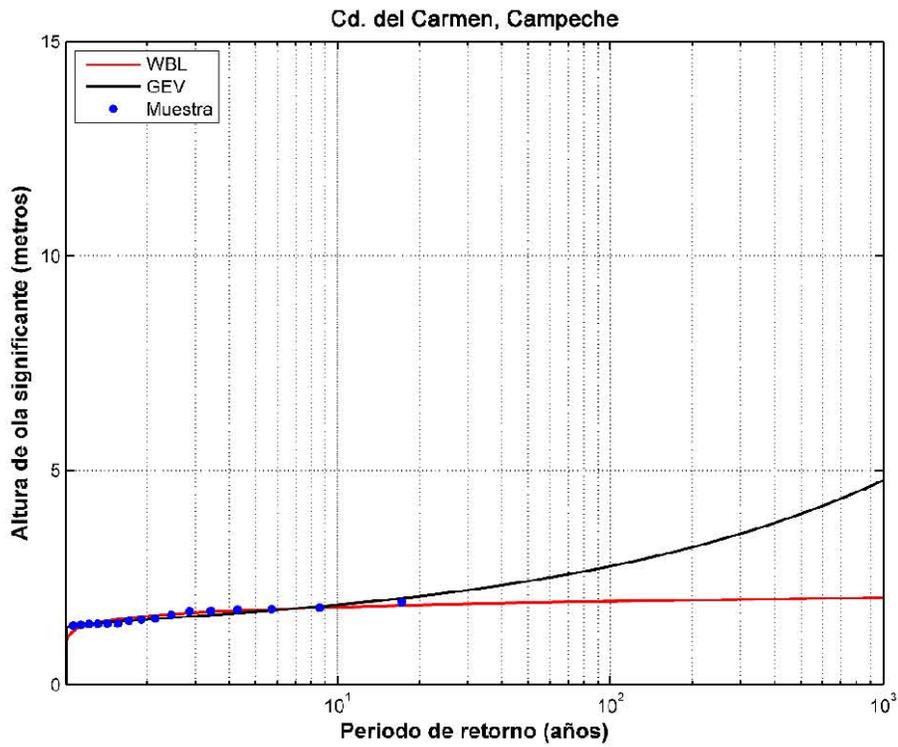
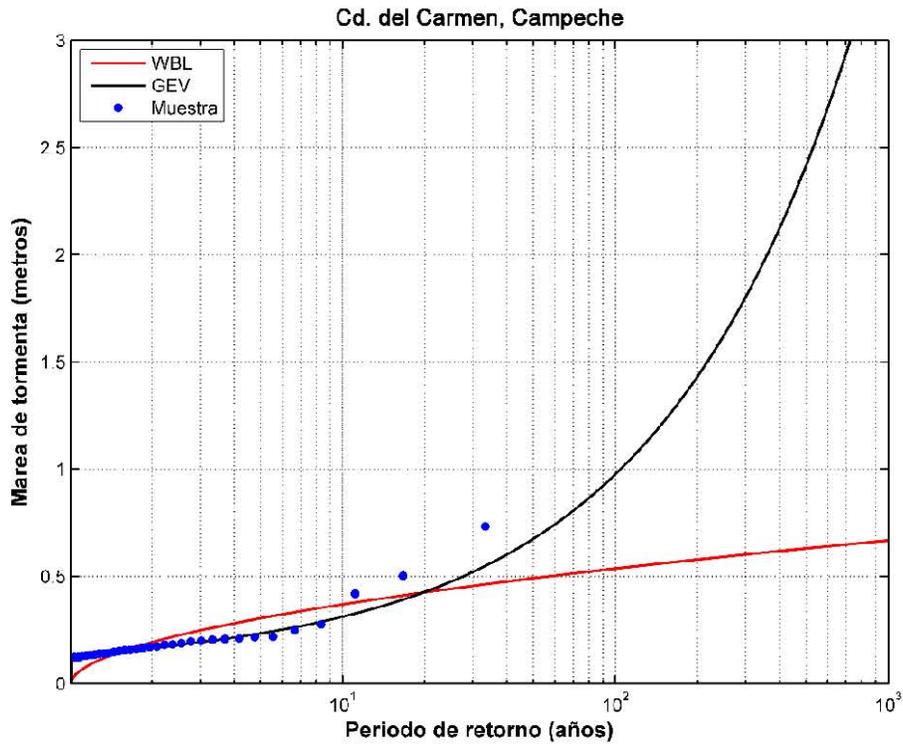


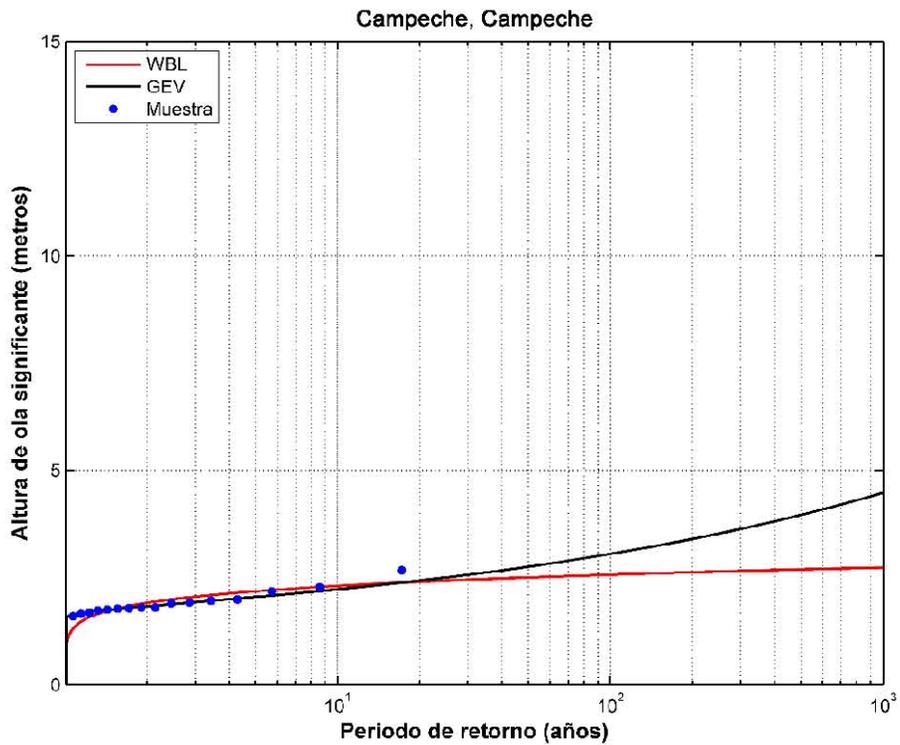
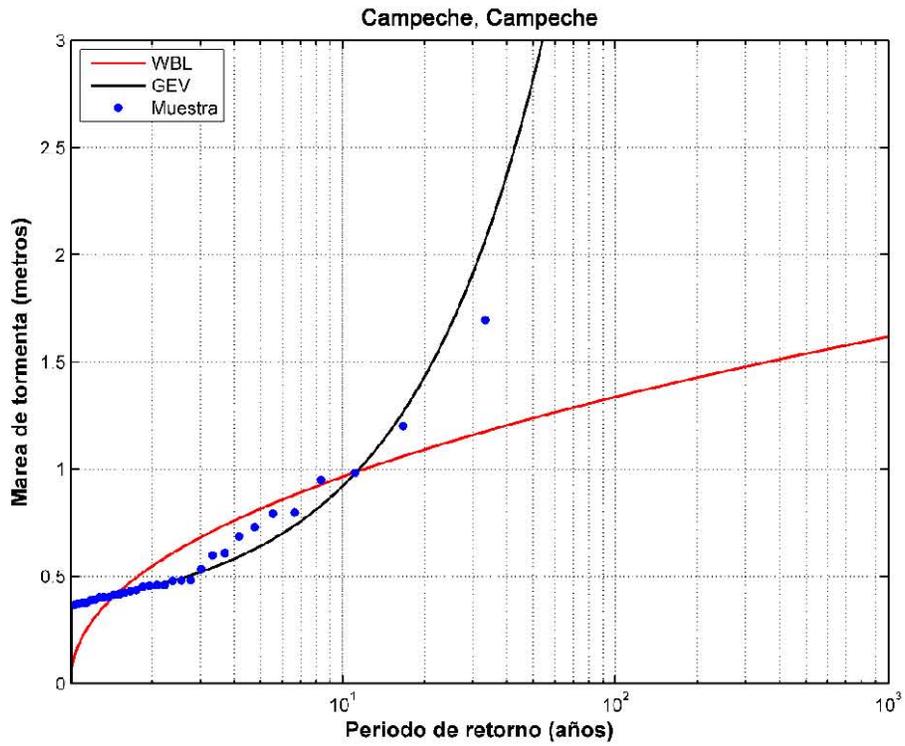


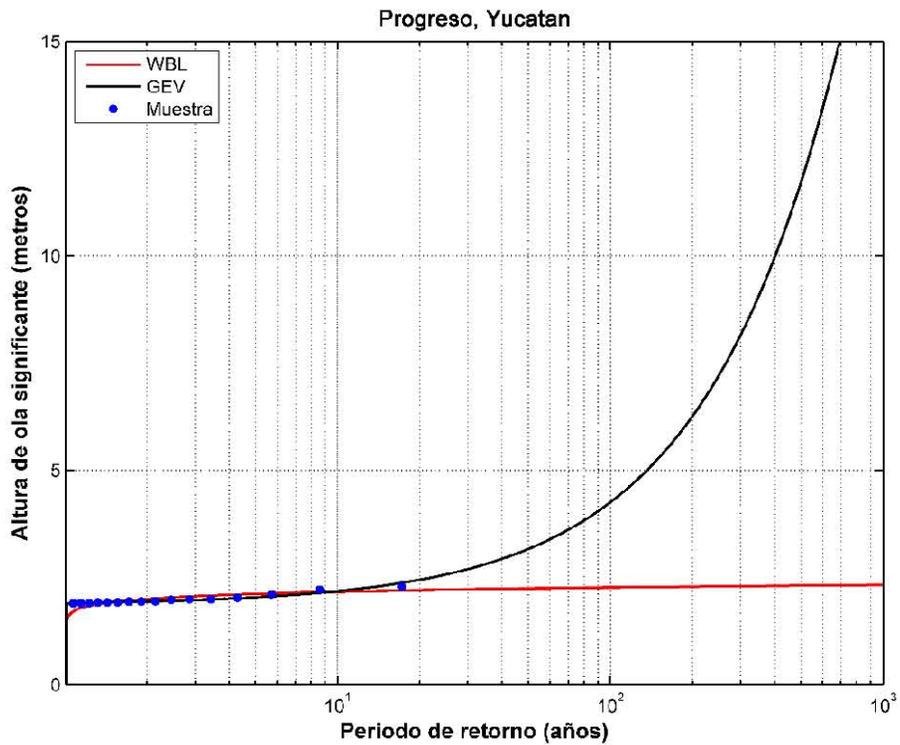
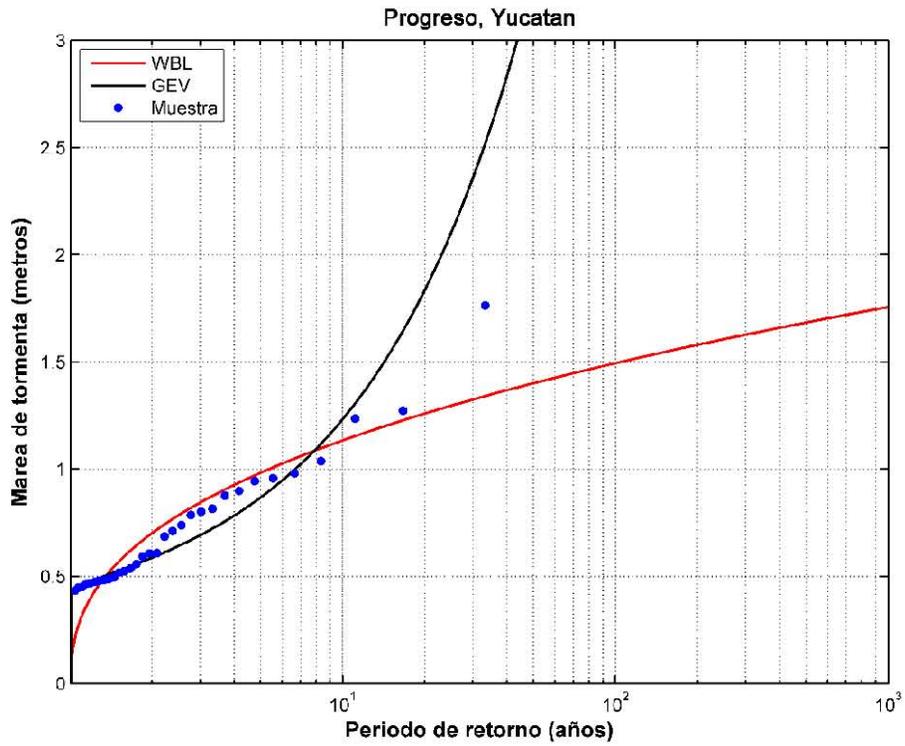


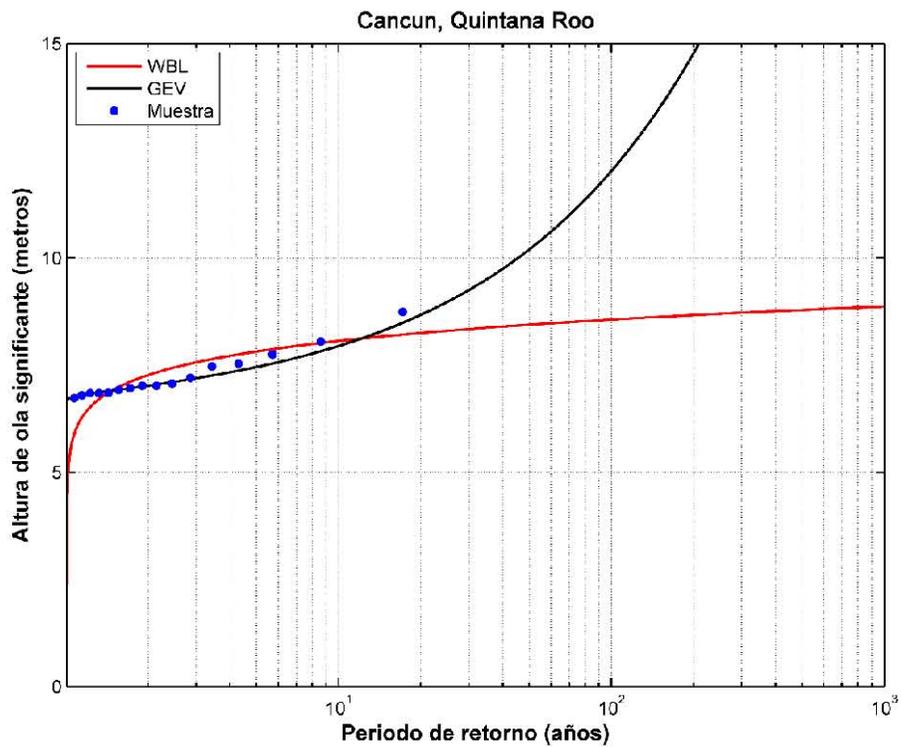
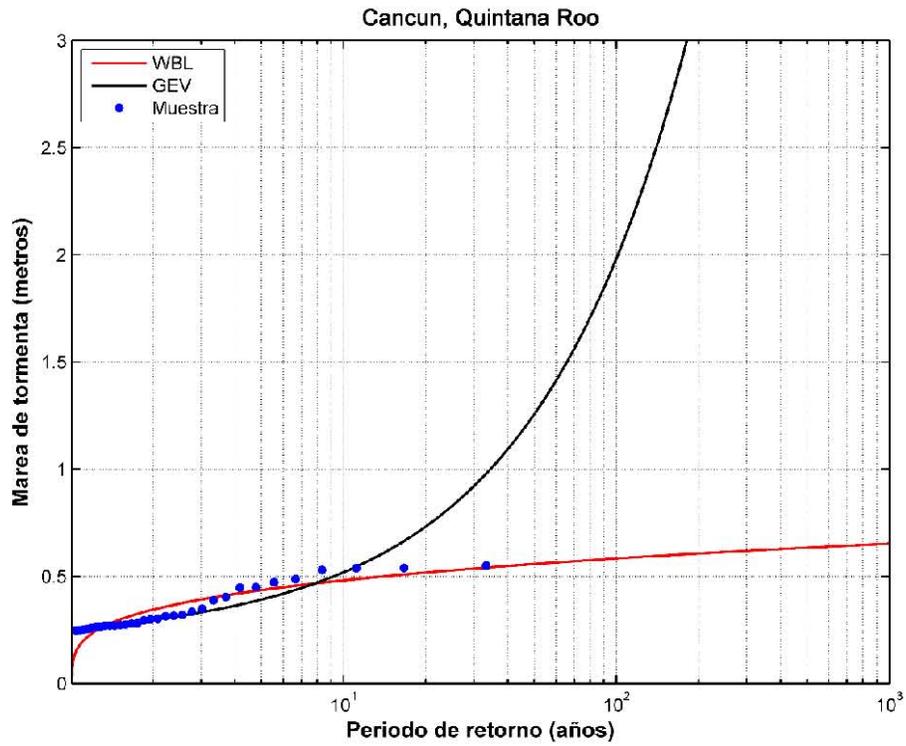
LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos





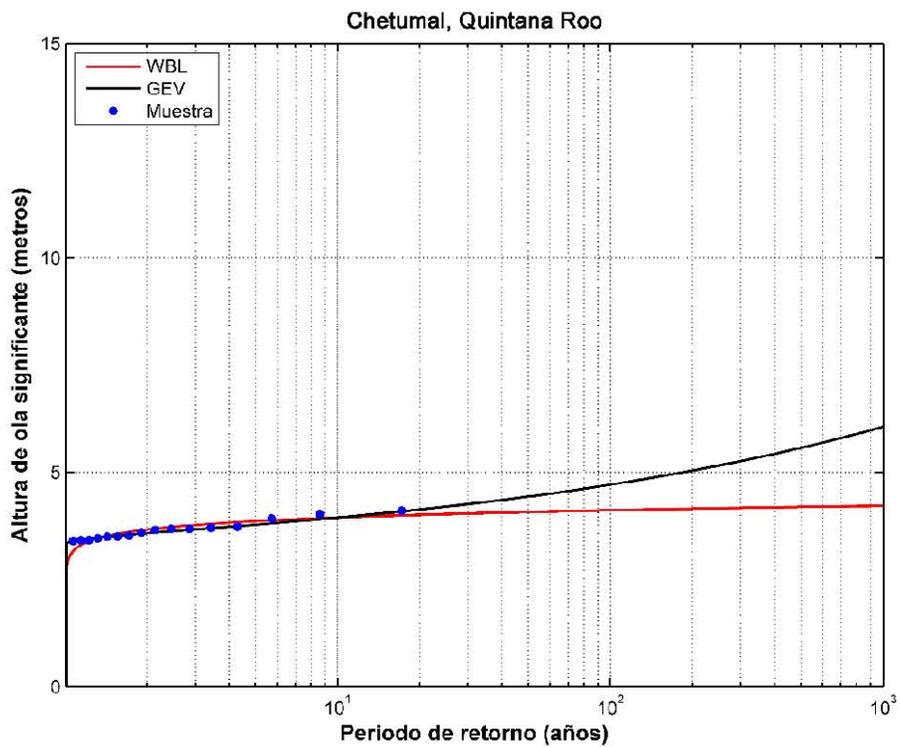
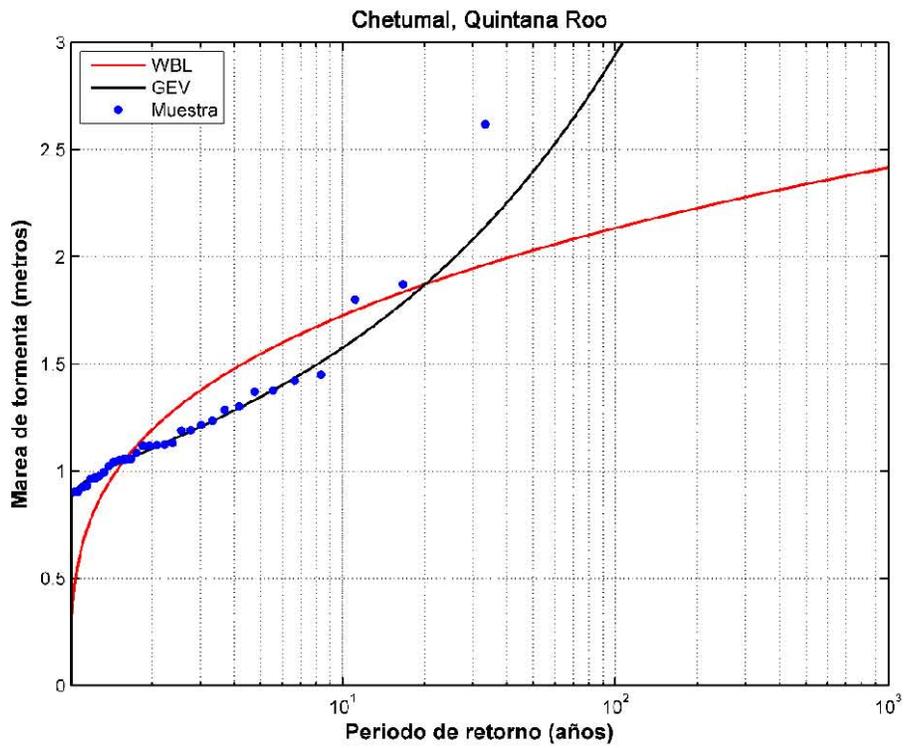




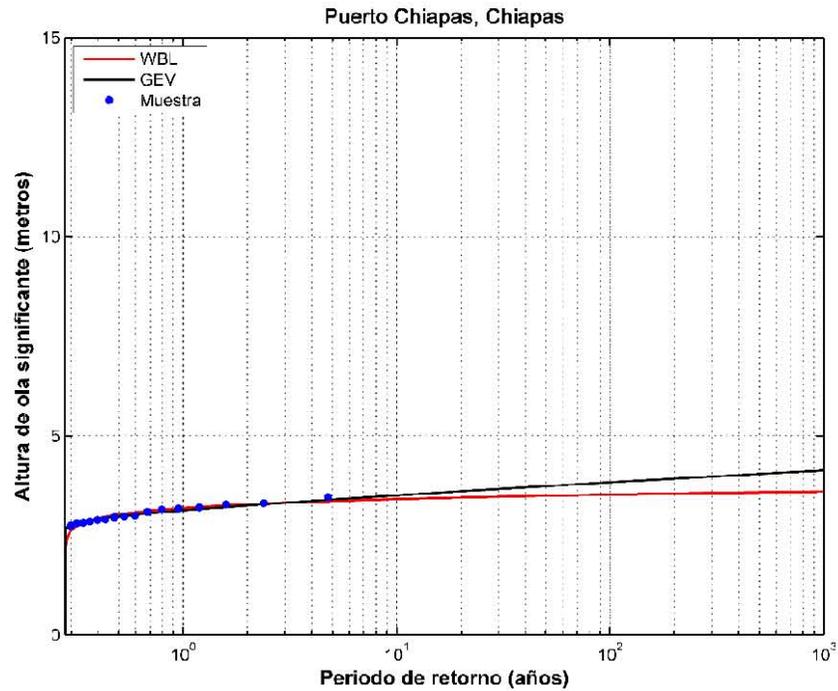
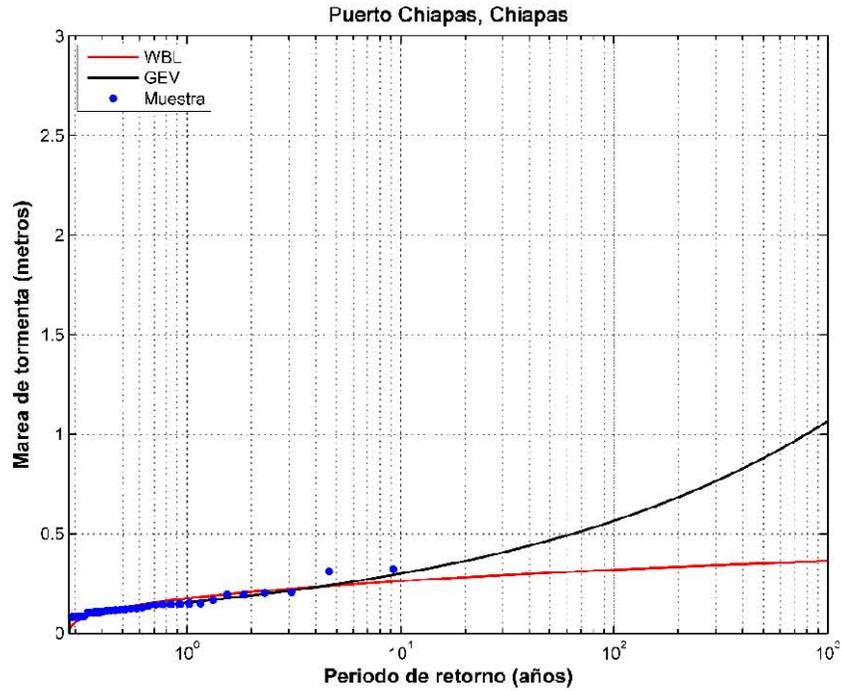


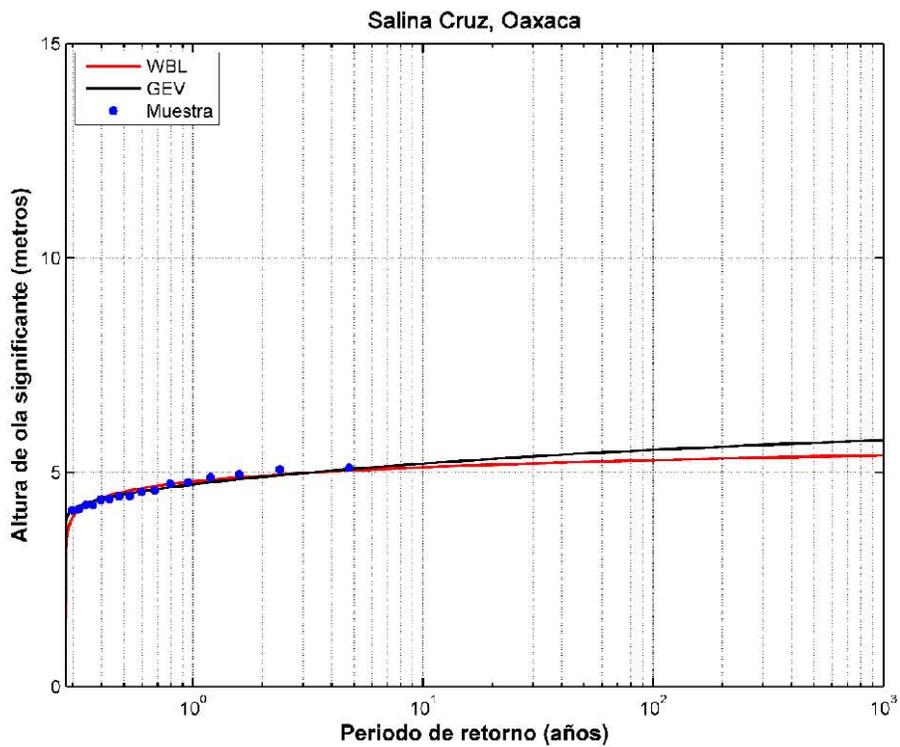
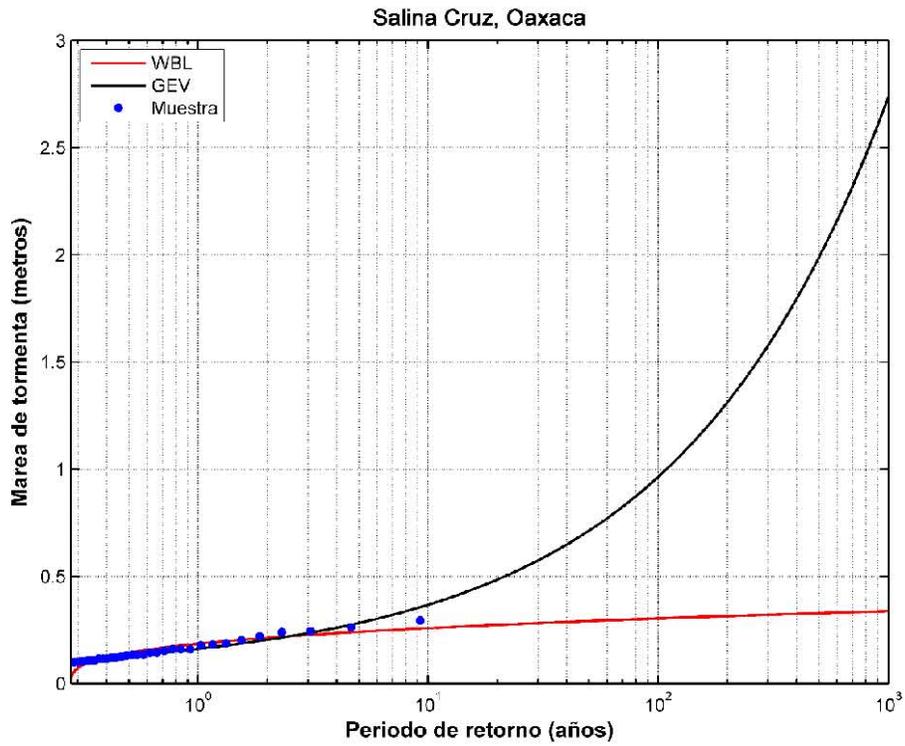
LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

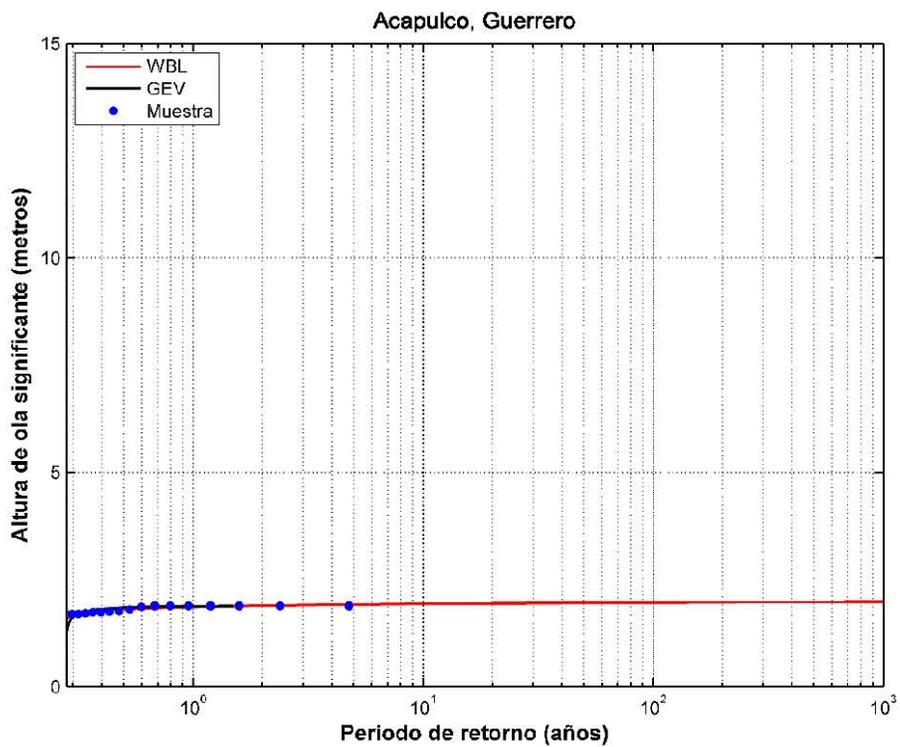
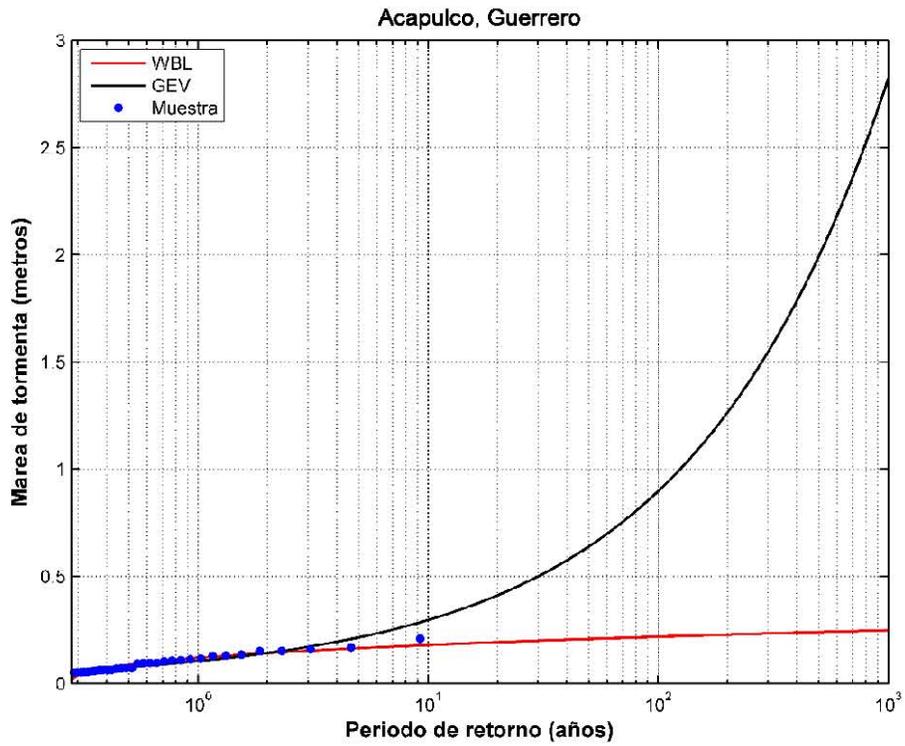
Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos



APENDICE E. Ajustes de la función de distribución en los puertos del Pacífico Mexicano



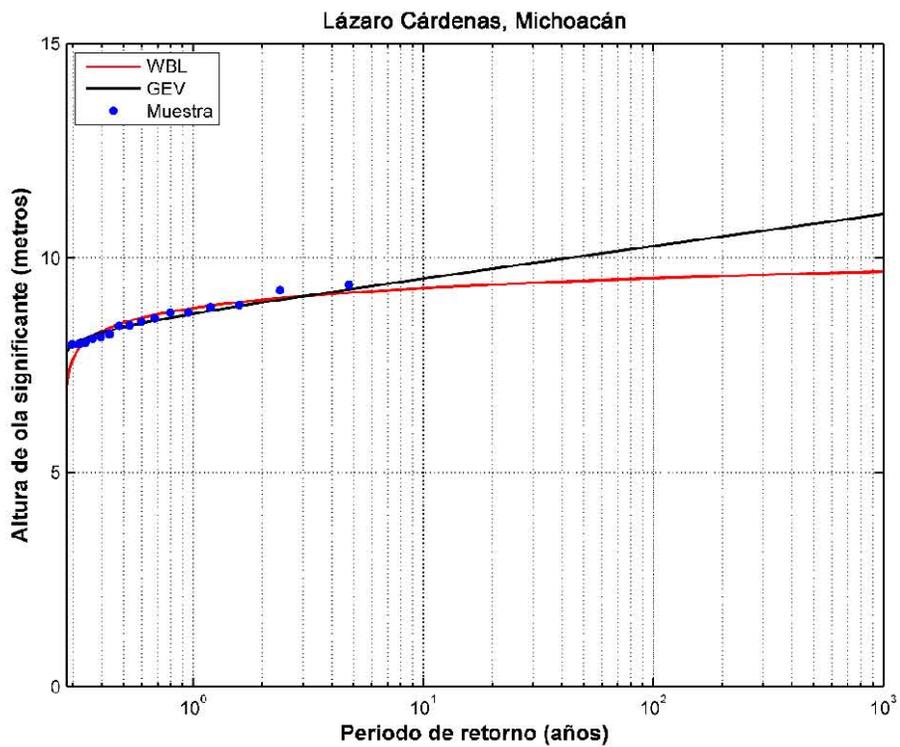
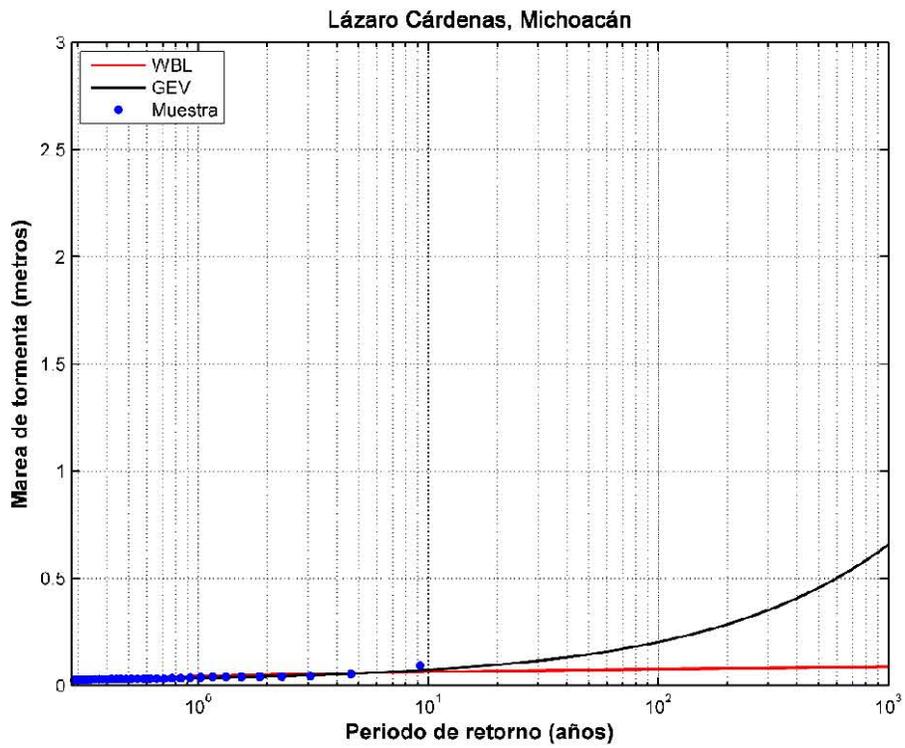






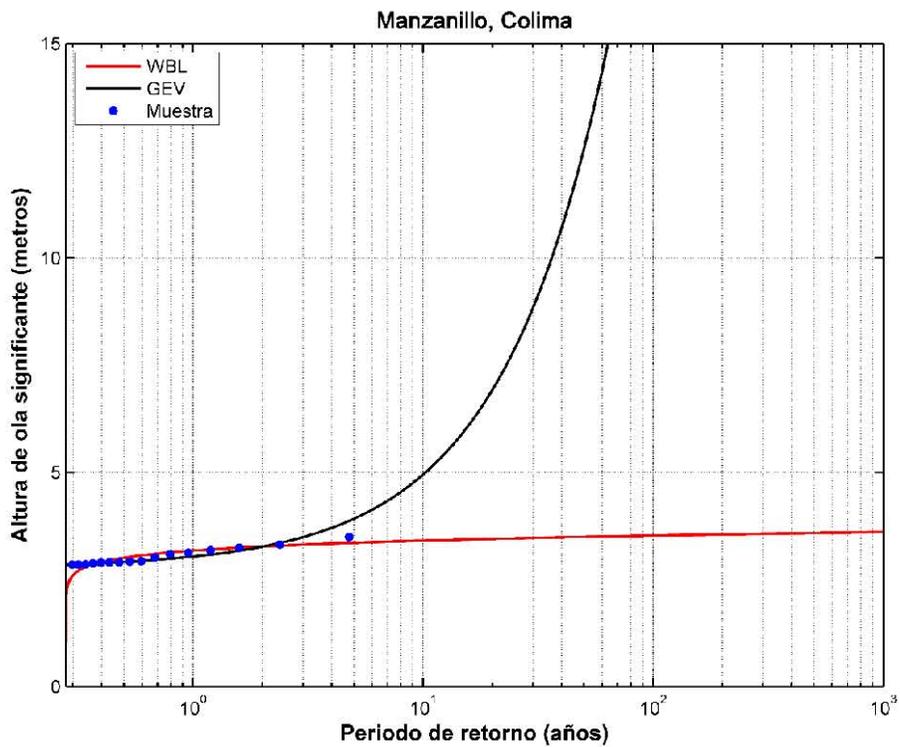
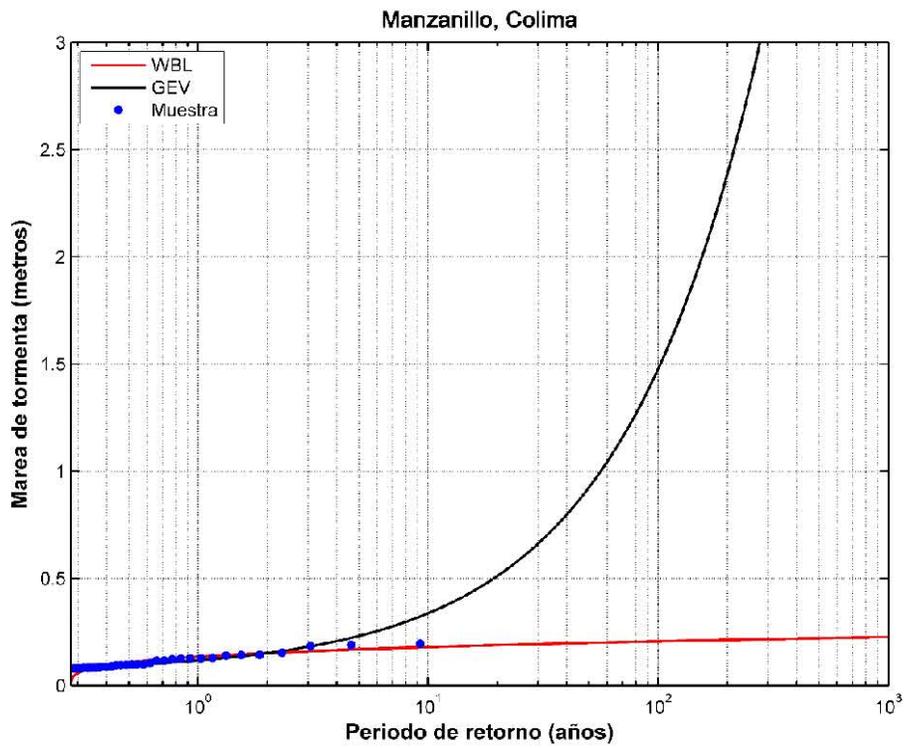
LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos





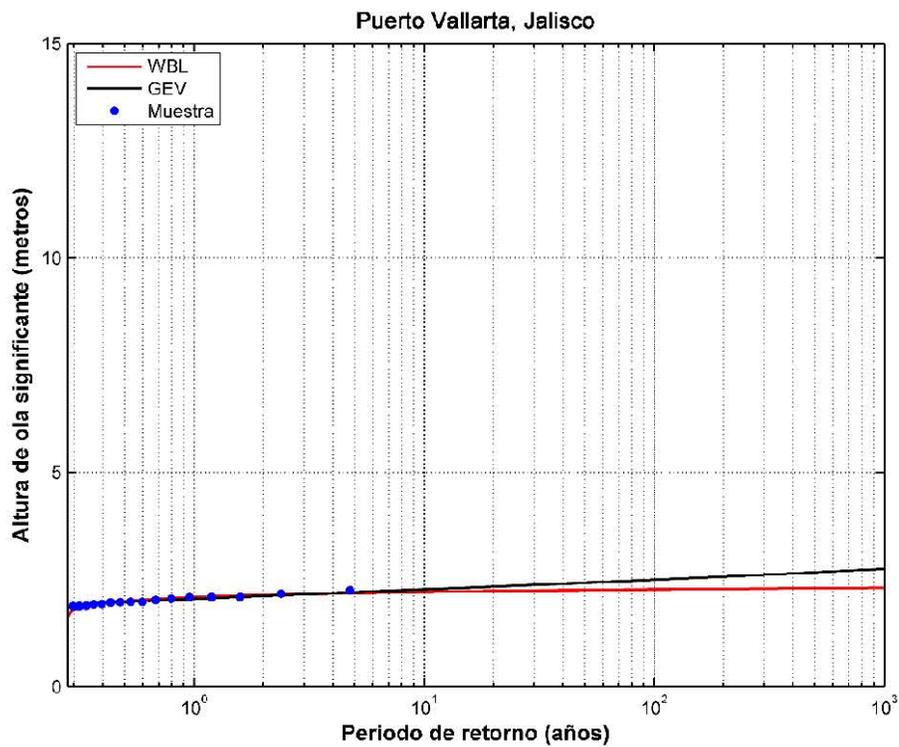
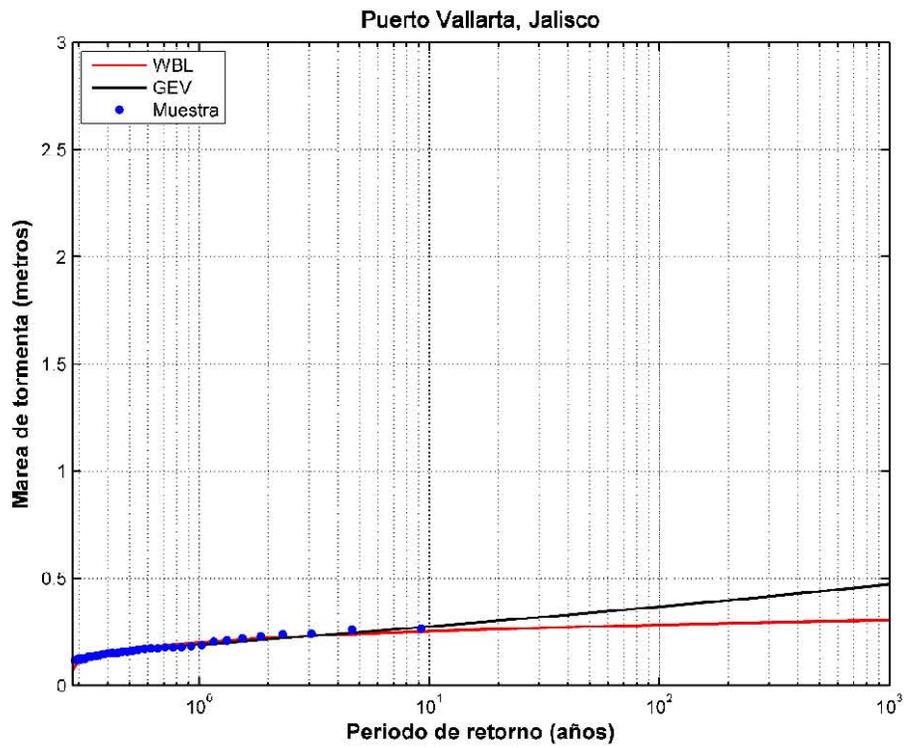
Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos

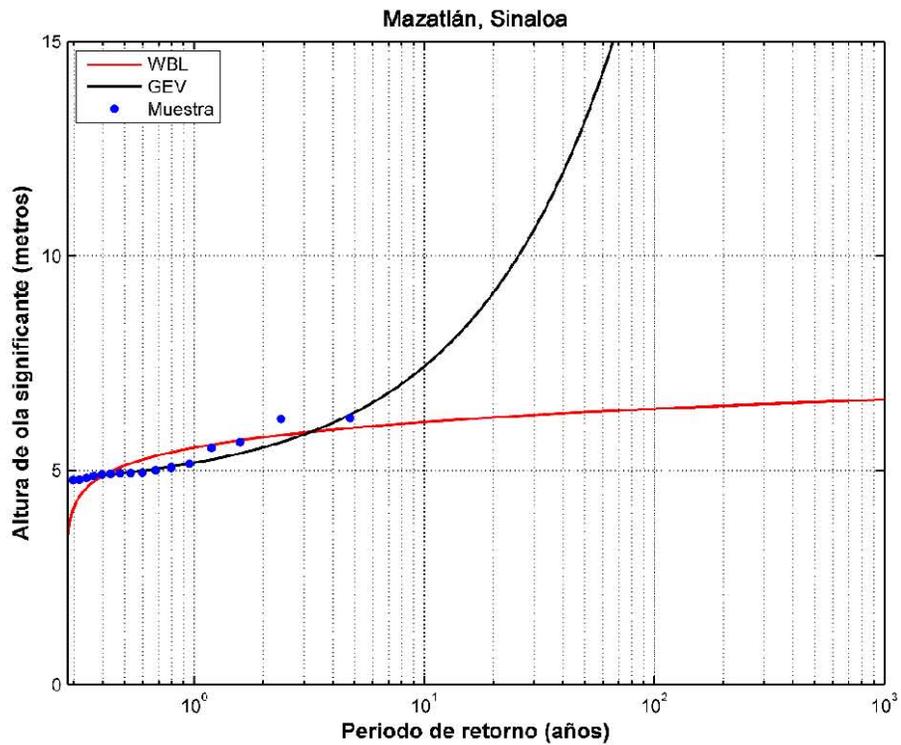
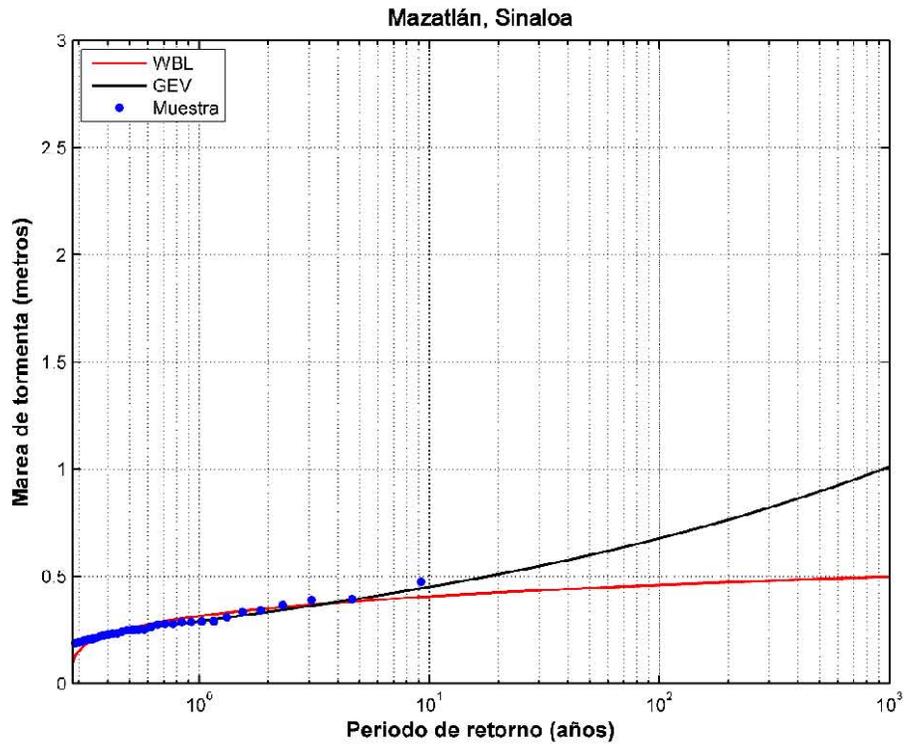


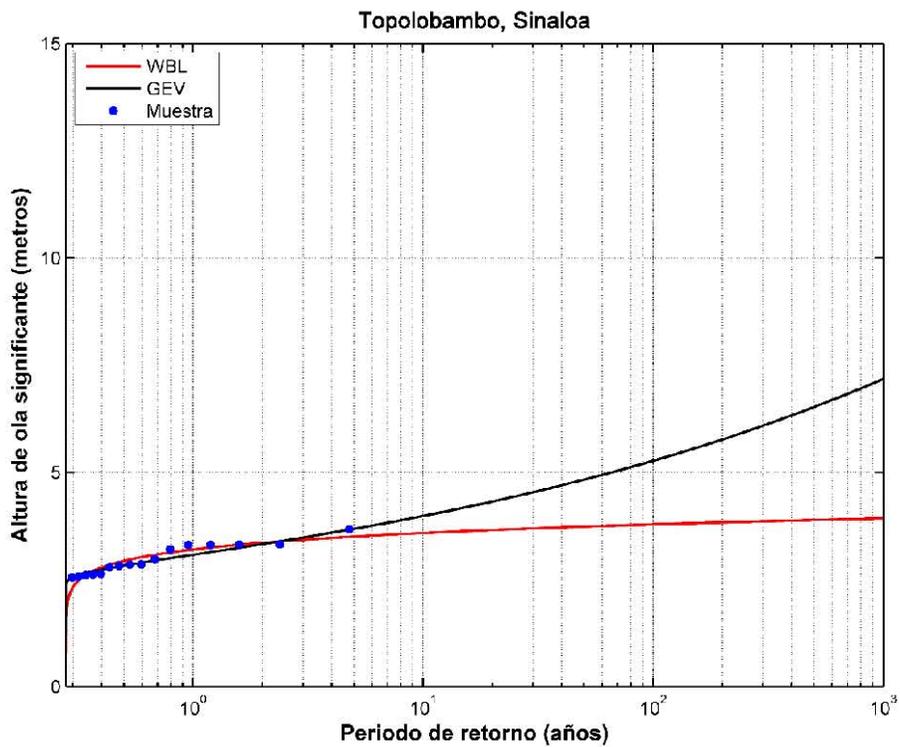
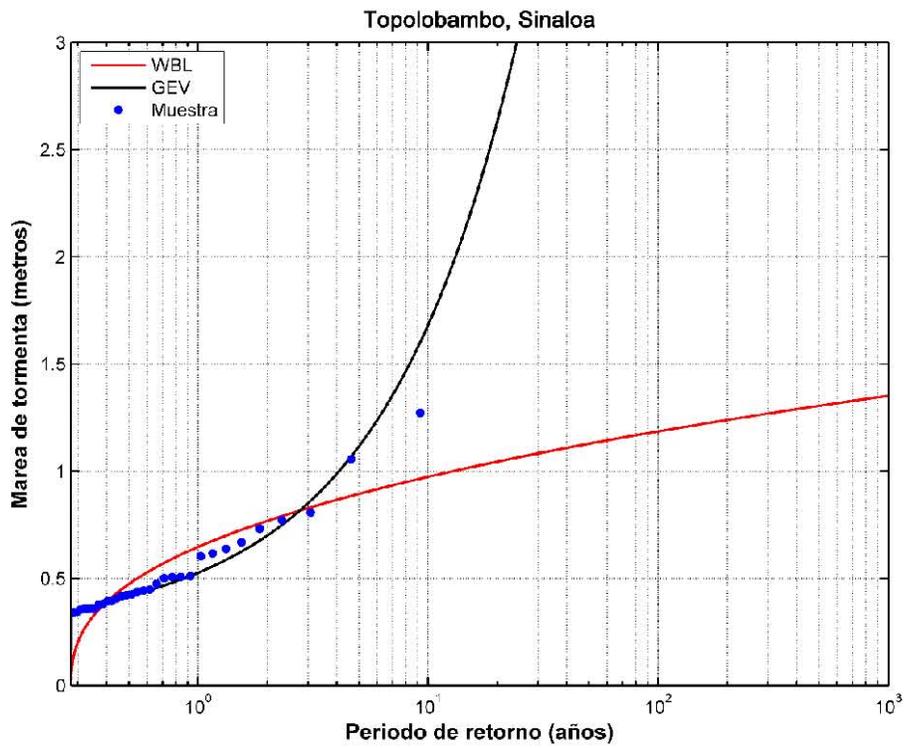


LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos



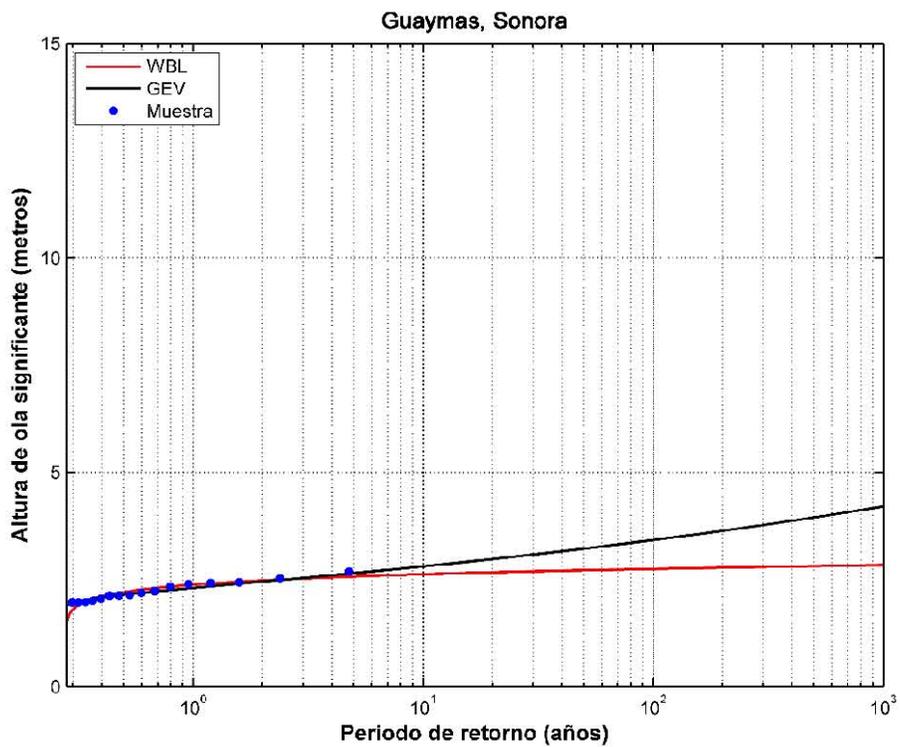
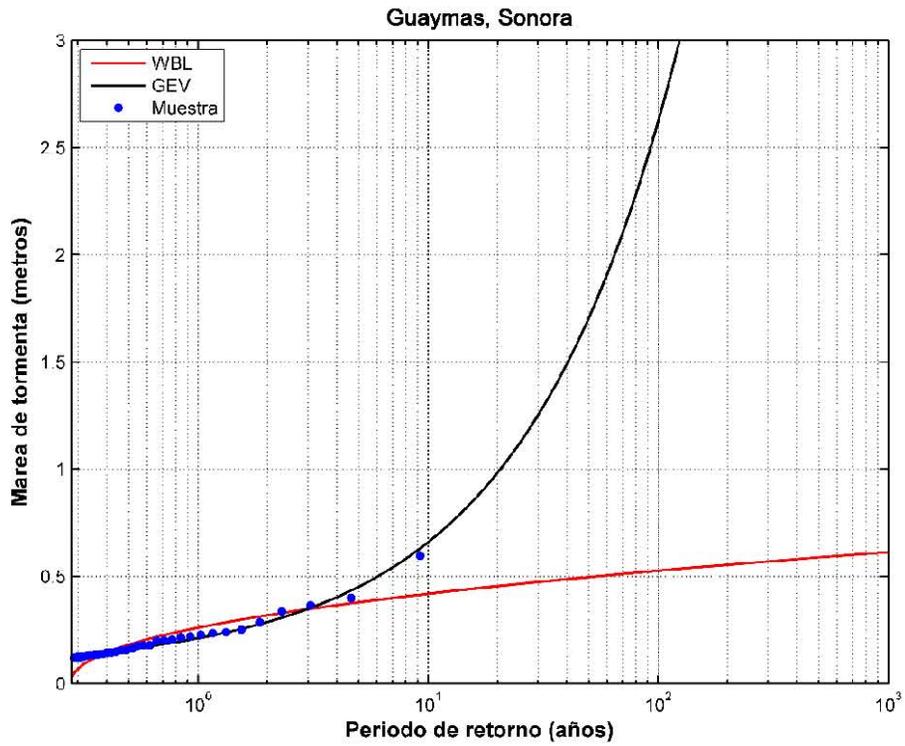


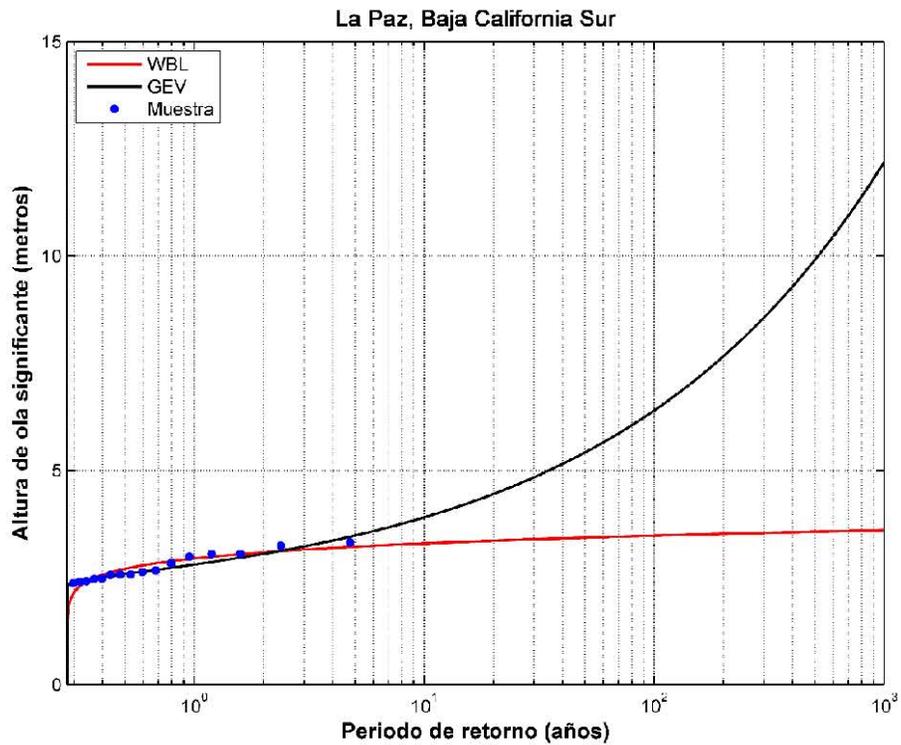
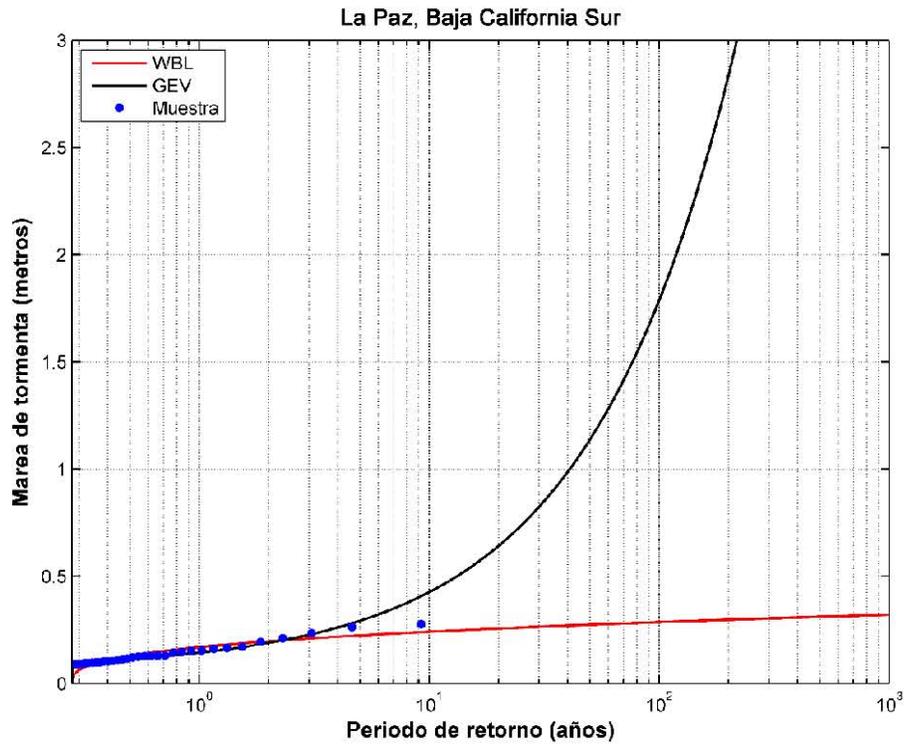




LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos

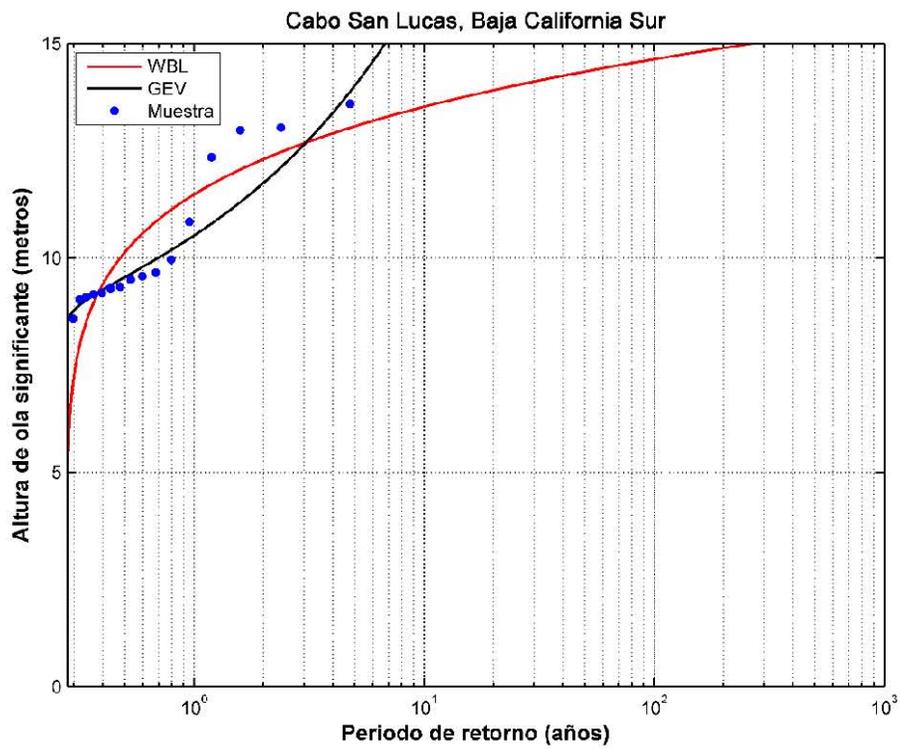
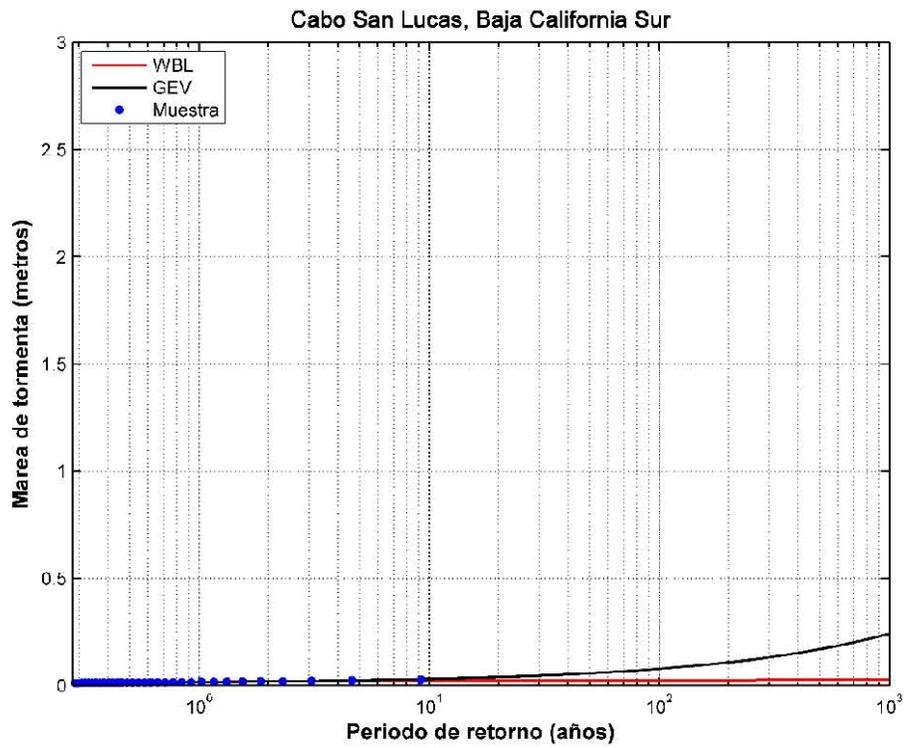






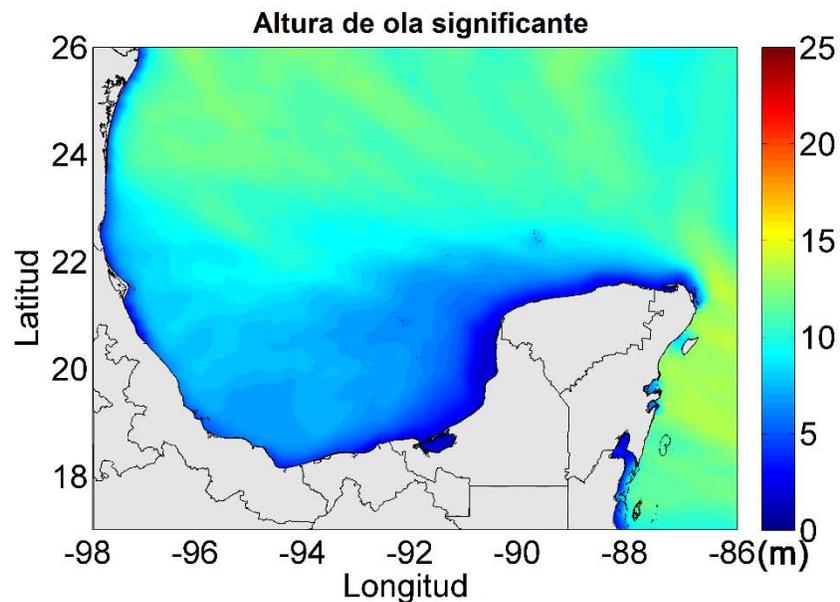
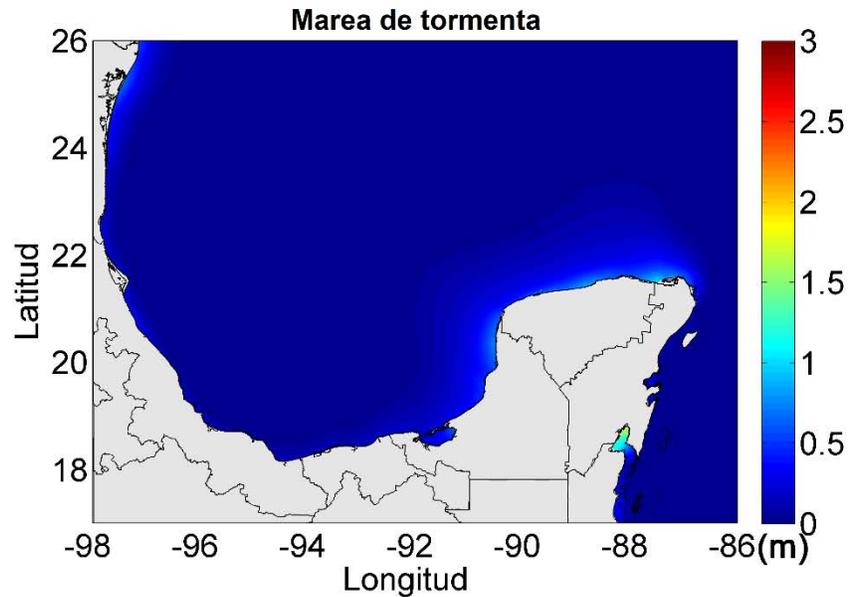
LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

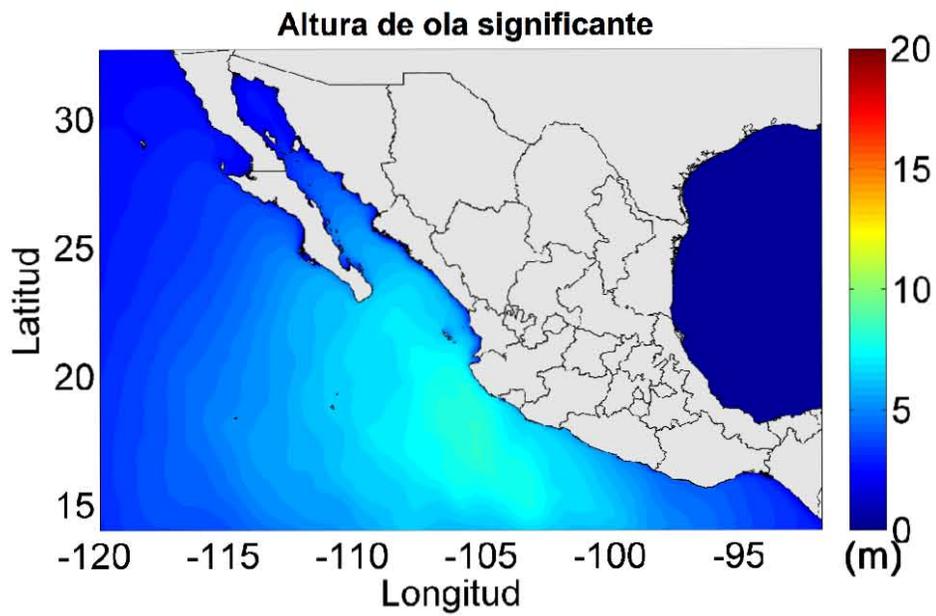
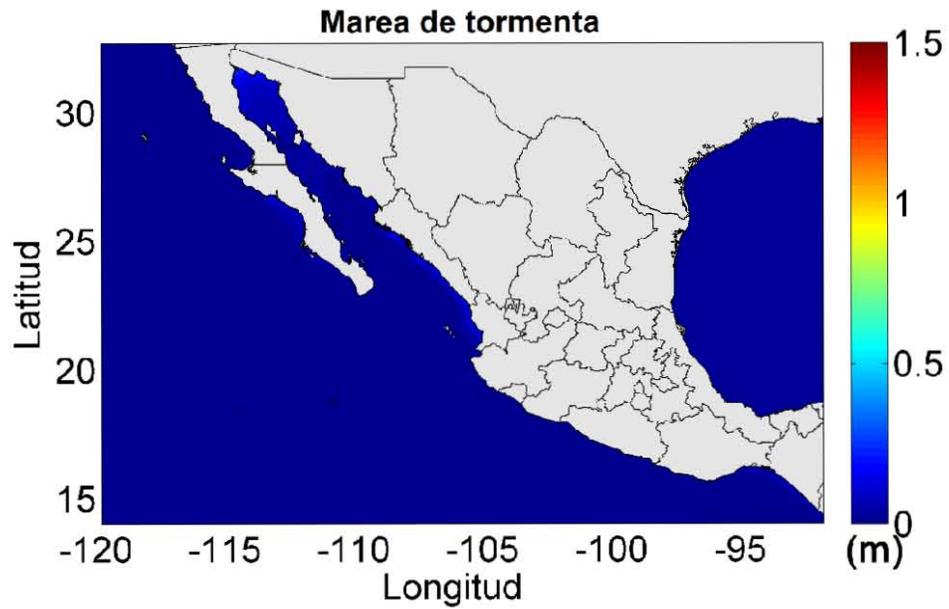
Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos



APENDICE F. Mapas de diferentes periodos de retorno a 2, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 100, 250, 500 y 1,000 años en los mares mexicanos.

Periodo de retorno a 2 años





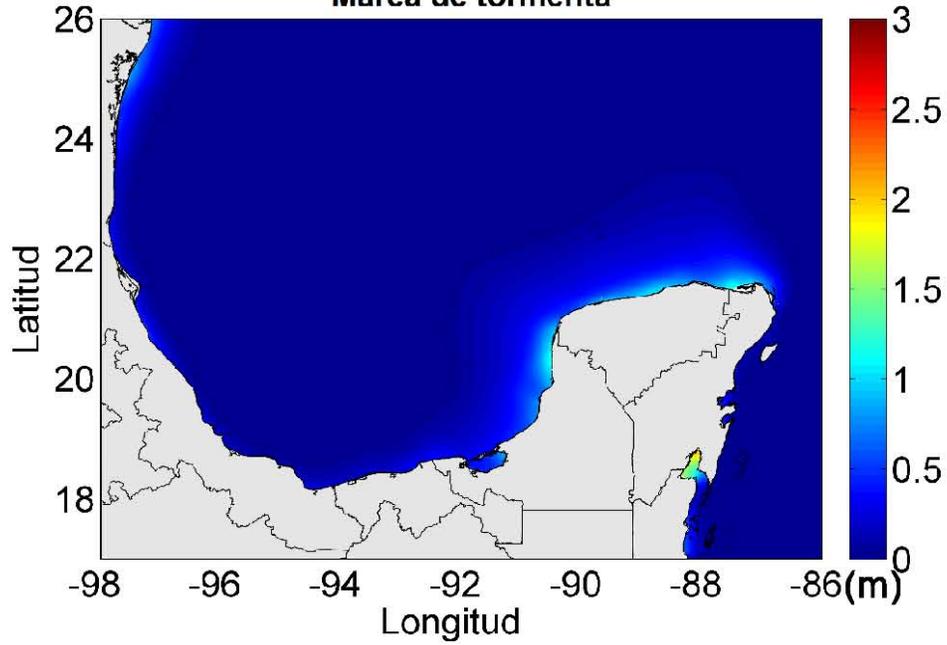


LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

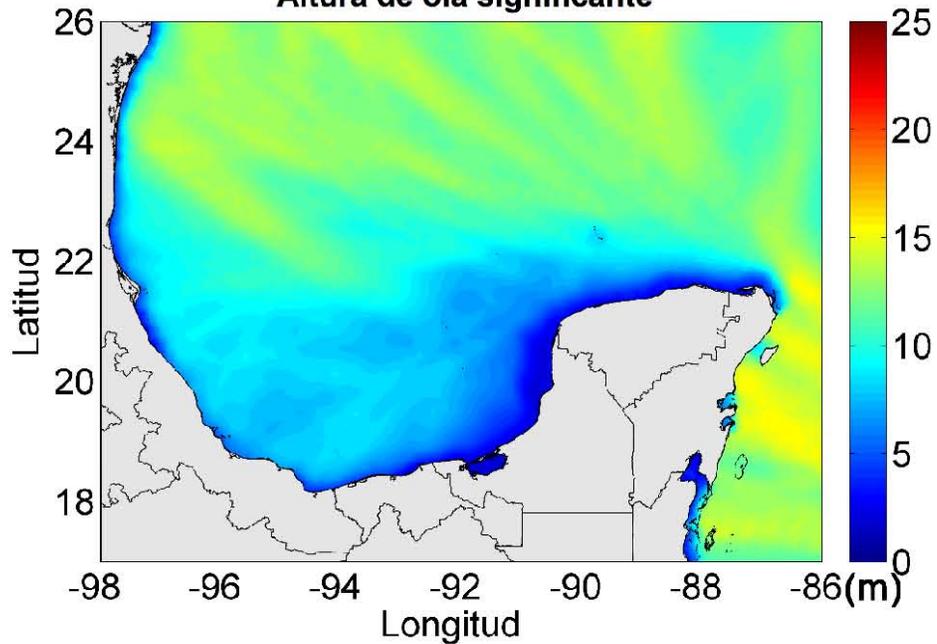
Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos

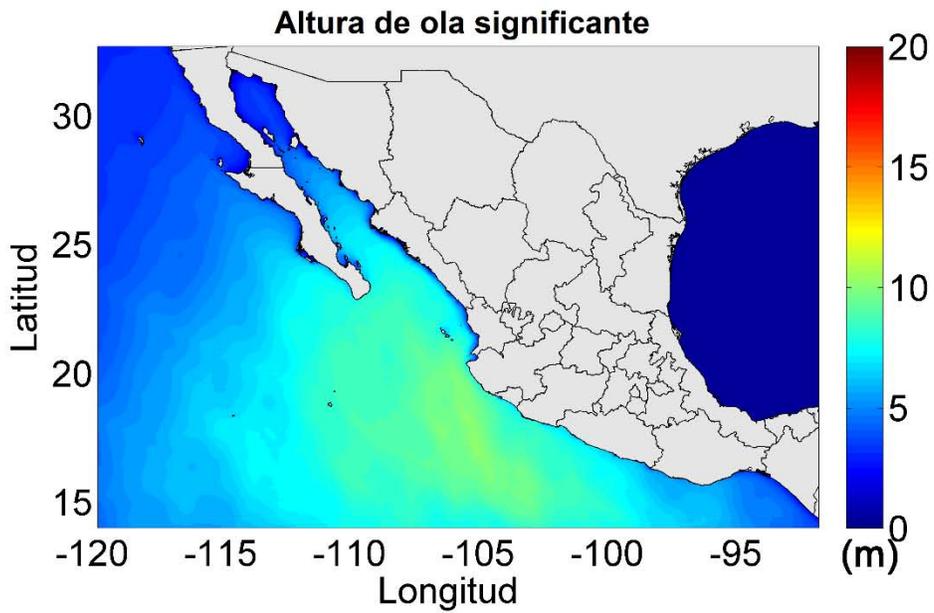
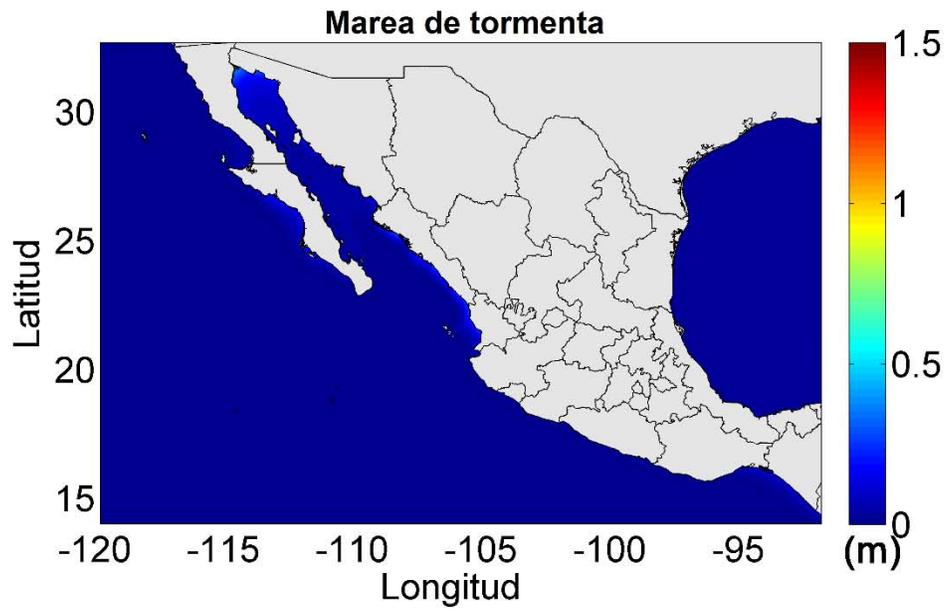
Periodo de retorno a 5 años

Marea de tormenta



Altura de ola significante





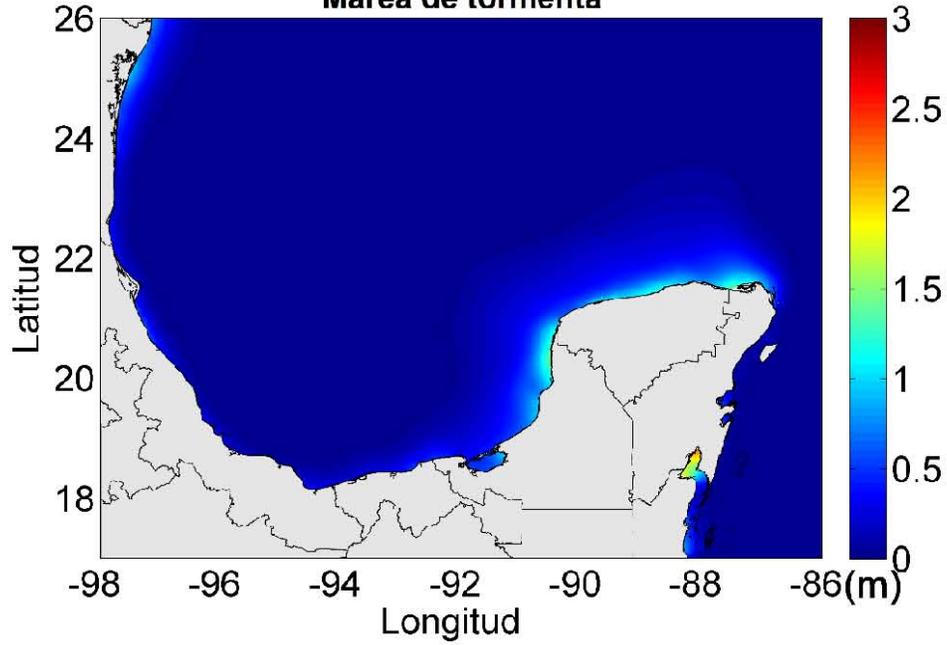


LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

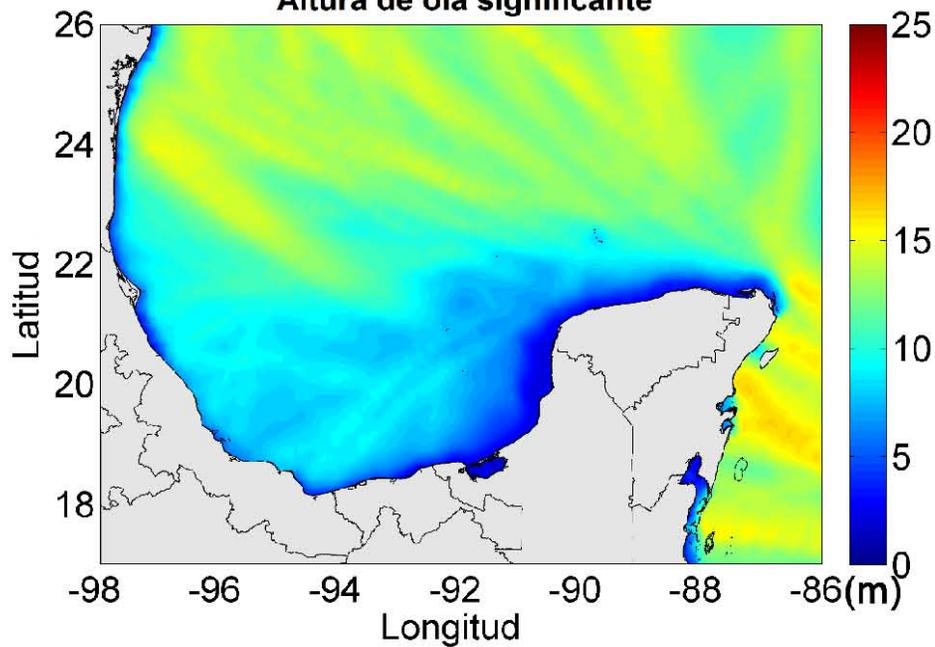
Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos

Periodo de retorno a 10 años

Marea de tormenta



Altura de ola significante

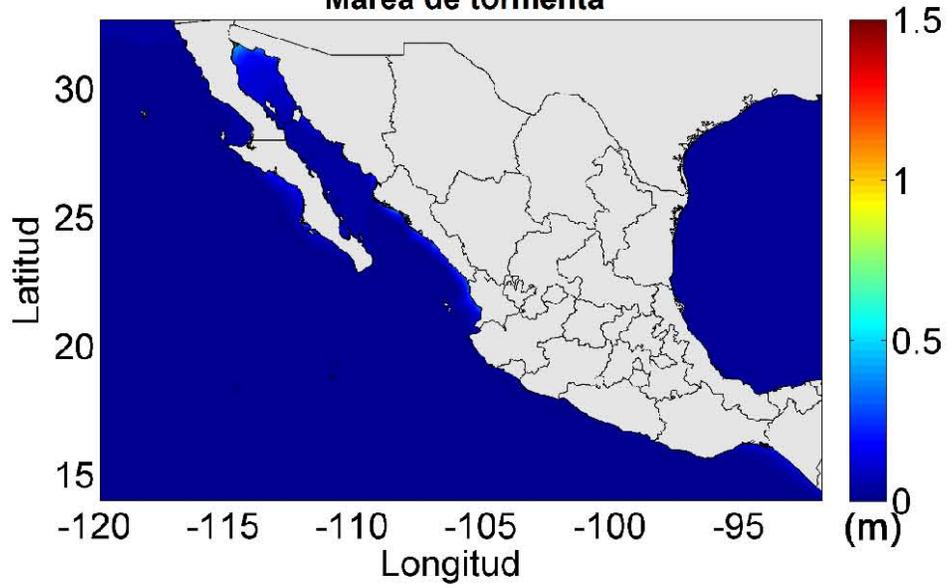




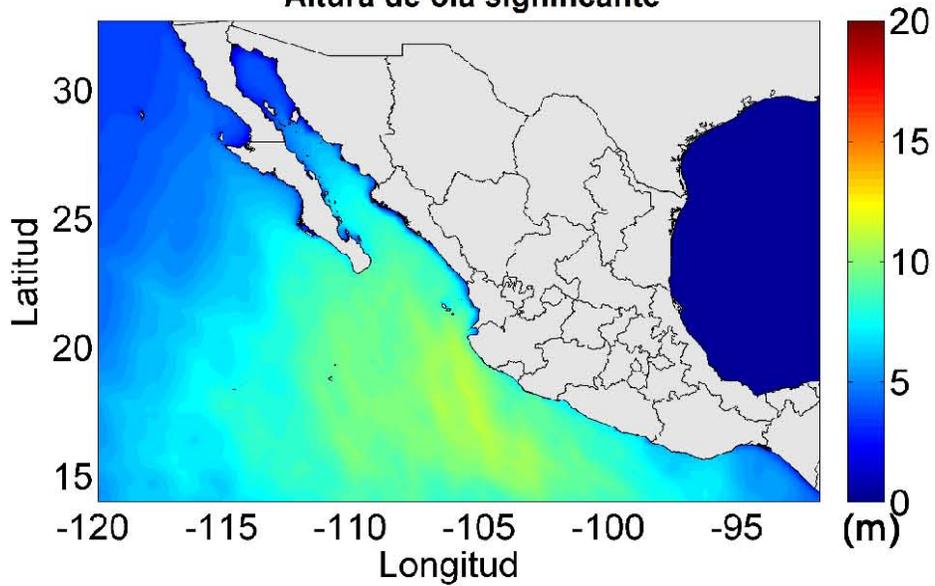
LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos

Marea de tormenta



Altura de ola significativa



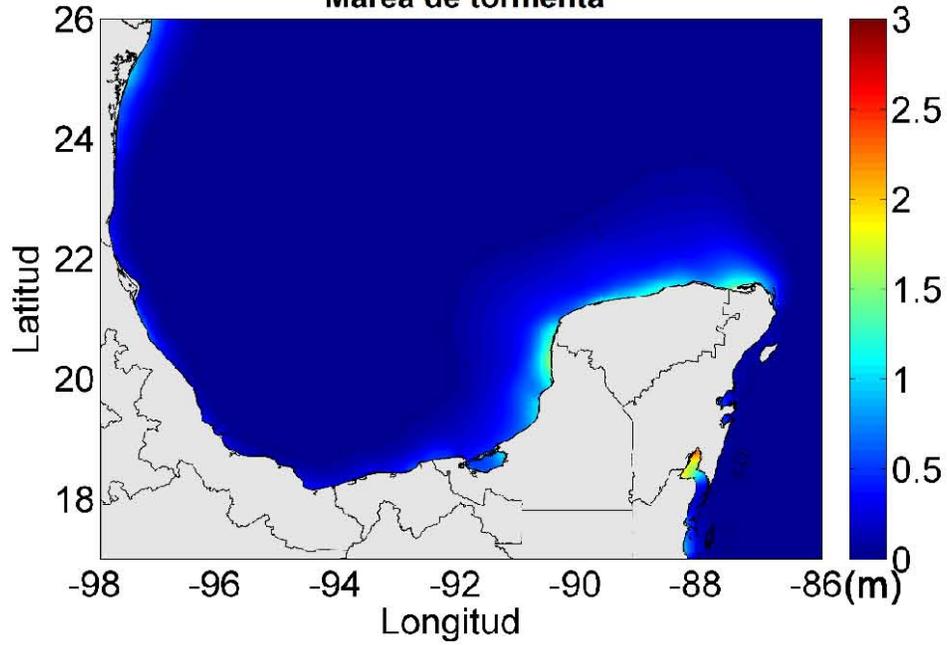


LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

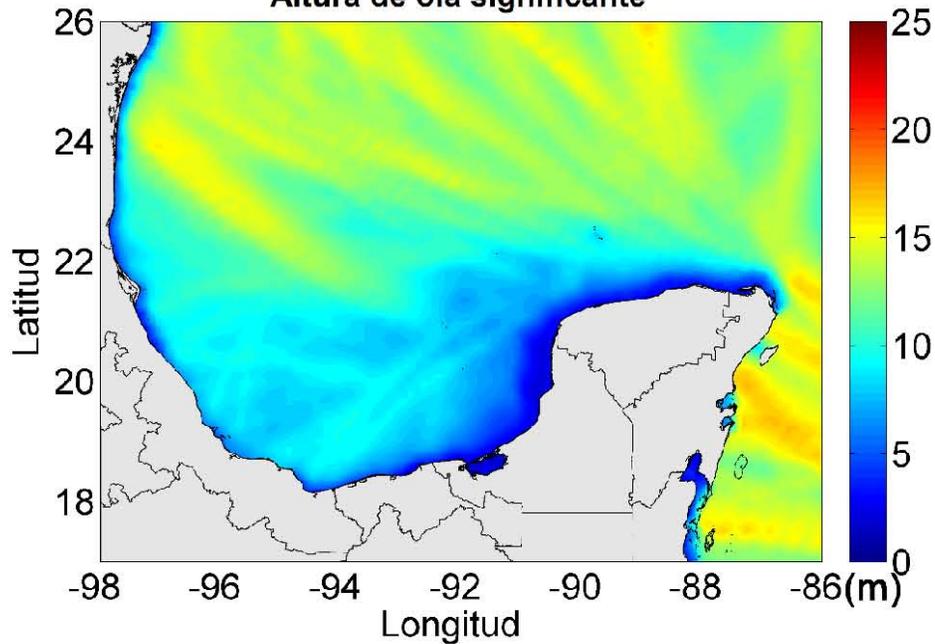
Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos

Periodo de retorno a 15 años

Marea de tormenta



Altura de ola significante

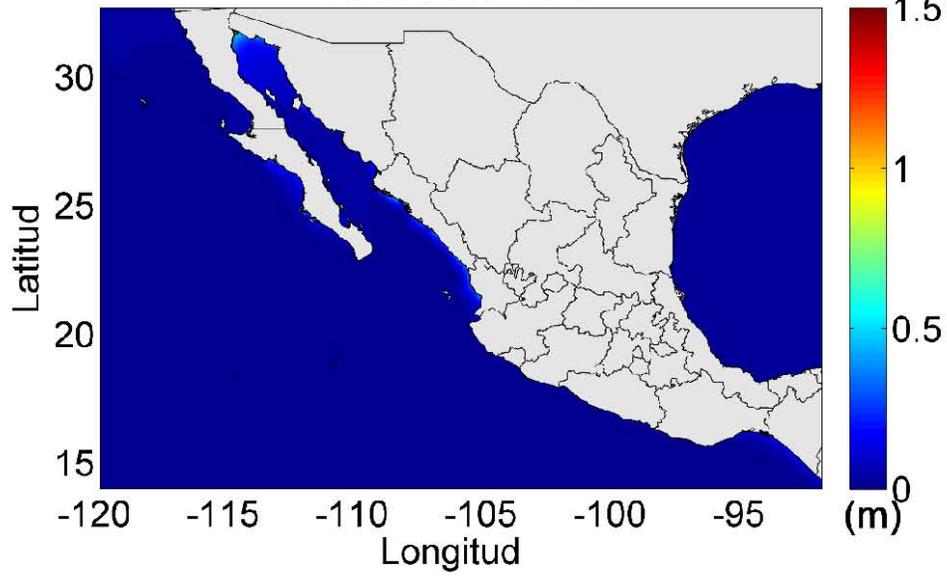




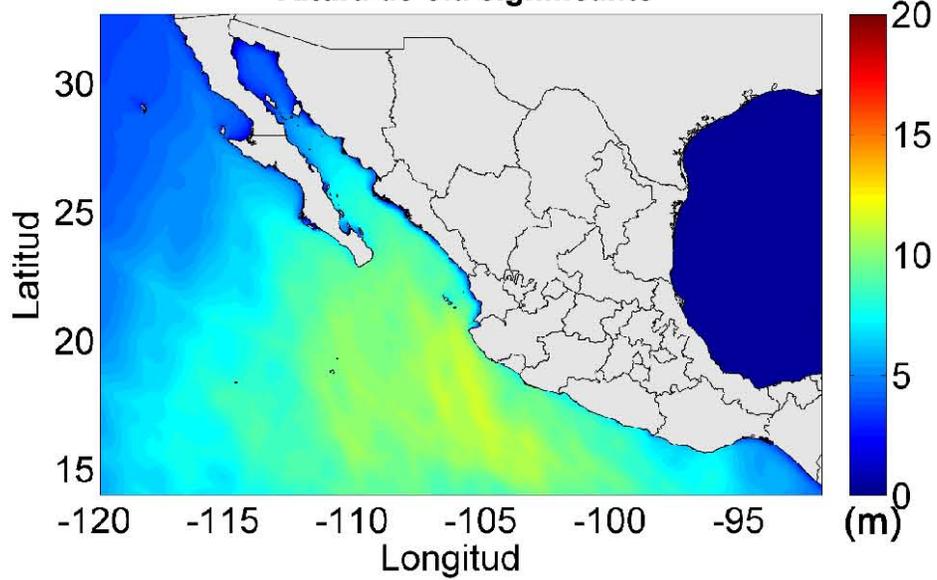
LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos

Marea de tormenta



Altura de ola significante

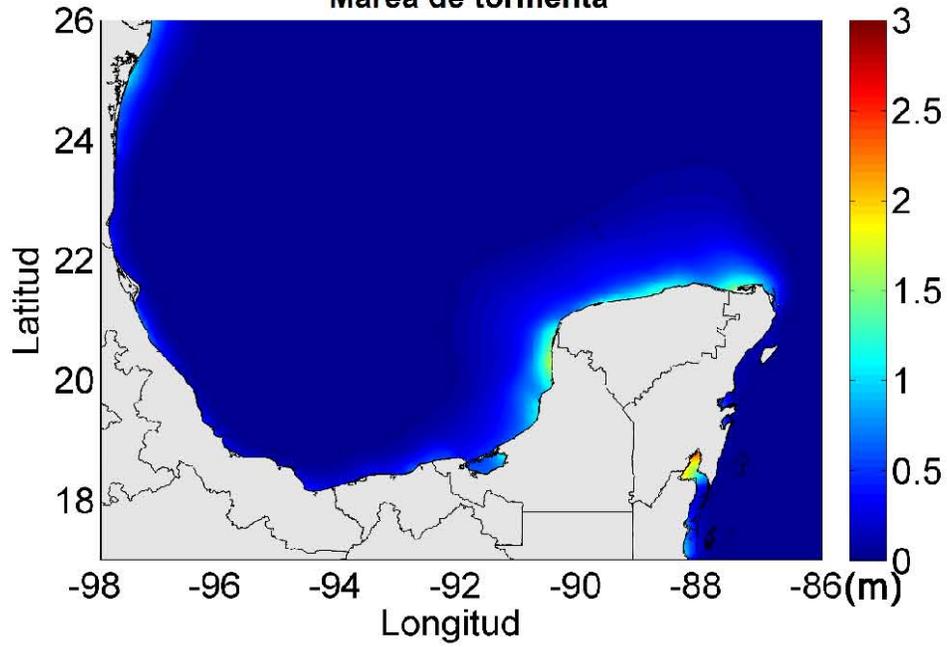




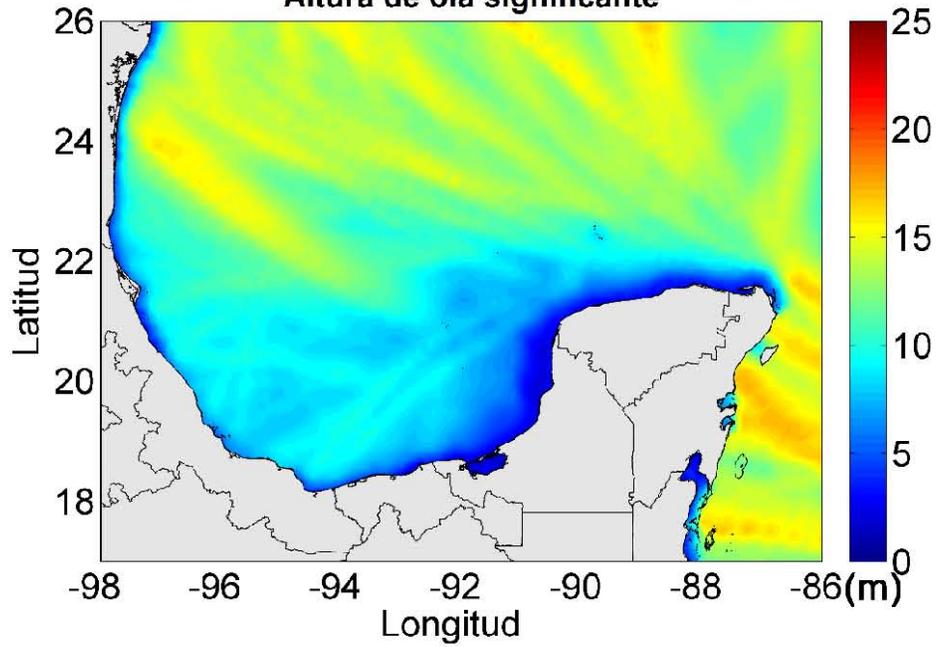
LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

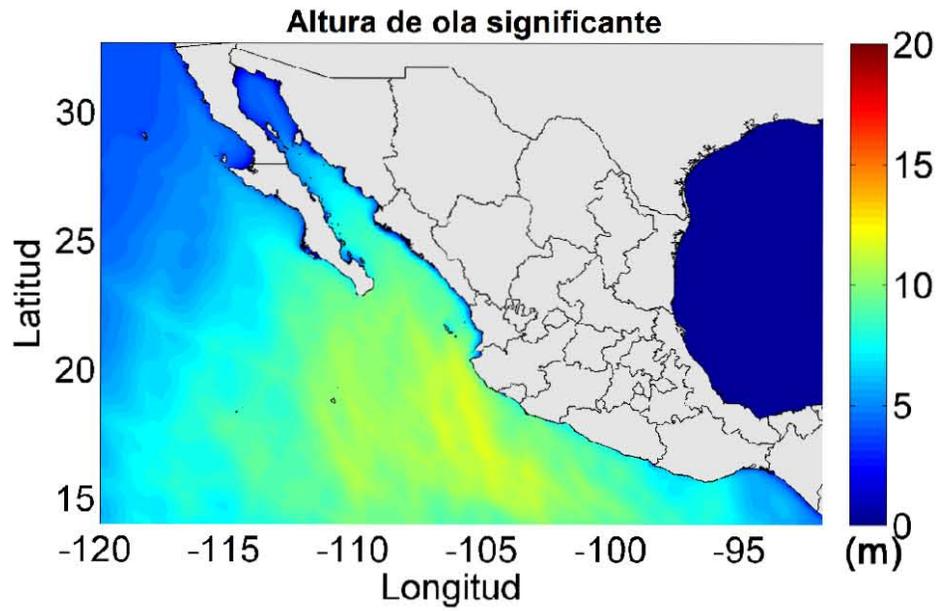
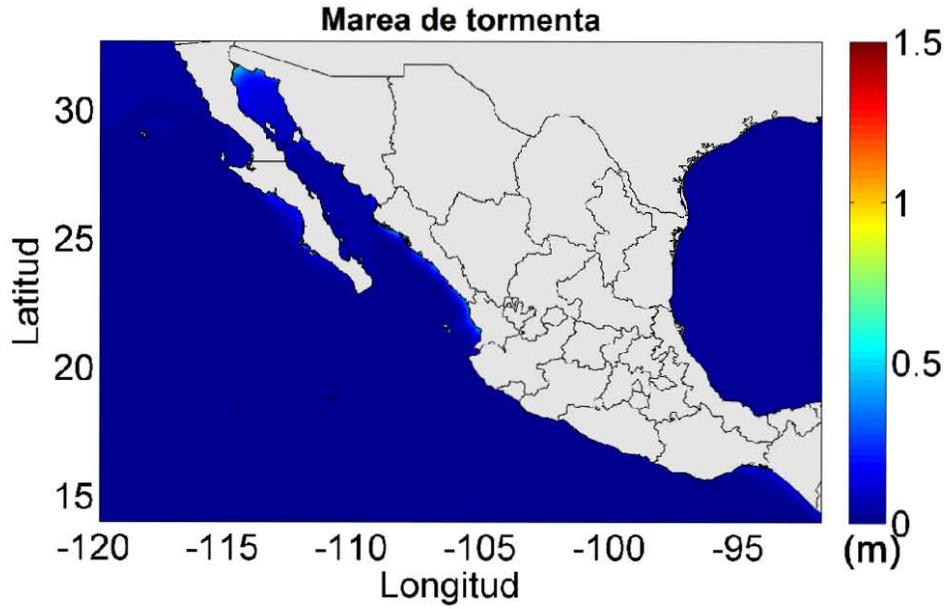
Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos

Periodo de retorno a 20 años Marea de tormenta



Altura de ola significativa

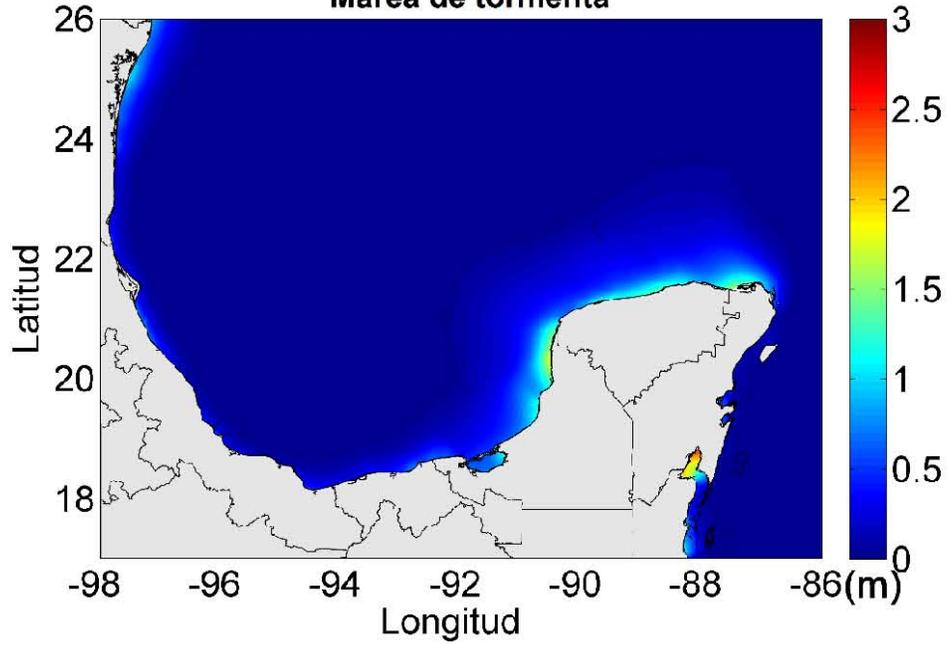




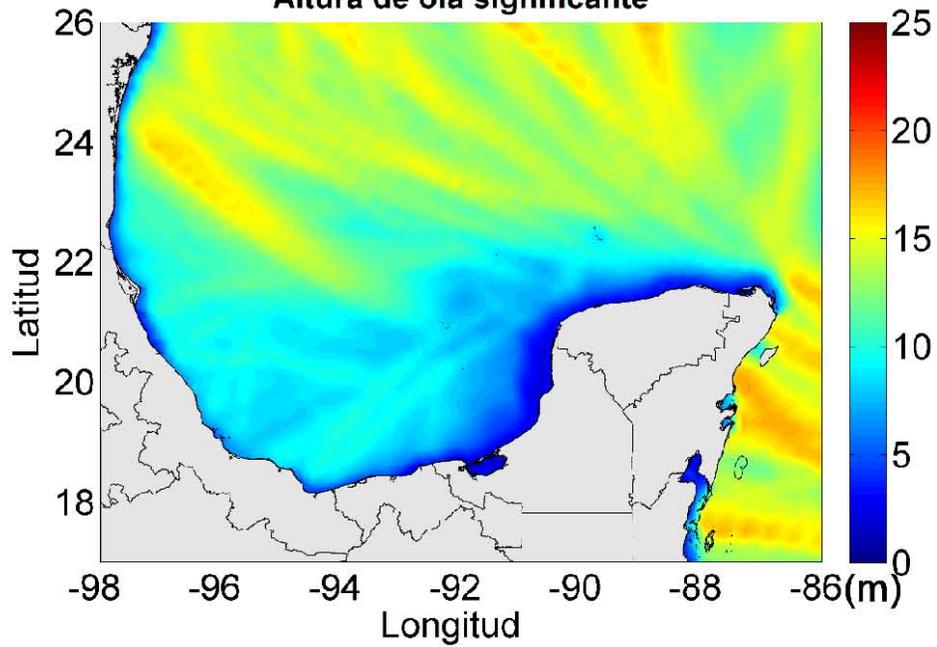


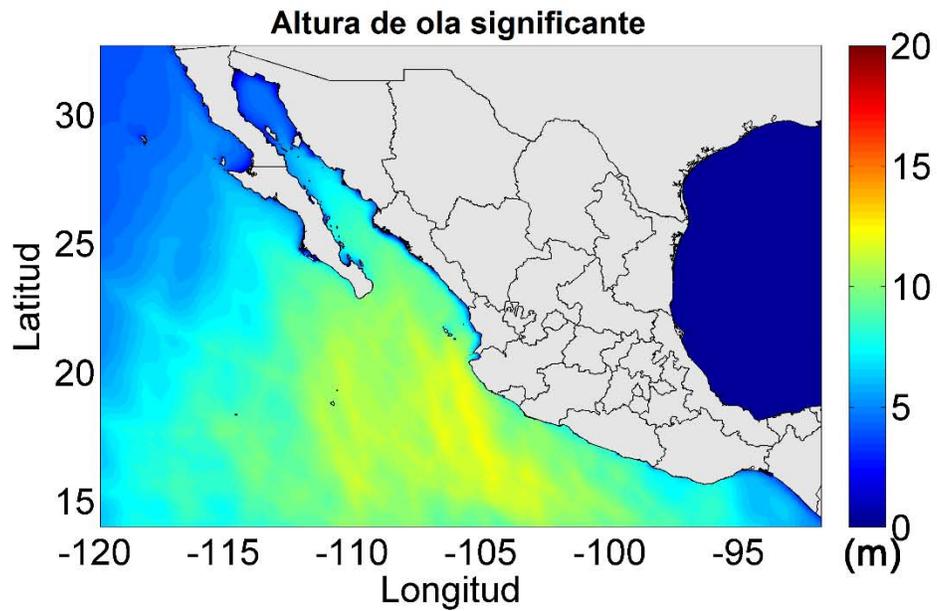
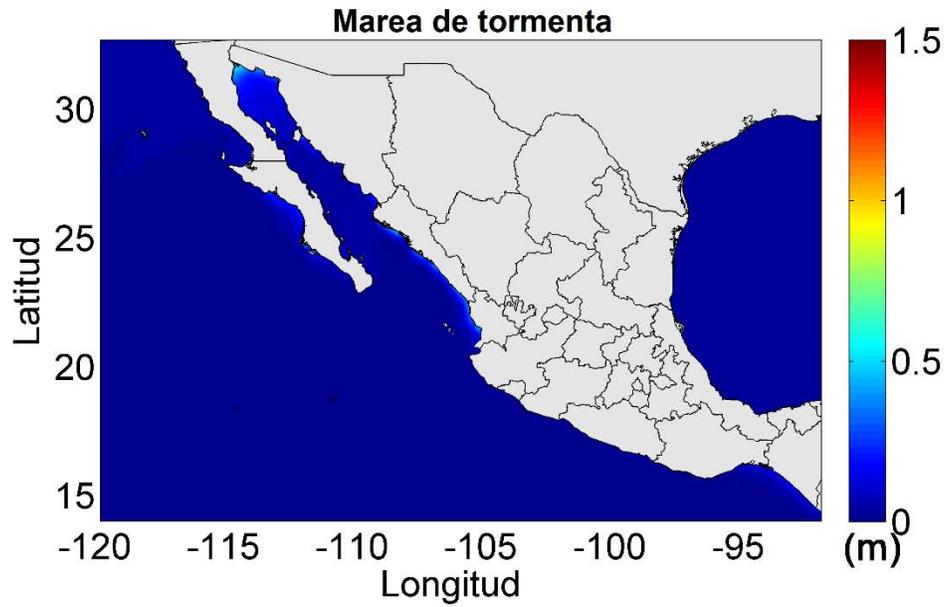
Periodo de retorno a 30 años

Marea de tormenta



Altura de ola significante

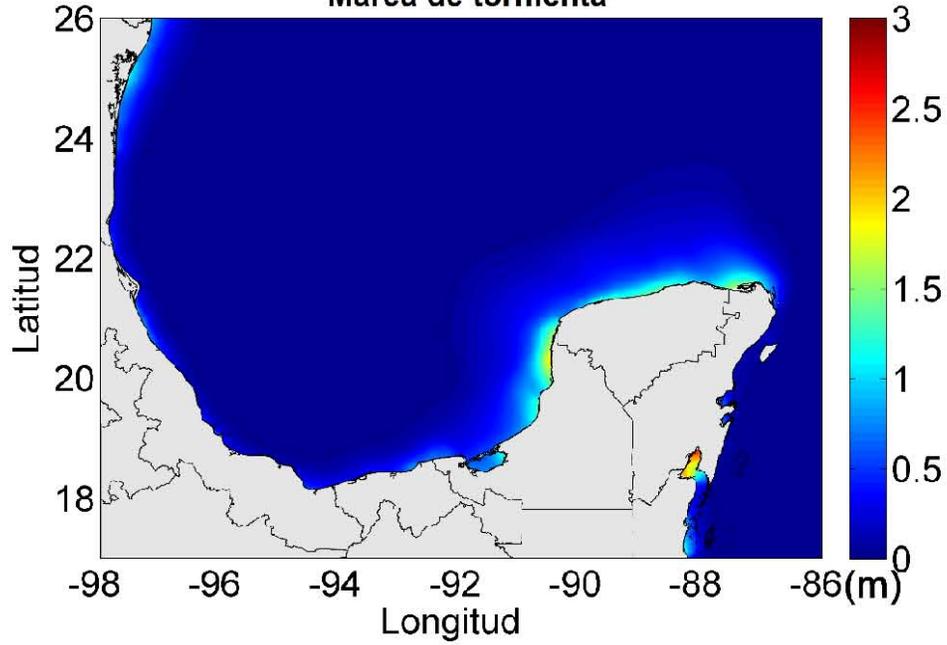




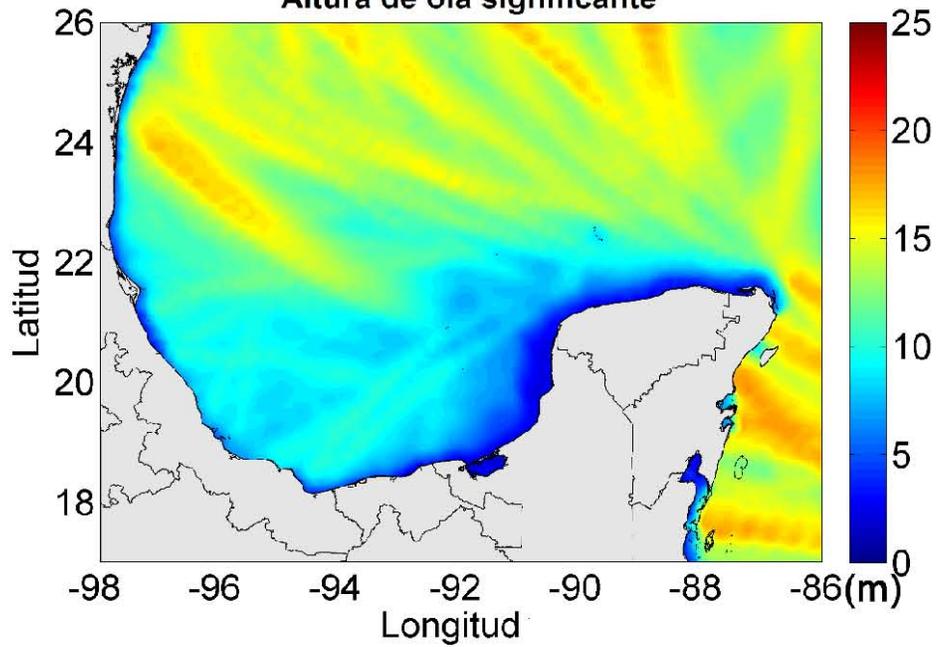


Periodo de retorno a 50 años

Marea de tormenta



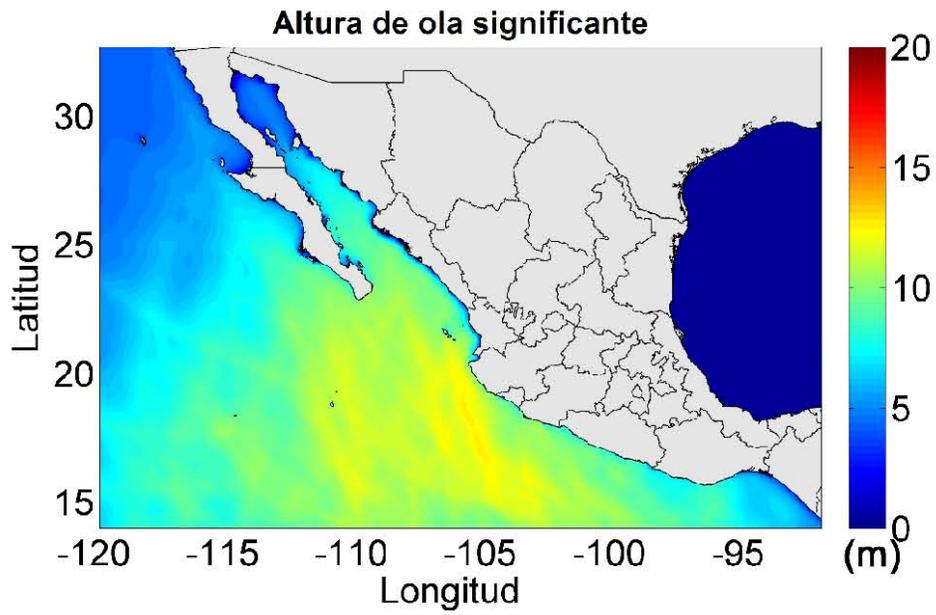
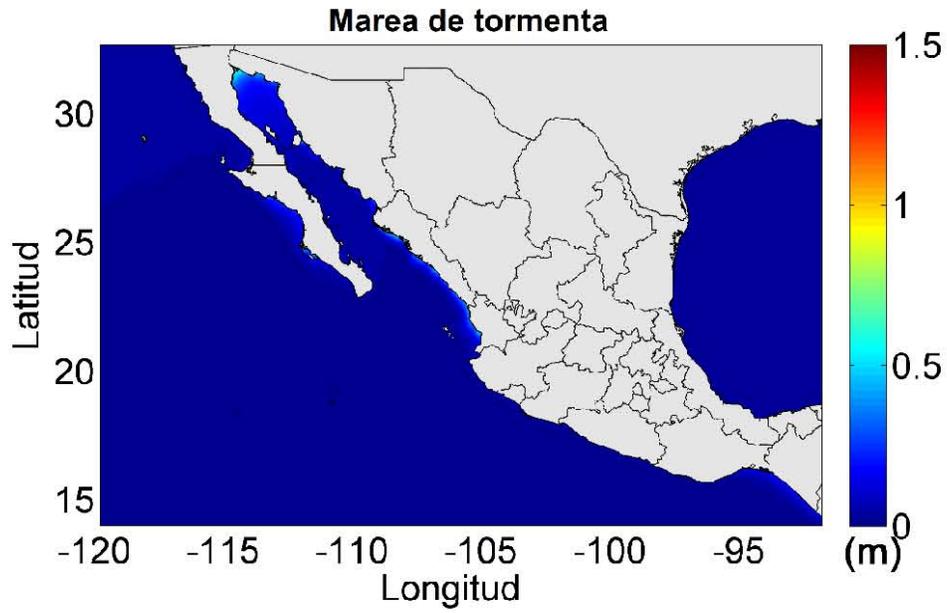
Altura de ola significativa





LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos



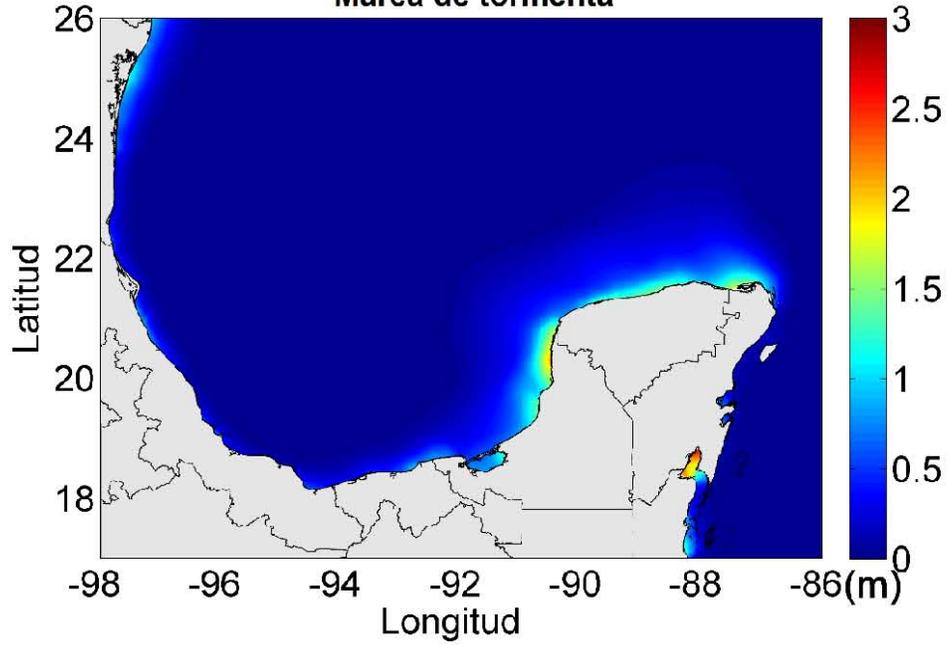


LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

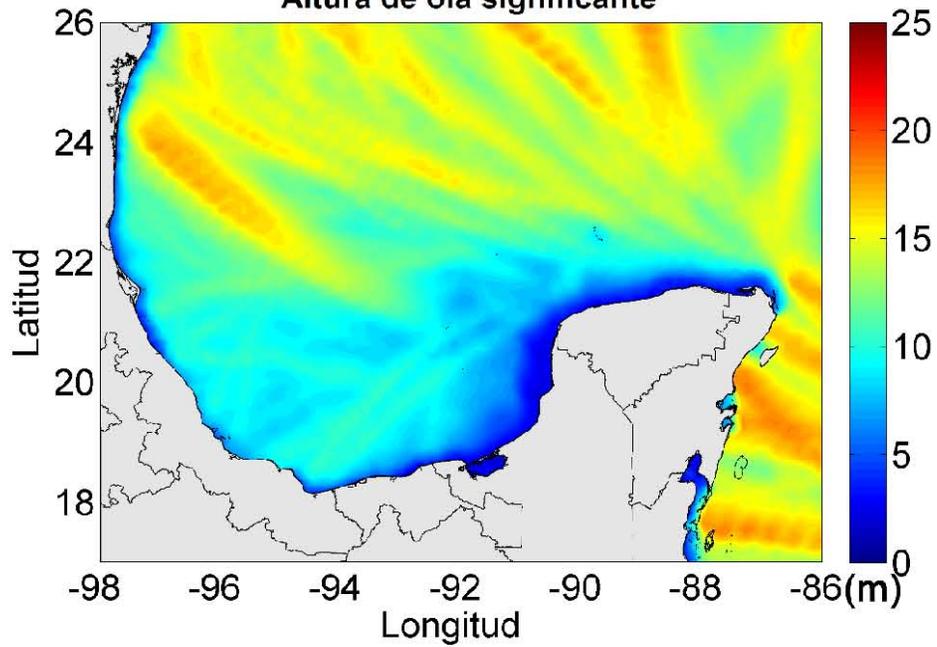
Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos

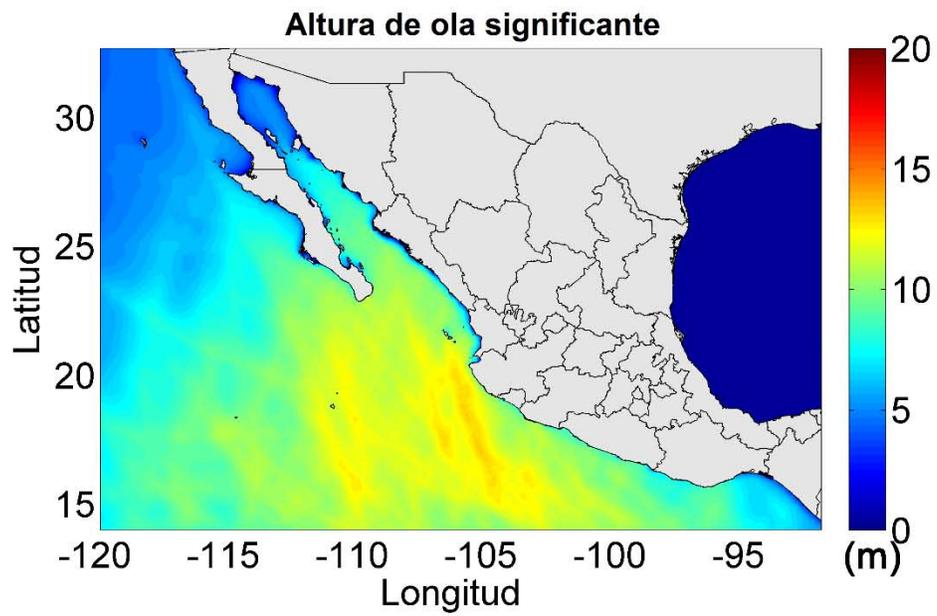
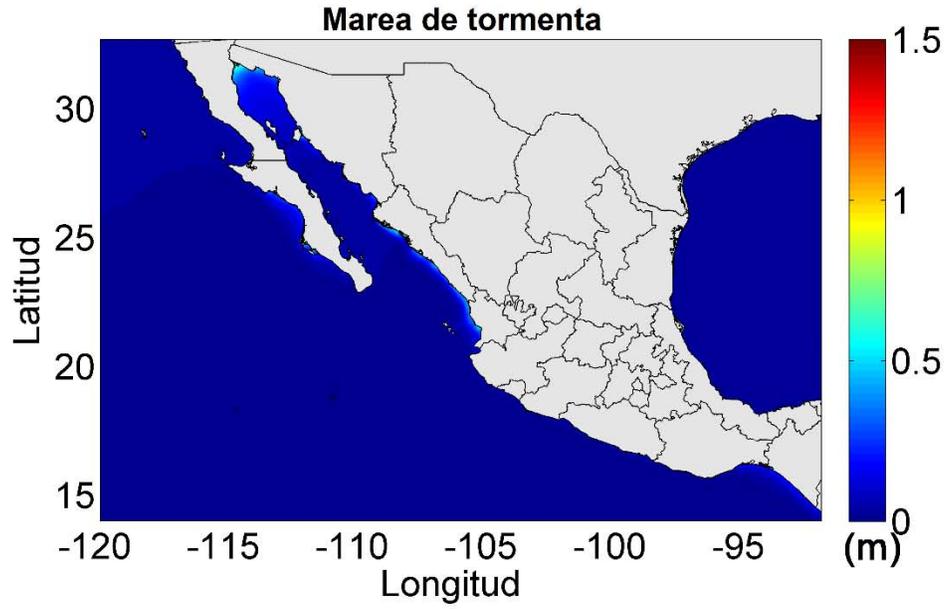
Periodo de retorno a 100 años

Marea de tormenta



Altura de ola significativa





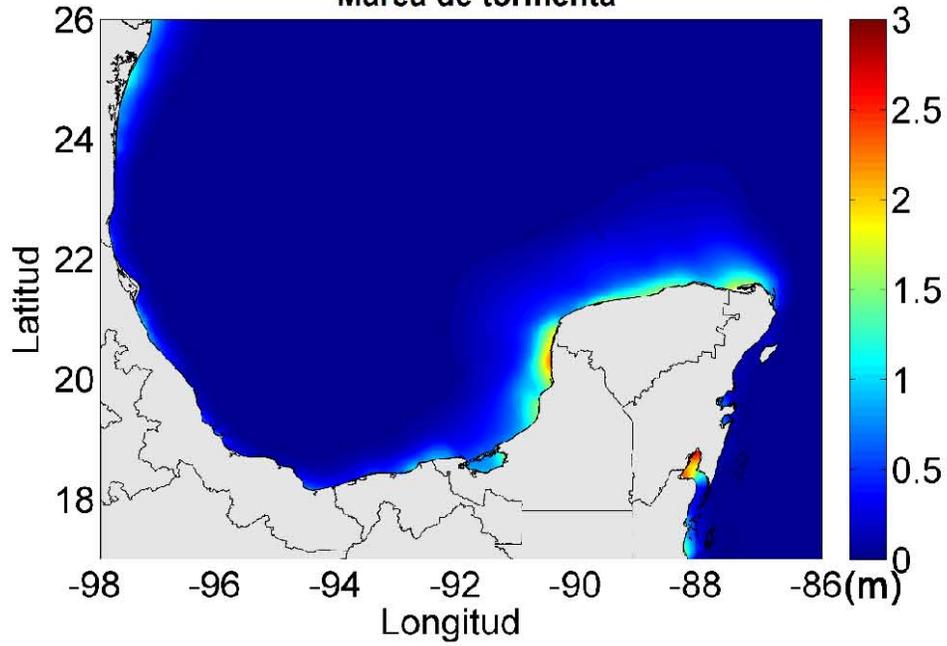


LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

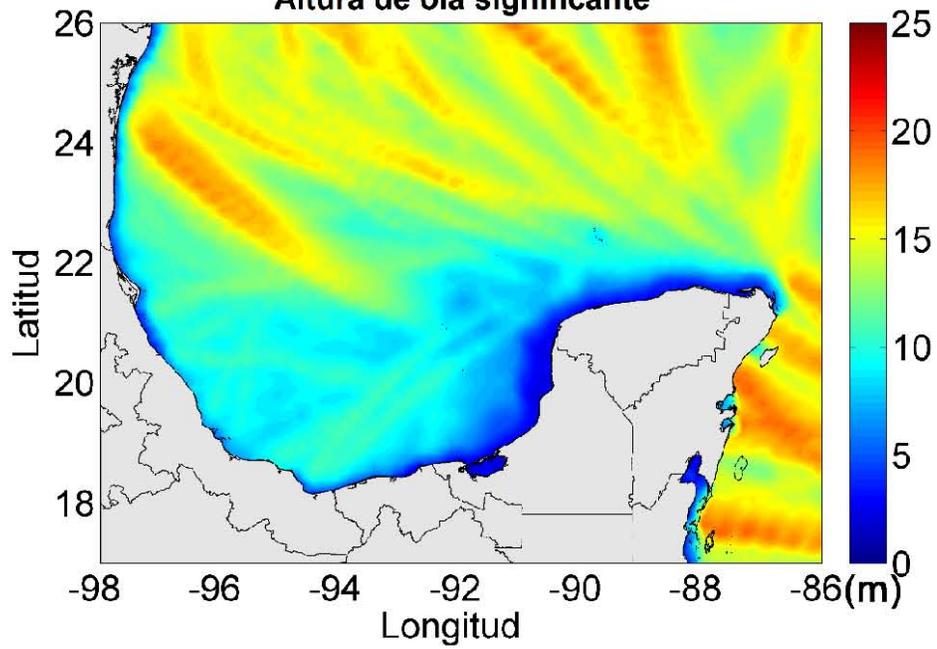
Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos

Periodo de retorno a 250 años

Marea de tormenta



Altura de ola significativa

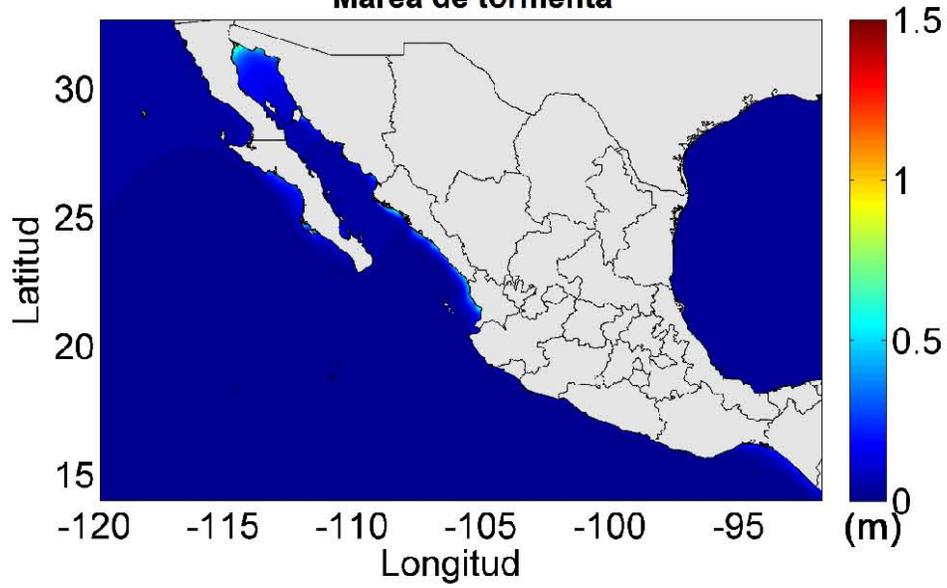




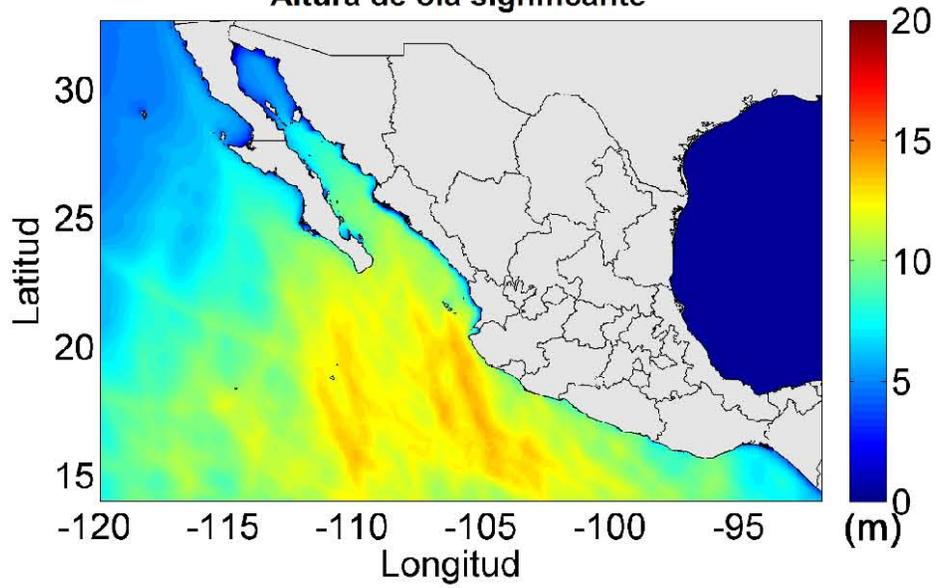
LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos

Marea de tormenta



Altura de ola significativa



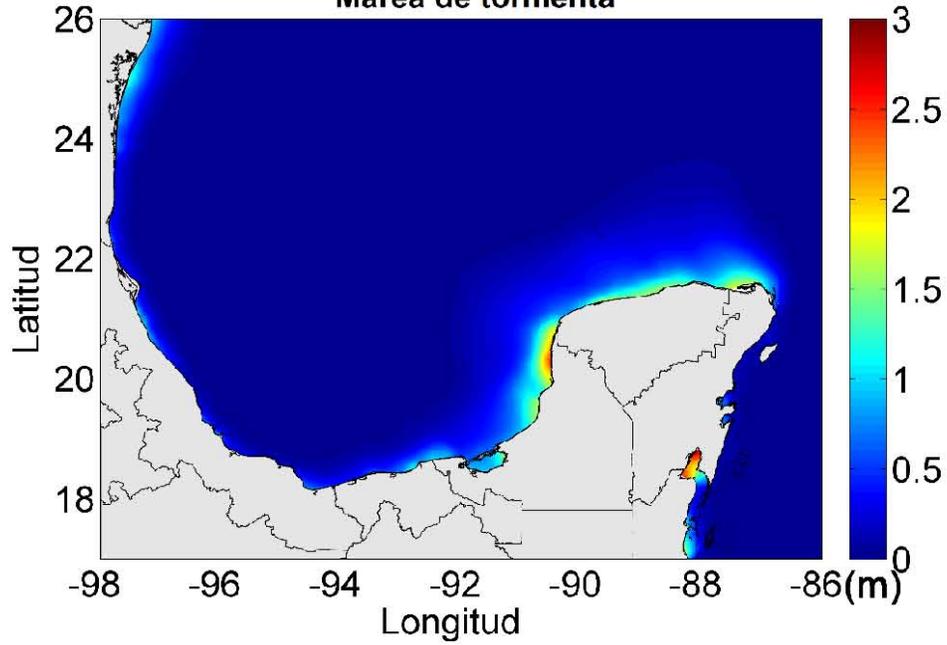


LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

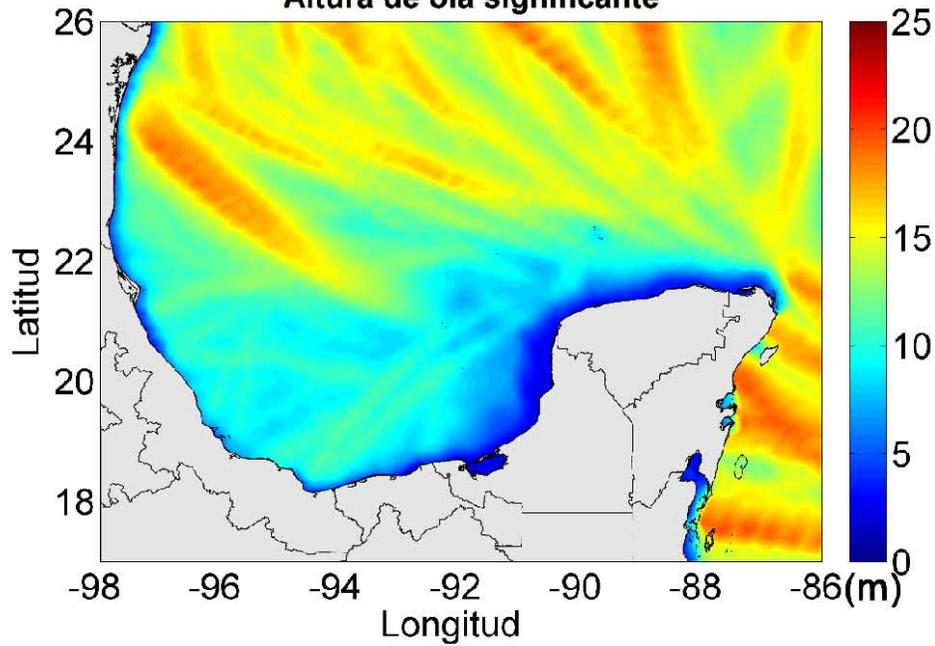
Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos

Periodo de retorno a 500 años

Marea de tormenta



Altura de ola significativa

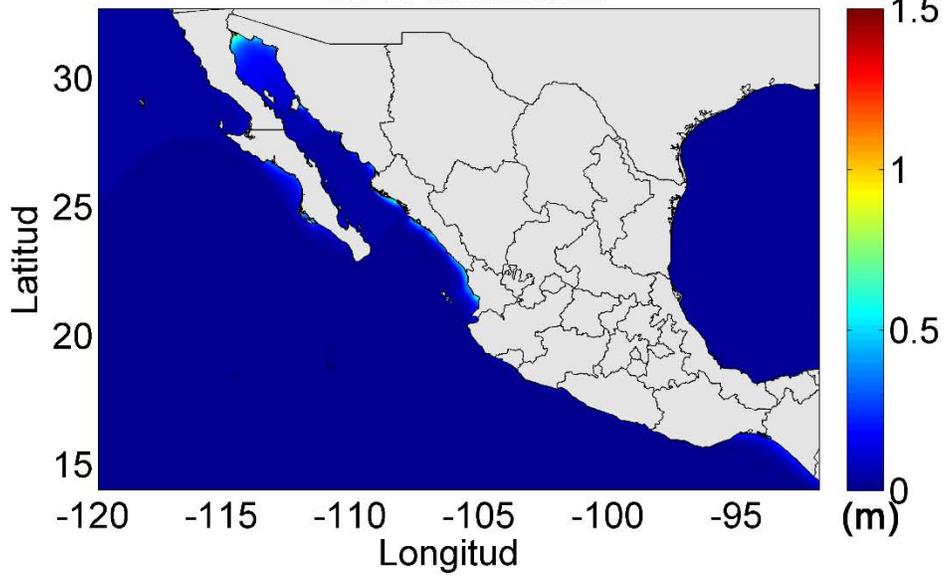




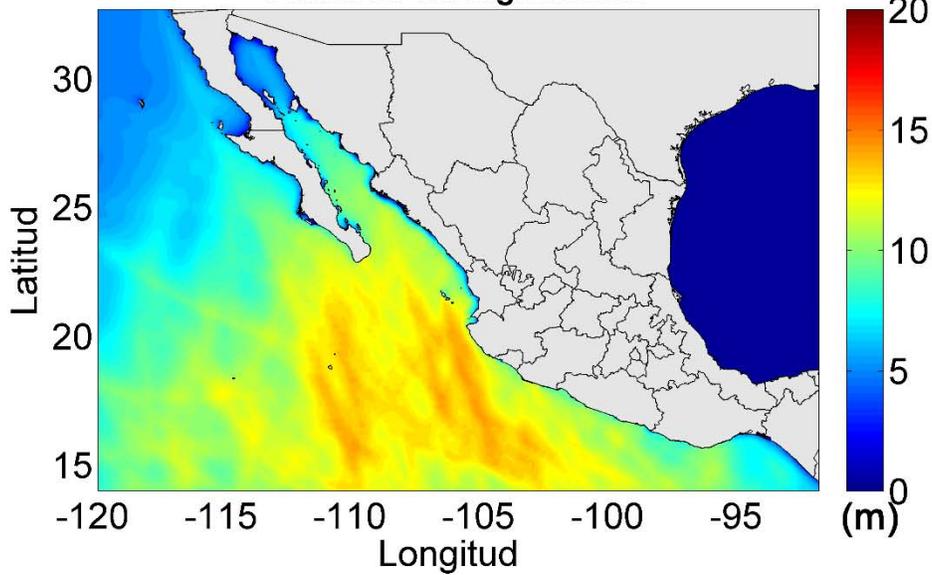
LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos

Marea de tormenta



Altura de ola significativa



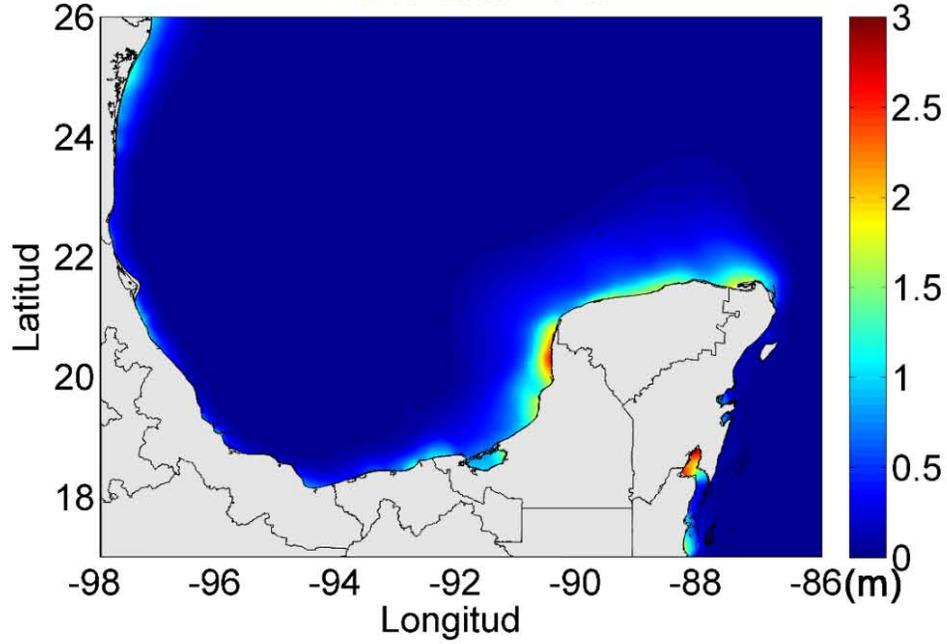


LIPC
LABORATORIO DE INGENIERÍA
Y PROCESOS COSTEROS
UNAM

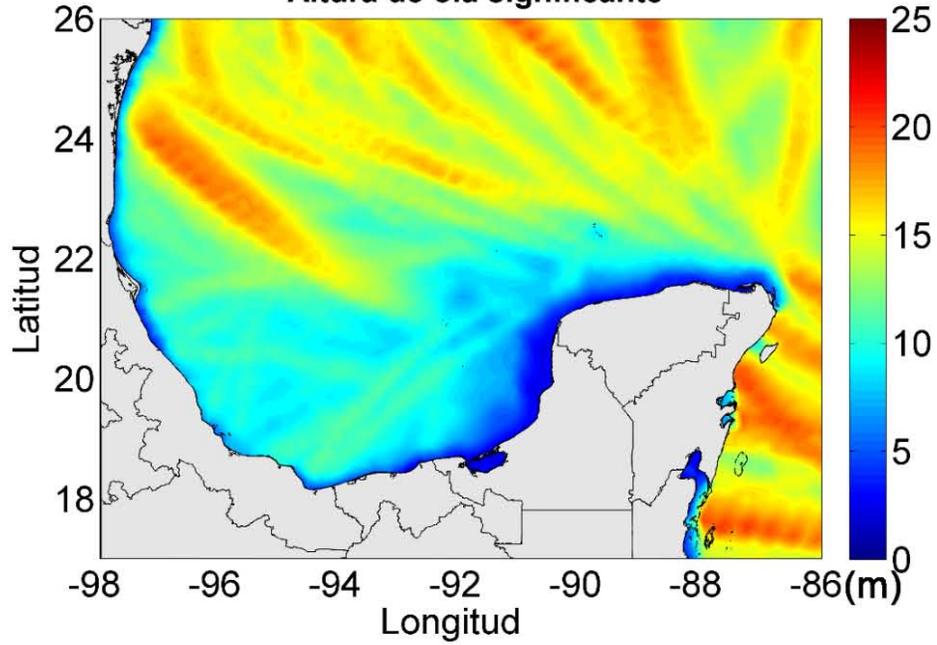
Estimación de marea de tormenta y oleaje inducidos por ciclones tropicales en mares mexicanos

Periodo de retorno a 1000 años

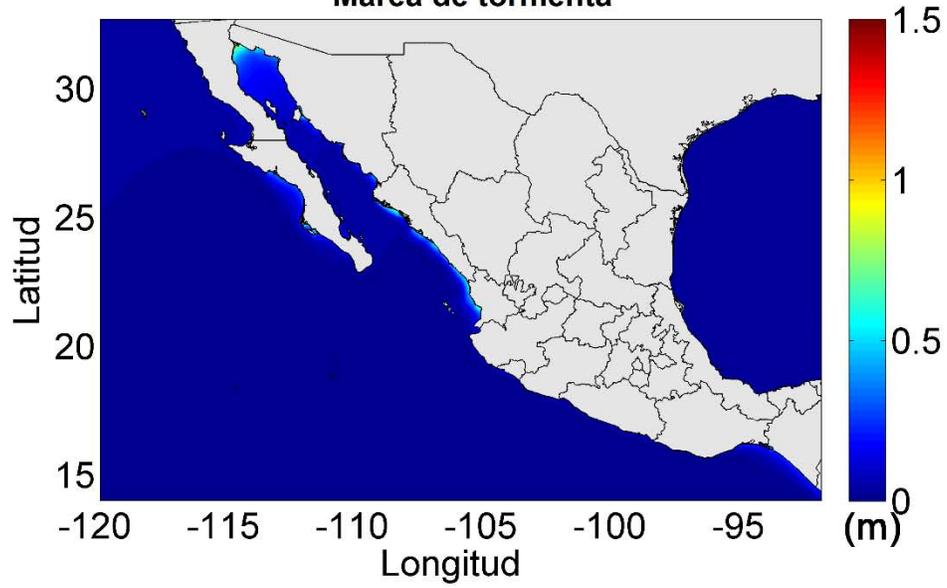
Marea de tormenta



Altura de ola significativa



Marea de tormenta



Altura de ola significante

