



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

**Efecto de Condiciones Hidrodinámicas Extremas en Escenarios de Dispersión de
Hidrocarburos en Manzanillo, Colima, México**

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

PRESENTA:
MIGUEL ANGEL VALENCIA HURTADO

TUTOR:
Dr. CHRISTIAN MARIO APPENDINI ALBRECHTSEN
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

Sisal, Hunucmá, Yucatán. Noviembre de 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Enriquez Ortiz Cecilia E.

Secretario: Dr. Torres Freyermuth Alec

Vocal: Dr. Appendini A. Christian M.

1^{er}. Suplente: Dr. Figueroa Espinoza Bernardo

2^{do}. Suplente: Dr. López González José

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, Sisal, Yucatán, México

TUTOR DE TESIS:

Dr. Christian Mario Appendini Albrechtsen



FIRMA

Dedicatoria:

A mis papás, Feliverto y Consuelo, que sin su apoyo, cariño y comprensión este nuevo logro no hubiese sido posible.

A mis hermanos, Luisa, Eriberto y Filemón por sus invaluable consejos de vida que me han permitido ser mejor persona.

“Once again I had to put myself in a vulnerable position in order to become stronger.”

Cédric Villani

Agradecimientos

Al Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros del Instituto de Ingeniería, por abrirme las puertas y permitirme seguir creciendo como persona y profesional.

Al Dr. Christian Appendini por su paciencia, guía y consejos que me brindó como tutor durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Agradecimiento especial a mi amigo Rafa, por apoyarme en todo lo que estuvo a su alcance para facilitar mi estadía en Yucatán, y también ser un guía más en mi transitar académico.

A Sergio Briceño por darse el tiempo de leer esta tesis y darme sus consejos para terminar la redacción de este documento.

A mis profesores en los cursos de maestría, que me brindaron un amplio panorama en los diversos temas que se tocan al estudiar ingeniería de costas.

A mis compañeros y amigos que conocí durante mi estadía en el LIPC, Astorga, Chava, Miguel, David, Pedro, Ana, Paola, Enna, Paulina, Marcos, Wilmer, Alejandra, Leo, Martín, Jose Carlos, Bernabe, Fernando, Olga, Luis, Nori, Lalo, Yineguela, Daniel, Clemente, Eduardo, Niels, Pablo, Balam, Paladio, Jorge, Mariana.

Al comité sinodal por sus aportaciones enriquecedoras en este trabajo de investigación.

Al CONACYT por el apoyo económico brindado para la realización del programa de maestría bajo el CVU 697683.

The author feel very grateful with DHI for student license provided and the support during the developing of this research project.

Gracias en general a todas las personas que de alguna forma contribuyeron para la conclusión de esta investigación.

Abstract

In this research, an analysis of the dispersion of pollutants in the coastal zone of the state of Colima, Mexico is presented. The aim of this work was to find out the effect of the extreme events, i.e. tsunamis and hurricanes, on hypothetical cases of oil spills. To do so, a computational domain was implemented with high resolution in three zones of interest: the port of Manzanillo, the Bay of Manzanillo and the Laguna de Cuyutlán. The numerical model MIKE 21, developed by the Danish Institute of Hydraulics (DHI), was used to characterize the nearshore hydrodynamics, on tidal, tsunami and storm surge conditions. An analysis was presented for two historical extreme events that occurred in the area; the October 9, 1995 tsunami and Hurricane Patricia, which made landfall on October 23, 2015. The models were calibrated and validated with local tidal records. The maximum values of surface elevation and magnitude of currents were analysed for both events. The oil spill scenarios were analysed at different stages of the tide including flooding, maximum, ebbing and minimum tides. The source locations were set at the PEMEX pier and in the Laguna de Cuyutlán. The model ECO Lab by DHI was used for the hydrocarbon dispersion, where the concentrations and the spreading of the pollutant slick were analysed. The results suggest that both events can accelerate the oil spill dispersal with respect to a spill with hydrodynamic conditions solely induced by tides. In the case of the tsunami, in just 12 hours the spill could reach a larger area than spring tides would in 5 days. In the case of the hurricane, the oil spill could reach the coastline in the Manzanillo Bay in a relatively short time.

Resumen

En este trabajo se llevó a cabo un estudio de dispersión de contaminantes en la zona costera del estado de Colima, México. El objetivo de esta investigación fue encontrar el efecto que tiene la hidrodinámica asociada a los fenómenos extremos de tsunami y huracán, en casos hipotéticos de derrame de hidrocarburos. Para la realización de este trabajo se implementó un modelo numérico de la zona de estudio con una malla de alta resolución en cuatro áreas de interés: el puerto de Manzanillo, la Bahía de Manzanillo, la Bahía de Santiago, y la Laguna de Cuyutlán. Se llevó a cabo la caracterización de la hidrodinámica de la zona por medio de modelación numérica utilizando el modelo MIKE 21, desarrollado por el Instituto Danés de Hidráulica (DHI, por sus siglas en inglés). En esta área se utilizaron dos fenómenos históricos para la calibración del modelo, el primero fue el tsunami ocurrido el 9 de octubre de 1995 y el segundo fue el huracán Patricia que tocó tierra el 23 de octubre de 2015, a este último se le hizo una modificación en su trayectoria para generar una condición más desfavorable. El modelo numérico fue calibrado y validado con registros del mareógrafo local del Puerto de Manzanillo. Se analizaron los valores máximos de sobreelevación de superficie y magnitud de corrientes para ambos eventos. Con los datos hidrodinámicos se llevaron a cabo escenarios de dispersión en diferente fase de la marea (llenante, máxima, vaciante y mínima), localizando fuentes potenciales de derrame en la terminal de PEMEX y en la Laguna de Cuyutlán. El modelo de dispersión de hidrocarburos utilizado fue ECO Lab de DHI, donde se analizaron las concentraciones y el alcance de la mancha del contaminante. Los resultados sugieren que ambos eventos pueden acelerar la propagación de hidrocarburos. Para el caso del tsunami, la propagación de hidrocarburos puede alcanzar en 12 horas un área mayor respecto a un derrame con condiciones hidrodinámicas inducidas sólo por marea viva de 5 días, aunque en estas últimas condiciones la mancha de contaminante adquiere mayores concentraciones. En el caso de huracán, el hidrocarburo puede alcanzar toda la línea de costa en la bahía de Manzanillo en un tiempo relativamente corto.

Índice

Abstract	i
Resumen	ii
Índice	iii
Índice de Figuras	v
Índice de Tablas	ix
Índice de Ecuaciones	x
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Antecedentes históricos	2
1.1.1 Estudios sobre derrames de hidrocarburos	2
1.1.2 Derrames de hidrocarburos en México	5
1.1.3 Huracanes en México	7
1.1.4 Huracanes trascendentales en el Estado de Colima	10
1.1.5 Impacto de Tsunamis en México	11
1.2 Área de estudio	14
1.3 Planteamiento del Problema	15
1.4 Objetivos	16
1.5 Justificación	17
Capítulo 2 Fundamento teórico y modelado numérico	18
2.1 Ecuaciones de la hidrodinámica	19
2.2 Modelos utilizados para la simulación de los fenómenos estudiados	22
2.3 Mareas astronómicas	24
2.4 Tsunamis	30
2.5 Huracanes	34
2.6 Corrientes	38
2.7 Derrame de hidrocarburos	39
Capítulo 3 Materiales y métodos	45
3.1 Recopilación de información del sitio de estudio	46

3.2 Generación del dominio computacional.....	48
3.3 Calibración de los modelos hidrodinámicos.....	50
3.3.1 Hidrodinámica inducida por marea astronómica.....	51
3.3.2 Hidrodinámica inducida por la onda de tsunami	53
3.3.3 Hidrodinámica inducida por huracán.....	55
3.4 Escenarios de dispersión.....	60
Capítulo 4 Resultados y discusiones	64
4.1 Validación de los modelos hidrodinámicos	65
4.1.1 Modelo de marea astronómica	65
4.1.2 Hidrodinámica inducida por marea astronómica.....	67
4.1.3 Modelo de tsunami.....	68
4.1.4 Sobreelevación de superficie y corrientes generadas por el Tsunami de 1995	69
4.1.5 Modelo de marea de tormenta.....	72
4.1.6 Campo de vientos de Patricia modificado	74
4.2 Efecto de condiciones hidrodinámicas extremas en la dispersión de hidrocarburos	77
4.2.1 Efecto en la dispersión de hidrocarburos durante el impacto de ambos eventos extremos.....	77
4.2.2 Efecto de la onda de tsunami en la dispersión de hidrocarburos durante diferente fase de marea astronómica	80
4.2.3 Efecto en la dispersión de hidrocarburos durante diferente fase de la marea astronómica ante el impacto del huracán.....	83
4.2.4 Dispersión de hidrocarburos en condiciones hidrodinámicas de marea astronómica	88
Capítulo 5 Conclusiones	90
Anexos	92
1. Trayectoria de los huracanes que ocasionaron más daños en el Estado de Colima.	92
Referencias bibliográficas	93

Índice de Figuras

Figura 1. Localización del derrame provocado por la plataforma petrolera Ixtoc I.	6
Figura 2. Buque el Llanitos encallado durante el evento del huracán Patricia. Obtenida de Méndez (2016).....	6
Figura 3. Contaminación por hidrocarburos en la zona de mangle en las cercanías de la Laguna de Cuyutlán. Obtenida de Rincón (2016).....	7
Figura 4. Mapa de placas tectónicas que cubren la zona de estudio, donde los puntos naranjas representan los sismos históricos. Obtenido de SGM (2017).....	11
Figura 5. Efectos del tsunami en las playas de Cuyutlán, Colima. Obtenido de El Universal (2011).	13
Figura 6. Nivel del mar alcanzado en la Costa Alegre Jalisco después del tsunami de 1995. Obtenido de López (2008).	13
Figura 7. Mapa de la ubicación del área de estudio. El punto rojo 1 representa la posición del derrame del buque el Llanitos encallado por Patricia y el punto 2 el derrame por ductos dañados en la Laguna de Cuyutlán.	14
Figura 8. Sistema cartesiano de coordenadas utilizado para las ecuaciones de hidrodinámica. Obtenido de Pugh y Woodworth (2014)	19
Figura 9. Acción de las fuerzas sobre un elemento finito de agua. Obtenido de Pugh y Woodworth (2014).....	20
Figura 10. Ejemplos de varios tipos de marea con diferente valor de número de forma. Obtenido de Massel (1999).....	27
Figura 11. Definiciones características de los niveles de marea. Obtenido de Massel (1999)	29
Figura 12. Parámetros geométricos de la falla sísmica. Obtenido de Kongko y Schlurmann (2011)	32
Figura 13. Distribución hipotética de la marea de tormenta cuando un huracán toca tierra. La mayor altura en la marea de tormenta se da a la derecha del campo de vientos debido a la dirección de éstos hacia tierra. Obtenido de Liu (2004).....	35
Figura 14. Descomposición vectorial de las corrientes en coordenadas cartesianas. Adaptado de Pugh y Woodworth (2014).....	39
Figura 15. Ecuación de Fick en un volumen de fluido tridimensional. Obtenido de Massel (1999)	40
Figura 16. Proporción en que los procesos de advección y difusión contribuyen al transporte de las partículas. Adaptado de Massel (1999)	41

Figura 17. Procesos físico-químicos ocurridos en un derrame de petróleo al océano (DHI 2015).	42
Figura 18. Diagrama de flujo del marco metodológico de este trabajo.	45
Figura 19. Ubicación del mareógrafo estación Manzanillo. Obtenido de Google Earth.	46
Figura 20. Datos históricos registrados por el mareógrafo hasta el año 2013.	46
Figura 21. Malla computacional con alta resolución espacial en el puerto de Manzanillo y Laguna de Cuyutlán.	48
Figura 22. En el panel superior se aprecia la batimetría de todo el dominio computacional correspondiente a la parte central del Océano Pacífico mexicano, y en el inferior un acercamiento a la batimetría de Manzanillo.	49
Figura 23. Localización y coordenadas de las 6 estaciones para la obtención de la magnitud y dirección de las corrientes.	51
Figura 24. Forzamiento del modelo de marea con valores en las fronteras marinas (Code 20, 15, 10, 5).	51
Figura 25. Elevación de superficie de la onda del tsunami de 1995, frente a las costas del Estado de Colima.	54
Figura 26. Campo de vientos (Panel superior) y de presión (panel inferior) del huracán Patricia al tocar tierra.	57
Figura 27. Modificación de la trayectoria del huracán Patricia, entrando a tierra por Manzanillo.	59
Figura 28. Ubicación geográfica de las fuentes en el área de la terminal de Pemex y la Laguna de Cuyutlán (fuente: Google Earth).	60
Figura 29. Esquematización de las fases de marea astronómica: máxima, vaciante, mínima y llenante. Para marea muerta (a) y viva (b).	63
Figura 30. La línea azul representa la marea astronómica obtenida del registro histórico de elevación de superficie, mientras que los puntos en rojo son las elevaciones predichas por MARV09.	65
Figura 31. Calibración del modelo de marea para la caracterización de la circulación en la zona.	66
Figura 32. Ajuste lineal entre los datos de marea medidos y los datos simulados por el modelo.	66
Figura 33. Envolvente máxima de la intensidad de corriente durante un ciclo de marea viva.	67
Figura 34. Elevación de la superficie libre generada por el Tsunami de 1995 (círculos) y por el modelo de propagación de la onda (línea roja).	68

Figura 35. Ajuste lineal entre los datos medidos del tsunami y los simulados por el modelo.	68
Figura 36. Máxima elevación de la superficie ocasionada por el tsunami sumado al efecto de la marea.	69
Figura 37. Magnitud y dirección de corrientes en las estaciones en la bahía (1, 2, 3,4) y laguna (5,6), para el evento de tsunami	70
Figura 38. Distribución de los valores máximos concernientes a la magnitud de las corrientes provocadas por el tsunami.	71
Figura 39. Valor absoluto de la corriente en distintas posiciones. Obtenido de Carbajal y Galicia-Pérez (2002).	71
Figura 40. Elevación de superficie medida por el mareógrafo (línea roja), marea meteorológica (línea negra), modelo conjunto de marea y marea de tormenta (marcador magenta), elevación de superficie generada sólo por el huracán (marcador azul).	72
Figura 41. Ajuste lineal entre los datos de marea de tormenta medidos y los datos simulados por el modelo.	72
Figura 42. Mapa de valores máximos espaciales de sobreelevación de superficie generada por el huracán Patricia.	73
Figura 43. Distribución máxima espacial de la magnitud de corrientes generadas por el huracán Patricia.	74
Figura 44. Envolvente de vientos máximos (a) y envolvente de presión mínima (b).	75
Figura 45. Sobreelevaciones máximas de superficie libre generadas por Patricia entrando por Manzanillo.	75
Figura 46. Magnitud y dirección de corrientes en las estaciones de la bahía (1, 2, 3,4) y laguna (5,6) para el evento de ciclón.	76
Figura 47. Magnitudes máximas de corriente del huracán entrando por Manzanillo.	76
Figura 48. Mapas de envolventes máximas de la dispersión de hidrocarburo ocasionada por hidrodinámica de marea (a) y a consecuencia del evento de tsunami (b).	77
Figura 49. Mapas de envolventes máximas de la evolución de la dispersión en el tiempo del tsunami en condiciones de marea viva durante la máxima elevación registrada.	78
Figura 50. Mapas de envolventes máximas de la dispersión de hidrocarburo en condiciones de marea (a) y propagación durante un evento de huracán (b).	79
Figura 51. Mapas de envolventes máximas del destino final de los hidrocarburos en el caso del fenómeno de tsunami (a) y huracán (b).	80
Figura 52. Mapas de envolventes máximas de los escenarios de dispersión bajo el efecto de tsunami en 4 diferentes fases de la marea muerta por un periodo de 12 hrs.	81

Figura 53. Mapas de envolventes máximas de los escenarios de dispersión bajo el efecto de tsunami en marea viva por un periodo de 12 hrs.....	81
Figura 54. Mapas de envolventes máximas de los escenarios de dispersión en condiciones hidrodinámicas de tsunami en cuatro diferentes fases de marea muerta por un periodo de 12 hrs.	82
Figura 55. Mapas de envolventes máximas de los escenarios de dispersión en condiciones hidrodinámicas de tsunami en cuatro diferentes fases de marea viva por un periodo de 12 hrs.	83
Figura 56. Mapas de envolventes máximas para los escenarios de dispersión en condiciones hidrodinámicas de huracán en cuatro diferentes fases durante marea muerta por un periodo de 12 hrs.	84
Figura 57. Mapas de envolventes máximas para los escenarios de dispersión en condiciones hidrodinámicas de huracán en cuatro diferentes fases de marea viva por un periodo de 12 hrs.	85
Figura 58. Mapas de envolventes máximas de la dispersión generada por condiciones hidrodinámicas de huracán en marea muerta dentro de la laguna por un periodo de 12 hrs.	86
Figura 59. Mapas de envolventes máximas de la dispersión generada por condiciones hidrodinámicas de huracán en marea viva dentro de la laguna por un periodo de 12 hrs.	87
Figura 60. Diagrama conceptual del comportamiento de la mancha de hidrocarburos para ambos eventos en los sitios del derrame.....	87
Figura 61. Mapas de envolventes máximas para la dispersión durante condición de marea muerta (a) y marea viva (b).....	88
Figura 62. Mapas de envolventes máximas para la dispersión en la Laguna de Cuyutlán en condición de marea muerta (a) y viva (b).....	89

Índice de Tablas

Tabla 1. Cronología de los mayores derrames de hidrocarburos a nivel mundial.	2
Tabla 2. Escala Saffir-Simpson obtenido de: CENAPRED (2017).....	8
Tabla 3. Tsunamis históricos que han impactado las costas del pacifico mexicano. Obtenido de NOAA (2017):	12
Tabla 4. Componentes principales de la marea.	28
Tabla 5. Magnitud, energía y elevación de máxima de run-up de tsunamis en el Japón. Obtenido de Lida (1963)	31
Tabla 6. Coordenadas geográficas de los límites del dominio computacional.....	48
Tabla 7. Configuración del modelo hidrodinámico de marea.	52
Tabla 8. Parámetros generales de la falla sísmica utilizados para la generación de las condiciones iniciales del modelo de tsunami.....	53
Tabla 9. Configuración del modelo hidrodinámico de tsunami.....	54
Tabla 10. Best track del huracán Patricia del 20 al 24 de octubre de 2015. Obtenido de Kimberlain, Blake, y Cangialosi (2016).....	55
Tabla 11. Configuración del modelo hidrodinámico de huracán.....	57
Tabla 12. Coordenadas de la posición de las fuentes del vertido de hidrocarburos.	60
Tabla 13. Propiedades de las partículas de petróleo crudo utilizadas en el modelo.	61
Tabla 14. Configuración del modelo de dispersión de hidrocarburos.	62
Tabla 15. Escenarios hipotéticos de dispersión durante diferentes fases de marea, dónde sitio 1 es la terminal de Pemex, y sitio 2 es la Laguna.	63
Tabla 16. Componentes principales en la marea en la región de Manzanillo, Colima.....	65

Índice de Ecuaciones

(2.1.1) Ecuación de la hidrostática.....	19
(2.1.2) Ecuación de conservación de masa	20
(2.1.3) Ecuación de conservación de masa a profundidad constante.....	20
(2.1.4) Ecuación de conservación de momentum lineal en el eje x.....	20
(2.1.5) Ecuación de conservación de momentum lineal en el eje y.....	20
(2.2.1) Ecuación de continuidad (MIKE 21 HD).....	22
(2.2.2) Ecuación de conservación de momentum lineal en el eje x.....	23
(2.2.3) Ecuación de conservación de momentum lineal en el eje y (MIKE 21 HD)	23
(2.3.1) Ley de gravitación universal de Newton	24
(2.3.2) Ecuación del número de forma.....	26
(2.3.3) Serie de Fourier	27
(2.4.1) Condición potencial de generación de tsunamis respecto a la magnitud sísmica	30
(2.4.2) Condición para que un tsunami sea desastroso	30
(2.4.3) Celeridad de onda en aguas someras	31
(2.4.4) Ecuación de desplazamiento de la superficie libre	33
(2.5.1) Ecuación de elevación de la superficie debido al esfuerzo del viento	36
(2.5.5) Ecuación analítica de Emanuel y Rotunno para campo vientos	36
(2.5.6) Ecuación analítica de Holland para campo de presión	37
(2.6.1) Componente vectorial horizontal de la corriente U.....	39
(2.6.2) Componente vectorial vertical de la corriente U.....	39
(2.6.3) Ángulo entre las componentes u y v de una corriente.....	39
(2.6.4) Magnitud de corrientes.....	39
(2.7.1) Ecuación de Fick	40
(2.7.2) Descomposición de Reynolds	40
(2.7.3) Ecuación de advección-difusión turbulenta	40
(2.7.4) Aproximación de Bousinessq.....	41
(2.7.5) Ecuación de advección-difusión con coeficientes variables	41
(2.7.6) Ecuación de advección-difusión con coeficientes constantes	41
(2.7.7) Número de Péclet	42
(2.7.8) Ecuación de difusión de un proceso (ECO Lab/OS)	43
(2.7.9) Ecuación de transporte (ECO Lab/OS)	43
(2.7.10) Ecuación diferencial de advección-difusión (ECO Lab/OS)	43
(2.7.11) Ecuación integral de advección-difusión	43
(2.7.12) Aproximación numérica para la solución de la Eq. de advección-difusión.....	43

Capítulo 1

Introducción

El incremento de la población, los avances tecnológicos, así como la industria a nivel mundial han generado un aumento en la explotación y producción de recursos energéticos. Hoy en día el sistema global energético está abastecido principalmente por los combustibles fósiles, como el petróleo, el gas natural, y el carbón (British Petroleum 2015; Exxon Mobil 2015). Debido al gran tamaño de la explotación y demanda de estos recursos se tuvo la necesidad de crear sistemas de extracción y transporte de estos combustibles, como plataformas, ductos submarinos, buques, y terminales. A consecuencia de que los combustibles fósiles son altamente contaminantes al mezclarse con el medio contiguo, esta infraestructura debe cumplir con estrictas normas de seguridad orientadas a su manejo. Dichas normas y regulaciones tienen como objetivo principal minimizar los daños y consecuencias negativas sobre los ecosistemas y hábitats aledaños a las áreas de operación. Sin embargo, a lo largo de la historia han ocurrido un gran número de accidentes, a consecuencia de errores humanos y fenómenos naturales, afectando seriamente el medio ambiente (Angulo, 2010; Castro, 2014).

Los mayores desastres ecológicos por derrame de hidrocarburos han ocurrido en los mares y océanos, debido a la complejidad que conlleva mitigar la propagación del contaminante y la facilidad con la que se dispersa por la acción de la hidrodinámica. Ante la contingencia de un evento de derrame, el componente principal que se encarga de dispersar los contaminantes es la hidrodinámica de la zona. En las áreas costeras, la hidrodinámica marina es producida por el viento, la marea, y el oleaje, siendo la rotura del oleaje la dominante en la zona de playa (Hunt y Johns 1963). Su importancia relativa se modifica durante los fenómenos naturales extremos, que pueden modificar considerablemente la hidrodinámica, como es el caso de huracanes y tsunamis. Ambos son capaces de modificar las condiciones hidrodinámicas de manera drástica y en un corto periodo de tiempo, a consecuencia de la cantidad de energía con la que impactan las costas. Estos eventos provocan condiciones marítimas intensas, que en ciertas circunstancias rebasan las condiciones de diseño de las estructuras, aumentando el riesgo a accidentes con el manejo de contaminantes.

En esta investigación, se utilizó el modelo hidrodinámico MIKE 21 HD FM para simular las condiciones hidrodinámicas generadas por los fenómenos de marea astronómica, huracán

y tsunamis. Dichas simulaciones se validaron a partir de mediciones de nivel de superficie libre del mar (representado en lo sucesivo como η). Posteriormente, se simuló la dispersión de contaminantes utilizando el modelo MIKE 21 ECOLAB/OS, con el que se realizaron distintos escenarios de dispersión de contaminantes, en las zonas adyacentes al área portuaria y sobre el tendido de una línea de combustoleoducto cercana a un cuerpo lagunar, ambos propiedad de Petróleos Mexicanos (PEMEX). Se analizó el comportamiento en la derrame de hidrocarburos, bajo condiciones hidrodinámicas propiciadas por eventos extremos, para estudiar los patrones generados en la dispersión de hidrocarburos.

1.1 Antecedentes históricos

En esta sección se presentan los mayores desastres históricos asociados a derrames de petróleo, provocados por accidentes debido a fenómenos naturales o errores humanos, ocurridos a buques petroleros, terminales portuarias, y plataformas de extracción en el entorno mundial; así como las catastróficas consecuencias ambientales provocadas. También se exponen brevemente los estudios que se han realizado entorno a los derrames. Por último, se presentan los casos particulares ocurridos en las costas mexicanas.

1.1.1 Estudios sobre derrames de hidrocarburos

Los derrames de petróleo más grandes de la historia de acuerdo a Angulo (2010) y Castro (2014) se muestran en la Tabla 1. Éstos han tenido lugar en diferentes lugares y las causas han sido diversas, desde vertidos generados por errores humanos en los trabajos de extracción, hasta los que fueron ocasionados por guerras en el medio oriente.

Tabla 1. Cronología de los mayores derrames de hidrocarburos a nivel mundial.

Fecha	Acontecimiento (Ciudad y País)	Empresa	Causa	Derrame (m ³)	Impactos
15/12/1976	Argo Merchant (Massachusetts, EUA)	Thebes Shipping Inc	Encalló a causa de marejadas y fuertes vientos.	29,148	Debido a la dirección de los vientos, las zonas costeras cercanas no se vieron afectadas.

16/03/1978	Amoco Cádiz (Brittany, Francia)	Standard Oil	Daño a la infraestructura del buque debido a temporal	260,057	Contaminación de 340 km de costa de Bretaña
03/06/1979	Ixtoc I (Golfo de México, México)	PEMEX	Pozo de exploración explotó a 2 millas de profundidad.	529,958	Zonas costeras de Campeche, Tabasco, Veracruz y Tamaulipas se vieron afectadas, incluyendo algunas áreas de Texas.
01/11/1979	Burmah Agate (Texas, EUA)		Colisión con el carguero Mimosa	9,842	Ardió por casi tres meses, produciendo efectos negativos al ambiente y casi irreversibles
24/03/1989	Exxon Valdez (Alaska, EUA)	Exxon Mobil	Encalló en el arrecife Bligh	40,883	Se afectaron más de 1,100 km de costa no continua de Alaska
06/03/1990	Cibro Savannah (New Jersey, EUA)	Cibro Petroleum Inc	Explosión e incendio mientras salía del muelle.	481	
08/06/1990	Mega borg (Golfo de México, EUA)		Accidente de alijo y el posterior incendio	20,820	
16/09/1990	Júpiter (Michigan, EUA)		Explosión e incendio a bordo.		
01/01/1991	Golfo Pérsico (Golfo Árabe, Kuwait)		Guerra Irak-Kuwait	143,088,498	Mayor derrame de petróleo en la historia
10/08/1993	Bouchard 155 (Florida, EUA)		Colisión con el carguero Balsa 37, y el barco Ocean 255.	1,272	Contaminación en la bahía de Tampa
10/08/2002	Prestige Galicia (España)	Universe Maritime Ltd.	Accidente durante una tormenta.	77,000	Contaminación de miles de kilómetros de costa, en España, Portugal y Francia

20/04/2010	Golfo de México (Golfo de México, EUA)	British Petroleum	Explosión en la plataforma de perforación Deepwater Horizon	780,000	Provocó el peor derrame de petróleo en alta mar en la historia de Estados Unidos
------------	--	----------------------	---	---------	---

Ante los acontecimientos de derrames y la crisis ambiental generada, se han realizado investigaciones para entender el comportamiento de contaminantes vertidos al océano. La modelación numérica y matemática han sido unas de las principales herramientas, permitiendo el estudio de la propagación de hidrocarburos en el medio marino, bajo el efecto de difusión de deriva hidrodinámica. A continuación se presenta una serie de investigaciones desarrolladas y los parámetros más importantes que se han considerado para la caracterización del clima marítimo y la circulación oceánica en diferentes investigaciones.

Con base en acontecimientos históricos Proctor, Flather, y Elliott (1994) realizaron simulaciones numéricas de derrames en el Golfo Pérsico implementando un modelo hidrodinámico bajo condiciones normales y de huracán. Los periodos de tiempo analizados fueron para vertidos con duración de varias semanas, con el objeto de ver el comportamiento del contaminante en periodos largos. También se realizó una reproducción numérica del derrame Mina Al Ahmadi ocurrido en enero de 1991. Después de 32 días de simulación de dicho vertido, la dirección principal de la mancha de contaminante concordó satisfactoriamente con las observaciones registradas.

Dentro de este tipo de simulaciones, incitadas por el accidente de embarcaciones que transportan combustible, Varlamov et al. (1999) investigaron la catástrofe del petrolero ruso Nakhodka en enero de 1997, el mayor acontecimiento de contaminación marina que había ocurrido en Japón. Para su estudio, se implementó un modelo numérico considerando el método de trayectoria de partículas, advección por corrientes, difusión aleatoria, efectos boyantes, y la parametrización del efecto de la evaporación del petróleo y su biodegradación. El modelo se compuso por un modelo de circulación oceánica y otro de derrames. Los resultados mostraron que el modelo de derrame aplicado al accidente de vertido del Nakhodka dio resultados satisfactorios al simular las componentes principales de la propagación del hidrocarburo. Una de las contribuciones de este estudio fue que las simulaciones consideraron corrientes a dos niveles, una capa de profundidad de 30 m y otra de 50 m. También se mostró que cuando el derrame se encuentra alejado de la costa, los modelos empíricos de la deriva inducida por viento fueron poco satisfactorios para

modelaciones de periodo prolongado, debido a la presencia de fuertes corrientes oceánicas que influyen en la trayectoria del vertido.

En la modelación de hidrocarburos, la incertidumbre se ha reducido al identificar los procesos de cambio en el compuesto del vertido cuando este se encuentra sobre la superficie del océano. Los modelos numéricos de vertidos han incorporado estos procesos, como en el modelo desarrollado por Wang, Shen, y Zheng (2005). Estos autores proponen un modelo bidimensional en el que se incorporan los procesos físicos más significantes: advección, expansión, evaporación, disolución, emulsificación, difusión turbulenta, sedimentación y su interacción con la línea de costa, viscosidad y tensión superficial del vertido. Este modelo se utilizó satisfactoriamente para la estimación del impacto ambiental. También se han implementado modelos que incorporan la interacción de las tres componentes de la velocidad para un mejor entendimiento del transporte de contaminantes y su interacción en con el ambiente costero, con objetivo de entender el comportamiento y trayectoria de la mancha (Guo et al. 2014).

1.1.2 Derrames de hidrocarburos en México

En México, a pesar de ser uno de los mayores productores de crudo a nivel mundial (Muciño, 2014), la implementación de modelos numéricos para entender el fenómeno de la dispersión de contaminantes es muy limitado. También el uso de estos modelos para la predicción de la trayectoria de vertidos durante contingencias es escaso, a pesar de la ocurrencia de eventos de derrame en las costas y mares mexicanos como fue el caso de la plataforma de extracción Ixtoc I en 1979. Por otro lado, la exposición que tienen las costas mexicanas a eventos extremos como tsunamis y ciclones tropicales, pone en peligro las instalaciones petroleras, la infraestructura de transporte (buques y ductos), aumentando la probabilidad de desastres, como el ocasionado por el huracán Patricia en 2015 (Méndez, 2016), evento del cual se hablará más adelante.

El accidente en la plataforma de extracción Ixtoc I a 80 km de la costa (Figura 1), representa el caso más importante de vertido de hidrocarburos en México. Este vertido fue consecuencia de una explosión el día 3 de junio de 1979, ocasionando un derrame que tardó nueve meses en ser controlado por PEMEX. La cantidad de petróleo vertido al Golfo de México fue de aproximadamente 3.3 millones de barriles, llegando incluso hasta las costas de Texas en EE.UU (Miglierini, 2010).

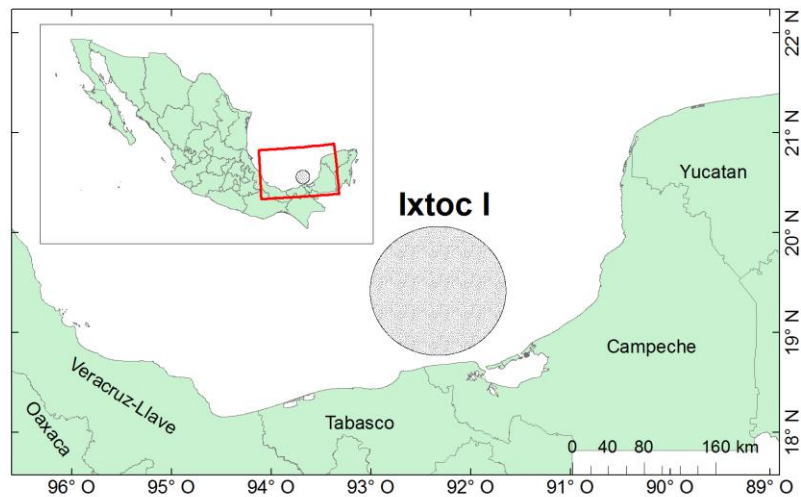


Figura 1. Localización del derrame provocado por la plataforma petrolera Ixtoc I.

Si bien los errores humanos pueden generar vertidos como fue el caso de Deepwater Horizon en 2010, los fenómenos extremos, que por definición son de baja frecuencia (e.g. tsunamis y huracanes), son capaces de exceder los límites de diseño estructural de la infraestructura marítima. Por el poder energético de estos eventos, se pueden causar daños serios a las estructuras diseñadas para extracción, transporte y producción de hidrocarburos. El más reciente caso fue el provocado por el huracán Patricia el 23 de octubre de 2015, donde debido a las condiciones hidrodinámicas de esta tormenta encalló la embarcación el Llanitos en la cercanía de las costas del municipio de Manzanillo (Figura 7). Esto provocó un derrame de cerca de 425 mil litros de combustible (Figura 2). El conjunto de acciones para controlar el derrame comenzaron 14 días posteriores al evento (Méndez, 2016).

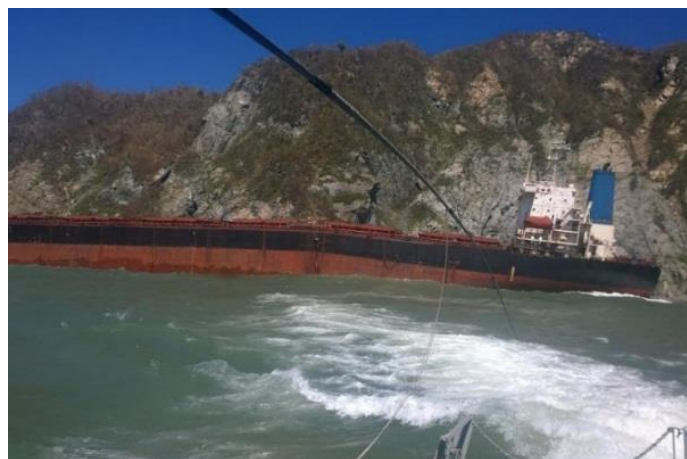


Figura 2. Buque el Llanitos encallado durante el evento del huracán Patricia. Obtenida de Méndez (2016).

Aunado a los desastres que pueden surgir al operar en los mares y océanos, también está latente la posibilidad de fallo de una estructura costera que transporte hidrocarburos, como es el caso de buques y ductos instalados cerca de la costa. Tal es el caso del fallo en los ductos que abastecían de combustóleo a la central termoeléctrica de Manzanillo, Colima en agosto de 2016 (Figura 7). El vertido de hidrocarburos alcanzó el área de manglar y posteriormente la Laguna de Cuyutlán como se observa en la Figura 3 (Rincón, 2016). Estas áreas de mangle en la laguna de Cuyutlán se localizan en los bordes del cuerpo de agua con el territorio y tienen una gran importancia medioambiental. Además, la laguna es utilizada por las comunidades locales para la pesca artesanal.



Figura 3. Contaminación por hidrocarburos en la zona de mangle en las cercanías de la Laguna de Cuyutlán. Obtenida de Rincón (2016).

1.1.3 Huracanes en México

La importancia en el estudio de los huracanes recae en su poder destructivo, caracterizado por fuertes ráfagas de viento, lluvias intensas, sobre elevación del mar, y el oleaje extremo cuya combinación representa un peligro para la infraestructura costera. De esto la importancia de incorporar estudios de estos eventos para la planeación, diseño y construcción en la zona costera. Los ciclones tropicales están caracterizados con base en la escala Saffir-Simpson (Tabla 2).

Tabla 2. Escala Saffir-Simpson obtenido de: CENAPRED (2017)

Fenómeno	Velocidad (km/h)	Estimación de los posibles daños
Depresión tropical	<63	Daños mínimos locales.
Tormenta Tropical	63 – 118	Daños mínimos.
Huracán Categoría 1	118 – 152	Daños mínimos. Daños a la vegetación y muelles, así como algunas inundaciones en carreteras y caminos.
Huracán Categoría 2	153 – 178	Daños moderados. Daños mínimos a muelles y daños no estructurales a casas y edificios, derribos de vegetación, así como inundaciones en carreteras costeras.
Huracán Categoría 3	179 – 209	Daños extensos. Destrucción parcial de casas y edificios, edificaciones costeras y muelles, derribo de árboles altos, anuncios dañados y llevados por el viento y marejadas inundan zonas costeras.
Huracán Categoría 4	210 - 250	Daños extremos. Colapso parcial de techos y paredes en casas, daños considerables a edificaciones costeras y muelles, derribo de vegetación y señales, así como erosión parcial de playas e inundación en terrenos planos abajo de 3 m.
Huracán Categoría 5	>250	Daños catastróficos. Derrumbe total de techos y paredes en casas, las construcciones ligeras son llevadas por el viento, daños extremos a muelles, vegetación arrasada por el viento, erosión total de las playas e inundación en terrenos planos provocando daños graves hasta 460 m de la costa.

A continuación se presenta una cronología de los huracanes más destructivos que han tocado tierra en las costas mexicanas hasta el año 2014 (MAC, 2015).

Janet (1955): Este es el primer huracán categoría 5 del que se tiene registro en México y uno de los más intensos en la cuenca del océano Atlántico. Este huracán dejó cientos de muertos y pérdidas millonarias al tocar tierra el 27 de septiembre de 1955 al sur de Quintana Roo.

Huracán sin nombre (1959): Huracán categoría 5 con vientos de hasta 260 km/h que tocó tierra el 29 de octubre 1959 cerca de Manzanillo, dejó más de 1,000 muertos a su paso.

Beulah (1967): Huracán categoría 5 que impactó la parte norte de Quintana Roo el 16 de septiembre de 1967, tomó fuerza en el Océano Atlántico, se reportaron pérdidas humanas de al menos 40 personas.

Liza (1976): Huracán de categoría 4 que tocó tierra en la península de Baja California el 30 de septiembre de 1976, dejando más de 1,000 muertos y decenas de miles de damnificados.

Gilberto (1988): Huracán categoría 5, tocó tierra el 14 de septiembre de 1988 en isla Cozumel, destruyó gran parte de Cancún y regresó al Atlántico para volver a impactar la región noroeste de México. Provocó una devastadora inundación al desbordar el cauce de un río seco en la ciudad de Monterrey. Las pérdidas humanas se estiman en 200 vidas.

Paulina (1997): Huracán que alcanzó la categoría 4, tocó tierra la tarde del 8 de octubre de 1997 en el estado de Oaxaca, horas después se dirigió al estado de Guerrero, su precipitación extrema causó un deslave en la ciudad Acapulco que provocó la muerte de cientos de personas.

Wilma (2005): Es catalogado como el huracán más errático y destructivo que ha golpeado México, tocó tierra como categoría 4 el 21 de octubre de 2005 en Cozumel y arrasó por más de 48 horas Cancún y la Riviera Maya. A su paso dejó aproximadamente 8 muertos y más de 10,000 USD en pérdidas en la zona hotelera.

Manuel e Ingrid (2014): Fue un caso especial ya que ambos arribaron de manera simultánea. El primero entró como tormenta tropical en la costa del Pacífico y el segundo como huracán en el Golfo de México a mediados de septiembre del 2014, dejando 157 muertos y al menos 1.7 millones de damnificados.

Patricia (2015): El mayor huracán registrado en el hemisferio norte desde que se tienen registros de la intensidad de los huracanes en el Pacífico Nororiental (Bravo, 2015). Alcanzó vientos máximos sostenidos de 325 km/h con rachas de 400 km/h, por lo que, se clasificó como categoría 5.

De los eventos de huracán antes mencionados, parte de ellos tocaron tierra en el Océano Pacífico, región donde se encuentra la zona costera de Manzanillo, Colima utilizada como área de estudio en esta investigación.

1.1.4 Huracanes trascendentales en el Estado de Colima

La zona costera en el Estado de Colima, en particular la perteneciente al municipio de Manzanillo, se ha visto seriamente afectada por tormentas y huracanes. Debido a su importancia portuaria, turística, y energética, es preciso nombrar los fenómenos que a su paso ocasionaron los mayores daños estructurales, económicos y sociales en esta zona.

Huracán Greg (1999). Las fuertes intensas lluvias alcanzaron aproximadamente 260 mm en Manzanillo, ocasionando daños en las vías de comunicación, viviendas, e infraestructura vial. La zona más afectada fue el Fraccionamiento del Valle de las Garzas, al inundarse los 5 Barrios que lo componen. También hubo pérdidas agrícolas y destrozos en la infraestructura carretera (Castillo, 1999).

Huracán Lane (2006). Los daños que provocó Lane a su paso por las costas de Manzanillo se valoraron en aproximadamente en 30 millones de pesos. Los sectores que se vieron más afectados por el paso del fenómeno meteorológico fueron el carretero y el agrícola. Según la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) Lane dejó un promedio de 113 milímetros de lluvia acumulada (Martínez y Aranda, 2006).

Huracán Jova (2011). El huracán Jova tocó Manzanillo con intensas lluvias ocasionando inundaciones severas. Los cauces de los arroyos Santiago, Salahua y Valle de las Garzas se vieron sobre excedidos, generando desborde e inundación. El efecto erosivo de la corriente del arroyo Santiago dañó el puente de acceso a esta localidad. En la localidad de Salahua, el rebase del caudal cubrió el Boulevard Miguel de la Madrid, cortando el flujo vehicular hacia la localidad contigua de Santiago (González, 2011). En los Barrios 4 y 5 del Valle de las Garzas el desborde ocasionó daños a la vialidad principal.

Huracán Patricia (2015). El huracán Patricia, categoría 5 tocó tierra el 23 de octubre de 2015 a las 17:40 hrs en las bahías de Tenacatita, Cuastecomate y Navidad, Jalisco, sin causar víctimas mortales ni personas lesionadas en Colima. La lluvia y vientos sólo dejaron daños menores en la costa. A Patricia le fue asignada la categoría 5, el máximo nivel en la escala Saffir-Simpson, pero ha roto todas las calificaciones debido a la intensidad de sus vientos que alcanzaron la magnitud de 325 km/h (Magallón y Ramírez, 2015) y su rápida intensificación.

Las trayectorias de los fenómenos antes mencionados se presentan en el anexo 1.

1.1.5 Impacto de Tsunamis en México

En México no se tiene conocimiento de ocurrencia histórica de tsunamis tan destructivos como los de Chile de 1960 y 2010, Alaska de 1964, Sumatra en 2004 o el de Japón en 2011. Sin embargo, no se puede omitir la posibilidad de ocurrencia ante la vulnerabilidad sísmica de la región oeste de México. Esta zona se localiza frente a la zona de subducción de las placas tectónicas Norteamericana, Rivera y Cocos (Figura 4). Esto hace que gran parte del litoral perteneciente al Pacífico mexicano se encuentre vulnerable ante la formación e impacto de tsunamis. De hecho, existen evidencias de que un gran terremoto en 1787 con una magnitud aproximada de 8.4 grados en la escala de Richter generó un tsunami que destruyó la población de San Sixto, Oaxaca (Núñez-Cornú, Ortiz, y Sánchez 2008).

De acuerdo a la DIGAOHM (2017) existen registros de que en los últimos 250 años han arribado 60 tsunamis a las costas del Pacífico Mexicano. Los tsunamis generados lejos de las costas mexicanas, alcanzaron en promedio una altura de 2.5 m. En cambio, los que se generaron en zonas cercanas tuvieron alturas entre 5 y 10 m, provocando pérdidas humanas y destrucción a las comunidades costeras. Los tsunamis del último siglo que causaron mayor cantidad de daños en los asentamientos costeros, fueron los ocurridos en 1932 y 1995. Ambos afectaron principalmente las costas de Colima y Jalisco. La Tabla 3 muestra los tsunamis que han impactado las costas mexicanas y algunos de los valores máximos de elevación que alcanzaron.

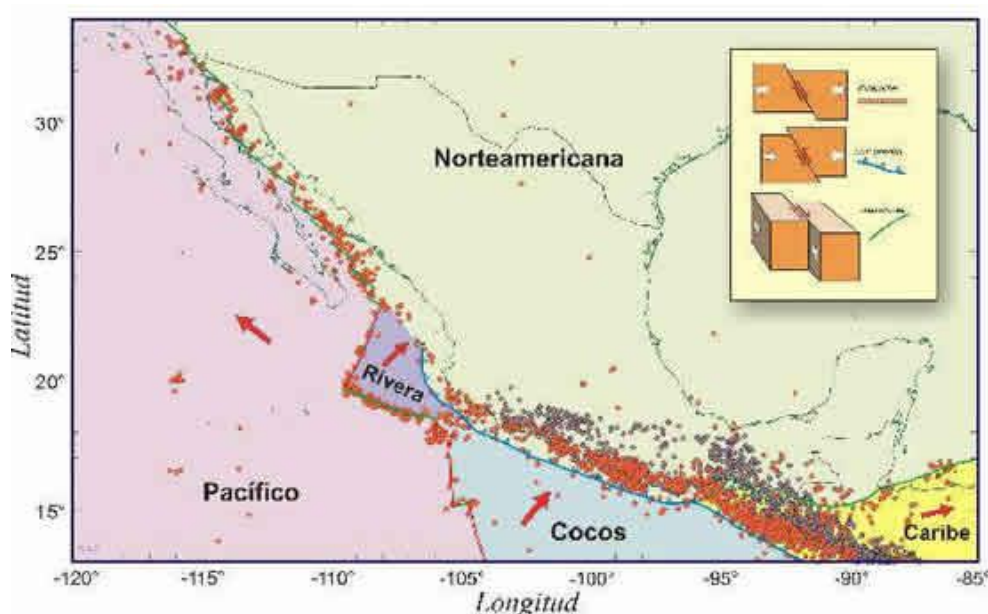


Figura 4. Mapa de placas tectónicas que cubren la zona de estudio, donde los puntos naranjas representan los sismos históricos. Obtenido de SGM (2017).

Tabla 3. Tsunamis históricos que han impactado las costas del pacifico mexicano. Obtenido de NOAA (2017):

Date						Tsunami Cause				Tsunami Source Location				Parameter
						Val	Code	Earthquake Mag	Volcano					Max. Height (m)
Year	Mo	Dy	Hr	Mn	Sec					Country	Name	Latitude	Longitude	
1875		2	23			1	1	*		MEXICO	S. MEXICO	20	-105	
1932	6	3	10	36	50	4	1	8.1		MEXICO	CENTRAL MEXICO	19.5	-104.25	10
1932	6	18	10	12	16.1	4	1	7.9		MEXICO	CENTRAL MEXICO	19.452	-103.632	1
1932	6	22	12	59	24	4	1	7		MEXICO	CENTRAL MEXICO	19	-104.5	10
1934	11	30	2	5	10	4	1	7		MEXICO	MEXICO	18.5	-105.5	0.11
1973	1	30	21	1	12.5	4	1	7.5		MEXICO	S. MEXICO	18.48	-103	1.13
1985	9	19	13	17	47.3	4	1	8		MEXICO	MEXICO	18.19	-102.533	3
1995	10	9	15	35	53.9	4	1	8		MEXICO	S. MEXICO	19.055	-104.205	11
2003	1	22	2	6	34.6	4	1	7.5		MEXICO	S. MEXICO	18.77	-104.104	0.61

Tsunamis en las Costas de Colima

Como se mencionó anteriormente, entre los registro de tsunamis ocurridos en las costas del Pacífico, existen dos tsunamis relativamente recientes que provocaron daños considerables a las comunidades costeras del estado de Colima y las próximas de Jalisco. El que ocasionó mayores daños fue el tsunami ocurrido en 1932, que ha sido estudiado por Corona y Ramírez-Herrera (2012), Okal y Borrero (2011), Ramírez-Herrera et al. (2014), estos estudios intentan reproducir el comportamiento de este tsunami con base en información histórico etnográfica. A pesar de que los estudios se consideran cualitativos por la falta de datos respecto a la falla sísmica y máxima elevación de agua, lograron observar patrones que demuestran que el comportamiento de este tsunami es característico de deslizamiento submarino. Esto contrasta con el evento ocurrido en 1995 y estudiado ampliamente debido a que se tienen datos registrados de este fenómeno. Por ejemplo, Carbajal y Galicia-Pérez (2002) realizaron un estudio de resonancia de Helmholtz en la laguna de Cuyutlán, donde se determina las máximas corrientes inducidas por el tsunami se produjeron en los canales de entrada al puerto y la laguna. Ortiz et al. (2000) reprodujo la onda de tsunami determinada por las características de la falla sísmica proviendo de datos más acertados de localización de la falla y magnitud. Más recientemente, Trejo et al. (2015) realizaron la modelación de la onda para reproducir con mayor exactitud las alturas registradas in situ con base en relatos de testigos presenciales. A continuación se hace una breve reseña histórica de los daños y las características históricas que los singularizaron.

Tsunami de 1932. El 22 de junio de 1932 se presentó una intensa actividad sísmica con magnitud de 7.0° (en la escala de Richter), que generaron 3 tsunamis (Tabla 3) que impactaron las costas del municipio de Armería (Figura 5), siendo la onda más catastrófica, la conocida como “la ola verde”. La comunidad de Cuyutlán resultó afectada por el suceso, ya que en ese tiempo sus playas eran un centro vacacional muy importante. Las alturas de

ola estimadas según testigos sobrevivientes fue de aproximadamente 12 metros. Debido a la subsidencia co-sísmica, el mar se desplazó entre 400 y 500 metros mar afuera, antes de la llegada del frente del tsunami. El epicentro del sismo se localizó a una distancia de 1,500 km en el Pacífico (Pacheco, 2005).



Figura 5. Efectos del tsunami en las playas de Cuyutlán, Colima. Obtenido de El Universal (2011).

Tsunami de 1995. Este tsunami impacto las costas de Colima y Jalisco aproximadamente a las 9:30 de la mañana, hora local, del 9 de octubre de 1995, afectando principalmente al pueblo de la Manzanilla (Figura 6). El tsunami lo generó un sismo de aproximadamente 8.0° en escala Richter. El evento ocurrió durante la marea viva con un nivel aproximado de 0.70 m, lo que propició condiciones desfavorables a la comunidad ante el desastre (Huesca, 2005). Con base en los registros medidos por la estación mareográfica la onda alcanzó una altura de 2 m.



Figura 6. Nivel del mar alcanzado en la Costa Alegre Jalisco después del tsunami de 1995. Obtenido de López (2008).

1.2 Área de estudio

El área de estudio se acota al borde costero de la ciudad de Manzanillo, Colima, que se encuentra localizada en las coordenadas geográficas $19^{\circ}03'08''\text{N}$ y $104^{\circ}18'57''\text{O}$, donde se ubican las bahías de Manzanillo y Santiago, la zona portuaria y la Laguna de Cuyutlán. Zonas que posicionadas en zona sísmica y con un clima tropical lluvioso de junio a octubre se encuentran expuestas a la ocurrencia de tsunamis y ciclones tropicales. La marea astronómica es del tipo semidiurna predominantemente mixta. Ambas bahías se caracterizan por ser utilizadas con fines turísticos, mientras que las zonas aledañas al puerto interior y la laguna se desarrollan actividades relacionadas a la transferencia de mercancía, descarga de graneles sólidos, graneles líquidos, labores industriales y de pesca. La Figura 7 muestra la ubicación de la zona de estudio y las localidades mencionadas.

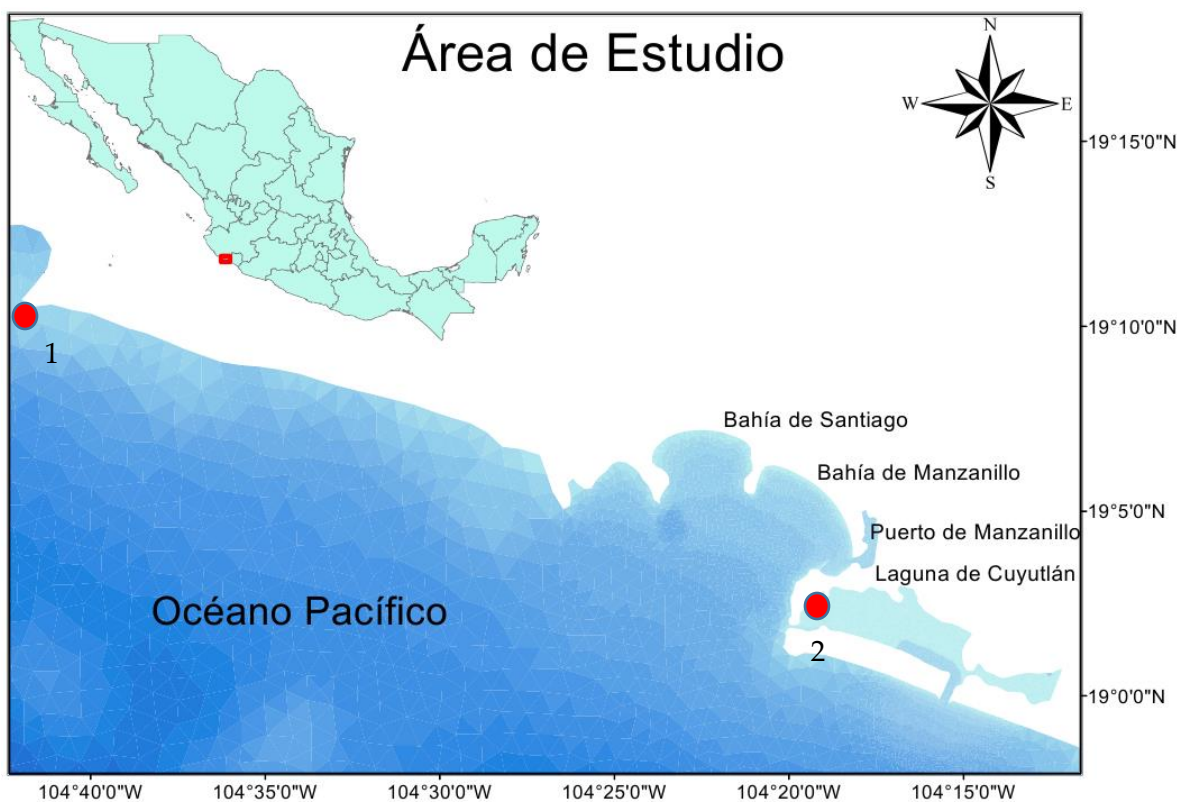


Figura 7. Mapa de la ubicación del área de estudio. El punto rojo 1 representa la posición del derrame del buque el Llanitos encallado por Patricia y el punto 2 el derrame por ductos dañados en la Laguna de Cuyutlán.

1.3 Planteamiento del Problema

La contaminación en los océanos debido a los vertidos de hidrocarburos es un problema que causa impactos ambientales adversos. La importancia de estudiar estos incidentes radica en poder pronosticar la trayectoria de los contaminantes a partir del clima marítimo existente durante y posterior a un evento de derrame, con el fin de implementar medidas de contingencia eficaces. Sin embargo, en algunas regiones existe la posibilidad del impacto de un evento extremo durante una contingencia de derrame de hidrocarburos. Esto modifica la hidrodinámica con respecto a las condiciones predominantes de la zona, complicando la implementación de medidas de contingencia. En este trabajo se estudian diferentes escenarios de vertido de hidrocarburos bajo condiciones hidrodinámicas asociadas a marea de tormenta o tsunami, con el fin de entender los patrones en las corrientes desarrollados durante el impacto de estos fenómenos.

1.4 Objetivos

Objetivo General

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento del vertido de hidrocarburos en las costas de Manzanillo, Colima, México, bajo condiciones hidrodinámicas asociadas a eventos extremos de tsunamis y huracanes.

Objetivos Específicos

- 1.- Realizar un análisis de armónicos a la información registrada por el mareógrafo portuario en el área de estudio, para la reconstrucción histórica de las mareas astronómicas.
- 2.- Calibrar y validar el modelo hidrodinámico bajo la acción de los agentes forzantes de marea astronómica, tsunami de 1995 y huracán Patricia de 2015.
- 3.- Analizar la hidrodinámica generada por los fenómenos de tsunami y huracán.
- 4.- Modelar la dispersión de hidrocarburos considerando diferentes escenarios de eventos extremos.

1.5 Justificación

La zona costera de Manzanillo se encuentra en un área estratégica de gran importancia para el país. Esta zona cuenta con la infraestructura energética que abastece el área de la costa centro-pacífico del país. Además se halla una planta termoeléctrica que suministra energía a la región, una terminal de gas licuado, y una terminal de descarga de hidrocarburos de PEMEX. Asimismo, en la zona se encuentra el puerto de Manzanillo, uno de los principales puertos de transferencia de mercancía consolidada del país. Debido al gran número de operaciones marítimas que se llevan a cabo en el sector, y con base en antecedentes incidentales de derrame de contaminantes en la zona, es de gran relevancia estudiar la trayectoria de los hidrocarburos al ser vertidos en el medio marino. Ante todos los factores antes mencionados se plantea el estudio de derrames bajo condiciones hidrodinámicas provocadas por eventos extremos de tsunami y ciclón tropical, para ayudar a la elaboración de planes de contingencia que ayuden a reducir el impacto ambiental que pudiese provocar por derrames durante y la presencia de estos fenómenos.

Capítulo 2

Fundamento teórico y modelado numérico

En este capítulo se explican las bases técnicas utilizadas para describir el comportamiento hidrodinámico de los fenómenos de marea astronómica, tsunami y marea de tormenta. También se exponen los fundamentos del fenómeno de dispersión en aguas oceánicas para un mejor entendimiento de la relación entre la hidrodinámica marina y la dispersión de hidrocarburos. Para comprender mejor los fenómenos antes mencionados, en la sección 2.1 se explican las ecuaciones fundamentales que describen el comportamiento de los fluidos bajo la acción de fuerzas y con ello explicar procesos donde el fluido se encuentra en movimiento, esta dinámica marina es muy compleja al igual que las ecuaciones que describen dicho proceso y por ello es necesario recurrir a la simulación de modelos numéricos (2.2) para entender fenómenos como, la generación y propagación de ondas de marea (2.3), tsunamis (2.4) así como los métodos para su análisis y consecuencias en la línea de costa. En la sección 2.5 se exponen los mecanismos de formación y terminología utilizada para la descripción de los huracanes, también se explica la generación del fenómeno de la marea de tormenta, que al igual que los fenómenos antes mencionados inducen corrientes oceánicas (2.6) que tienen la propiedad de ser dinámicas y forman parte esencial en el proceso de transporte de hidrocarburos (2.7)

2.1 Ecuaciones de la hidrodinámica

Esta sección presenta las ecuaciones básicas que describen el comportamiento dinámico de los fluidos, utilizadas para el cálculo de las variables hidrodinámicas importantes como lo son la presión, la elevación de la superficie libre, y las componentes de la velocidad en el fluido. El desarrollo básico de estas ecuaciones las podemos encontrar en libros comúnmente utilizados en oceanografía (Fenton 2013; Massel 1999; Pugh y Woodworth 2014; Stewart 2006).

Ecuación de la hidrostática

La presión hidrostática (P_z) en el sistema coordenado cartesiano (Figura 8) es la aplicación de la fuerza dada por el peso del fluido en un punto dado a una profundidad z en la columna de agua, sumado a la presión atmosférica (P_A) que actúa sobre la superficie del agua. La presión hidrostática está dada por la siguiente expresión:

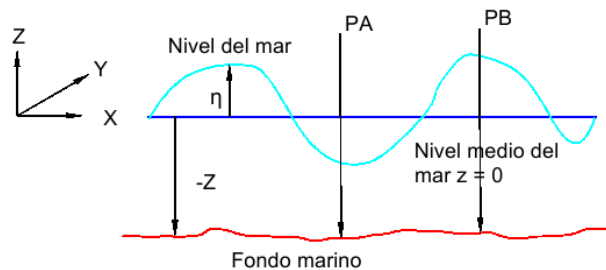


Figura 8. Sistema cartesiano de coordenadas utilizado para las ecuaciones de hidrodinámica. Obtenido de Pugh y Woodworth (2014)

$$\Delta P = P_B - P_A - \rho g(z - \Delta\eta) - \rho g z = \rho g \Delta\eta \quad (2.1.1)$$

donde ρ es la densidad del agua (se asume constante), y η es el desplazamiento de la superficie libre del agua con respecto al nivel medio del mar, y g es la aceleración gravitatoria. El signo negativo indica que z incrementa en dirección hacia arriba; como z es negativo bajo el nivel medio del mar, la formula representa correctamente el incremento de la presión con la profundidad.

Ecuación de conservación de masa

La suposición principal para la derivación de la ecuación de conservación de masa es que la densidad del agua se mantiene constante en el tiempo, lo que significa que la masa y el volumen del agua son parámetros proporcionales. En el caso habitual en el que la

profundidad del agua D es grande en comparación con el desplazamiento del nivel medio del mar, la conservación de la masa se expresa como:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Du) + \frac{\partial}{\partial y}(Dv) = 0 \quad (2.1.2)$$

donde u y v representan las componentes horizontales de la corriente en dirección x e y promediadas en profundidad.

Considerando un fondo plano, entonces podemos asumir que la profundidad también es constante, simplificando la ecuación:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + D \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.1.3)$$

Estas ecuaciones también son conocidas como ecuaciones de continuidad y representan el flujo neto de agua entrando o saliendo en un área de balance con respecto al cambio en la superficie del nivel del agua.

Ecuaciones de conservación de momentum lineal

Las ecuaciones que describen el comportamiento de los fluidos bajo la acción de fuerzas nacen de la segunda ley de Newton. Estas relacionan la masa del fluido y sus componentes de aceleración, con todas las fuerzas que actúan sobre éste (Figura 9), siendo dos las ecuaciones fundamentales de conservación de momentum en la horizontal:

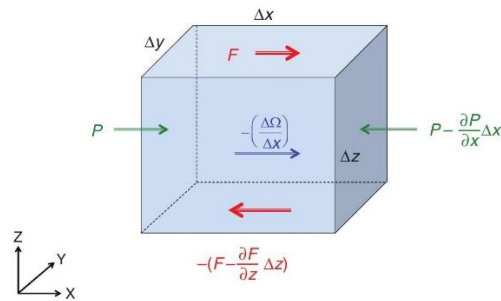


Figura 9. Acción de las fuerzas sobre un elemento finito de agua. Obtenido de Pugh y Woodworth (2014)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -\frac{\partial \Omega}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial F}{\partial z} \right) \quad (2.1.4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -\frac{\partial \Omega}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial G}{\partial z} \right) \quad (2.1.5)$$

En el lado izquierdo de la ecuación tenemos los cambios temporales, advectivos $\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}\right)$ y el efecto producido por la fuerza de Coriolis ($f_v; f_u$). Mientras que el lado derecho de la ecuación representa los gradientes de nivel por marea $\left(\frac{\partial \Omega}{\partial x}; \frac{\partial \Omega}{\partial y}\right)$, de presión barotrópica $\left(\frac{\partial P}{\partial y}; \frac{\partial P}{\partial y}\right)$ y los esfuerzos cortantes que actúan sobre la superficie $\left(\frac{\partial F}{\partial z}; \frac{\partial G}{\partial z}\right)$.

Para la derivación de estas ecuaciones tenemos que considerar un elemento de volumen macroscópico cartesiano, con dimensiones $\Delta x, \Delta y, \Delta z$. Éste se encuentra fijo sobre la superficie de rotación del planeta, considerando el equilibrio de fuerzas en la dirección x , referenciado de oeste a este, y la dirección y que parte de sur a norte. Cada una de estas direcciones desarrolla una ecuación independiente.

Esquemáticamente las fuerzas y aceleraciones en el eje x se muestran en la Figura 9. Las tres fuerzas que podemos encontrar en estas ecuaciones son: la fuerza de marea, las fuerza de presión P , y las fuerza de esfuerzo cortante F que actúa en la superficie superior e inferior.

En este marco de referencia euleriano se requieren de condiciones adicionales $\left(v \frac{\partial u}{\partial y}\right)$ y $\left(u \frac{\partial v}{\partial x}\right)$ que permiten una aceleración necesaria en el agua, dentro del marco de referencia para un instante de tiempo; y la velocidad apropiada para un instante subsecuente a su cambio de posición por advección.

Estas ecuaciones nacen de la aplicación de la segunda ley de Newton, también conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes en la literatura que enmarca la mecánica de fluidos y a las que en este caso se les agrega la fuerza provocada por la rotación del planeta $-f\bar{u}$, conocido como el término de Coriolis ($f = 2\omega \sin \phi$). Esta fuerza provoca que las corrientes geostróficas sean desviadas o que recurven hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el hemisferio sur.

Las ecuaciones, (2.1.4) y (2.1.5) junto con la ecuación de continuidad (2.1.3) y la ecuación hidrostática (2.1.1) se utilizan para describir la respuesta física de los océanos debido a la aplicación de las fuerzas de marea y meteorológicas. Con estas ecuaciones se han desarrollado modelos numéricos para entender la hidrodinámica de los océanos.

2.2 Modelos utilizados para la simulación de los fenómenos estudiados

Como contexto inicial se define que un modelo matemático o numérico tiene como objetivo describir un fenómeno de la naturaleza dentro de un formalismo matemático. Los modelos se construyen para identificar y calcular cantidades de propiedades físicas, que van a ser estudiadas en cierto periodo de tiempo, así como las relaciones matemáticas que existen entre éstas.

En este trabajo se utilizaron cuatro modelos necesarios para reproducir las condiciones hidrodinámicas y la dispersión generada por los eventos estudiados. El primero fue el modelo hidrodinámico MIKE 21 HD para reproducir las condiciones generadas por los fenómenos de marea astronómica, tsunami y huracán. Para los dos últimos se crearon condiciones iniciales con base en modelos matemáticos analíticos y con ello forzar el modelo de hidrodinámica marina. Por último se usó el modelo MIKE ECOLab/OS de advección - difusión en el medio marino.

Modelo MIKE 21 HD FM

El MIKE 21 HD es un sistema de modelación numérica para la simulación de los niveles de superficie libre y corrientes de agua en estuarios, bahías y zonas costeras. Éste simula flujos bidimensionales inestables en fluidos verticalmente homogéneos y se ha aplicado en un gran número de estudios (DHI, 2016). Este modelo hidrodinámico está basado en la solución numérica en dos dimensiones de las ecuaciones de Reynolds Navier-Stokes promediadas, sujetas a las suposiciones de Boussinesq y de presión hidrostática. El modelo soluciona las ecuaciones de continuidad, momentum lineal, temperatura, salinidad y densidad y es cerrado por un esquema de cerradura turbulenta. La densidad sólo depende de la temperatura y salinidad. El método de solución para estas variables es el elemento finito, construyendo elementos triangulares o rectangulares.

Se presentan las ecuaciones de gobierno en coordenadas cartesianas.

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (2.2.1)$$

Ecuación de momentum para las componentes horizontales x, y respectivamente:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} & \quad (2.2.2) \\ &= f\bar{v}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}\right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_sS \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} & \quad (2.2.3) \\ &= -f\bar{u}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial P_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} \\ &- \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_sS \end{aligned}$$

La solución numérica de las ecuaciones de Reynolds-Navier-Stokes promediadas en profundidad se realiza asumiendo un fluido incompresible en dos dimensiones sujeto a la hipótesis de Boussinesq y de la presión hidrostática, con la solución de estas ecuaciones se describe el comportamiento de la hidrodinámica de los fenómenos estudiados. Así, el modelo consiste en la conservación de masa, momento, temperatura, salinidad y densidad y se cierra mediante un esquema de cerradura turbulento. La densidad no depende de la presión, sino sólo de la temperatura y la salinidad (DHI 2013).

En el caso de la modelación de tsunamis, el modelo MIKE 21 HD es forzado con la superficie libre de la deformación generada por el sismo. Por otro lado, para la modelación de marea de tormenta por ciclones tropicales, el modelo es forzado por los vientos del ciclón tropical. En ambos casos se puede forzar en las fronteras con nivel del mar en base a las mareas astronómicas, si el objetivo es incorporar las mareas. Para esto es necesario que previamente se realice una calibración y validación del MIKE 21 HD para propagar la onda de marea astronómica, caso en el cual solamente se fuerza el modelo con las mareas astronómicas en las fronteras del modelo.

2.3 Mareas astronómicas

La marea astronómica es el cambio periódico del nivel del mar producido por la atracción gravitacional de la Luna, el Sol y otros cuerpos astronómicos. Aquí se presenta brevemente su clasificación, las fuerzas que las producen, y los métodos de análisis. Se sugiere consultar la bibliografía citada (Fenton 2013; Massel 1999; Pugh y Woodworth 2014; Stewart 2006) para profundizar en estos temas.

Las mareas se clasifican como:

- Diurnas: Cuando presentan una pleamar y una bajamar en un día lunar.
- Semidiurnas: Cuando se presentan dos pleamares y dos bajamares en un día lunar.
- Mixtas: Ocasionalmente presentan características diurnas o semidiurnas.

Fuerzas generadoras

Para explicar las causas que provocan las ondas de marea es necesario citar la primera ley de Newton, que afirma, que un cuerpo continúa a una velocidad uniforme en línea recta a menos que actúe sobre él una fuerza, en nuestro caso, este cuerpo es el océano. Refiriendo a la segunda ley que relaciona la velocidad de cambio en el movimiento o impulso y magnitud de la fuerza impuesta, nace la siguiente expresión:

$$Aceleración = \frac{fuerza}{masa}$$

donde la aceleración y la fuerza tienen la misma dirección.

Para que esta ley sea válida, el movimiento tiene que observarse en un sistema externo de coordenadas espaciales, no sobre la Tierra en rotación. Entonces, se deduce que el movimiento parece describir una línea recta para un observador en la Tierra en rotación, pero que sigue una trayectoria curvada cuando se observa desde el espacio, esto es producido por una fuerza terrestre adicional, aunque esta fuerza no es inmediatamente aparente.

La ley de gravitación de Newton establece que cualquier partícula de masa m_1 atrae a otro artículo de masa m_2 , con una fuerza que depende del producto de las masas y la inversa del cuadrado de su distancia, r :

$$Fuerza = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (2.3.1)$$

donde G es la constante de gravitación universal cuyo valor depende de las unidades de masa elegidas, longitud y fuerza. En la ecuación G tiene unidades $M^{-1}L^3T^{-2}$, y un valor numérico de $6,67 \times 10^{-11} \frac{m^3}{kgs}$ en unidades del sistema internacional de unidades (MKS).

Modelo dinámico de mareas

Al comparar los registros de mareas con la teoría de la marea de equilibrio desarrollada por Newton, existen marcadas discrepancias. De acuerdo con la teoría del equilibrio, la amplitud de las mareas semidiurnas llegarían a su valor máximo de unos 10.5 m en latitudes ecuatoriales, contrario a las mareas observadas que tienen un orden de medida que va de 0 a 1 m. Asimismo, cuando las mareas se propagan en aguas poco profundas de la plataforma continental, sus alturas aumentan. También la amplitud de la marea incrementa cuando se adentran en las bahías. Como ejemplo, en zonas de la plataforma de la Bahía de Fundy en la costa Atlántica de Canadá, el canal de Bristol en Gales, y la costa de Kimberley en el sector norte de Australia Occidental, donde la amplitud de las mareas en primavera puede superar los 10 mts.

Las principales razones para que se den estas discrepancias entre la predicción y la medición son:

- La profundidad media de los océanos es mucho menor que la profundidad de 20 km que se requiere para permitir que estas ondas largas viajen libres en el ecuador.
- La tierra no está uniformemente cubierta de agua, la presencia de continentes evita que las ondas de marea se propaguen alrededor de la tierra, y la complejidad de la batimetría del océano complica la propagación.
- Las cuencas de los océanos tienen sus propios modos naturales de oscilación, con diversas frecuencias resonantes. Estas interactúan con las oscilaciones de las mareas para dar un conjunto muy complicado de resonancias y amplificaciones locales.
- La teoría del equilibrio sugiere que el agua responde inmediatamente a las fuerzas gravitacionales y de atracción. Pero el agua tiene inercia y esta satisface una ecuación diferencial, por ende no podemos decir que la amplitud de la marea responde inmediatamente a la fuerza.
- El movimiento del agua se ve afectada por la rotación de la tierra a través de la fuerza de Coriolis.

Pierre-Simon Laplace, a finales del siglo XVIII, desarrolló la teoría dinámica de las mareas, que supera algunos de los problemas de la teoría del equilibrio, pero todavía postula una

cáscara esférica de océano homogénea. Poco a poco otras personas mejoraron la teoría mediante el desarrollo de diversos aspectos. Uno de los más interesantes fue la de Lord Kelvin, que resolvió el problema de la propagación de la marea en una bahía rectangular, descubriendo la presencia de puntos donde el nivel de la marea no cambia, hoy en día se conocen como puntos anfidrómicos.

Análisis de constituyentes armónicos

Una clasificación práctica de la naturaleza de la marea en un punto particular lo puede caracterizar el número de forma F . Este es la relación de la suma de las amplitudes de los componentes principales y expresan la forma relativamente importante de las contribuciones diurnas. La ecuación para el número de forma es la siguiente:

$$F = \frac{O_1 + K_1}{M_2 + S_2} \quad (2.3.2)$$

donde O_1 es el componente principal lunar diurno, K_1 es el constituyente lunar-solar, M_2 es el constituyente principal lunar semidiurno, y S_2 es el constituyente semidiurno solar principal. Tomando referencia el número de forma, las mareas se pueden dividir más o menos como:

$$F = 0 - 0.25 \text{ semidiurna}$$

$$F = 0.25 - 1.5 \text{ Mixta, predominantemente semidiurna}$$

$$F = 1.50 - 3 \text{ Mixta, predominantemente diurna}$$

$$F > 3 \text{ Diurna}$$

En la Figura 10 se presentan varios tipos de marea registrados en diferentes lugares del mundo.

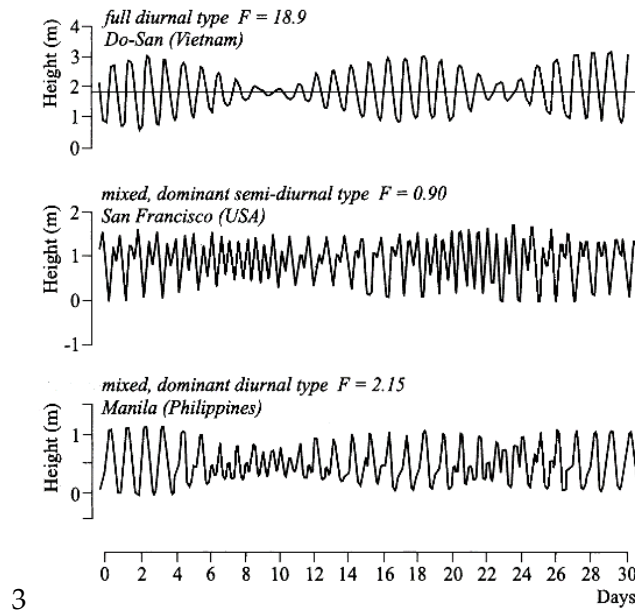


Figura 10. Ejemplos de varios tipos de marea con diferente valor de número de forma. Obtenido de Massel (1999)

Con base en las ecuaciones de marea de Laplace y considerando la disipación de energía debido a la fricción de fondo, se han desarrollado modelos numéricos sofisticados para predecir las mareas alrededor de la tierra. Estos modelos tienen un error cuadrático medio de 3 cm en aguas profundas del océano, y 10.5 cm en aguas someras. Para su uso práctico estos modelos no son los suficientemente precisos, por lo que es común utilizar observaciones de mareas en lugares de interés durante largos períodos de tiempo. Utilizando estas mediciones se pueden predecir posteriormente las mareas por medio del análisis de armónicos. Dicho análisis de datos obtiene los componentes armónicos principales utilizando un análisis de Fourier. Esto significa que la serie temporal puede ser representada por una serie trigonométrica infinita de la forma:

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N c_n \cos(w_n t + \phi_n) \quad (2.3.3)$$

donde el c_n son los coeficientes de Fourier, w_n son las frecuencias en radianes, $w_n = 2\pi/T$, donde T es el período de la n -ésima contribución, y ϕ_n es un desplazamiento de fase.

La palabra armónico en este contexto significa generalmente frecuencias constituyentes que representan fracciones de la principal. De hecho, los componentes se calculan mediante el uso de transformadas de Fourier discretas de una serie de tiempo.

En la Tabla 4 se muestran los principales componentes armónicos que componen una señal de marea, a consecuencia principalmente de la luna y el sol.

Tabla 4. Componentes principales de la marea.

Componente de marea	Periodo (horas)	Descripción	Naturaleza
*M2	12.42	Principal lunar	Semidiurna
*S2	12.00	Principal solar	Semidiurna
*N2	12.66	Gran elíptica lunar	Semidiurna
*K2	11.97	Lunar-solar	Semidiurna
*K1	23.93	Lunar-solar diurno	Diurna
*O1	25.82	Principal diurno lunar	Diurna
*P1	24.07	Principal diurno solar	Diurna
*Q1	26.87	Gran elíptica lunar	Diurna
*MF	327.90	Fuertemente lunar	Largo plazo
*MM	661.30	Lunar mensual	Largo plazo
*SSA	4383.00	Solar semi-anual	Largo plazo
*M4	6.21		Compuesta
*MS4	6.10		Compuesta

Los niveles del mar son comúnmente referenciados al nivel de la marea en la costa los como se muestra en la Figura 11. Estos niveles previstos a partir de los componentes armónicos pueden diferir de los niveles observados. Estas diferencias son generalmente una consecuencia del empuje sobre el agua que pueden tener los vientos prolongados y de alta intensidad, así como presiones barométricas altas o bajas, lo cual se conoce como marea de tormenta. Las corrientes costeras también pueden producir gradientes locales en la superficie del mar al interactuar con la topografía.

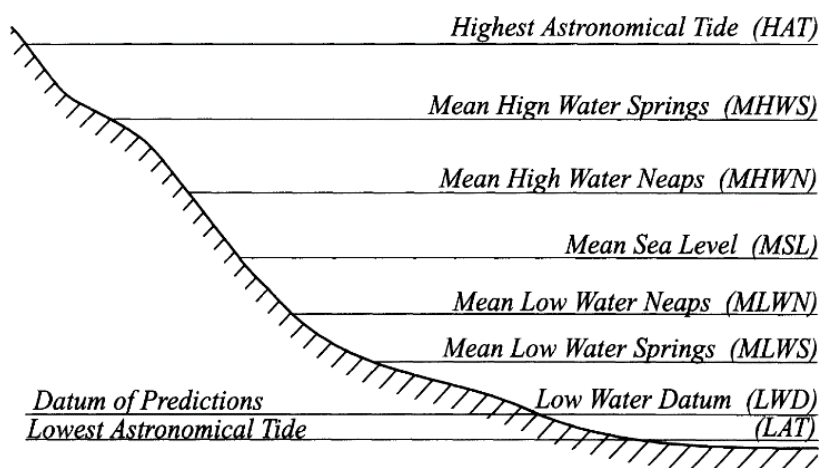


Figura 11. Definiciones características de los niveles de marea. Obtenido de Massel (1999)

2.4 Tsunamis

Macdonel et al. (2011) definen los tsunamis como ondas largas que se generan por diversos mecanismos entre los que se encuentran los desprendimientos submarinos de tierra, terremotos marítimos y explosiones volcánicas, como la ocurrida en la isla de Krakatoa en 1888. Sin embargo no todos los eventos sísmicos producirán tsunamis. Para el caso de actividad sísmica, Leet (1948) presentó un catálogo de 15,000 entre los cuales solo 124 generaron ondas de tsunami. A continuación se describen los procesos de generación y propagación de tsunamis, así como sus efectos en la zona costera.

Generación

Los tsunamis son principalmente generados por terremotos submarinos en aguas profundas, a lo largo de zonas de subducción encontradas en regiones de falla a lo largo de los límites entre las placas tectónicas (Mangor et al. 2017). El potencial de generación de tsunamis está relacionado directamente con la magnitud del sismo y la profundidad focal. Las ondas de tsunami pueden recorrer grandes distancias a través de los océanos.

Los tsunamis ligados a sismos con profundidades focales mayores a 80 km no resultan perceptibles (Macdonel et al. 2011). Así, Fenton (2013) refiere que los terremotos submarinos tienen que ser mayores a 6.5 grados (escala de Richter) y presentarse con profundidades focales menores a 50 km para ser potencialmente generadores de tsunamis. Se ha observado que los tsunamis relevantes ocurren cuando se cumplen las siguientes expresiones (Macdonel et al. 2011):

$$M > 6.3 + 0.01H \quad (2.4.1)$$

donde M es la magnitud del sismo y H es la profundidad focal en km.

Se ha observado también que los tsunamis son desastrosos cuando se cumple la siguiente condición:

$$M > 7.75 + 0.008H \quad (2.4.2)$$

La Tabla 5 muestra la magnitud, energía y sobreelevación de los tsunamis en el Japón.

Tabla 5. Magnitud, energía y elevación de máxima de run-up de tsunamis en el Japón. Obtenido de Lida (1963)

Clasificación de la magnitud del tsunami	Energía del Tsunami		Máxima elevación de run-up	
(m)	ergs	(ft-lb)	(metres)	(ft)
5	25.6 x 10 ²³	18.9 x 10 ¹⁶	>32	>105
4.5	12.8	9.4	24-32	79-105
4	6.4	4.7	16-24	52.5-79
3.5	3.2	2.4	12-16	39.2-52.5
3	1.6	1.2	8-12	26.2-39.2
2.5	0.8	0.59	6-8	19.7-26.2
2	0.4	0.29	4-6	13.1-19.7
1.5	0.2	0.15	3-4	9.9-13.1
1.0	0.1	0.074	2-3	6.6-9.9
0.5	0.05	0.037	1.5-2	4.9-6.6
0	0.025	0.018	1-1.5	3.2-4.9
-0.5	0.0125	0.0092	0.75-1	2.5-3.2
-1.0	0.006	0.0044	0.50-0.75	1.6-2.5
-1.5	0.003	0.0022	0.30-0.50	1.0-1.6
-2	0.0015	0.0011	<0.30	<1.0

Propagación

Debido a que un tsunami es una onda larga propagándose en aguas someras, para calcular su celeridad se utiliza la siguiente ecuación:

$$C = \sqrt{gd} \quad (2.4.3)$$

La altura de onda de un tsunami en aguas profundas es del orden de 0.5 m de altura y su longitud de onda puede ser de varias decenas de kilómetros, por lo cual su detección es difícil. Los periodos de onda pueden ir de 5 a 40 min, correspondiendo a una longitud de 70 a 500 km. Las celeridades promedio de los tsunamis varían entre 155 y 220 m/s. El orden de esta celeridad de onda es muy alto, y por tanto complica la toma de decisiones para evitar escenarios catastróficos en la zona costera. El tiempo que se tiene para prevenir desastres se limita a escasos minutos (Fenton 2013).

Efectos en la zona costera

Los principales efectos causados por una onda de tsunami en la zona costera están directamente relacionados a la gran cantidad de energía que esta onda transporta. Al ser una onda considerablemente larga y tomando en cuenta la ley de conservación de la energía en el proceso de propagación, esta onda tiene el poder de penetrar grandes distancias hacia continente. Esto se produce físicamente debido a que al ser una ola de considerable longitud, al disminuir la profundidad reacciona incrementando su altura y disminuyendo su celeridad. Al impactar la línea de costa se disipa el 60% de la energía de la onda y el 40% restante es reflejado al océano (Fenton 2013).

Modelo de tsunami

El modelo MIKE 21 Earthquake incorpora las formulas empíricas propuestas por Papazachos et al. (2004), Wells y Coppersmith (1994), que relacionan los parámetros de la falla (área de la falla, su longitud y el deslizamiento) con la magnitud del sismo. Estas formulaciones asumen que al deformar el fondo marino se genera un desplazamiento en la columna de agua que forma una onda de características y energéticas considerables.

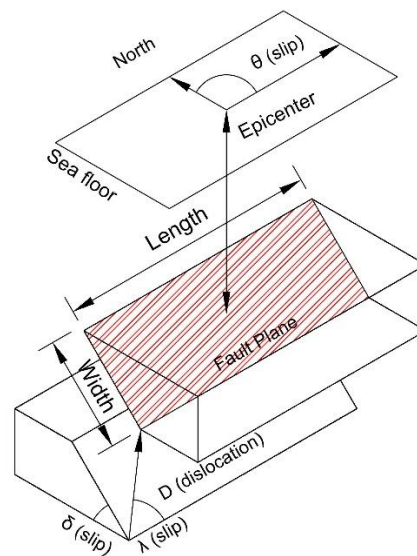


Figura 12. Parámetros geométricos de la falla sísmica. Obtenido de Kongko y Schlurmann (2011)

La Figura 12 muestra la esquematización de una falla sísmica, donde se presentan los parámetros geométricos que la caracterizan y en donde δ es el ángulo de descenso de una placa respecto a la otra, λ es el ángulo de dislocación entre ambas placas, θ es el ángulo

horizontal de contacto entre ambas placas y H es la profundidad a la que se encuentra la falla en km.

La relación respectiva al desplazamiento u (cm) respecto a la magnitud del sismo está dada por la siguiente expresión (Papazachos et al., 2004):

$$\text{Log}(u) = 0.64M - 2.78 \quad 6.7 \leq M \leq 9.2 \quad (2.4.4)$$

donde M es la magnitud del sismo.

2.5 Huracanes

En esta sección se abordarán los aspectos referentes a los mecanismos de formación de los huracanes y las condiciones meteorológicas que se tienen que presentar para la evolución del fenómeno. La información presentada en esta parte del trabajo se obtuvo de Cap (2006).

Terminología y fundamentos

En meteorología se utiliza el término ciclón para un campo de baja presión que exhibe una circulación de aire giratoria. En una zona de baja presión, el viento circula en sentido contrario a las agujas del reloj en el hemisferio norte y en sentido horario en el hemisferio sur. En contraste, un área de vientos con una presión más alta en el entorno se denomina anticiclón. La circulación de un anticiclón es en sentido horario en el hemisferio norte y en sentido contrario a las agujas del reloj en el hemisferio sur.

Los ciclones están conectados con el mal tiempo y la lluvia. Se clasifican como ciclones tropicales, también llamados tifones o huracanes, y ciclones extratropicales. Estos ciclones son generados por el transporte de aire cálido y húmedo desde la superficie del mar hacia alturas considerables, que al condensar inyecta calor extra, este transporte de calor es perpendicular a la velocidad del flujo del viento. La fuerza de Coriolis, proporciona la una componente de giro al movimiento, que se vuelve relevante en latitudes mayores de unos 5 grados. Los ciclones tropicales son causados por sistemas de baja presión y la fuerza de Coriolis. El Laboratorio de Oceanografía y Meteorología Atlántica de los Estados Unidos define algunos factores capaces de formar un huracán tropical:

1. La temperatura del agua en la superficie del océano debe ser de por lo menos 26.5°C (debajo de este valor la atmósfera es muy estable).
2. Existencia de una inestabilidad convectiva al enfriarse la atmósfera de la zona. Una tormenta permite liberación de calor almacenado en el agua del océano.
3. Una distancia mínima $> 500 \text{ km}$ desde el ecuador, para que la fuerza de Coriolis sea suficientemente fuerte.

Además de las condiciones antes mencionadas se ha observado que perturbaciones de ondas convectivas llamadas "ondas del este", influyen en la formación de estos fenómenos.

Los principales efectos de los huracanes al impactar la costa son las inundaciones, generadas por la gran cantidad de precipitación que transportan y el aumento del nivel del mar debido al empuje de las fuertes ráfagas de viento. Este aumento del nivel del mar se conoce como marea de tormenta y se define a continuación.

Marea de tormenta

Macdonel et al. (2011) y Weisse y von Storch (2010) definen al fenómeno de marea de tormenta como un disturbio atmosférico que se caracteriza por la incidencia de vientos fuertes sobre la superficie del océano, y que generan un incremento en el nivel del mar. Si aunado a esto existe un decremento de la presión atmosférica, como en el caso de los ciclones tropicales, este incremento del nivel del mar es mayor debido al fenómeno de barómetro invertido. A una tormenta que se haya originado en el trópico se le llama comúnmente tormenta tropical, mientras que aquella que es el resultado del choque de un frente frío y uno caliente se llama tormenta extratropical. Ambos tipos de tormenta pueden producir sobreelevaciones anormales del nivel del agua en las partes poco profundas y cercanas al perímetro de cuerpos agua (mar, lagos, estuarios, etc.) debido al empuje de los vientos. En la Figura 13 se presenta la distribución del nivel mar producida por los vientos de un huracán cuando arriba a continente.

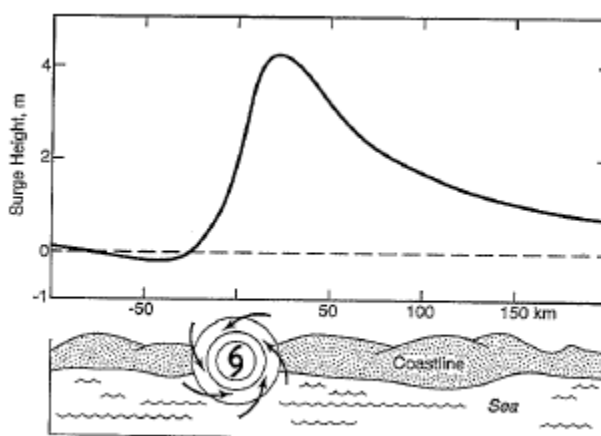


Figura 13. Distribución hipotética de la marea de tormenta cuando un huracán toca tierra. La mayor altura en la marea de tormenta se da a la derecha del campo de vientos debido a la dirección de éstos hacia tierra.
 Obtenido de Liu (2004)

Las ecuaciones hidrodinámicas que describen el fenómeno de marea de tormenta son la ecuación de continuidad (2.1.3) y las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento (2.1.4) y (2.1.5). Existen algunos métodos simplificados para aproximar la sobreelevación producida por estas perturbaciones atmosféricas, tomando en cuenta dos parámetros importantes del fenómeno: el gradiente de presiones y el campo de velocidades de viento. Como primera aproximación se puede estimar el efecto del viento sobre la superficie del océano considerando el arrastre que éste provoca y tomando en cuenta la profundidad de

la columna de agua (Weisse y von Storch 2010), para llegar a una expresión que ignora los efectos causados por la rotación del planeta. Dicha expresión representa un balance entre el gradiente de presiones y el arrastre del viento en la superficie de la siguiente manera:

$$\frac{\delta\eta}{\delta x} = \frac{\rho_a C_d u^2}{\rho D g} \quad (2.5.1)$$

donde η representa la altura de la superficie del mar, x es la distancia horizontal sobre la cual actúa el viento (fetch); ρ_a y ρ son la densidad del aire y densidad del agua de mar respectivamente; D es la profundidad del agua, C_d es el coeficiente de arrastre y g es la aceleración de la gravedad.

Esta ecuación provee una simple estimación de la marea de tormenta cuando el viento sopla sobre regiones extensas en aguas someras (Pugh y Woodworth 2014).

Modelo paramétrico de ciclones tropicales

Los modelos paramétricos para la generación de campos de viento y presión atmosférica de ciclones tropicales han sido desarrollados por Depperman (1947); Holland (1980); Young y Sobey (1981); Jelesnianski et al. (1992), Emanuel (2004); Emanuel y Rotunno (2011)). Estos modelos analíticos han sido evaluados utilizando datos medidos por boyas en Ruiz-Salcines (2013), estableciendo que el modelo paramétrico de Emanuel y Rotunno (2011) describe ligeramente mejor el comportamiento de los vientos de un huracán.

El modelo paramétrico de Emanuel y Rotunno (2011) considera un número de Richardson constante $\left(\frac{gh}{u^2}\right)$, el cual es un número adimensional que relaciona el flujo de salida de la tormenta, la energía potencial y la energía cinética de un fluido, siendo g la aceleración de la gravedad, h la longitud vertical y u la velocidad del fluido que determina la variación de la temperatura de salida en la parte superior del vórtice de vientos. Determinando que la variación del flujo de salida en términos del momento angular puede estimar la estructura radial de la tormenta fuera del R_{mw} , obteniendo la ecuación del perfil de velocidades del viento:

$$V_r = \frac{2r \left(R_{mw} V_{max} + \frac{1}{2} f R_{mw}^2 \right)}{R_{mw}^2 + r^2} - \frac{fr}{2} \quad (2.5.2)$$

donde:

V_{max} es la velocidad máxima en el campo de vientos, R_{mw} es el radio máximo de viento, r es la distancia radial de un punto considerado al ojo del huracán y f es el parámetro de Coriolis ($f = 2\Omega \sin \phi$, donde $\Omega = 7.292 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$, es la velocidad angular considerada por un día (23h 56' 4.1'') y por último ϕ corresponde a la latitud.

El campo de presión del ciclón tropical se calcula utilizando la teoría de Holland (1980) con base a una distribución radial empírica de la presión del evento y la suposición que el gradiente del viento se encuentra en equilibrio y modifica el campo de presiones aplicando una parábola rectangular al perfil de presiones. Así la presión P en un radio r queda descrito por la siguiente ecuación:

$$p(r) = p_c + (p_n - p_c) e^{\left(-\frac{R_{mw}}{r}\right)^B} \quad (2.5.3)$$

donde:

p_c es la presión en el centro del huracán, p_n es la presión fuera de la influencia del huracán, R_{mw} es el radio máximo de viento, r es la distancia radial desde un punto considerado al ojo del huracán y B es el parámetro de forma de Holland.

2.6 Corrientes

Las corrientes oceánicas son generadas por diversos mecanismos, como pueden ser los gradientes de presión, gradientes de densidad o la perturbación del viento sobre la superficie. En este trabajo se abordará el análisis de las corrientes marinas generadas por el cambio periódico del nivel mar debido a las mareas. Las teorías aquí presentadas se pueden encontrar en Pugh y Woodworth (2014).

Generación de corrientes en el ambiente marino

De acuerdo con Mangor et al. (2017) las mayores magnitudes de corriente inducidas por marea se presentan cerca de la costa, en los estrechos, estuarios y bocanas de lagunas costeras. Estas corrientes interactúan con la morfología de la zona dando gran importancia al factor de fricción con el fondo. La morfología de la zona costera y del fondo marino obliga a las corrientes a fluir paralelas a la orilla o a través de estrechos, estuarios o bocanas, donde pueden alcanzar mayores velocidades. En los estrechos costeros, las velocidades de flujo extremas que presentan las corrientes de marea se encuentran en el rango de 2.5 m/s a 3.0 m/s y en casos particulares hasta 5 m/s (Seymour Narrows, Canadá). Sin embargo, estas corrientes sólo ocurren en ambientes con un fondo marino rocoso. En zonas arenosas como las bocanas (canal de entrada que conecta lagunas costeras con el mar) en las costas con islas de barrera, las corrientes son sólo intensificadas por los flujos generados por las mareas.

Las corrientes generadas por la marea de tormenta son resultado del efecto combinado del esfuerzo cortante del viento y los gradientes de presión barométrica que actúan sobre la superficie del mar y que a su vez interactúan con las corrientes de marea. Este tipo de corriente es similar a las corrientes de marea, donde la velocidad de la corriente vertical se ajusta a una distribución logarítmica en la columna de agua. Las mayores magnitudes en las corrientes se producen a grandes profundidades (e.g. lejos de la costa) y en áreas confinadas (e.g. estrechos y canales). Mientras que las corrientes de marea son de naturaleza oscilatoria regular con períodos típicos alrededor de 6 y 12 horas.

Análisis de las Corrientes por marea

El análisis de las corrientes se realiza tomando en cuenta las componentes vectoriales de las corrientes, con dirección de referencia el Este-Oeste para la componente horizontal y Norte-Sur para la vertical, siendo positivas al Este y al Norte. Las ecuaciones que nos permiten la descomposición vectorial en ambas componentes son:

$$U \cos(\omega t - g_u) \quad (2.6.1)$$

$$V \cos(\omega t - g_v) \quad (2.6.2)$$

donde ω es la frecuencia angular en radianes, t representa el tiempo, y g_u y g_v es la fase de la componente horizontal y vertical respectivamente.

En el sistema cartesiano de coordenadas (Figura 14), el ángulo que describe la dirección de una corriente es:

$$\theta = \text{atan} \frac{V \cos(\omega t - g_v)}{U \cos(\omega t - g_u)} \quad (2.6.3)$$

Y la magnitud de la velocidad de la corriente se determina con la siguiente expresión:

$$q = [U^2 \cos^2(\omega t - g_u) + V^2 \cos^2(\omega t - g_v)]^{1/2} \quad (2.6.4)$$

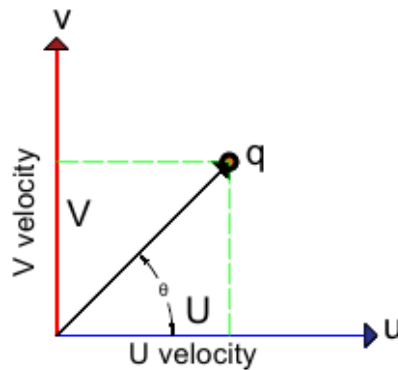


Figura 14. Descomposición vectorial de las corrientes en coordenadas cartesianas. Adaptado de Pugh y Woodworth (2014)

2.7 Derrame de hidrocarburos

Para entender el comportamiento de los vertidos de hidrocarburos es necesario explicar los mecanismos que describen y gobiernan el comportamiento de sustancias cuando son vertidas en el océano. Para ello es necesario abordar la Ley de Fick que describe con bastante precisión la dispersión de una sustancia en un medio fluido, considerando la sustancia a nivel macroscópico como zonas de distinta concentración. Esta ecuación relaciona el flujo de materia y el gradiente de concentración c de la siguiente manera:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(cu)}{\partial x} + \frac{\partial(cv)}{\partial y} + \frac{\partial(cw)}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) \quad (2.7.1)$$

Donde c es la concentración y D es el coeficiente de difusión. La derivación de esta expresión se hace a partir de un volumen de fluido macroscópico como se presenta en la Figura 15.

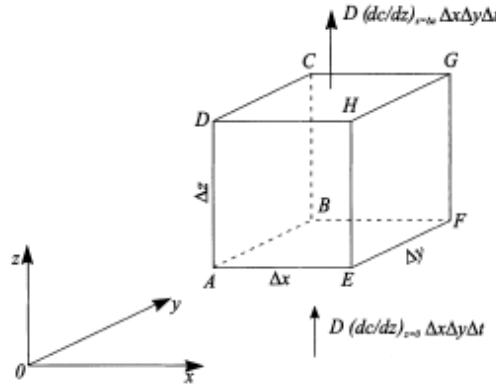


Figura 15. Ecuación de Fick en un volumen de fluido tridimensional. Obtenido de Massel (1999)

Los términos del lado izquierdo de la ecuación 2.6.1 describen la tasa de cambio debido a los mecanismos advectivos, que representan las partículas desplazadas por las corrientes. Los términos del lado derecho describen el proceso debido a la difusión molecular que propaga las partículas.

Sin embargo, los flujos en el océano generalmente son turbulentos, por lo tanto, es necesario definir un coeficiente de difusión turbulenta. Esto se hace utilizando la descomposición de Reynolds de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} c &= \bar{c} + c' \\ u &= \bar{u} + u', \quad v = \bar{v} + v', \quad w = \bar{w} + w' \end{aligned} \quad (2.7.2)$$

Que representan la concentración instantánea, y las componentes de velocidad instantánea como la suma de sus valores medios y componentes fluctuantes.

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = D \nabla^2 \bar{c} - \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'c'}) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{v'c'}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{w'c'}) \quad (2.7.3)$$

Y utilizando la aproximación de Boussinesq

$$\overline{u'c'} = -K_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}; \overline{v'c'} = -K_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y}; \overline{w'c'} = -K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \quad (2.7.4)$$

donde K_x , K_y y K_z son coeficientes de difusión turbulenta en el eje x , y , y z respectivamente. También son conocidos como coeficientes de difusión de remolino. En contraste con el coeficiente de difusión molecular los coeficientes K_x , K_y y K_z no son propiedades físicas del fluido, sino describen el estado y la escala del movimiento.

Usando la ecuación (2.7.4) en (2.7.3) tenemos:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) \quad (2.7.5)$$

Si se asume que los coeficientes son constantes, entonces:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = K_x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + K_y \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + K_z \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) \quad (2.7.6)$$

Esta expresión nos representa la eficiencia de la difusión turbulenta de cualquier sustancia o partículas suspendidas en el océano. Y la razón entre los mecanismos de advección y difusión de estas partículas (Figura 16. Proporción en que los procesos de advección y difusión contribuyen al transporte de las partículas. Adaptado de Massel (1999) Figura 16), está determinado por el número de Péclet.

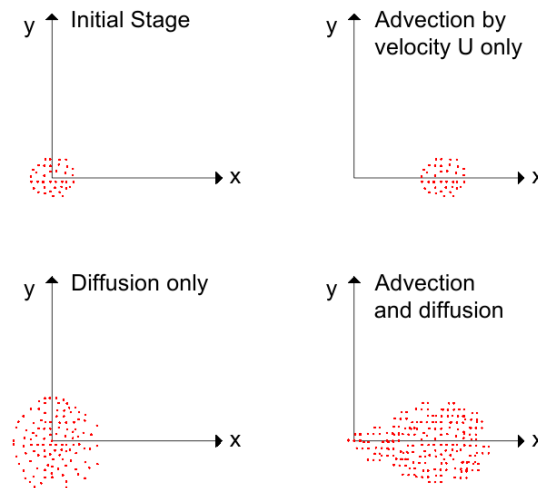


Figura 16. Proporción en que los procesos de advección y difusión contribuyen al transporte de las partículas. Adaptado de Massel (1999)

El número adimensional de Péclet está determinado por la siguiente expresión:

$$P_e = \frac{UL}{D} \quad (2.7.7)$$

donde U es la velocidad característica del fluido, L es la longitud característica del flujo y D es el coeficiente de difusión.

Modelo MIKE ECO Lab/OS

El modelo MIKE ECO Lab/OS simula la degradación y el movimiento del hidrocarburo en el océano utilizando partículas discretas en un campo de flujo y con base en una aproximación lagrangiana. El modelo también puede simular la difusión del petróleo disuelto utilizando cálculos de advección-dispersión, que se basan en una aproximación Euleriana del proceso. La Figura 17 muestra los procesos físico-químicos que ocurren a los hidrocarburos en el mar y que son simulados por el modelo.

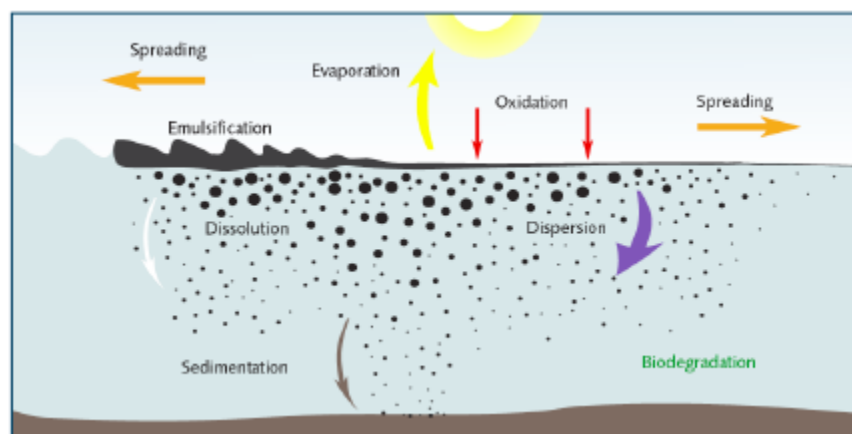


Figura 17. Procesos físico-químicos ocurridos en un derrame de petróleo al océano (DHI 2015).

El MIKE ECO Lab/OS se basa en la hidrodinámica generada por el modelo de circulación MIKE 21 HD y se especifica una ecuación diferencial ordinaria para cada variable de estado. Estas ecuaciones diferenciales ordinarias sintetizan los procesos involucrados para una variable de estado específica, incluyendo la cantidad de materia vertida, temperatura y densidad del agua de mar. Si un proceso afecta a más de una variable de estado, o las variables de estado se afectan entre sí, se dice que las ecuaciones diferenciales están acopladas, como es el caso de la temperatura y la densidad del agua. Los procesos siempre describen la velocidad a la cual cambia una propiedad. En este contexto, las constantes son valores iguales respecto al tiempo, y los forzamientos son valores que pueden variar en el tiempo, tal que:

$$P_c = \frac{dc}{dt} = \sum_{i=1}^n \text{proceso}_i \quad (2.7.8)$$

donde

c es la concentración de la variable de estado

n es el número de procesos

La dinámica de las variables de estado advectivas en ECO Lab puede ser expresadas por un conjunto de ecuaciones de transporte, las cuales en forma no conservativa pueden ser escritas como:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + S_c + P_c \quad (2.7.9)$$

donde

c es la concentración de la variable de estado, u, v, w son los componentes de la velocidad del flujo, D_x, D_y, D_z son los coeficientes de dispersión, S_c representa la existencia de fuentes o sumideros, P_c es un proceso estudiado.

Las variables de estado pueden acoplarse de forma lineal o no lineal entre sí, a través del término de la fuente P_c , con lo cual la ecuación de transporte se puede reescribir como:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = AD_c + P_c \quad (2.7.10)$$

Tratando el término de advección-dispersión AD_c como constante en cada paso de tiempo, se obtiene una solución aproximada.

El conjunto acoplado de ecuaciones diferenciales ordinarias definidas en ECO Lab se resuelve integrando la tasa de cambio debido a los procesos y la advección-dispersión.

$$c(t + \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} (P_c(t) + AD_c) + \partial t \quad (2.7.11)$$

La contribución de la advección-dispersión es aproximada por:

$$AD_c = \frac{C^* + (t + \Delta t) - c^n(t)}{\Delta t} \quad (2.7.12)$$

Donde la concentración media c^* transporta la variable de estado de ECO Lab como sustancia conservativa durante el periodo de tiempo Δt .

La principal ventaja de esta aproximación explícita de solución es que resuelve los problemas de acoplamiento y no linealidad resultantes de la fuente compleja de ECO Lab P_c , por lo que el ECO Lab y la advección-dispersión del proceso pueden tratarse por separado.

Capítulo 3 Materiales y métodos

En esta sección se presentan los materiales y procedimientos técnicos aplicados para el cumplimiento de los objetivos. Estos procedimientos se muestran en la Figura 18, que de manera general explica la realización de las siguientes tareas: recopilación de información del sitio de estudio, generación del dominio computacional, simulación de la hidrodinámica marina inducida por los fenómenos estudiados, validación de los resultados de las simulaciones, planeación y ejecución de los escenarios de dispersión en diferente fase de la marea astronómica.

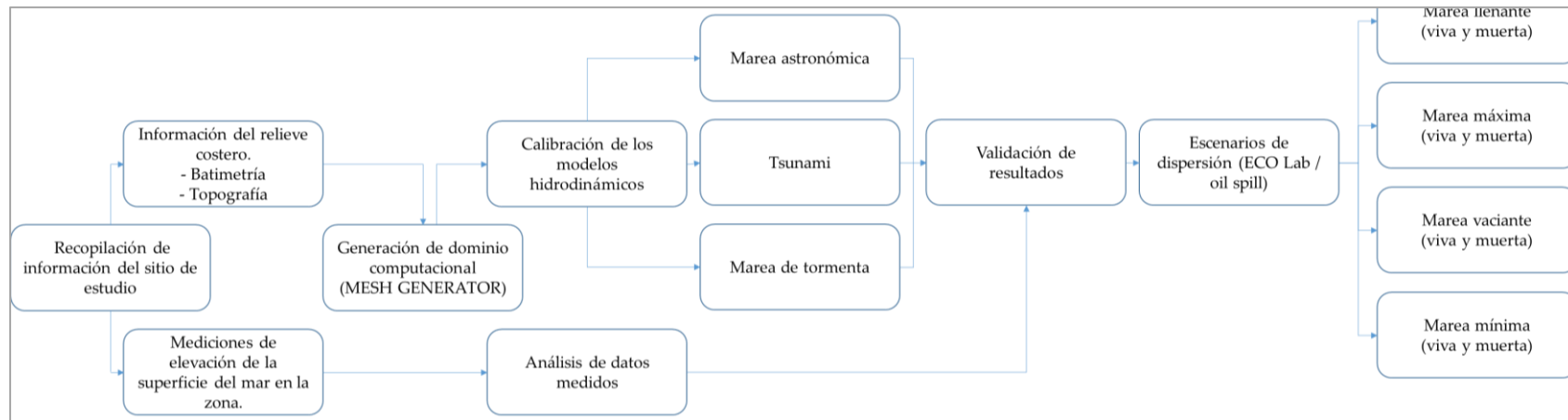


Figura 18. Diagrama de flujo del marco metodológico de este trabajo.

3.1 Recopilación de información del sitio de estudio

Información del relieve costero

La información topo-batimétrica de la zona de estudio. Esta información se obtuvo de las bases de datos ETOPO 1 (Amante y Eakins 2009), CEM 3.0 (INEGI 2015) y de datos medidos en las zonas someras de la costa.

Mediciones de elevación de superficie del mar en la zona

Los datos para la validación de todos los modelos hidrodinámicos fueron obtenidos de la estación mareográfica ubicada dentro de la zona portuaria de Manzanillo (Figura 19), que pertenece al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). De dicha estación se obtuvo la serie histórica del nivel del mar (Figura 20) a partir de la cual se calcularon los componentes armónicos (Pawlowicz et al., 2002) para la construcción de la marea astronómica durante el periodo de simulación.



Figura 19. Ubicación del mareógrafo estación Manzanillo. Obtenido de Google Earth.

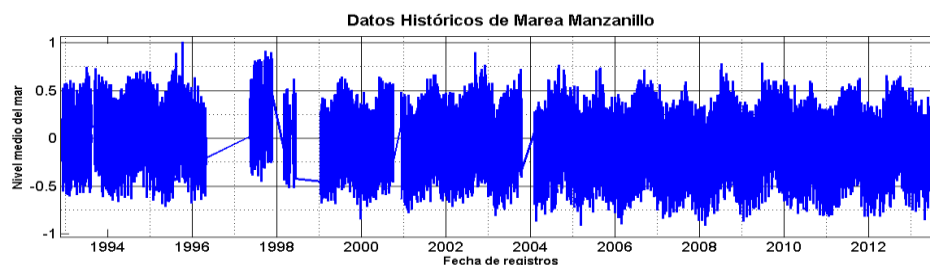


Figura 20. Datos históricos registrados por el mareógrafo hasta el año 2013.

Los datos de marea astronómica se restaron a la serie temporal del registro de elevación del mareógrafo para la obtener la marea residual, que contenía la onda de tsunami y la marea de tormenta del huracán Patricia. Los resultados de la propagación de la onda en el modelo de tsunami se compararon con la marea residual observada cuando impactó el tsunami. Para el caso del huracán Patricia la validación del modelo se realizó con base en los datos observados de elevación del nivel del mar, considerando dos escenarios de modelación. El primer caso se realizó simulando de manera conjunta la marea astronómica y el forzamiento del campo de vientos y presión como lo sugiere Wolf (1978). El segundo caso se hizo modelando el efecto sólo del huracán sobre la superficie del océano. Los resultados se compararon con los datos históricos de sobreelevación durante el evento y con la marea residual respectivamente.

3.2 Generación del dominio computacional

Para realizar la modelación numérica de los fenómenos es necesario contar con un dominio computacional donde se encuentre la información topo-batimétrica de la zona de estudio. Los datos se discretizaron geoméricamente para la creación de una malla computacional del tipo no estructurada (compuesta por elementos triangulares) con una resolución espacial variable. Esta malla se creó utilizando el módulo Mesh Generator de MIKE Zero y la resolución espacial se definió por la distancia aproximada entre los vértices del elemento triangular, iniciando en 5 km en la zona offshore del dominio y reduciéndose en dirección a la costa hasta un mínimo de 50 m. La resolución más fina se localizó en la zona portuaria de estudio y la laguna de Cuyutlán. La malla de cálculo se presenta en la Figura 21 y sus límites espaciales en la Tabla 6.

Tabla 6. Coordenadas geográficas de los límites del dominio computacional.

Frontera	Punto inicial		Punto final	
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud
Norte	20.39900	-105.71620	20.39489	-106.99130
Oeste	20.39489	-106.99130	17.00950	-107.01860
Sur	17.00950	-107.01860	17.00489	-102.45220
Este	17.00489	-102.45220	18.00069	-102.45850

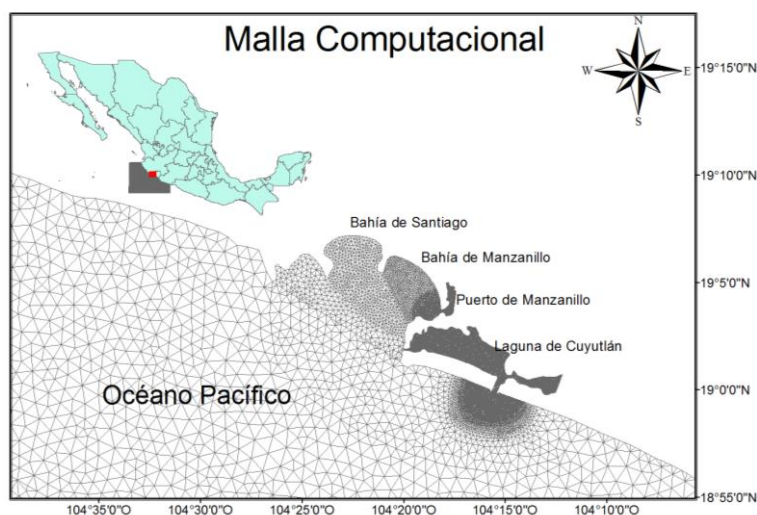


Figura 21. Malla computacional con alta resolución espacial en el puerto de Manzanillo y Laguna de Cuyutlán.

La interpolación de la batimetría en la malla de cálculo se llevó a cabo por el método proximal de Sibson (1981), obteniendo datos batimétricos en cada elemento de la malla. En la Figura 22 se muestra el dominio computacional utilizado con la información batimétrica

Efecto de Condiciones Hidrodinámicas Extremas en Escenarios de Dispersión de

del Pacífico mexicano, donde se incluye la información de la zona costera de Manzanillo con mayor detalle. En este dominio se llevó a cabo la simulación hidráulica de los tres fenómenos estudiados.

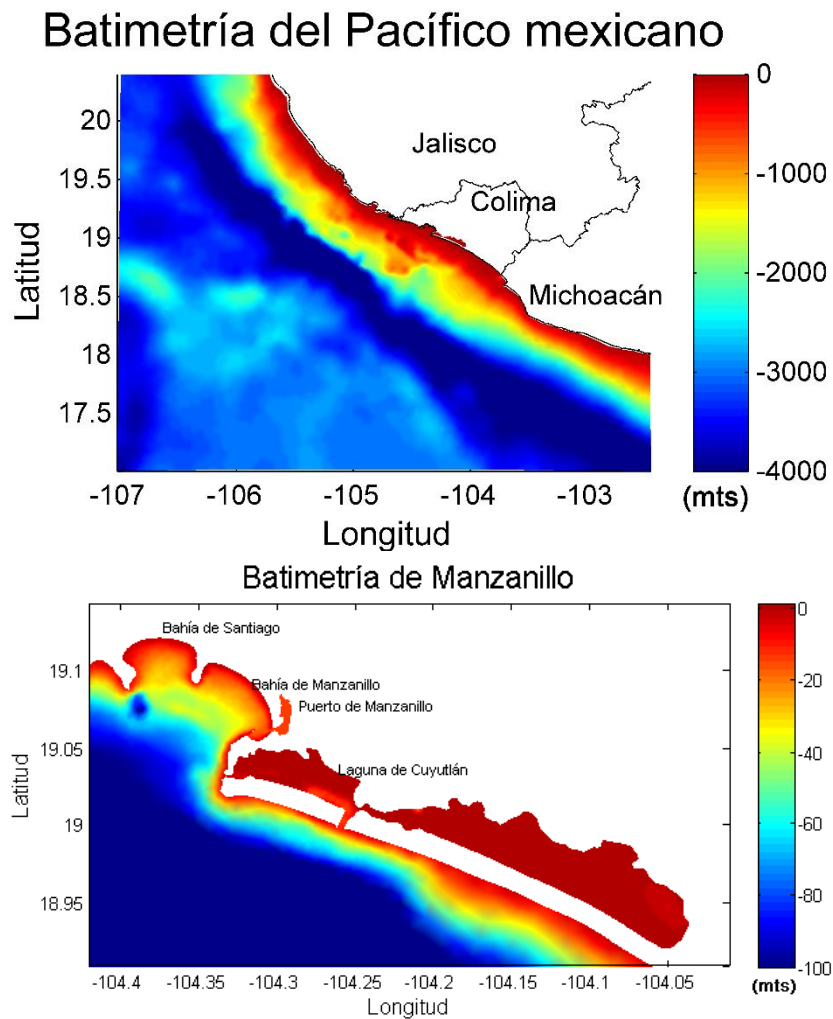


Figura 22. En el panel superior se aprecia la batimetría de todo el dominio computacional correspondiente a la parte central del Océano Pacífico mexicano, y en el inferior un acercamiento a la batimetría de Manzanillo.

3.3 Calibración de los modelos hidrodinámicos

Las simulaciones hidrodinámicas de marea astronómica, tsunami y marea de tormenta se realizaron utilizando el modelo MIKE 21 HD. El modelo se calibró y validó comparando los resultados de la sobreelevación de superficie libre con datos medidos durante el impacto de los eventos extremos. Para realizar esta comparación se usó el método de análisis de regresión polinomial de primer grado, que permite establecer el coeficiente de correlación entre datos simulados y observados. Este valor representa la precisión de los resultados obtenidos respecto a las mediciones.

Los resultados de las simulaciones se utilizaron para estudiar las áreas potencialmente vulnerables ante un escenario de derrame de hidrocarburos. Para ello se construyeron mapas de distribución máxima de las variables hidráulicas de elevación de la superficie libre del agua y de la magnitud de las corrientes provocadas por ambos fenómenos extremos (i.e. tsunami y huracán).

Por analizar la magnitud y dirección de las corrientes durante cada evento extremo se ubicaron 6 estaciones sobre la zona de estudio (Figura 23). La estación 1 se posicionó entre las escolleras de la terminal de PEMEX y el canal de acceso al puerto (esta ubicación corresponde la salida hacia las bahías). Las estaciones 2, 3, y 4 se encuentran sobre la línea de costa de la bahía de Manzanillo. La estación 5 se encuentra en la Laguna de Cuyutlán en la cercanía del canal de toma de aguas de enfriamiento de la termoeléctrica, mientras que la estación 6 se encuentra en las áreas de pesca regional de la misma laguna. Con los valores de las estaciones se graficaron rosas de magnitud y dirección para determinar la trayectoria y destino del contaminante.



Estación	Latitud	Longitud
1	19.061334	-104.310029
2	19.064704	-104.304274
3	19.086377	-104.312522
4	19.100997	-104.333398
5	19.031670	-104.325765
6	19.023401	-104.287841

Figura 23. Localización y coordenadas de las 6 estaciones para la obtención de la magnitud y dirección de las corrientes.

3.3.1 Hidrodinámica inducida por marea astronómica

Para determinar la hidrodinámica inducida por mareas astronómicas, el MIKE 21 HD se forzó utilizando valores predichos de marea en las fronteras. Dichos valores se obtuvieron del modelo de predicción global (Andersen, 1995) y se colocaron en el modelo según los códigos mostrados en la Figura 24. Este modelo de predicción tiene una resolución de $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ para los 14 principales constituyentes armónicos del espectro de marea, incluyendo los semidiurnos (M2, S2, K2, N2), diurnos (S1, K1, P1, Q1), y el relativo a aguas someras (M4) (DHI, 2014). Estos constituyentes se calculan a partir de 17 años de mediciones altimétricas realizadas por los satélites TOPEX/Poseidon (fase A y B), Jason-1 (fase A y B) y Jason-2.

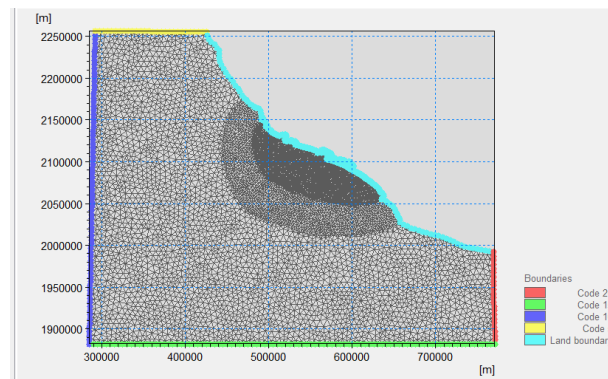


Figura 24. Forzamiento del modelo de marea con valores en las fronteras marinas (Code 20, 15, 10, 5).

Configuración del Modelo

En la Tabla 7 se presenta la configuración inicial del modelo, donde se muestra el valor de los parámetros físicos con los que se inició la simulación y las variables hidráulicas de salida. A sugerencia del manual de usuario DHI (2013), algunos de estos parámetros se mantuvieron constantes para la obtención de mejores resultados de salida. Dentro de los parámetros modificados, la fricción de fondo se usó para calibrar y validar el modelo. Esta fricción se consideró uniforme en el dominio e invariante en el tiempo durante todo el periodo de simulación. Otro parámetro de calibración es la viscosidad de remolino, el cual permite variar y aproximar la fase de la onda, sin embargo, los valores sugeridos por el modelo arrojaron los mejores resultados.

Tabla 7. Configuración del modelo hidrodinámico de marea.

Parámetro	Valor o condición.
<i>Características del dominio</i>	Batimetría y topografía (Sólo del área de interés) del Pacífico Central Mexicano: - 15391 nodos - 29491 elementos
<i>Tiempo de simulación</i>	Variante en cada evento.
<i>Tipo de solución</i>	De bajo orden y rápido algoritmo.
<i>Inundación y secado de áreas</i>	Profundidad de secado: 0.005 m Profundidad de inundado: 0.05 m Profundidad de mojado: 0.1 m
<i>Densidad</i>	Barotrópica
<i>Viscosidad turbulenta</i>	Tipo: Smagorinsky Constante con valor de 0.28
<i>Fricción de fondo</i>	Tipo: Número de Manning Constante: 25 m ^{1/3} /s
<i>Fuerza de Coriolis</i>	Variante en el dominio
<i>Viento</i>	Sin Viento
<i>Condiciones iniciales</i>	Nivel del mar en reposo (0 m)
<i>Condiciones de contorno</i>	Tipo: Especificación del nivel del mar. Variando en el tiempo y a lo largo de la frontera.
<i>Salidas</i>	- Nivel del mar (η) - Velocidad u de corrientes - Velocidad v de corrientes - Magnitud de corrientes - Dirección de corrientes - Profundidad total del agua.

La importancia de los resultados del modelo hidrodinámico de mareas astronómicas son de gran importancia ya que representan las condiciones que periódicas que se presentan en el área de estudio, y sobre las cuales se suma el efecto de los eventos extremos (i.e. tsunamis y huracanes).

3.3.2 Hidrodinámica inducida por la onda de tsunami

El modelo hidrodinámico de tsunamis se habilitó para el tsunami de 1995. Para poder caracterizar la deformación inicial del evento y poder iniciar el modelo, se caracterizaron las siguientes variables sísmicas: magnitud del sismo, tipo de falla sísmica y características geométricas (Tabla 8).

Tabla 8. Parámetros generales de la falla sísmica utilizados para la generación de las condiciones iniciales del modelo de tsunami.

Configuración geométrica de la falla	Magnitud	Unidad
Mw	7.6	[Nm]
Length	97.7237	[km]
Width	53.2108	[km]
Slip	1.121339	[m]
Dip angle	9	[deg]
Slip angle	92	[deg]
Strike angle	302	[deg]
Depth	24	[km]
Latitude	18.79	[deg]
Longitude	-104.47	[deg]

Las características sísmicas de la tabla 8 se utilizaron como parámetros de entrada para el método analítico de Papazachos et al. (2004). Este método es utilizado por el modelo MIKE 21 Earthquake para el cálculo de la sobreelevación del nivel del mar generado por la liberación de energía del sismo (Figura 25). Esta sobreelevación sirvió como condición inicial para forzar el modelo hidrodinámico. Para la calibración y validación del modelo de tsunamis se omitió el efecto de la marea astronómica en las fronteras, con lo que solamente se consideró la propagación de la onda de tsunami. Una vez calibrado el modelo, se plantearon diversos escenarios donde se tomó en cuenta la marea astronómica.

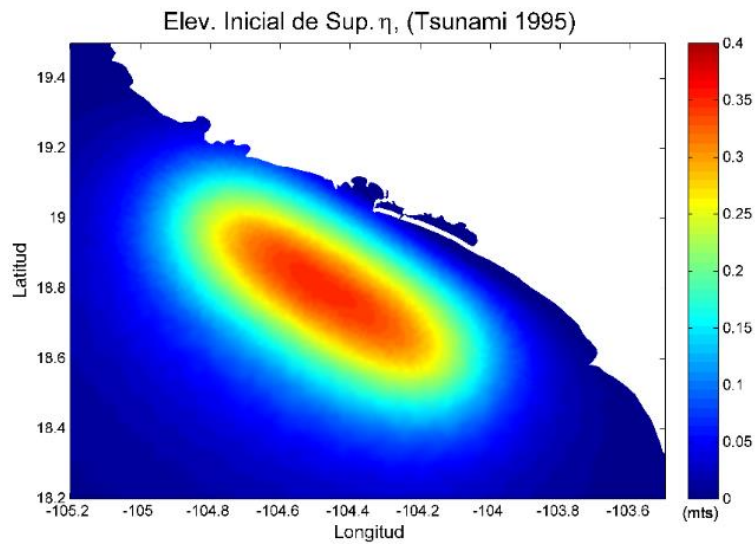


Figura 25. Elevación de superficie de la onda del tsunami de 1995, frente a las costas del Estado de Colima.

Configuración del Modelo Hidrodinámico de Tsunami

La Tabla 9 muestra la configuración del modelo de tsunamis, donde la condición inicial fue la deformación de la superficie libre generada por el sismo. Inicialmente se utilizaron los valores de los parámetros físicos obtenidos para el modelo de marea astronómica.

Tabla 9. Configuración del modelo hidrodinámico de tsunami

Parámetro	Valor o condición.
Características del dominio	Batimetría y topografía (Sólo del área de interés) del Pacífico Central Mexicano: • 15391 nodos • 29491 elementos
Tiempo de simulación	Variante en cada evento.
Tipo de solución	De bajo orden y rápido algoritmo.
Inundación 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 Constante con valor de 0.28
Fricción de fondo	Tipo: Número de Manning Constante: 25 m ³ /s
Fuerza de Coriolis	Variante en el dominio
Viento	Sin Viento

Condiciones iniciales	Variación espacialmente del nivel de la superficie libre del mar. Onda de Tsunami.
Condiciones de contorno	Tipo: Especificación del nivel del mar. Variando en el tiempo y a lo largo de la frontera.
Salidas	- Nivel del mar (η) - Velocidad u de corrientes - Velocidad v de corrientes - Magnitud de corrientes - Dirección de corrientes - Profundidad total del agua.

El modelo fue validado en base a la marea residual obtenida por el mareógrafo del Puerto de Manzanillo. Posteriormente, se estudió el efecto del tsunami en la dispersión de hidrocarburos bajo las condiciones que se dieron el 9 de octubre de 1995. Para este caso se simuló una descarga constante por 6 hrs, y se comparó con la dispersión que se produce bajo las condiciones de marea astronómica.

3.3.3 Hidrodinámica inducida por huracán

El modelo de marea de tormenta utilizó como agentes forzantes el campo de vientos y de presión del huracán Patricia. Estos agentes son producto de los modelos paramétricos de Emanuel y Rotunno (2011) y Holland (1980). Estos modelos paramétricos utilizan como variables de entrada datos del Centro Nacional de Huracanes de los E.U.A. (NHC, por sus siglas en inglés). En la Tabla 10 se muestra las variables necesarias para la generación de los campos de viento y presión del huracán Patricia, mientras que la Figura 26 muestra un instante de tiempo de los campos resultantes.

Tabla 10. Best track del huracán Patricia del 20 al 24 de octubre de 2015. Obtenido de Kimberlain, Blake, y Cangialosi (2016)

Fecha/Hora (UTC)	Latitud	Longitud	Presión (hPa)	Velocidad del viento (m/s)	Estado
20/0600	13.4	94.0	1007	12.8611	Depresión tropical
20/1200	13.3	94.2	1006	15.4333	----
21/0600	13.2	94.6	1006	15.4333	----
21/1200	13.1	95.1	1004	18.0055	Tormenta tropical
21/1800	12.9	96.2	1004	18.0055	-----
22/0000	12.9	97.4	1001	20.5778	-----
22/0600	13.1	98.7	997	25.7222	-----

22/1200	13.4	100.1	991	30.8666	-----
22/1800	14.0	101.7	981	38.5833	-----
23/0000	14.6	103.1	969	46.3000	-----
23/0600	15.2	104.2	957	59.1611	-----
23/1200	15.8	104.9	920	77.1666	-----
23/1800	16.5	105.4	886	92.5999	-----
23/2300	17.3	105.6	872	95.1721	-----
24/0000	18.3	105.3	878	92.5999	-----
24/0600	19.4	105.0	932	66.8777	-----
24/1200	19.6	104.9	946	56.5888	Tormenta tropical
24/1800	21.6	103.8	985	25.7222	Depresión tropical

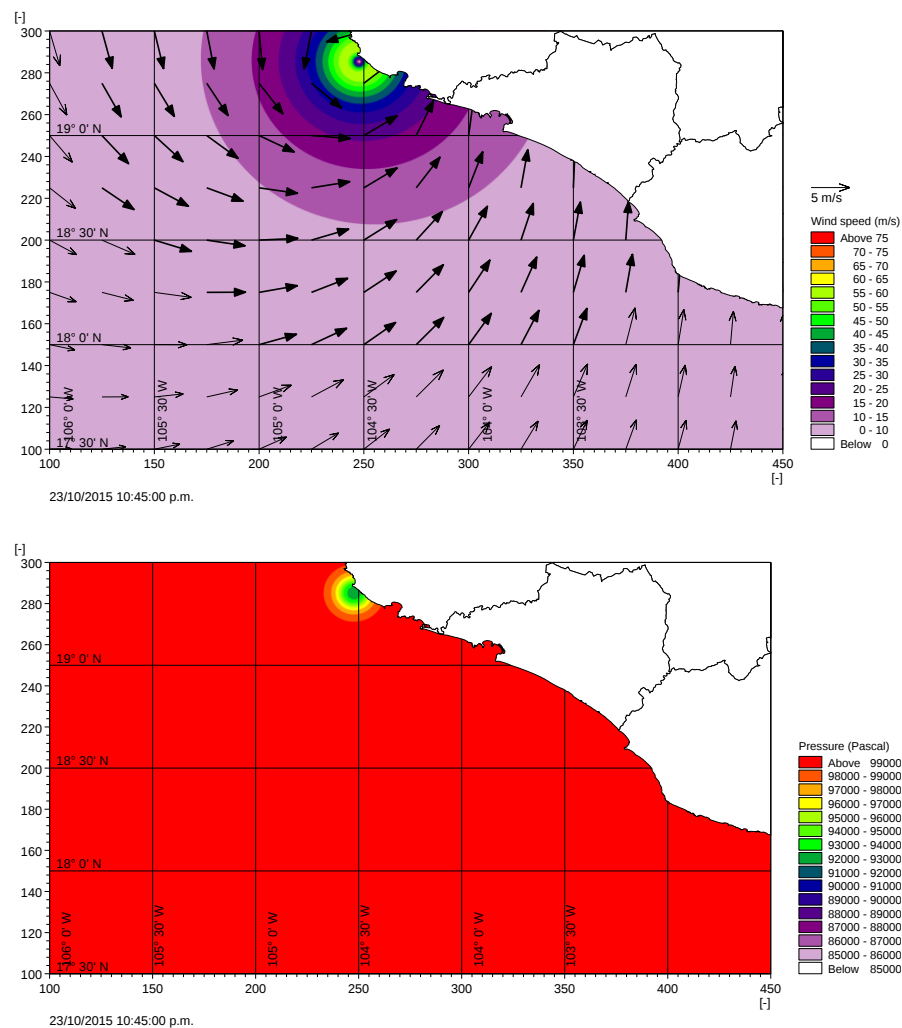


Figura 26. Campo de vientos (Panel superior) y de presión (panel inferior) del huracán Patricia al tocar tierra.

Configuración del Modelo Hidrodinámico de Huracán

En la Tabla 11 se muestra la configuración del modelo MIKE 21 HD para simular la hidrodinámica inducida por huracanes. Los parámetros físicos de viscosidad, fricción de fondo se mantuvieron con el valor de calibración de la marea astronómica. En este caso, el parámetro de calibración fue la fricción del viento con la superficie del océano.

Tabla 11. Configuración del modelo hidrodinámico de huracán.

Parámetro	Valor o condición.
Características del dominio	Batimetría y topografía (Sólo del área de interés) del Pacífico Central Mexicano:

	• 15391 nodos • 29491 elementos
<i>Tiempo de simulación</i>	Variante en cada evento.
<i>Tipo de solución</i>	De bajo orden y rápido algoritmo.
<i>Inundación y secado de áreas</i>	Profundidad de secado: 0.005 m Profundidad de inundado: 0.05 m Profundidad de mojado: 0.1 m
<i>Densidad</i>	Barotrópica
<i>Viscosidad turbulenta</i>	Tipo: Smagorinsky Constante con valor de 0.28
<i>Fricción de fondo</i>	Tipo: Número de Manning Constante: 25 m ³ /s
<i>Fuerza de Coriolis</i>	Variante en el dominio
<i>Viento</i>	Campo de Viento Variando en el tiempo y en el dominio
<i>Fricción del viento</i>	Variando con la magnitud del viento 0 m/s: 0.001255 26.5 m/s: 0.02
<i>Condiciones iniciales</i>	Nivel del mar en reposo (0 m)
<i>Condiciones de contorno</i>	Tipo: Especificación del nivel del mar. Variando en el tiempo y a lo largo de la frontera.
<i>Salidas</i>	- Nivel del mar - Velocidad u de corrientes - Velocidad v de corrientes - Magnitud de corrientes - Dirección de corrientes - Profundidad total del agua.

Con base en estas simulaciones se estudió el efecto que tuvo este fenómeno en la dispersión de hidrocarburos el 23 de octubre de 2015. Se simuló una descarga constante por 12 hrs en la zona portuaria y se compararon los resultados con la dispersión que se produce bajo las condiciones de marea astronómica.

Por último se modificó el campo de vientos y presiones del huracán Patricia (Figura 27), para estudiar el impacto que tendría un huracán categoría 5 entrando a tierra directamente en la zona de estudio. La finalidad de este ejercicio fue analizar la máxima repercusión en la elevación de superficie del agua y la magnitud de las corrientes en la zona costeras.

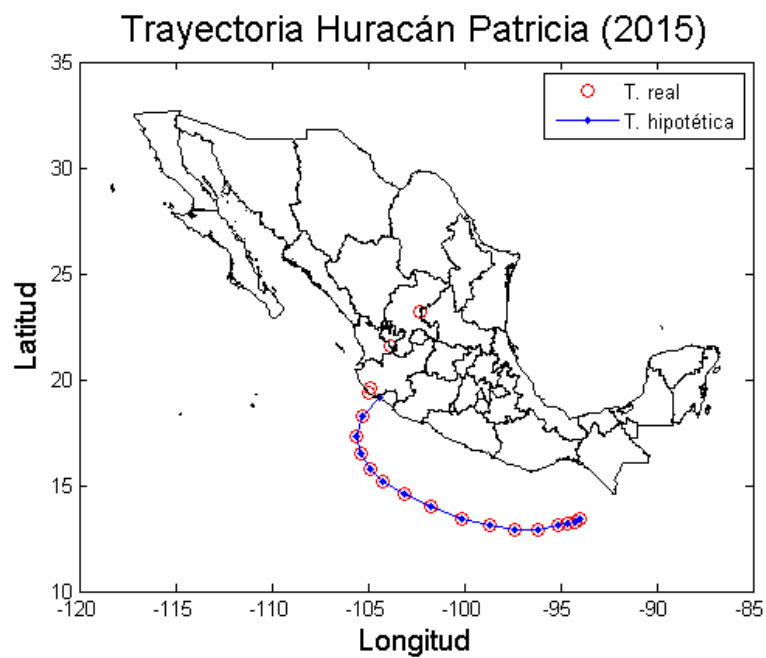


Figura 27. Modificación de la trayectoria del huracán Patricia, entrando a tierra por Manzanillo.

3.4 Escenarios de dispersión

Para analizar el efecto que tiene cada uno de los eventos extremos en la dispersión de hidrocarburos, se plantearon distintos escenarios de vertidos ubicando una fuente en la terminal de PEMEX y otra en la Laguna de Cuyutlán. Estos lugares fueron elegidos por su vulnerabilidad ante estos desastres, ya que en el primero se llevan a cabo trabajos de transferencia de hidrocarburos de buques a tierra, y en el segundo se encuentra el combustoleoducto que alimenta la central termoeléctrica. La ubicación de ambas fuentes se muestra en la Figura 28 y sus coordenadas geográficas se presentan en la Tabla 12. La liberación del vertido se realizó antes del arribo de las ondas a la costa. Considerando la alta velocidad a la que se propaga la onda de tsunami, el vertido comenzó 15 min antes de la llegada de éste a la línea de costa. Para el caso huracán, el vertido comenzó 6 horas antes del impacto.

Tabla 12. Coordenadas de la posición de las fuentes del vertido de hidrocarburos.

Coordenadas geográficas	Terminal de PEMEX	Laguna de Cuyutlán
Latitud	19.0587	19.0445
Longitud	-104.3153	-104.3143



Figura 28. Ubicación geográfica de las fuentes en el área de la terminal de Pemex y la Laguna de Cuyutlán (fuente: Google Earth).

Las fuentes puntuales de vertido se mantuvieron constantes durante el periodo de simulación y se consideraron las propiedades químicas de las partículas de hidrocarburo sugeridas por el modelo Oil Weathering Model 2010 de DHI (Tabla 13).

Se consideró el elemento más cercano a la ubicación del vertido (Tabla 12) con una concentración de 1 kg/kg como condición inicial para el forzar el modelo ECOLab. Debido a que el comportamiento de las partículas es no conservativo, se consideraron los procesos de meteorización química. Así, se consideraron los parámetros que se muestran en la Tabla 13 a fin de modificar las propiedades de las partículas.

Tabla 13. Propiedades de las partículas de petróleo crudo utilizadas en el modelo.

Descripción	Unidad	Valor
Evaporación detallada: número de Schmidt	adimensional	2.7
Evaporación detallada: Peso molecular promedio de la fracción volátil de petróleo	g/mol	122
Evaporación detallada: Presión de vapor de la fracción volátil	atm.	0.00017
Fórmula de evaporación simple, 1ª constante específica del petróleo	adimensional	2.67
Fórmula de evaporación simple, 2ª constante específica de petróleo para la dependencia de la temperatura	dimensionless	0.06
Esparcimiento: espesor terminal	mm	0.1
Fracción volátil de biodegradación: tasa de decaimiento	por día	0.005
Fracción pesada de biodegradación: tasa de descomposición	por día	0
Emulsificación: fracción máxima de agua	(m ³ /m ³)	0.75
Emulsificación: Constante Kao igual 3,3 a 293 K	adimensional	3.3
Emulsificación: constante Kaw igual a 200 a 293 K	adimensional	200
Emulsificación: tasa de emulsion	s/m ²	1.00E-06
Flotabilidad: Densidad del petróleo a 20 °C, fracción volátil	kg/m ³	755
Flotabilidad: Densidad del petróleo a 20 °C, fracción pesada	kg/m ³	940
Solubilidad en agua: fracción volátil	(kg/kg)	2.00E-05
Solubilidad en agua: fracción pesada	(kg/kg)	2.00E-07
Coeficiente volumétrico de dilatación por temperatura de la fracción volátil de petróleo	1/°C	0.0007
Coeficiente volumétrico de dilatación por temperatura de la fracción pesada de petróleo	1/°C	0.0007
Fracción volátil de fotooxidación: tasa de decaimiento a 100 watt / m ²	por día	0
Fracción pesada de fotooxidación: tasa de decaimiento a 100 watt / m ²	per day	0
Fotooxidación: Coeficiente de extinción de la luz	1/m	1
Disolución: Tasa, fracción ligera	por día	0.4
Disolución: Velocidad, fracción pesada	por día	0.4

Distancia máxima debajo de la superficie para pertenecer a la cantidad superficial	m	0.05
Distancia sobre el fondo para pertenecer a la cantidad inferior	m	0.05
Constante de Mooney en la ecuación de viscosidad (rango de 0,62-0,65 litros, 0,7 de petróleo crudo - 0,25 aceite de calefacción doméstico)	dimensionless	0.7
Viscosidad dinámica del petróleo a temperatura de referencia	cP	1.4
Referencia de temperatura para la viscosidad dinámica del petróleo	deg C	20
Área de crecimiento tasa constante	por segundo	150

Configuración del Modelo ECOLab/OS

La Tabla 14 muestra la configuración del modelo para las simulaciones de dispersión.

Tabla 14. Configuración del modelo de dispersión de hidrocarburos.

Parámetro	Valor o condición.
<i>Definición del modelo</i>	DHI Oil Weathering Model 2010
<i>Clase</i>	Petróleo
<i>Constantes</i>	- Constante de Gas: 8.206e-005 - Viscosidad dinámica del agua a 20° C: 1.002cP
<i>Dispersión</i>	Dispersión horizontal: - Formulación de viscosidad de remolino escalada: 1
<i>Fuentes</i>	Dependiendo de cada escenario mostradas en Tabla 12
<i>Perfil de deriva</i>	Tipo: Utilizar datos brutos de la hidrodinámica
<i>Salidas</i>	- Fracción suspendida de petróleo (kg/kg)

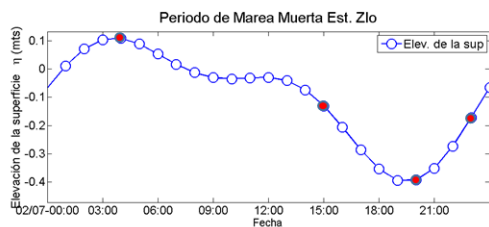
Se formularon 32 escenarios de dispersión como se muestra en la Tabla 15, con el fin de analizar el efecto que provoca cada evento en la dispersión de petróleo. Para todos los escenarios se dejó correr el modelo hidrodinámico por un periodo de 12 horas. Los escenarios fueron determinados en base a la llegada de los eventos extremos y la fase de

marea astronómica. El punto de coincidencia de la fase de marea y la sobreelevación de cada fenómeno extremo se muestra en la Figura 29a y Figura 29b respectivamente.

Tabla 15. Escenarios hipotéticos de dispersión durante diferentes fases de marea, dónde sitio 1 es la terminal de Pemex, y sitio 2 es la Laguna.

Sitio	Escenario	Tsunami				M. Muerta	M. Viva			
1	-	Máxima	Vacante	Mínima	Llenante	X				
	1	X								
	2		X							
	3			X						
2	4				X	X				
	5	X								
	6		X							
	7			X						
1	8				X		X			
	9	X								
	10		X							
	11			X						
2	12				X		X			
	13	X								
	14		X							
	15			X						
-	16				X	-	-			
	-	-	Marea de tormenta					-	-	
	1	17	X						X	
		18		X						
19				X						
20					X					
2	21	X				X				
	22		X							
	23			X						
	24				X					
1	25	X					X			
	26		X							
	27			X						
	28				X					
2	29	X					X			
	30		X							
	31			X						
	32				X					

(a)



(b)

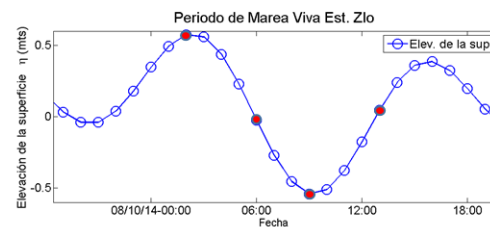


Figura 29. Esquematización de las fases de marea astronómica: máxima, vacante, mínima y llenante. Para marea muerta (a) y viva (b)

Por último se realizó la simulación de un derrame durante cinco días sólo bajo las condiciones hidrodinámicas de marea muerta y marea viva, con el fin de establecer el alcance de la mancha de contaminante en estas condiciones para ambos lugares.

Capítulo 4

Resultados y discusiones

Este capítulo se divide en dos secciones, en la primera se presentan los resultados de la validación de los modelos hidrodinámicos, que se llevó a cabo utilizando ajustando los datos simulados a valores medidos sobre elevación de superficie. De acuerdo a estas sobre elevaciones se analizan las regiones donde valores son máximos y las magnitudes de las corrientes asociadas a cada fenómeno estudiado. Con base en estos valores, se utilizó el momento en el que se alcanzó la máxima sobre elevación de superficie en el punto de muestreo (ubicación del mareógrafo local). Además, se plantearon escenarios de doce horas en los que coincidió la máxima sobre elevación de superficie con diferente fase marea (llenante, máxima, vaciante y mínima). Lo anterior para analizar el efecto que tienen ambos fenómenos en el comportamiento de la mancha de contaminante y el alcance en las zonas de la terminal de PEMEX en la Bahía de Manzanillo y la Laguna de Cuyutlán.

4.1 Validación de los modelos hidrodinámicos

4.1.1 Modelo de marea astronómica

Para validar el modelo de marea astronómica se analizaron los registros del nivel del mar por el mareógrafo para obtener los componentes armónicos a partir de un análisis de Fourier y así extraer la marea astronómica para validar el modelo. En la tabla 16 se muestran los primeros 10 componentes de armónicos de la señal, sus amplitudes y fases.

Tabla 16. Componentes principales en la marea en la región de Manzanillo, Colima.

Componente	Frecuencia	Amplitud	Fase
*S2	0.0833333	0.1653	112.61
*M2	0.0805114	0.1525	205.17
*K1	0.0417807	0.1525	340.62
*O1	0.0387307	0.1075	87.36
*P1	0.0415526	0.0507	4.14
*N2	0.0789992	0.0475	92.07
*K2	0.0835615	0.0405	261.2
*Q1	0.0372185	0.0218	330.57
*T2	0.0832193	0.0112	71.3
*H2	0.0806255	0.0112	142.84

La señal obtenida de la suma de los constituyentes armónicos se corroboró con la marea predicha para la estación Manzanillo (Figura 30), y de este análisis se obtuvo la serie temporal de marea astronómica para la validación.

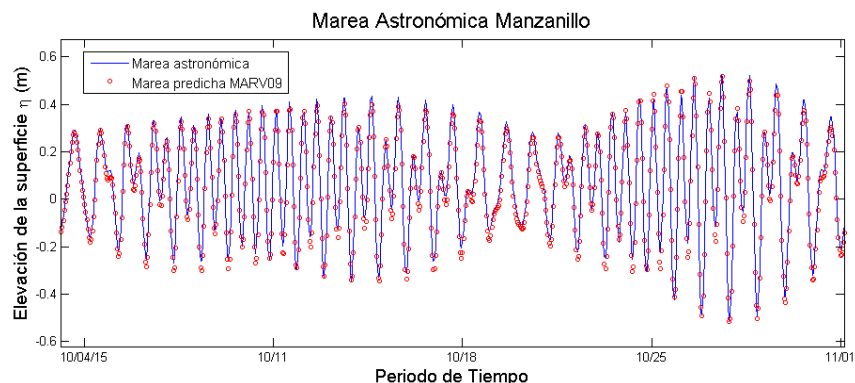


Figura 30. La línea azul representa la marea astronómica obtenida del registro histórico de elevación de superficie, mientras que los puntos en rojo son las elevaciones predichas por MARV09.

En base las mediciones se calibró el modelo en base al coeficiente de fricción de fondo, hasta obtener el ajuste que se muestra en la Figura 31 al utilizar un e coeficiente de fricción de fondo de $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

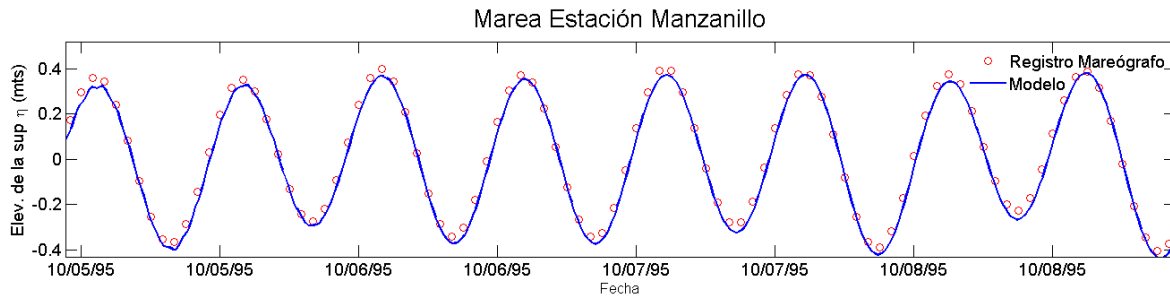


Figura 31. Calibración del modelo de marea para la caracterización de la circulación en la zona.

Con el modelo validado se obtuvo un coeficiente de correlación (R^2) de 0.8335 entre las mareas astronómicas en la zona del mareógrafo y los valores simulados de nivel del mar (Figura 32).

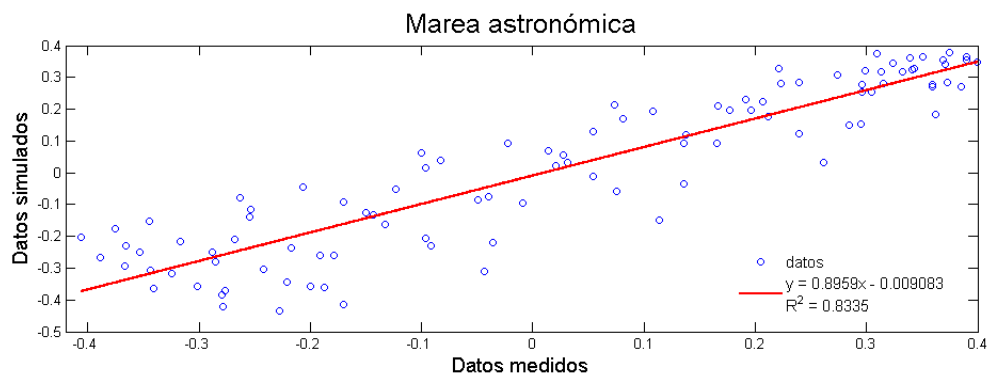


Figura 32. Ajuste lineal entre los datos de marea medidos y los datos simulados por el modelo.

4.1.2 Hidrodinámica inducida por marea astronómica

Una vez validados los datos de la simulación hidrodinámica de marea astronómica se analizaron las corrientes durante la llenante y vaciante en mareas viva, cuando las corrientes de la zona alcanzan su mayor velocidad. En la Figura 33 se muestran los resultados en las zonas aledañas al puerto de Manzanillo, donde las corrientes presentan velocidades de baja intensidad (entre 0.04 m/s y 0.05 m/s). Sin embargo, la hidrodinámica dentro de la laguna de Cuyutlán presenta corrientes mayores a 0.20 m/s, indicando que la capacidad de transporte dentro de la laguna es superior respecto a las áreas portuarias y la bahía de Santiago y Manzanillo. Estas velocidades representan las máximas magnitudes que se pueden alcanzar en la zona por este fenómeno, y son importantes porque con base en ellas se puede estimar cuál es el incremento en la magnitud para cada evento extremo.

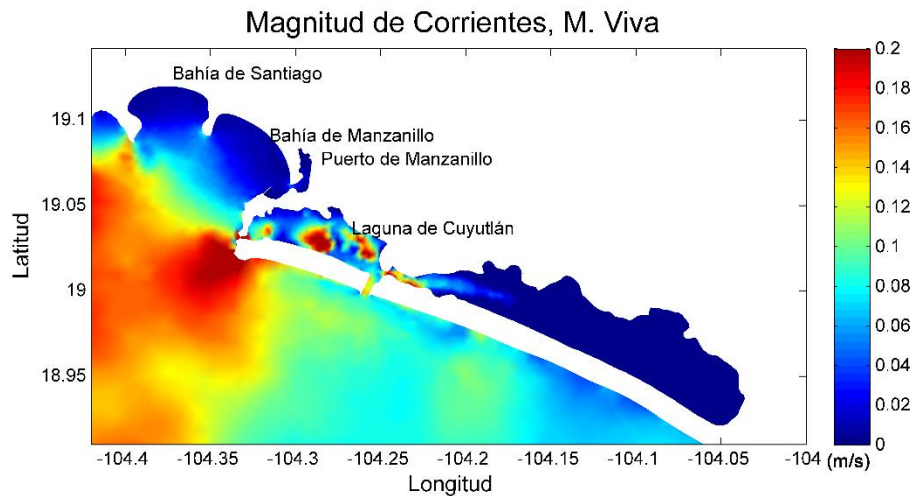


Figura 33. Envolvente máxima de la intensidad de corriente durante un ciclo de marea viva.

4.1.3 Modelo de tsunami

Si consideramos que el modelo hidrodinámico está calibrado para mareas astronómicas y de tormenta, no es posible modificar los parámetros del modelo si se desea utilizar el mismo modelo también para tsunamis. De esta manera, el modelo de tsunamis se calibró variando las características geométricas de la falla sísmica. Esto ha sido realizado anteriormente por otros autores como Ortiz et al. (2000) quien utiliza la modelación del tsunami para ajustar los parámetros del sismo. De manera similar, en este trabajo se ajustaron dichos parámetros, hasta encontrar la definición del sismo que generara el tsunami que reprodujera la marea residual registrada por el mareógrafo. La Figura 34 muestra la sobreelevación del tsunami obtenido en las simulaciones y el residual. Para aproximar la fase del tsunami se inició en un tiempo de ruptura de 09/10/1995 03:36:51 pm (UTC). Se realizó un análisis de regresión lineal entre los valores simulados y los medidos y se obtuvo un valor de R^2 de 0.7133. En la Figura 35 se muestra la función lineal obtenida respecto a la distribución de los datos. Debido al buen ajuste entre los valores medidos y simulados, se consideró validado el modelo de tsunami.

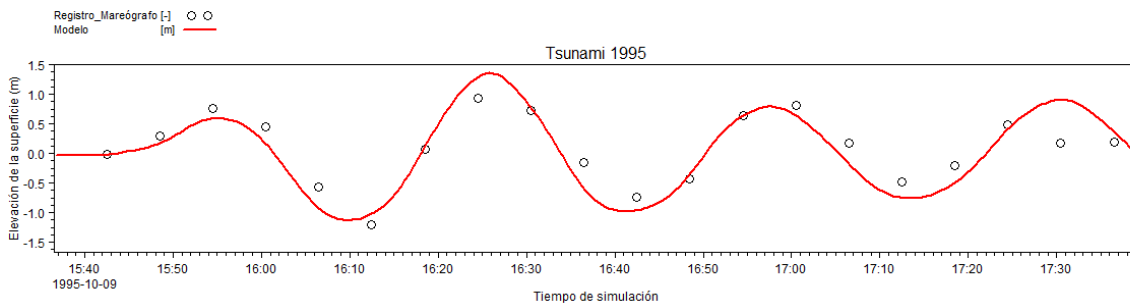


Figura 34. Elevación de la superficie libre generada por el Tsunami de 1995 (círculos) y por el modelo de propagación de la onda (línea roja).

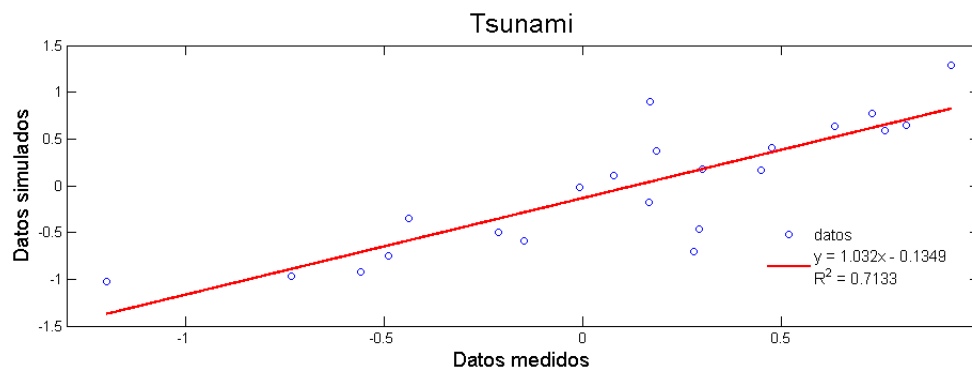


Figura 35. Ajuste lineal entre los datos medidos del tsunami y los simulados por el modelo.

4.1.4 Sobre elevación de superficie y corrientes generadas por el Tsunami de 1995

Posterior a la validación, el modelo de tsunami se simuló agregando el efecto de la marea astronómica para obtener las mayores sobre elevaciones de superficie del agua. Estas mayores sobre elevaciones se produjeron dentro del cuerpo lagunar y el puerto de Manzanillo como se muestra en la Figura 36. Los valores de máxima sobre elevación alcanzaron 1.6 m en el área portuaria, y valores entre 1 m y 1.2 m en las zonas de playa de las bahías de Santiago y Manzanillo respectivamente.

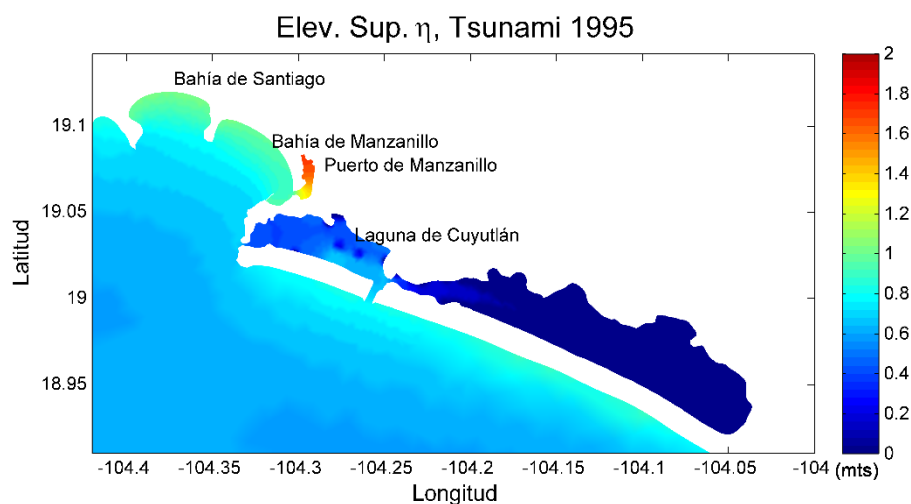


Figura 36. Máxima elevación de la superficie ocasionada por el tsunami sumado al efecto de la marea.

Posteriormente se analizaron las variables de dirección y magnitud de las corrientes generadas por la onda de tsunami en las estaciones distribuidas como se mostró en la Figura 23. Estas variables son fundamentales ya que estas dominan el transporte de los contaminantes y el rumbo que toman. Las rosas de corrientes para las 6 estaciones sobre el área de estudio se muestran en la Figura 37. En la estación 1 se alcanzaron magnitudes en las corrientes de 0.5 m/s en dirección noroeste, sugiriendo una salida de flujo de agua del área protegida. Mientras que en la estación 2 la magnitud alcanzada fue de 0.5 m/s y su dirección predominante fue la sureste, indicando entrada del flujo de agua hacia el área protegida. Las estaciones 3 y 4, que pertenecen a la Bahía de Manzanillo y las 5 y 6 en la Laguna de Cuyutlán, presentaron magnitudes de aproximadamente 0.15 m/s, las primeras dos toman direcciones paralelas a la línea de costa, mientras que las dos últimas en dirección oeste. En la estación 5 se obtuvieron corrientes con direcciones paralelas oeste-este, mientras que en la estación 6 se obtuvieron direcciones predominantes del noroeste y suroeste, dando salida al flujo de agua por un canal artificial que funciona como toma de enfriamiento

para la termoeléctrica de la región. Si bien las corrientes dominantes se direccionan hacia el oeste, éstas adquieren magnitudes relativamente bajas (entre 0.10 m/s y 0.15 m/s).

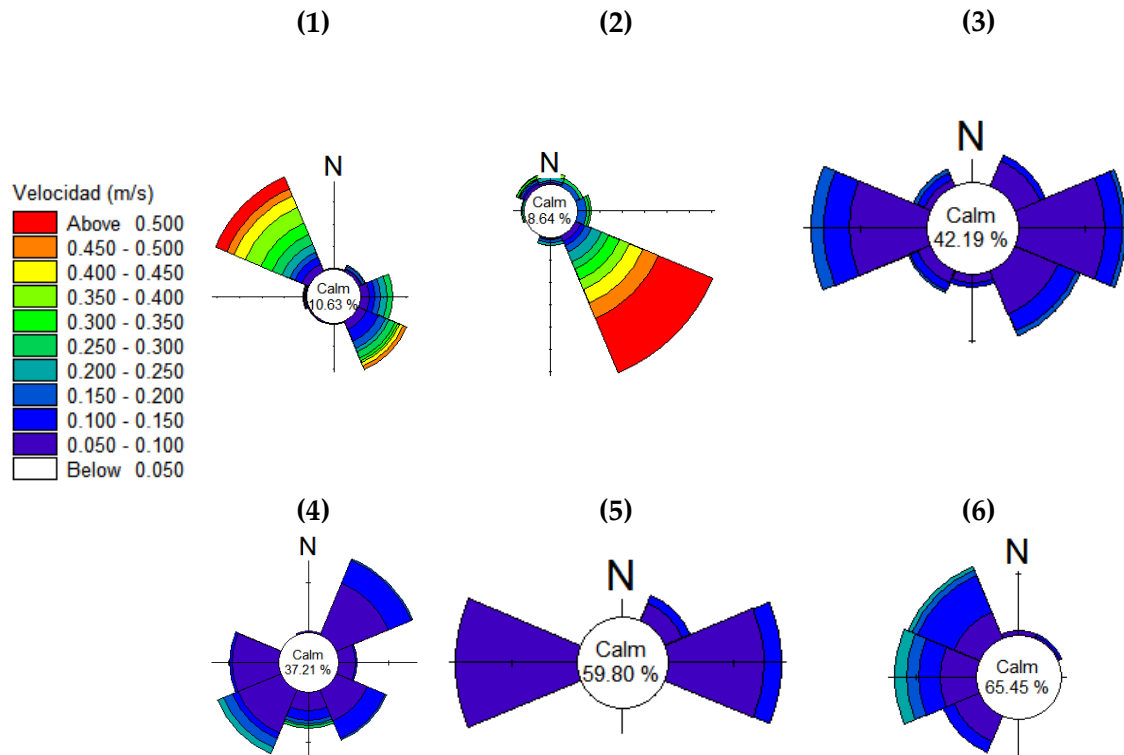


Figura 37. Magnitud y dirección de corrientes en las estaciones en la bahía (1, 2, 3,4) y laguna (5,6), para el evento de tsunami

La Figura 38 muestra la distribución de los valores máximos de magnitud de corriente que se produjeron durante todo el escenario de simulación del tsunami. Estas magnitudes se presentaron en el canal de acceso al puerto de Manzanillo, donde la magnitud máxima llegó a intensidades superiores a 1 m/s.

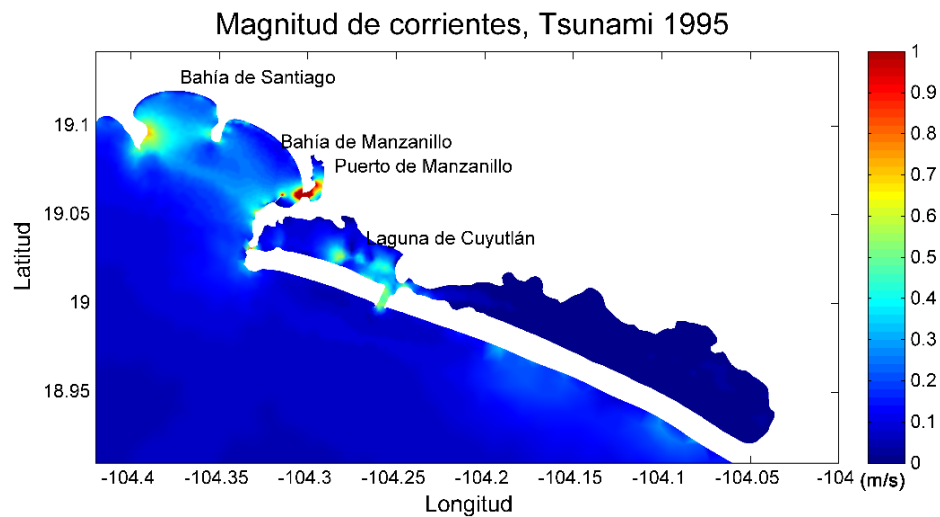


Figura 38. Distribución de los valores máximos concernientes a la magnitud de las corrientes provocadas por el tsunami.

Los resultados de máxima magnitud de corrientes fueron similares a los presentados por Carbajal y Galicia-Pérez (2002), quienes, obtuvieron valores máximos de 1 m/s y 0.40 m/s para el canal de acceso al puerto y la laguna respectivamente (Figura 39).

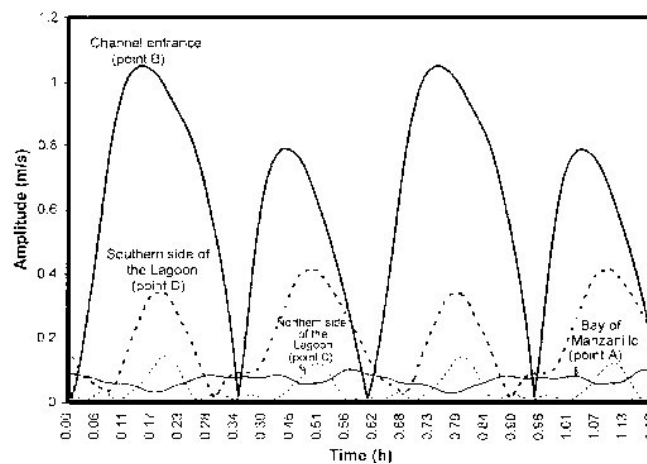


Figura 39. Valor absoluto de la corriente en distintas posiciones. Obtenido de Carbajal y Galicia-Pérez (2002).

4.1.5 Modelo de marea de tormenta

Este modelo se validó con la sobreelevación de superficie libre observada en el mareógrafo del Puerto de Manzanillo (Figura 40), donde la modelación utilizando las mareas astronómicas y los campos de viento y presión del huracán Patricia reprodujeron satisfactoriamente las mediciones del mareógrafo. También se modeló sin utilizar la marea astronómica a fin de reproducir la marea residual, sin embargo los resultados no fueron tan satisfactorios, ya que discreparon respecto al tiempo de sobreelevación en relación con los datos observados. Para evaluar la incertidumbre se utilizó el método de regresión lineal.

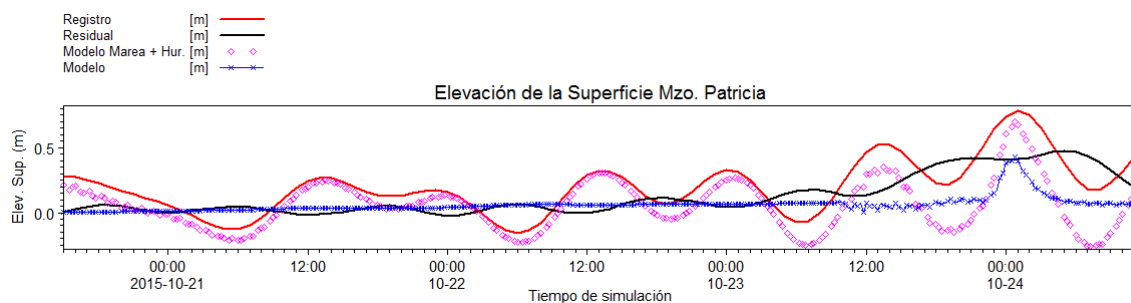


Figura 40. Elevación de superficie medida por el mareógrafo (línea roja), marea meteorológica (línea negra), modelo conjunto de marea y marea de tormenta (marcador magenta), elevación de superficie generada sólo por el huracán (marcador azul).

La regresión lineal arrojó un R^2 de 0.7189 y en la Figura 41 se muestra la función lineal obtenida respecto a la distribución de los datos. Este ajuste se considera bueno, ya que durante este fenómeno se presentan variables como la precipitación torrencial y la descarga fluvial, que no consideradas en la modelación y que influyen en la sobreelevación del nivel del mar.

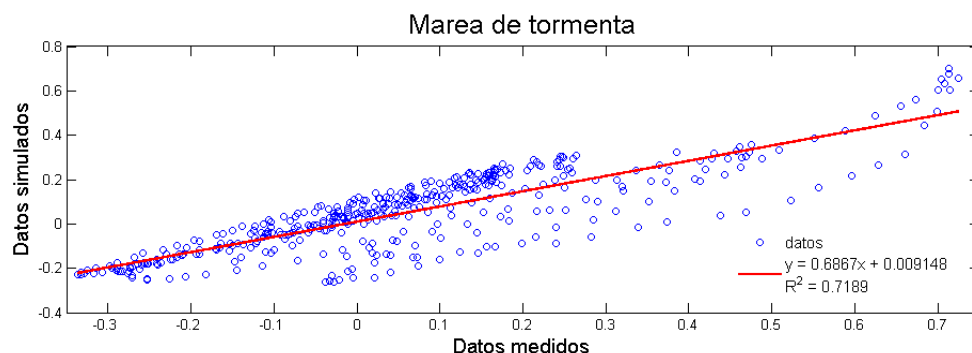


Figura 41. Ajuste lineal entre los datos de marea de tormenta medidos y los datos simulados por el modelo.

Sobreelevaciones del nivel del mar y corrientes provocadas por el huracán Patricia

En la Figura 42 se muestra la distribución espacial de las máximas sobreelevaciones de superficie libre generadas por el viento del huracán. En las bahías se presentaron sobreelevaciones de 0.7 m al igual que en la zona portuaria, mientras que en la laguna se dan las mayores sobreelevaciones de superficie con valores de 1.5 m.

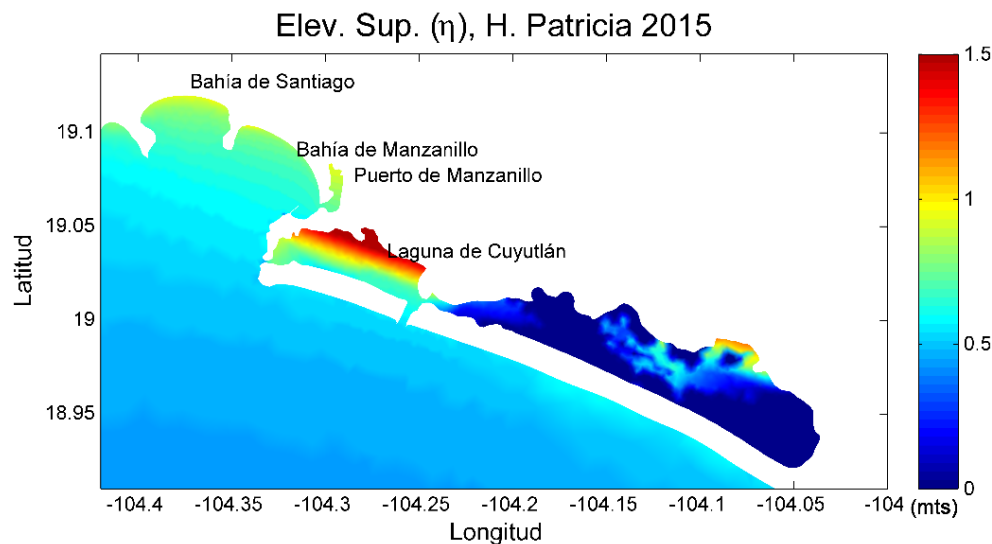


Figura 42. Mapa de valores máximos espaciales de sobreelevación de superficie generada por el huracán Patricia

Las corrientes generadas por este evento afectarían con mayor intensidad las playas de ambas bahías como se muestra en la Figura 43, estas corrientes alcanzan las magnitudes cercanas a 1 m/s en la línea de costa y en la Laguna de Cuyutlán 0.5 m/s. Los resultados indican que para este tipo de fenómeno las corrientes de mayor magnitud se presentan en la zona más somera adyacente a la línea de playa. Esto se debe al esfuerzo cortante que ejercen los vientos sobre la superficie del agua, empujando el fluido hacia la costa hasta chocar con continente, que a causa la dirección ciclónica y los gradientes de presión forzaron a las corrientes a transportar esa masa de agua paralela a la línea de costa hacia el noroeste.

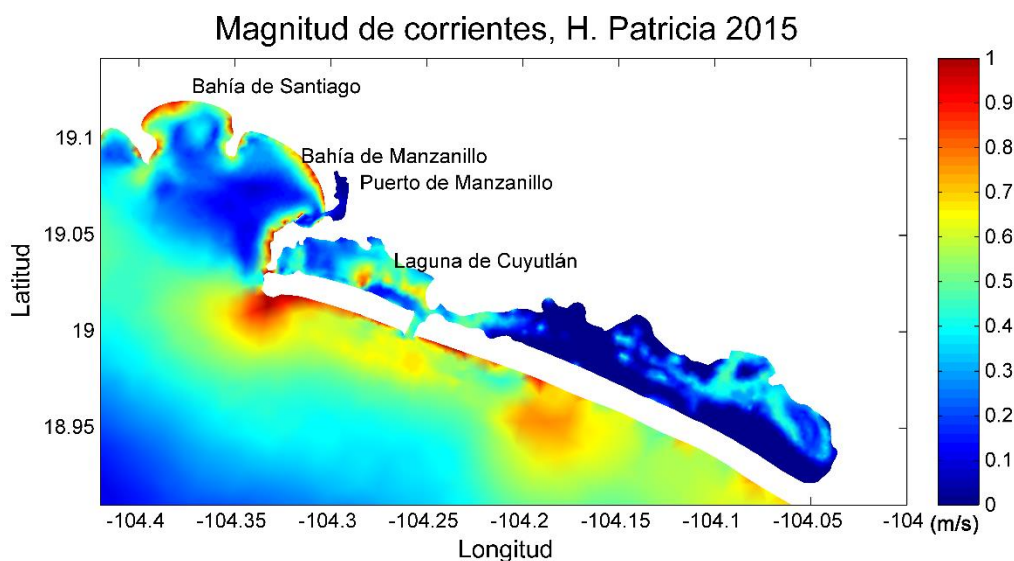


Figura 43. Distribución máxima espacial de la magnitud de corrientes generadas por el huracán Patricia

La intensidad con la que se presentan las corrientes en cada evento extremo son de gran importancia para este estudio, ya que éstas son las responsables del proceso de transporte de masa en el océano. Esta investigación se centra en el comportamiento que toman los hidrocarburos bajo estos eventos extremos, caracterizando el rumbo que adquieren los contaminantes de acuerdo a las características de su impacto de cada fenómeno. También cabe destacar que los eventos de huracán tienen un gran contenido energético que puede producir grandes cambios en la línea de costa en un periodo relativamente corto. En el caso del huracán Patricia la entrada a tierra fue aproximadamente a 86 km de Manzanillo, por lo que se optó por realizar un cambio a la trayectoria del huracán, y así evaluar el evento al impactar directamente la zona de estudio.

4.1.6 Campo de vientos de Patricia modificado

La modificación de los campos de vientos máximos y de presión del huracán resultó en el impacto de vientos con magnitud máxima de entre 60 y 70 m/s en Manzanillo (Figura 44a), y una presión mínima de 930 hPa (Figura 44b) que caracteriza a un huracán categoría 5. Con esto se simuló un evento catastrófico, esperando incrementar considerablemente las sobreelevaciones de superficie y magnitud de corrientes en la zona de estudio.

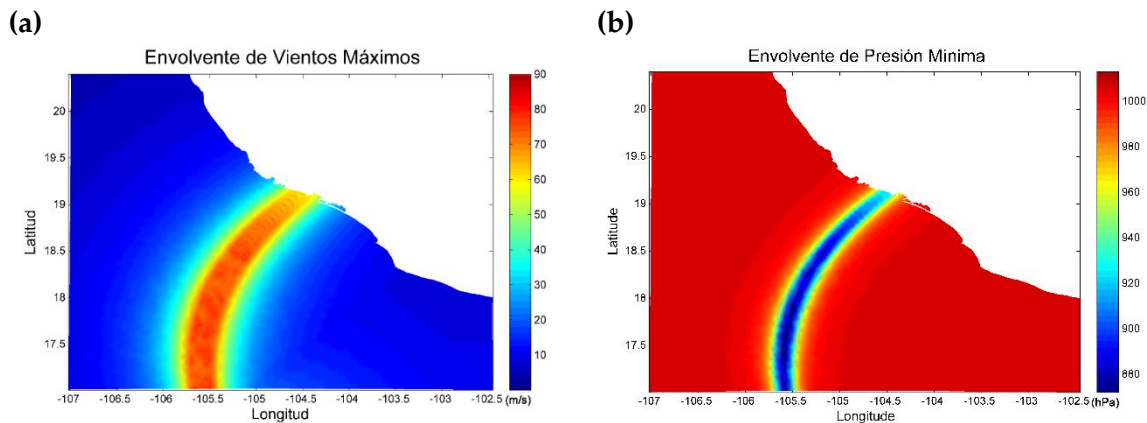


Figura 44. Envolverte de vientos máximos (a) y envolverte de presión mínima (b).

La sobreelevaciones de la superficie libre generadas por el evento se muestra en la Figura 45, donde las mayores magnitudes se encuentran en la laguna con valores cercanos a los 5 metros. En la Bahía de Santiago se presenta una elevación cercana a los 4 metros, aunque esta bahía se encuentra muy alejada de la fuente, es la más afectada por los vientos del huracán.

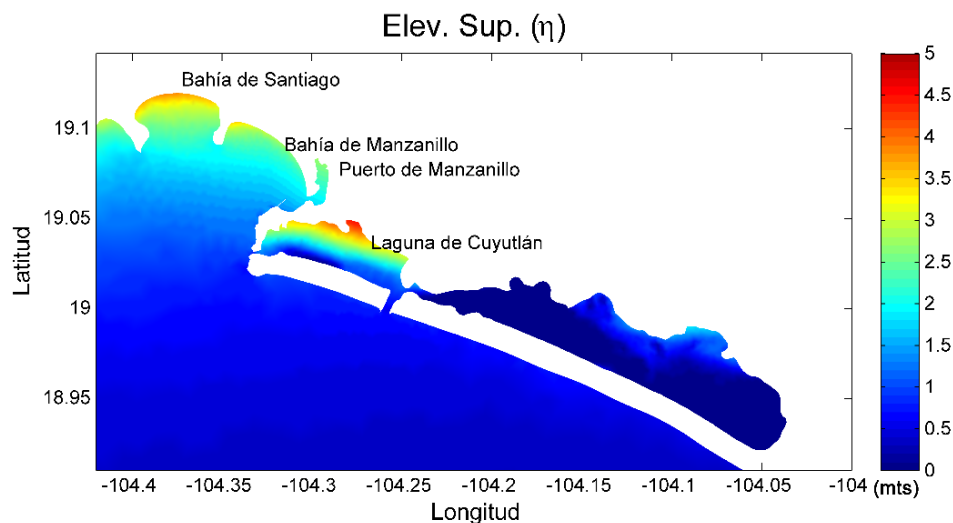


Figura 45. Sobrelevaciones máximas de superficie libre generadas por Patricia entrando por Manzanillo.

Para entender el comportamiento de la hidrodinámica en la costa y en la laguna, se presentan los resultados de magnitud y dirección de corrientes en las estaciones descritas anteriormente (Figura 46). La estación 1 y 2 muestran entrada de flujo hacia la zona protegida entra las escolleras de Pemex y del canal portuario. Las estaciones 3 y 4 presentan corrientes en dirección paralela a la línea de costa. Las estaciones 5 y 6 se encuentran en la Laguna y su dirección dominante es hacia suroeste y oeste.

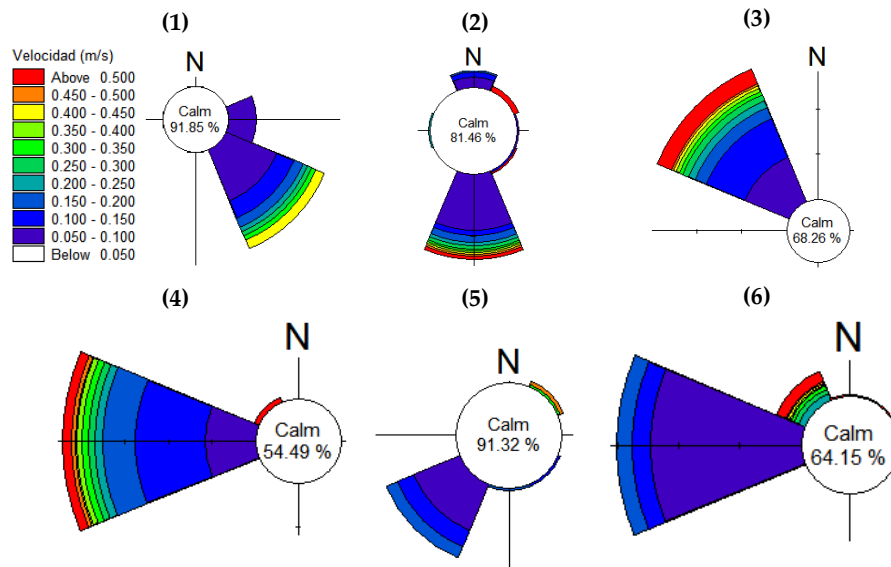


Figura 46. Magnitud y dirección de corrientes en las estaciones de la bahía (1, 2, 3,4) y laguna (5,6) para el evento de ciclón.

La máxima intensidad de las corrientes alcanzó valores superiores a 2 m/s sobre la línea de costa (Figura 47). Durante este evento las bahías se ven seriamente afectadas por sobreelevaciones altas y corrientes de magnitud considerables. Los resultados sugieren que el transporte del contaminante se produciría con mayor intensidad en estas zonas. En la laguna la magnitud de corrientes fue de 1 m/s.

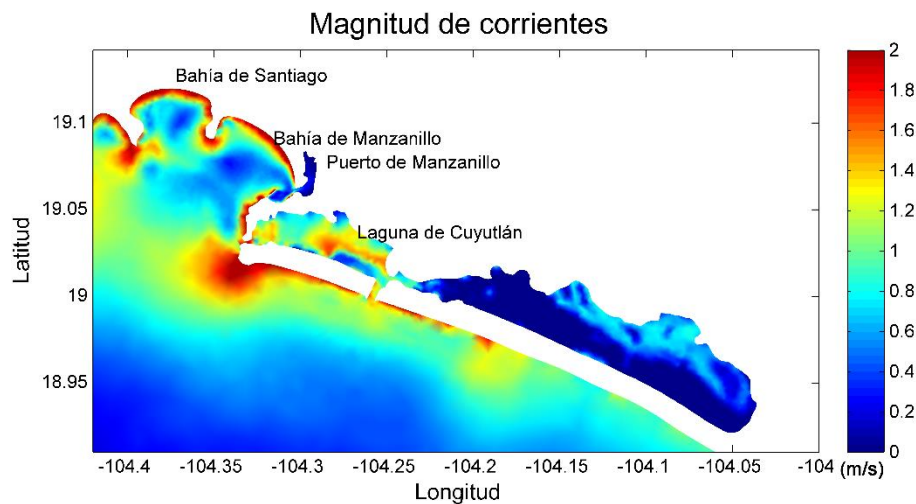


Figura 47. Magnitudes máximas de corriente del huracán entrando por Manzanillo.

4.2 Efecto de condiciones hidrodinámicas extremas en la dispersión de hidrocarburos

En esta sección se presentan los resultados del comportamiento de la dispersión durante fenómenos extremos de tsunami y huracán. Para ambos fenómenos se analizó el vertido durante las fechas en que impactaron la zona costera. Posteriormente se muestran los resultados obtenidos de los escenarios de dispersión en diferente fase de la marea. Por último se exponen los resultados de la simulación de vertido de 5 días en estados de marea muerta y viva.

4.2.1 Efecto en la dispersión de hidrocarburos durante el impacto de ambos eventos extremos

Aquí se presenta el caso hipotético de dispersión durante la fecha en que los fenómenos impactaron las costas. Estos resultados muestran hipotéticamente un vertido de hidrocarburos sólo bajo los eventos del tsunami de 1995 y el huracán Patricia. Para ambos casos los eventos extremos se hicieron coincidir con mareas vivas.

Tsunami del 9 de octubre de 1995

Bajo las condiciones de tsunami (Figura 48b), la dispersión del contaminante fue mayor que bajo las condiciones que solo consideraron la modelo de marea astronómica (Figura 48a), donde la mancha se mantiene focalizada en la zona del vertido. A pesar de que la mancha del hidrocarburo tuvo mayor dispersión con el tsunami, ésta no alcanzó la zona de playas en la Bahía de Manzanillo y la dispersión se caracterizó por ser uniforme, alejándose de la zona del vertido al momento del impacto del tsunami.

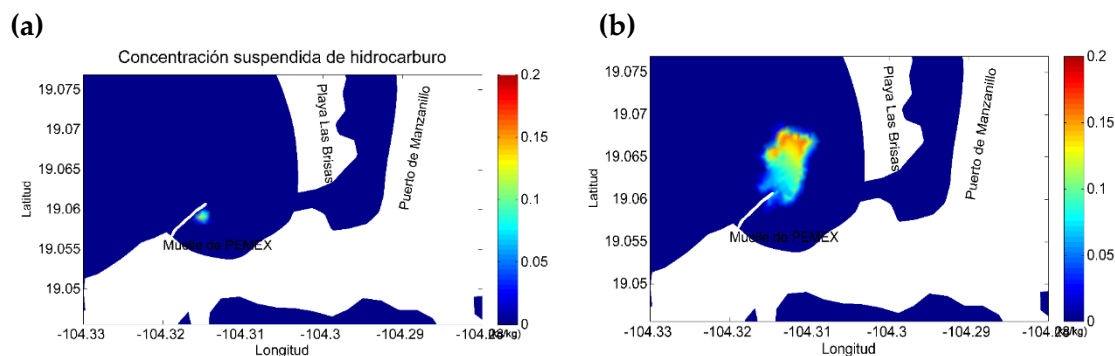


Figura 48. Mapas de envolventes máximas de la dispersión de hidrocarburo ocasionada por hidrodinámica de marea (a) y a consecuencia del evento de tsunami (b).

La evolución de la concentración del contaminante se analizó considerando la coincidencia de la marea viva máxima con el pico de la onda de tsunami. En la Figura 49 se muestra el comportamiento de la concentración y la expansión del contaminante en la bahía para 3, 12, 24, y 48 horas. En el último caso se observa que el área de mayor concentración (0.5 kg/kg) es frente a la Bahía de Manzanillo, en la zona de playa las Brisas. Las implicaciones que estos escenarios exponen son las concentraciones de residuos fósiles liberadas en la zona costera, para el caso de tres horas, sin duda tendría repercusión en la biota marina cercana; alimentando a los pequeños microorganismo que a su vez son devorados por otros de mayor tamaño, hasta llegar al consumo humano. Los tres escenarios de dispersión siguientes, en los que se alcanza la playa (total o parcialmente), responden a un mayor grado de complejidad. Esto no sólo se debe al mecanismo físico involucrado en la zona de rompiente del oleaje, si a que los organismos costeros, que regularmente viven en bermas, dunas y zona de swash, se ven seriamente afectados y también forman parte de una cadena trófica compleja.

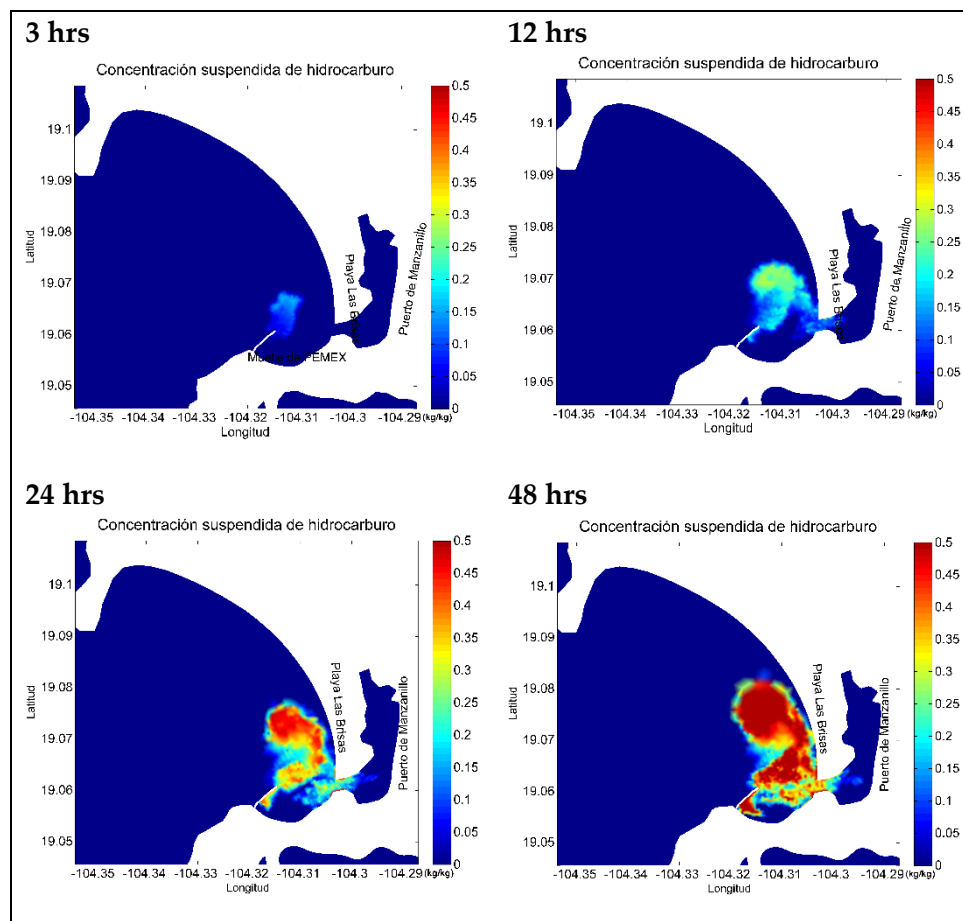


Figura 49. Mapas de envolventes máximas de la evolución de la dispersión en el tiempo del tsunami en condiciones de marea viva durante la máxima elevación registrada.

Huracán Patricia 20-24 de octubre de 2015

El vertido en este escenario se realizó antes de que el huracán alcanzara la máxima sobreelevación en la superficie del océano. La simulación de la dispersión inducida por el huracán Patricia (Figura 50b) resultó en condiciones más adversas de contaminación en relación a la marea astronómica (Figura 50a), siendo que el huracán puede transportar el contaminante hasta la playa en un tiempo relativamente corto (12 horas).

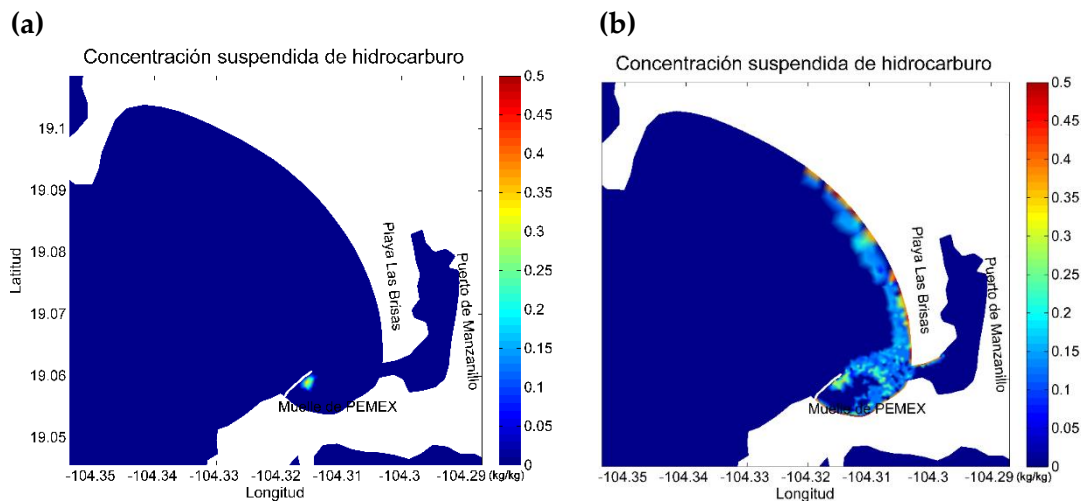


Figura 50. Mapas de envolventes máximas de la dispersión de hidrocarburo en condiciones de marea (a) y propagación durante un evento de huracán (b).

Comparando la dispersión generada por los eventos extremos, tenemos que el tsunami genera una mancha más concentrada pero cercana a la zona de la fuente (Figura 51a). En términos de planeación ante una contingencia ambiental de este tipo, los resultados indican que el escenario más desfavorable es la llegada de un evento de huracán. Lo anterior se debe a que los vientos del huracán generan corrientes que desplazan grandes distancias a los contaminantes, y en poco tiempo (Figura 51b). Considerándose así como un desastre mayor, al causar un esfuerzo importante frente a la contingencia respecto al que puede provocar la onda de tsunami.

Con base en los resultados de la dispersión generada por ambos eventos extremos, se puede observar que el huracán genera gran potencial advectivo en la superficie del mar, por lo que el proceso de advección domina el transporte del hidrocarburo sobre el de difusión. Mientras que para el caso del tsunami, el mecanismo de advección-difusión se desarrolló más equilibrado y es por ello que la mancha de contaminante se dispersa uniformemente.

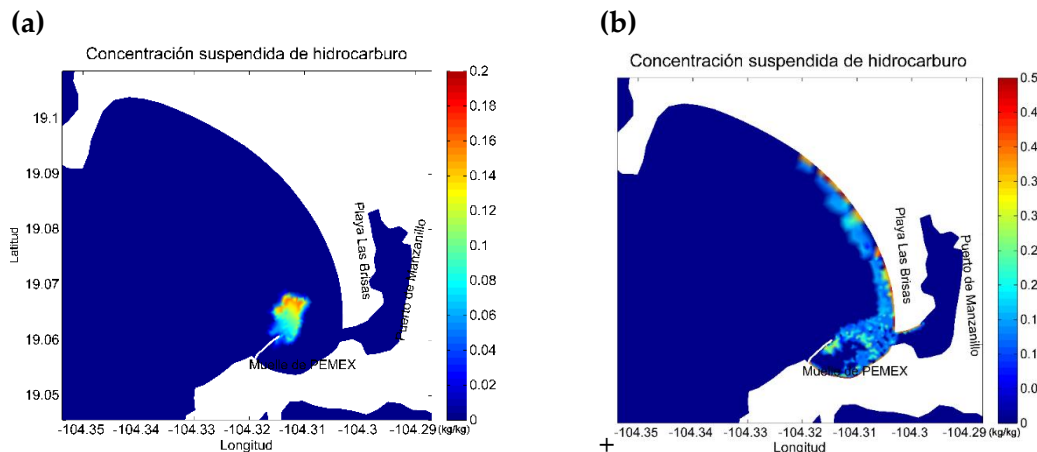


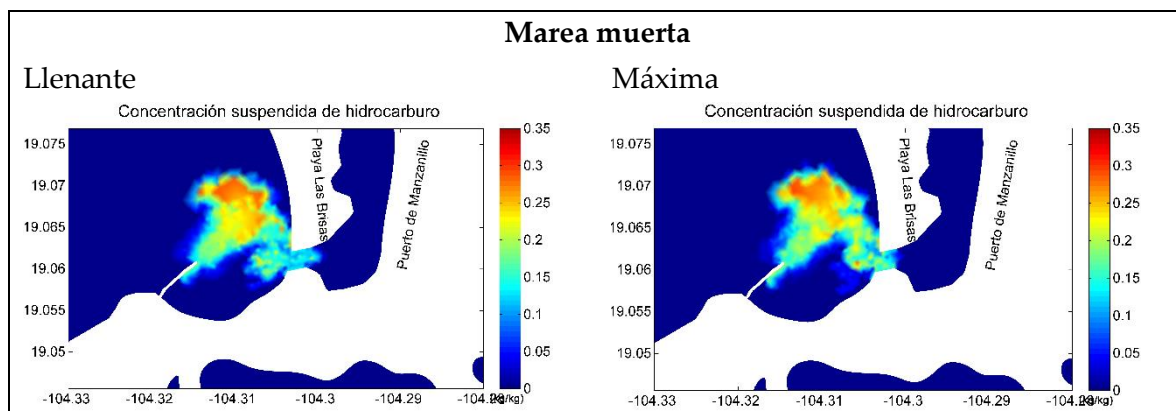
Figura 51. Mapas de envolventes máximas del destino final de los hidrocarburos en el caso del fenómeno de tsunami (a) y huracán (b).

4.2.2 Efecto de la onda de tsunami en la dispersión de hidrocarburos durante diferente fase de marea astronómica

Los resultados de los escenarios de dispersión de tsunami en las cuatro fases de marea (llenante, máxima, mínima y vaciante) se llevaron a cabo en dos lugares de interés: terminal de PEMEX y Laguna de Cuyutlán.

Área de la Terminal de PEMEX

En la Figura 52 se presenta la dispersión y las máximas concentraciones alcanzadas para el caso del tsunami en la terminal de PEMEX. Los resultados muestran que bajo los cuatro escenarios se presenta una dispersión de hidrocarburos similar en concentración y área, indicando que la fase de marea en la que impacta el tsunami no es determinante en la afectación por el vertido.



Efecto de Condiciones Hidrodinámicas Extremas en Escenarios de Dispersión de Hidrocarburos

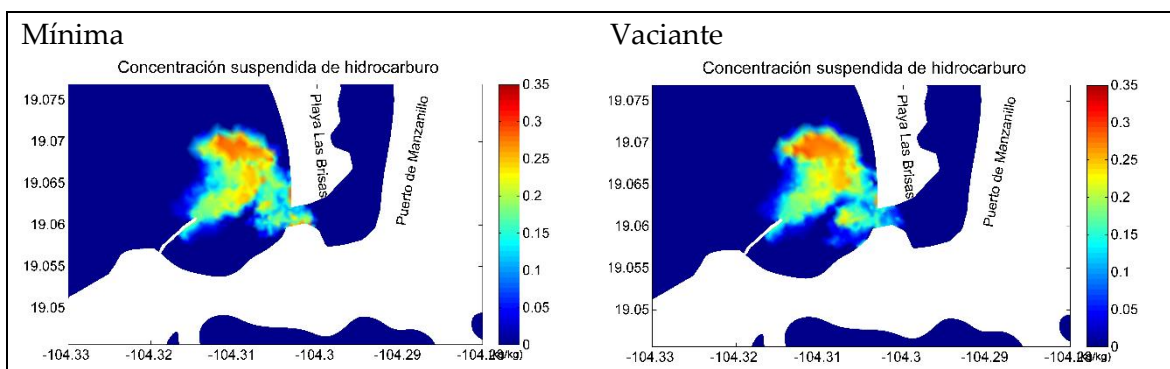


Figura 52. Mapas de envolventes máximas de los escenarios de dispersión bajo el efecto de tsunami en 4 diferentes fases de la marea muerta por un periodo de 12 hrs.

Los resultados presentados en la Figura 53, muestran que el estado de marea viva no influye considerablemente en la dispersión de la concentración, que alcanzó valores máximos de 0.35 kg/kg frente a la Bahía de Manzanillo: también, el comportamiento de la mancha de dispersión fue similar al encontrado en los resultados de las simulaciones en marea muerta. Se observa que la propagación de la onda de tsunami en marea viva generó un comportamiento en la mancha de hidrocarburo equivalente al que se presenta en marea muerta.

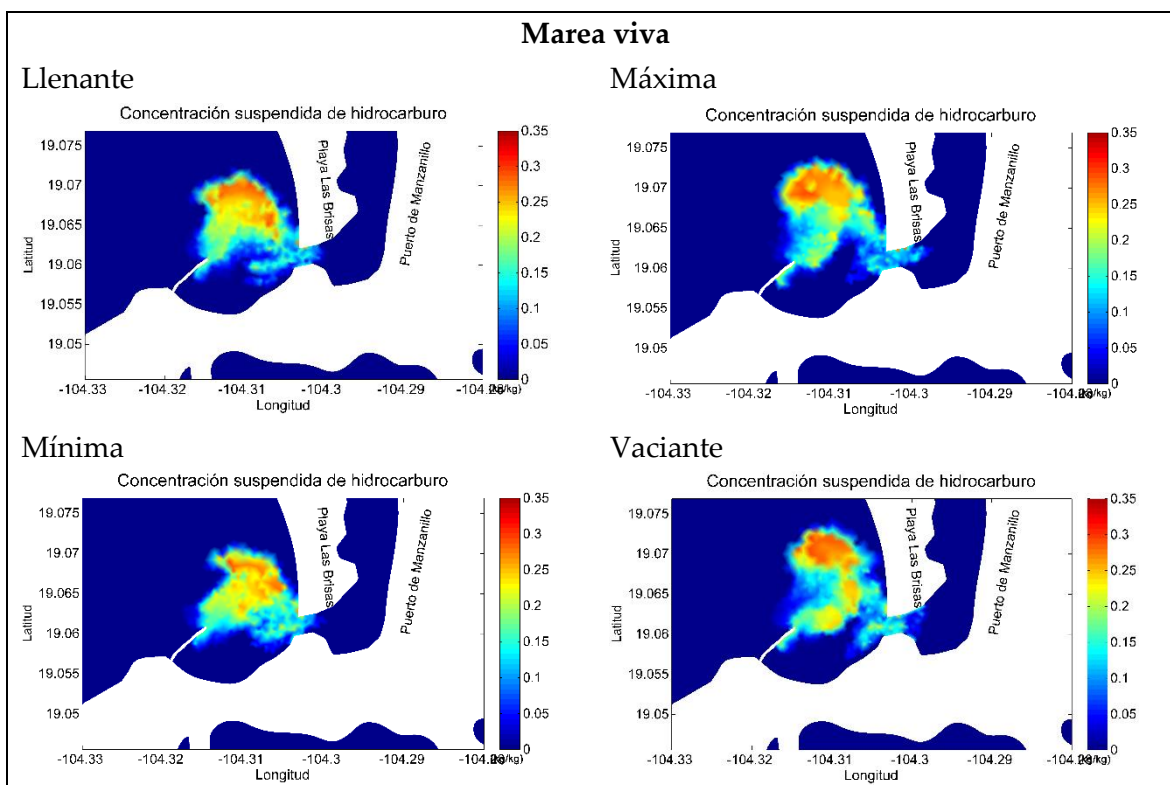


Figura 53. Mapas de envolventes máximas de los escenarios de dispersión bajo el efecto de tsunami en marea viva por un periodo de 12 hrs.

Área de la Laguna de Cuyutlán

Para el caso de la Laguna de Cuyutlán las condiciones hidrodinámicas no se vieron afectadas en gran medida por la onda de tsunami. Esto puede deberse a que ésta se encuentra naturalmente protegida por sus islas de barrera y la onda sólo se propagó a través del canal de conexión entre el cuerpo lagunar y el mar. En la Figura 54 se muestra que en los cuatro escenarios simulados en estado de marea muerta, la dispersión no alcanzó un área significativa para ningún caso.

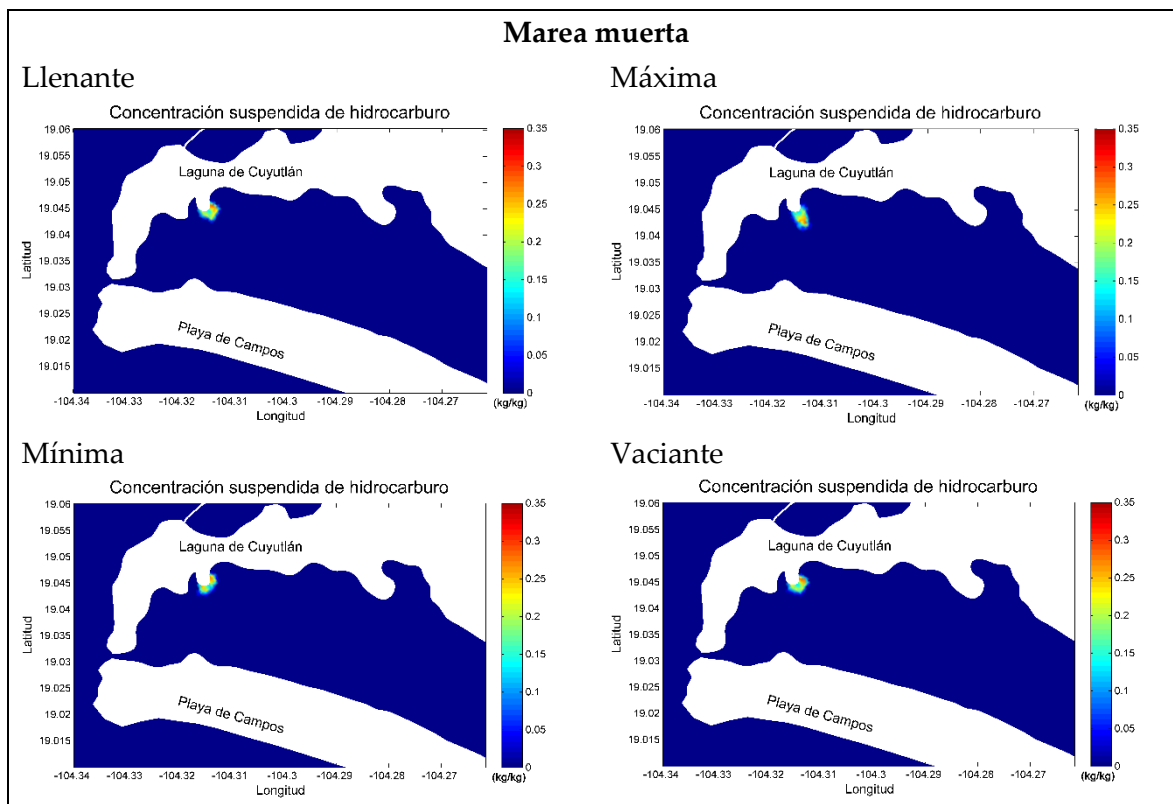


Figura 54. Mapas de envolventes máximas de los escenarios de dispersión en condiciones hidrodinámicas de tsunami en cuatro diferentes fases de marea muerta por un periodo de 12 hrs.

Los escenarios de dispersión en la laguna durante marea viva y bajo el efecto del tsunami, formaron una pluma de contaminante para los casos de llenante, máxima y vaciante. Esta pluma toma dirección hacia la parte sur de la laguna; la hidrodinámica inducida por la marea astronómica domina el transporte de los hidrocarburos, ya que la onda de tsunami no causó un efecto considerable. Se afectaron principalmente áreas de pesca y manglar ubicadas en esa zona con concentraciones de aproximadamente 0.20 kg/kg. Para el caso de mínima la dispersión se mantuvo en la cercanía de la fuente (Figura 55) con concentraciones de 0.15 kg/kg.

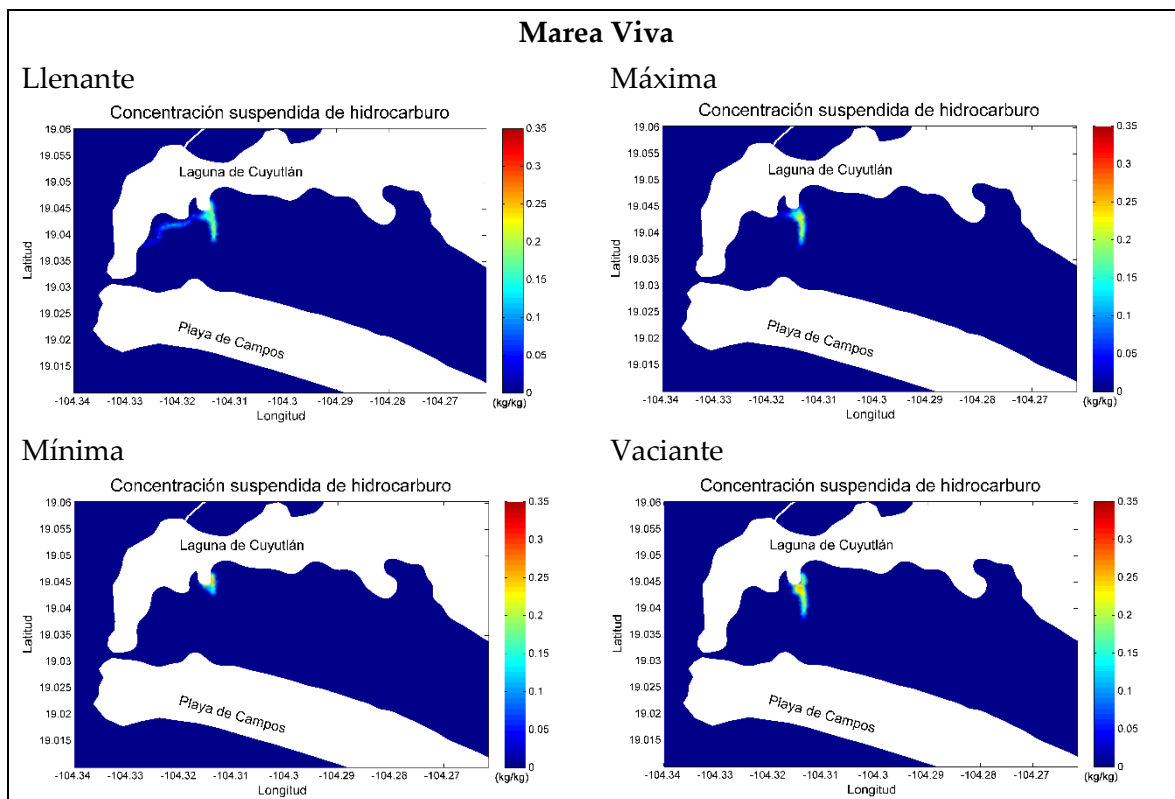


Figura 55. Mapas de envolventes máximas de los escenarios de dispersión en condiciones hidrodinámicas de tsunami en cuatro diferentes fases de marea viva por un periodo de 12 hrs.

Los resultados indican que bajo el evento de tsunami, el máximo potencial de transporte se presenta en los canales de entrada al puerto y a la laguna. Esto se debe a que en estas zonas existe una reducción en el área hidráulica, lo cual incrementa la magnitud de las corrientes. Para el caso particular de la laguna, los ocho casos simulados sugieren que la hidrodinámica no se ve perturbada en gran medida por la onda de tsunami y las corrientes inducidas por marea son las que dominan el proceso transporte.

4.2.3 Efecto en la dispersión de hidrocarburos durante diferente fase de la marea astronómica ante el impacto del huracán

Aquí se presentan los resultados de los escenarios de dispersión de huracán en las cuatro fases de marea (llenante, máxima, mínima y vaciante) y en ambos sitios de interés: terminal de PEMEX y Laguna de Cuyutlán.

Área de la Terminal de PEMEX

Las condiciones hidrodinámicas generadas por el huracán durante marea muerta y su interacción con la geometría costera formaron un vórtice que mantuvo la mancha de hidrocarburo en el área cercana a la terminal de PEMEX. Esto provocó que el transporte de hidrocarburos se dirigiera hacia el lado derecho de la estructura (Figura 56). En el caso donde la máxima marea de tormenta coincide con el nivel de marea mínima, por dispersión el derrame alcanza las costas de las playas cercanas con concentraciones cercanas a 0.15 kg/kg. Para los otros tres casos el contaminante siguió el mismo patrón rotativo dentro del área que cubre la estructura de protección de la terminal, pero alcanzó el canal portuario con concentraciones de aproximadamente 0.35 kg/kg.

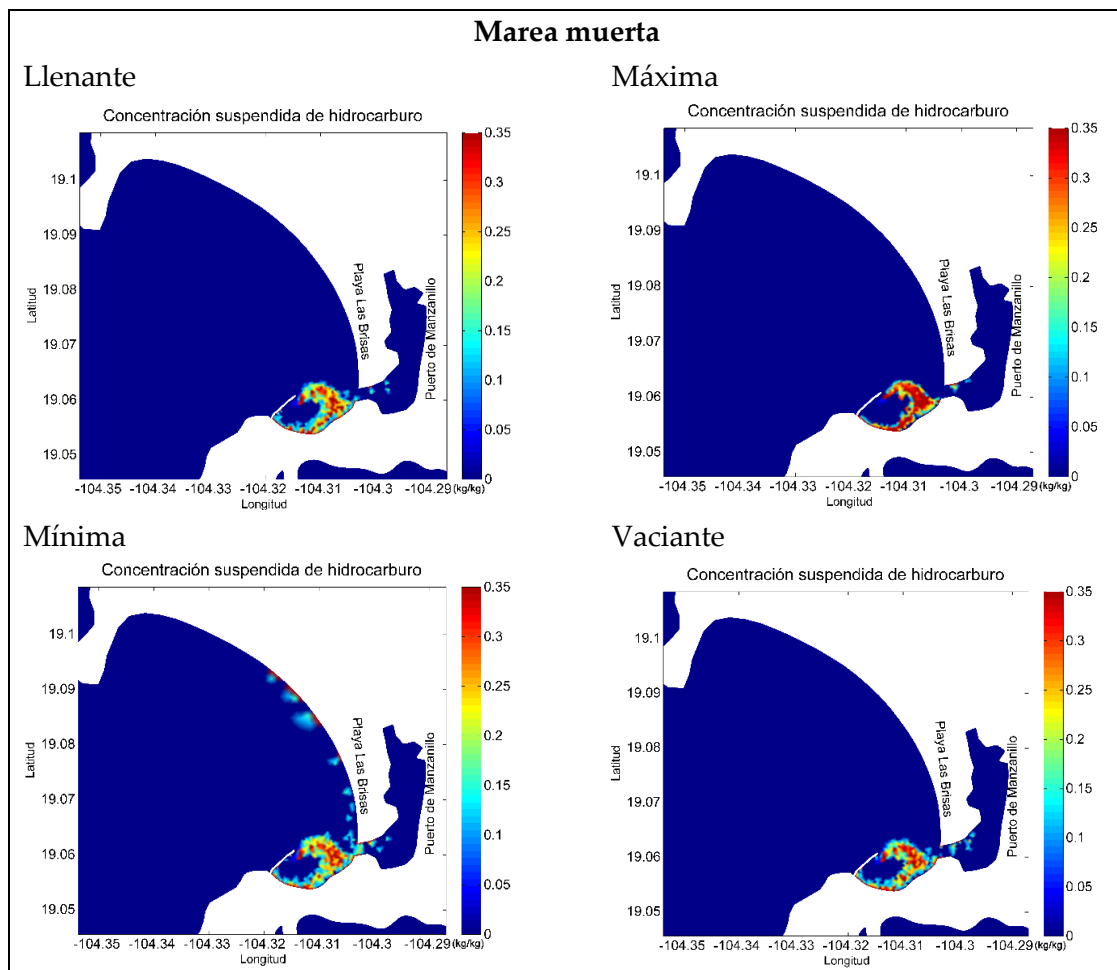


Figura 56. Mapas de envolventes máximas para los escenarios de dispersión en condiciones hidrodinámicas de huracán en cuatro diferentes fases durante marea muerta por un periodo de 12 hrs.

En caso del impacto del huracán durante marea viva, el comportamiento en el movimiento de los hidrocarburos para los distintos escenarios fue similar respecto a los eventos de marea

Efecto de Condiciones Hidrodinámicas Extremas en Escenarios de Dispersión de

Hidrocarburos

muerta (Figura 57). Sin embargo, en el caso de marea viva la mancha de contaminante con concentraciones de entre 0.25 – 0.30 kg/kg alcanza mayor área en el canal de acceso al puerto que en el caso de marea muerta.

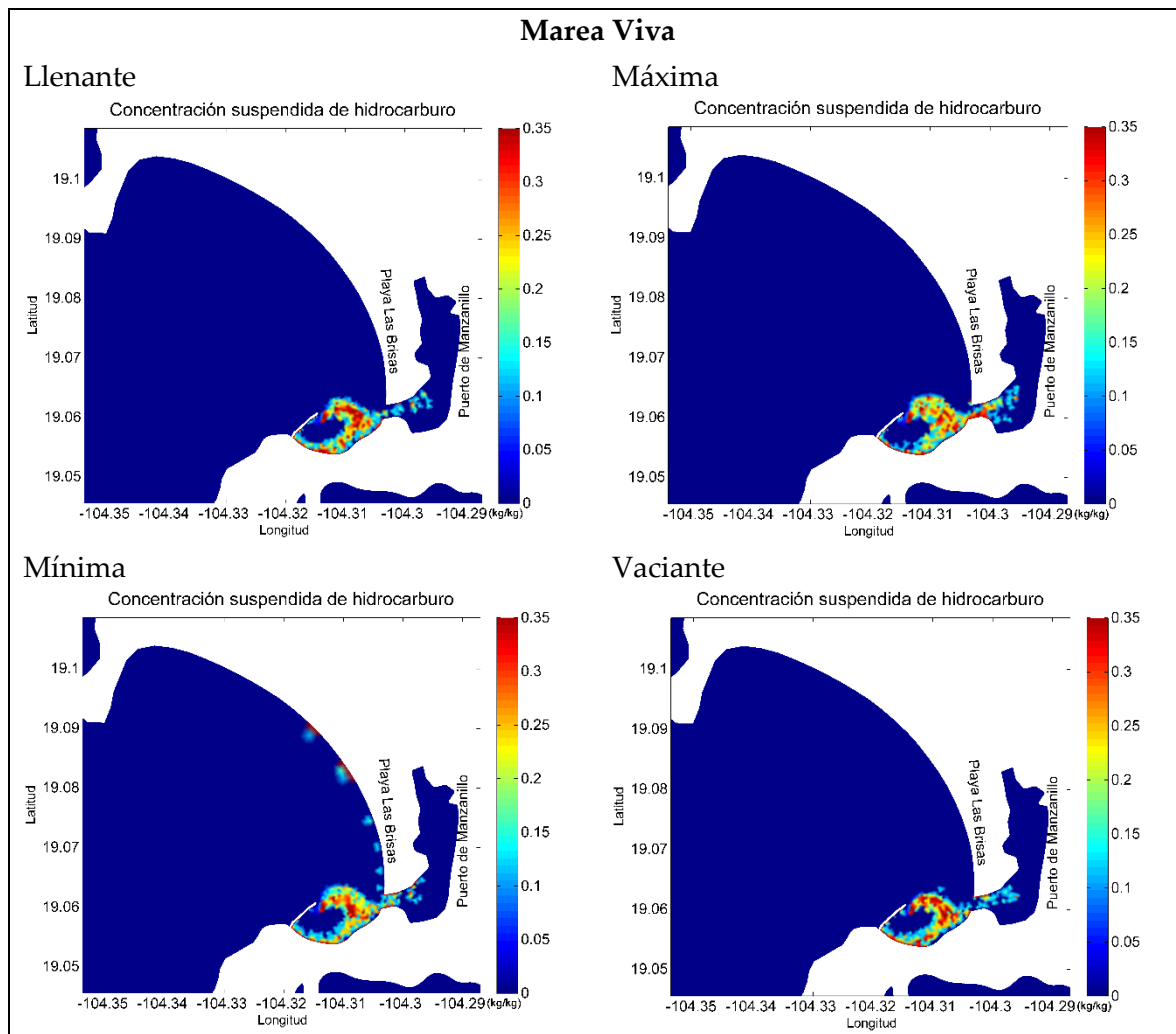


Figura 57. Mapas de envolventes máximas para los escenarios de dispersión en condiciones hidrodinámicas de huracán en cuatro diferentes fases de marea viva por un periodo de 12 hrs.

Área de la Laguna de Cuyutlán

En la Laguna de Cuyutlán la dispersión que se generó a partir de las corrientes producidas por el impacto del huracán, transportó el contaminante hasta la zona suroeste del cuerpo lagunar (Figura 58). La contaminación se produjo dentro de la laguna y zonas aledañas a las inmediaciones de la zona del vertido. El océano también se vio afectado con concentraciones máximas de aproximadamente 0.35 kg/kg debido al transporte del hidrocarburo a través del canal de toma de agua para enfriamiento de la termoeléctrica.

Cabe destacar que lo anterior sucede en todas las fases de marea, con excepción de la pleamar, donde el vertido se confina a la laguna.

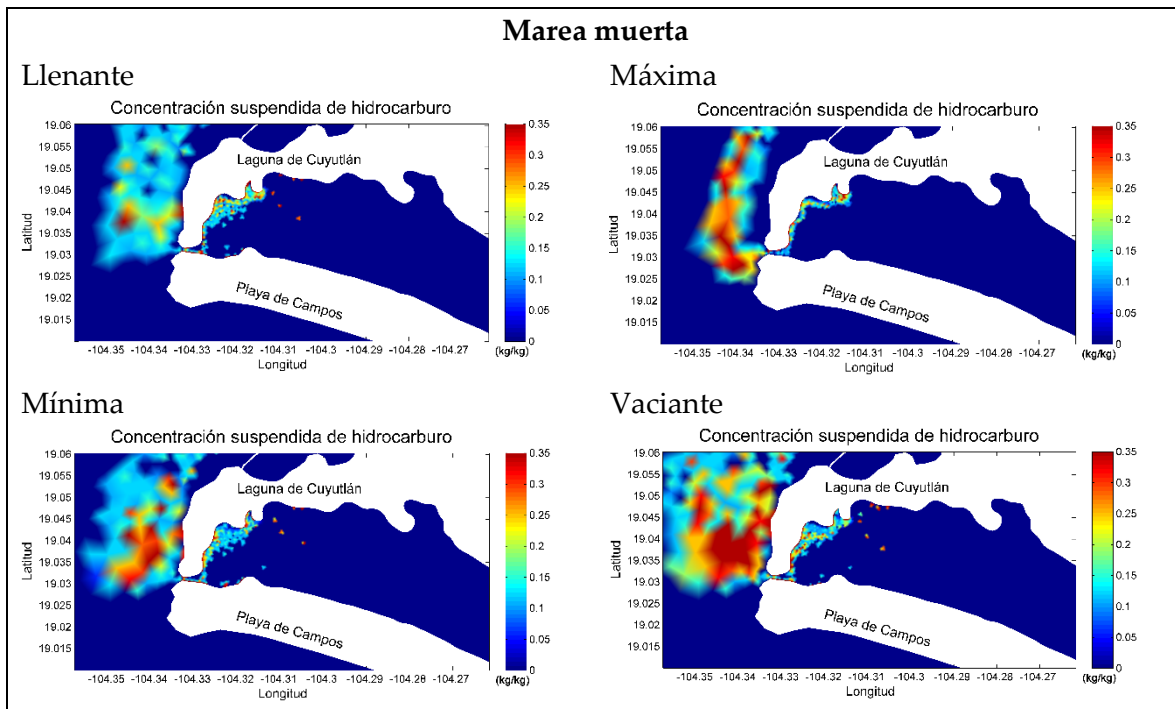
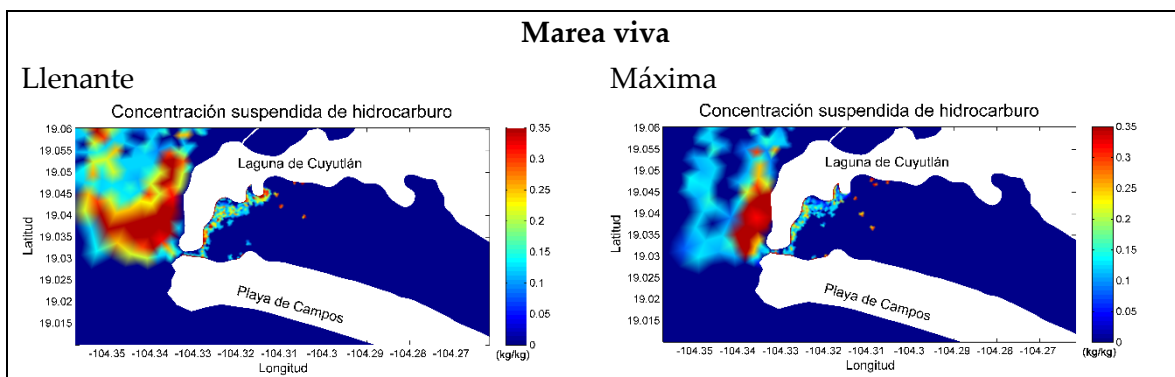


Figura 58. Mapas de envolventes máximas de la dispersión generada por condiciones hidrodinámicas de huracán en marea muerta dentro de la laguna por un periodo de 12 hrs.

En el caso del impacto del evento durante la marea viva, se produjo un patrón similar al de marea muerta, con mayores concentraciones cercanas a la línea de costa exterior a la laguna (0.35 kg/kg), mientras que las mayores concentraciones dentro de la laguna fueron de aproximadamente 0.15 kg/kg (Figura 59).



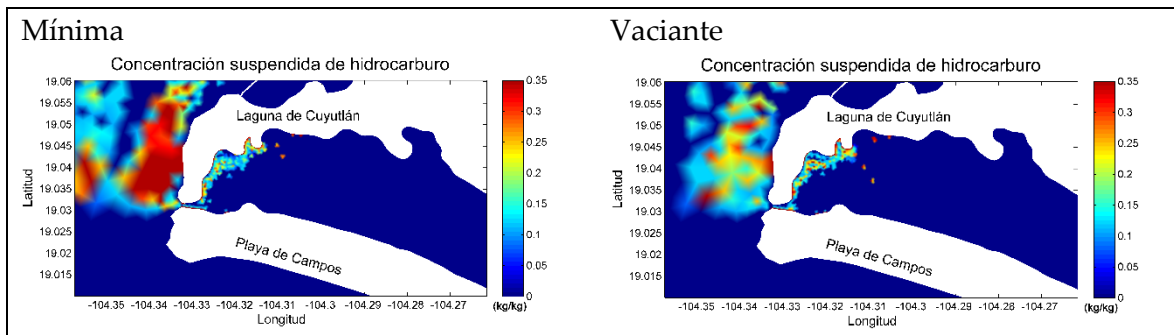


Figura 59. Mapas de envolventes máximas de la dispersión generada por condiciones hidrodinámicas de huracán en marea viva dentro de la laguna por un periodo de 12 hrs.

Los resultados de todos los escenarios en la laguna muestran que las corrientes generadas por el huracán impulsan la concentración vertida de hidrocarburo hacia fuera de la laguna desde la región noroeste hasta la suroeste. Esto se debió a que los patrones de circulación en las corrientes en la laguna que convergieron en el punto donde se localiza el canal de toma de aguas para enfriamiento de la Termoeléctrica de Manzanillo.

En la Figura 60 se muestra el comportamiento adquirido por la mancha de hidrocarburo, bajo la hidrodinámica producida por ambos fenómenos.

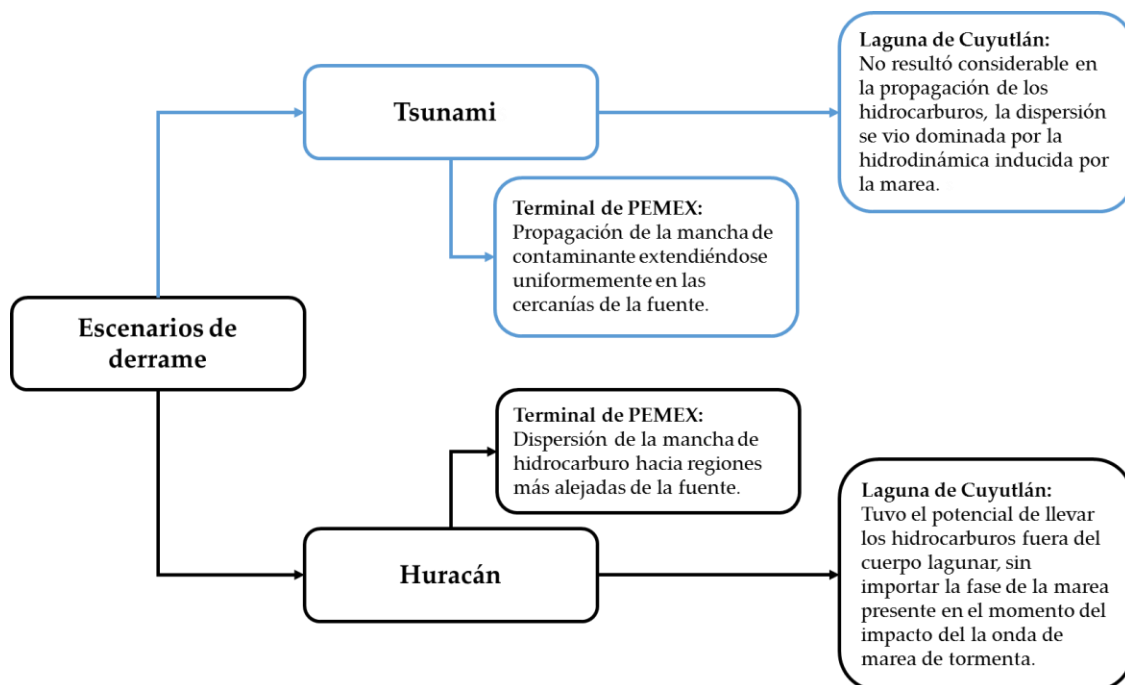


Figura 60. Diagrama conceptual del comportamiento de la mancha de hidrocarburos para ambos eventos en los sitios del derrame.

4.2.4 Dispersión de hidrocarburos en condiciones hidrodinámicas de marea astronómica

Se realizaron dos escenarios de simulación de dispersión de hidrocarburos para un periodo de cinco días en la terminal de PEMEX y en la Laguna de Cuyutlán. Estos escenarios incluyeron tanto mareas vivas como mareas muertas. Los resultados de éstos escenarios muestran que la concentración alcanzada por el vertido de hidrocarburo en el periodo de mareas muertas afectó un área pequeña en las cercanías de la terminal (Figura 61a), mientras que en mareas vivas la zona de afectación es mayor (Figura 61b). Cabe destacar que en ambos casos las máximas concentraciones fueron de aproximadamente 0.70 kg/kg. La relevancia de este resultado fue que la dispersión del hidrocarburo puede llegar a obstaculizar zonas de tránsito de buques cercanas al canal de acceso portuario, además de afectar los hábitats marinos cercanos.

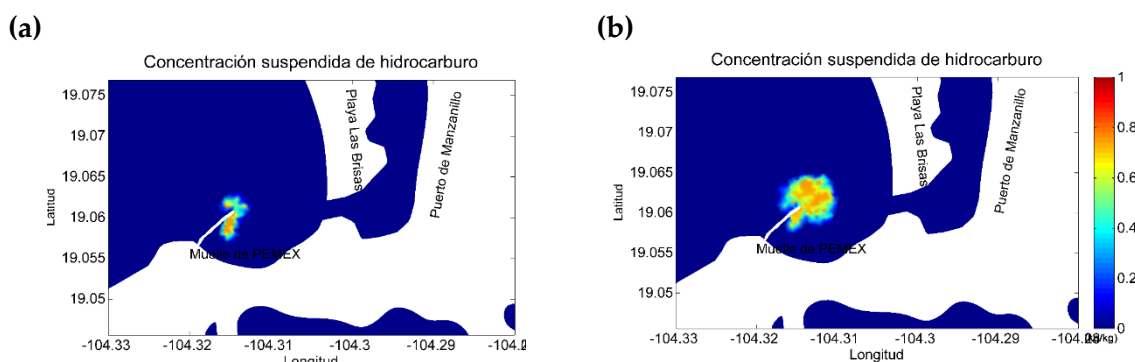


Figura 61. Mapas de envolventes máximas para la dispersión durante condición de marea muerta (a) y marea viva (b).

En el caso de la laguna de Cuyutlán, durante mareas muertas el hidrocarburo se propagó hacia el sur bordeando la zona oeste con concentraciones de hidrocarburo de 0.70 kg/kg (Figura 62a). Para el caso de mareas vivas el comportamiento fue similar, aunque las concentraciones menores a 0.2 kg/kg afectaron un área mayor (Figura 62b). En ambos casos, la contaminación afecta principalmente la zona pesquera que se encuentra en el lado oeste de la laguna.

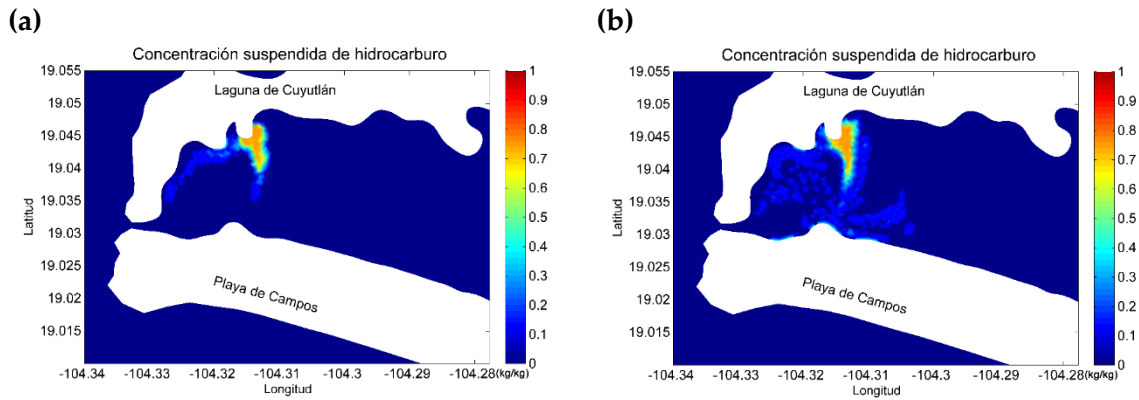


Figura 62. Mapas de envolventes máximas para la dispersión en la Laguna de Cuyutlán en condición de marea muerta (a) y viva (b).

Realizando una comparación entre la dispersión de contaminantes en condiciones normales (i.e. considerando solo mareas astronómicas) y la observada durante el impacto del tsunami, se encontró que en doce horas de vertido durante bajo las condiciones hidrodinámicas del evento extremo, la dispersión alcanza un área mayor a lo que cubre el derrame en cinco días durante marea viva.

Capítulo 5

Conclusiones

Se analizó el efecto que tienen los fenómenos extremos de tsunami y huracán en la hidrodinámica costera y en escenarios de dispersión de hidrocarburos en Manzanillo, Colima, México. Se localizaron dos sitios de estudio potencialmente vulnerables, el primero fue la Terminal de PEMEX cerca del Puerto de Manzanillo, y el segundo en la Laguna de Cuyutlán sobre el paso de un combustoleoducto que abastece la termoeléctrica local.

Se llevaron a cabo simulaciones hidrodinámicas en ambos sitios para dos fenómenos extremos; tsunami y huracán. Los resultados de la simulación hidrodinámica del tsunami indican que las mayores sobreelevaciones de superficie se produjeron dentro del Puerto de Manzanillo, y las magnitudes de las corrientes bajo este escenario se incrementaron en los canales y estrechos. Para el caso del huracán se encontró que las mayores elevaciones de superficie de superficie se originaron en la Laguna de Cuyutlán y las máximas magnitudes de corrientes se presentaron cerca de la línea de costa.

El efecto que tuvieron estos eventos extremos en la dispersión de hidrocarburos en la zona de la terminal indica que, para el caso del tsunami la propagación del contaminante se inició con la formación de una mancha, que se extendió de manera uniforme sobre la superficie del océano en las cercanías del punto de la fuente. Por otro lado el huracán tiene la capacidad de dispersar la mancha de hidrocarburo hacia regiones más lejanas. En resumen, al evento de tsunami le tomó aproximadamente 24 horas para que la expansión alcanzará la zona de playas más cercana, mientras que el huracán en 12 horas alcanzó regiones de playa alejadas.

En términos de potencial advectivo, el fenómeno de huracán desarrolla magnitudes mayores con respecto al proceso de difusión, siendo este último el que domina el transporte del hidrocarburo. Mientras que para el caso del tsunami, el mecanismo de advección-difusión se desarrolló más equilibrado y es por ello que la mancha de contaminante se dispersa uniformemente.

El comportamiento que adquirió la mancha de contaminante a causa de la hidrodinámica inducida por el tsunami, fue similar en forma de propagación del derrame y concentración (0.20-0.35 kg/kg), para todos los escenarios de mareas vivas y muertas en las diferentes fases de la onda (llenante, máxima, vaciante y mínima). Estos resultados sugieren que el hidrocarburo también puede alcanzar el canal de acceso portuario.

La hidrodinámica inducida por el huracán formó un vórtice a causa de la interacción con la geometría costera, esto provocó que el contaminante se mantuviera en el área que encierra la estructura de protección portuaria, y dentro de esta superficie se obtuvieron concentraciones que variaron de 0.15 -0.35 (kg/kg)

La perturbación del tsunami dentro de la laguna no resultó considerable en la propagación de los hidrocarburos, por lo que se asume que la dispersión en estos escenarios fueron dominados por la hidrodinámica inducida por la marea astronómica.

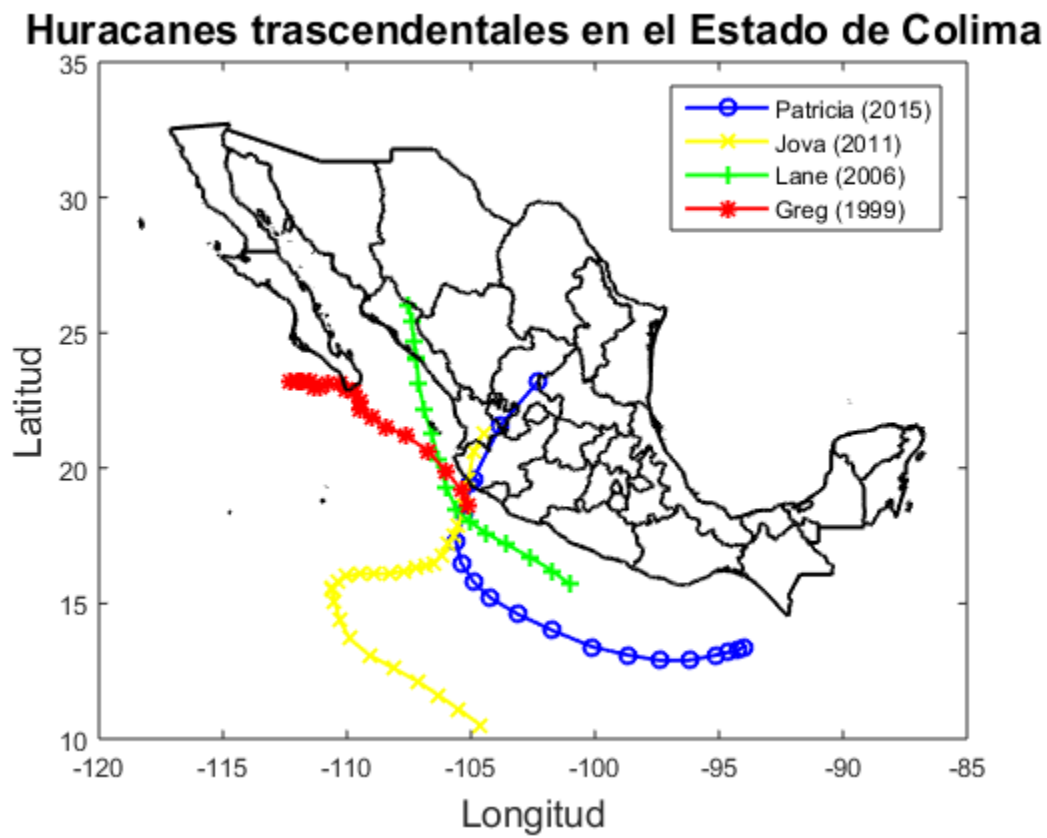
Los resultados de las corrientes generadas por el huracán dentro de la laguna indican que tienen el potencial de transporte para llevar los hidrocarburos fuera del cuerpo de agua, independientemente de la fase de la marea en la que impacte el fenómeno o el estado de la marea.

Entre los dos fenómenos extremos estudiados, el que causó mayor velocidad en la propagación del hidrocarburo fue huracán. Sin embargo, comparando los tiempos de arribo se puede decir que para este fenómeno se dispondría de tiempo para crear condiciones seguras a las instalaciones de manejo y transporte de hidrocarburos, con el objetivo de evitar desastres. Entretanto, el fenómeno de tsunami se origina de manera repentina, por lo tanto su naturaleza es impredecible y la velocidad a la que viaja ocasionaría problemas para actuar de manera rápida ante un escenario de vertido.

Por último es importante señalar que ante el impacto de cualquiera de los fenómenos extremos aquí estudiados, se debe acudir a la implementación de diferentes acciones de prevención y contingencia al desastre que minimicen los daños en el caso de dispersión de hidrocarburos. Estas acciones deben establecerse con base en la generación, tiempo de reacción y efectos sobre la línea de costa. En el caso de los tsunamis, el tiempo que se tiene entre la detección mar adentro y su llegada a la costa es relativamente corto, esto debido a su gran celeridad de onda, lo cual hace poco probable la ejecución de acciones ante una contingencia de vertido. En contraste a lo que sucede para el caso de los huracanes, que se caracterizan por tener largos periodos de tiempo desde su formación hasta su arribo a la zona costera, adquiriendo mayor tiempo para tomar las debidas acciones que prevengan escenarios de desastre por derrame de hidrocarburos que se puedan magnificar al llegar a la zona costera.

Anexos

1. Trayectoria de los huracanes que ocasionaron más daños en el Estado de Colima.



Referencias bibliográficas

Amante, C, y B.W. Eakins. (2009). *"ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis"*. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24 (March): 19. <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>.

Andersen, O. B. (1995). *"Global ocean tides from ERS 1 and TOPEX/POSEIDON altimetry"*. Journal of Geophysical Research, 100(95), 25,249-25,259.

Angulo, L. (02 de agosto de 2010). *"La jornada ecológica"*. Recuperado el 11 de 08 de 2016, de: <http://www.jornada.unam.mx/2010/08/02/eco-f.html>

Bravo, C. (2015). *"Reseña del huracán Patricia del Océano Pacífico"*. D.F.: CONAGUA.

British Petroleum. (2015). *"Statistical Review of World Energy June 2015"*. bp.com/satisticalreview BP.

Cap, F. (2006). *"Tsunamis and Hurricanes A Mathematical Approach"*. Mörlenbach, Germany: Springer.

Carbajal, N., y M. A. Galicia-Pérez. (2002). *"Earthquake-Induced Helmholtz Resonance in Manzanillo Lagoon, Mexico"*. Revista Mexicana de Física 48(3): 192–96.

Castillo, E. (7 de septiembre de 1999). *"Cuantiosos Daños en Todo el Estado Dejó Greg"*. Diario de Colima, págs. 1-2.

Castro, K. (20 de octubre de 2014). *"Veo Verde"*. Recuperado el 11 de 08 de 2016, de <https://www.veoverde.com/2014/10/los-10-peores-desastres-ambientales-del-mundo/>

CENAPRED. (21 de febrero de 2017). Centro Nacional de Prevención de Desastres. Obtenido de <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/107-CARTELCICLONESTROPICALES.PDF>

Cenedese, C., y Gordon, A. (19 de septiembre de 2016). *"Britannica Academic"*. Obtenido de <https://global.britannica.com/science/ocean-current>

Corona, N., y M. T. Ramírez-Herrera. (2012). *"Mapping and historical reconstruction of the great Mexican 22 June 1932 tsunami"*. Natural Hazards and Earth System Science.

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

DIGAOHM. (21 de febrero de 2017). Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología. Obtenido de: <http://digaohm.semar.gob.mx/historiaTsunamisMexico.html>

DHI. (2013). “MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM Hydrodynamic Module”. : 14.

— — —. 2014. “MIKE 21 Toolbox: Global Tide Model-Tidal prediction”. : 20.

— — —. 2015. “MIKE 21 / 3 Oil Spill Modelling”. : 6.

— — —. 2016. “MIKE 21 Flow Model User Manual”. : 120.

El Universal. (2011). “¿Tsunamis en México?” Obtenido de El Universal: http://archivo.eluniversal.com.mx/graficos/graficosanimados11/EU_tsunami_mexico/historia.html

Emanuel, Kerry, y Richard Rotunno. (2011). “Self-Stratification of Tropical Cyclone Outflow. Part I: Implications for Storm Structure”. Journal of the Atmospheric Sciences 68(10): 2236–49.

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

Exxon Mobil. (2015). “Summary Annual Report”.

Fenton, John. (2013). “Coastal and Ocean Engineering”. : 1–84.

Guo, W. J., y Wang, Y. X. (2009). “A numerical oil spill model based on a hybrid method”. Marine Pollution Bulletin, vol. 84, pp. 213–724.

González, J. (13 de octubre de 2011). “Incomunicadas, Santiago, Salagua y Valle de las Garzas por Desbordamiento de Ríos”. Diario de Manzanillo, págs. B-1.

H. Ayuntamiento de Manzanillo. (2013). Obtenido de: http://www.manzanillo.gob.mx/ayuntamiento/manzanillo/antecedentes_historicos

Hernández, C. (15 de agosto de 2016). El Correo de Manzanillo. Obtenido de: <http://elcorreodemanzanillo.mx/2016/05/07/el-llanitos-muestra-derrame-de-combustibles/>

Holland, Greg J. (1980). “An Analytic Model of the Wind and Pressure Profiles in Hurricanes”. Monthly Weather Review 108(8): 1212–18.

Huesca, P. (4 de abril de 2005). “Como en Indonesia, un tsunami inundó la Manzanilla en 1995”. Obtenido de Crónica: <http://www.cronica.com.mx/notas/2005/174836.html>

Hunt, J. N., y B. Johns. (1963). “Currents induced by tides and gravity waves”. *Tellus* 15(4): 343–51.

INEGI. (2015). “Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0”. Recuperado el 20 de 05 de 2015, de: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>

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

Kimberlain, T. B., Blake, E. S., y Cangialosi, J. P. (2016). National Hurricane Center Tropical “Cyclone Report Hurricane Patricia”, (October 2015), 20–24.

Kongko, Widjo, y Torsten Schlurmann. (2011). “The Java Tsunami Model: Using Highly-Resolved Data To Model the Past Event and To Estimate the Future Hazard”. *Proceedings of 32nd Conference on Coastal Engineering*: 3670–85.

Liu, Kam-biu. (2004). “Paleotempestology: Principles, Methods, and Examples from Gulf Lake Sediments”. En *Hurricanes and Typhoons: The Past, Present and Future*, Columbia University Press, 13–57.

Leet, L. D. (1948). “Causes of Catastrophe”. New York: McGraw-Hill.

Lida, K. (1963). “Magnitude, Energy And Generation Mechanism Of Tsunami And A Catalogue Of Earthquake Associated With Tsunami”. *International Union Geodesy and Geophysics Monograph*, 7-17.

López, C. (11 de Diciembre de 2008). “La Manzanilla Tsunami – 1995”. Obtenido de La Manzanilla on the Costalegre: <http://la-manzanilla.blogspot.mx/2008/12/la-manzanilla-tsunami-1995.html>

MAC. (23 de octubre de 2015). El Economista. Obtenido de <http://eleconomista.com.mx/sociedad/2015/10/23/huracanes-mas-fuertes-que-han-pegado-mexico>

Macdonel, G., Pindter, J., Pizá, J., y López, H. (2011). “Ingeniería Marítima y Portuaria”. México D.F.: Alfaomega.

Magallón, A., y Ramírez, H. (24 de octubre de 2015). *"Daños menores; ninguna víctima"*. Diario de Colima, pág. 1.

Mangor, K., Drønen, N., Kærgaard, K., y Kristensen, S. (2017). *"Shoreline Management Guidelines"*. Hørsholm, Denmark: DHI.

Martínez, F., y Aranda, J. (17 de septiembre de 2006). *"Lane toca tierra en Sinaloa; un muerto y millonarias pérdidas materiales"*. La Jornada.

Massel, Stanislaw. (1999). *"Fluid Mechanics for Marine Ecologists"*. Berlín: Springer.

Méndez, L. (15 de agosto de 2016). Manzanillo News MX. Obtenido de <http://manzanillonews.mx/inicia-profepa-retiro-de-combustible-del-buque-llanitos/>

Miglierini, J. (16 de junio de 2010). *"Derrame: las lecciones de México"*. BBC Mundo. Obtenido de: http://www.bbc.com/mundo/internacional/2010/06/100615_derrame_especial_campeche.s

Muciño, F. (18 de marzo de 2014). Forbes Mexico. Obtenido de: <http://www.forbes.com.mx/los-paises-mas-ricos-en-oro-negro/#gs.4XzpocU>

NOAA. (21 de febrero de 2017). *"National Center for Environmental Information"*. Obtenido de: https://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/results?st_1=21.055&bt_2=-106.205&st_2=-102.205&bt_1=17.055&d=7&t=101650&s=7

Núñez-Cornú, Francisco J., Modesto Ortiz, y John J. Sánchez. (2008). *"The great 1787 Mexican tsunami"*. Natural Hazards 47(3): 569–76.

Okal, Emile a., y José C. Borrero. (2011). *"The 'tsunami earthquake' of 1932 June 22 in Manzanillo, Mexico: Seismological study and tsunami simulations"*. Geophysical Journal International 187(3): 1443–59.

Ortiz, M et al. (2000). *"New constraints on the uplift of October 9, 1995 Jalisco-Colima earthquake (M w 8) based on the analysis of tsunami records at Manzanillo and Navidad, Mexico"*. 39: 349–57.

Pacheco, R. (16 de Enero de 2005). *"El tsunami de Colima, en 1932, se tragó un pueblo"*. Obtenido de Crónica: <http://www.cronica.com.mx/notas/2005/162283.html>

Padilla, R. (2007). *"Huracanes en el Estado de Colima 1573-1999: Ocurrencia del Riesgo por Fenómeno Hidrometeorológico"*. Memorias en Extenso VI Congreso Internacional y XII Nacional de Ciencias Ambientales.

Papazachos, B. C. et al. (2004). *"Global Relations Between Seismic Fault Parameters and Moment Magnitude of Earthquakes"*. Bulletin of the Geological Society of Greece XXXVI: 1482–89.

Pawlowicz, R., Beardsley, B., y Lentz, S. (2002). *"Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE"*. Computers and Geosciences, 929-937.

Proctor, Roger, Roger A. Flather, y Alan J. Elliott. (1994). *"Modelling tides and surface drift in the Arabian Gulf-application to the Gulf oil spill"*. Continental Shelf Research 14(5): 531–45.

Pugh, David, y Woodworth, Philip. (2014). *"Sea-Level Science"*. Second edition. New York: Cambridge University Press.

Ramírez-Herrera, María-Teresa et al. (2014). *"Unearthing earthquakes and their tsunamis using multiple proxies: the 22 June 1932 event and a probable fourteenth-century predecessor on the Pacific coast of Mexico"*. International Geology Review 56(13): 1584–1601.

Rincón, J. (03 de agosto de 2016). *"Derrama combustóleo PEMEX en laguna"*. Diario de Colima, pág. 1.

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

SGM. (22 de febrero de 2017). Servicio Geológico Mexicano. Obtenido de Evolución de la Tectónica en México:

<http://portalweb.sgm.gob.mx/museo/riesgos/tectonica/evolucion-tectonica-mexico>

Sibson, R. (1981). *"A brief description of natural neighbour interpolation"*. Interpreting multivariate data, 21, 21-36.

Stewart, Robert H. (2006). *"Introduction to Physical Oceanography"*. University Press of Florida.

Trejo, Elizabeth, Modesto Ortiz, y Francisco J. Núñez. (2015). *"Source Model of the October 9, 1995 Jalisco-Colima Tsunami as constrained by field survey reports, and on the numerical simulation of the tsunami"*. Geofísica Internacional: 149–59.

Wang, S. D., Y. M. Shen, y Y. H. Zheng. (2005). *"Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas"*. Ocean Engineering 32(13): 1556–71.

Weisse, Ralf, y Hans von Storch. (2010). *"Marine Climate and Climate Change Storms, Wind Waves and Storm Surges. First"*. ed. Praxis Publishing. Chichester, UK: Springer.

Wells, Donald L, y J. Coppersmith. (1994). *"New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement"*. Bulletin of the Seismological Society of America 84(4): 974–1002.

Wolf, Judith. (1978). *"Interaction of tide and surge in a semi-infinite uniform channel, with application to surge propagation down the east coast of Britain"*. Appl. Math. Modelling, 1978, Vol 2, pp. 245–53.

Young I. R. y Sobey R. J. (1981), *"The Numerical prediction of tropical cyclone wind-waves"*. Department of Civil & Systems Engineering, James Cook University of North Queensland.