

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C. ORGANISMO DESCENTRALIZADO DE INTERES PUBLICO

> Departamento de Oceanografía Física Km. 107 Carretera Tijuana-Ensenada * Ensenada, Baja California, México. Tel: +52 (646) 175 05 00 * Fax: +52 (646) 175 05 47



24 de noviembre de 2014 Ref: Convenio INECC/A1-007/2014

Reporte Final 24 de noviembre de 2014

Estudio para la incorporación de nuevas variables en los escenarios de cambio climático para México utilizados en la Quinta Comunicación Nacional

Coordinadora Técnica del Proyecto Tereza Cavazos¹

Parte II Escenarios de ascenso del nivel del mar

Alejandro Hinojosa², Christian Mario Appendini Albrechtsen³, María de Lourdes Mexicano Vargas², Rafael Meza Padilla³

¹ Departamento de Oceanografía Física, CICESE

² División de Ciencias de la Tierra, CICESE

³ Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, Instituto de Ingeniería, Unidad Académica-Sisal, UNAM

ÍNDICE

ÍNDICE	2
RESUMEN EJECUTIVO DE LA PARTE II	3
EXECUTIVE SUMMARY DE LA PARTE II	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. OBJETIVOS DE LA SEGUNDA ETAPA, PARTE II	4
3. PARTE II: ANÁLISIS DEL ASCENSO ESTÁTICO DEL NIVEL DEL MAR	5
3.1. ALCANCES Y CONSIDERACIONES	5
3.2. DATOS Y METODOLOGÍA	5
3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE ASCENSO ESTÁTICO DEL NIVEL DEL MAR	7
4. PARTE II: ESCENARIOS DE INUNDACIÓN POR MAREAS DE TORMENTA AUNADOS AL AUMENTO ESTÁTICO	DEL
NIVEL DEL MAR	13
4.1. ANTECEDENTES	13
4.2 OBJETIVOS	13
4.3 Metodología	14
4.3.1 Selección de eventos a simular	15
4.3.2 Campos de viento	16
4.4. MODELACIÓN NUMÉRICA	16
4.4.1 Mallas de cálculo y topobatimetría	
4.4.2 Modelo de Oleaje	20
4.4.3. Modelo Hidrodinamico	
4.4.4 Estrategia de modelación y escenarios de cambio climático	
4.5 RESULIADOS Y DISCUSION	24
4.5.7 Tsid UE HOIDOX	24 20
4.5.2 Tampico-ou. Madero	
4.5.4 La Paz	
5. CONCLUSIONES	40
6. BIBLIOGRAFÍA	41
7. RESUMEN DE ACTIVIDADES Y CRONOGRAMA (2 JUL - 30 NOV 2014)	42
ANEXO I. EJERCICIO SOBRE AREAS VULNERABLES	45

Resumen Ejecutivo de la Parte II

Los resultados de la **Parte II** del proyecto definen las zonas vulnerables a un ascenso estático del nivel del mar con escenarios de 1 y 2 metros de aumento. Las llanuras costeras del Golfo de México, Pacifico y la Península de Yucatán son las más afectadas. Se hizo un ejercicio delimitando zonas vulnerables como todas aquellas zonas planas (pendiente menor a 10°) con elevación del terreno menor a 100 m. Se incorporó un modelo de distribución espacial de la población (2004) para estimar el riesgo.

Además, para cuatro localidades costeras (Holbox, Tampico, Manzanillo y La Paz) se modelaron escenarios dinámicos del ascenso del nivel del mar, mediante modelación numérica que incluye mareas de tormenta asociadas al paso de huracanes aunados al ascenso estático del nivel del mar. Los resultados presentados en este estudio muestran la importancia de incluir escenarios dinámicos de aumento del nivel del mar, debido a que los escenarios estáticos no dimensionan la problemática del aumento del nivel del mar en las zonas costeras.

Executive Summary de la Parte II

Results from **Part II** of the project outline vulnerable areas to a static sea level rise based on scenarios of 1 and 2 meter rise. The coastal plains of the Gulf of Mexico, the Pacific and the Yucatan Peninsula are the most affected. An exercise was performed delineating all flat areas (slope less than 10 °) with less than 100 m terrain elevation. A model of spatial distribution of the population (2004) was incorporated to estimate the risk.

Moreover, four coastal locations (Holbox, Tampico, Manzanillo, and La Paz) were numerically modeled with storm surge scenarios associated with the passage of tropical cyclones coupled with the static sea level rise. The results presented here show the importance of including both dynamic sea level rise scenarios, because the static scenarios do not show the real dimension of the sea level rise problem in coastal regions.

1. Introducción

Considerando las predicciones en el ascenso de nivel del mar por los diferentes modelos climáticos en respuesta al calentamiento global de la Tierra (IPCC), se exploran las zonas que podrían ser afectadas por el ascenso estático del nivel del mar de 1 y 2 m en las costas mexicanas.

Se exploran los escenarios de ascenso del nivel del mar; el análisis se enfoca a las zonas costeras de México utilizando modelos digitales de elevación (DEM) para identificar las zonas susceptibles a ser afectadas. En una primera instancia, se analiza un ascenso estático del nivel del mar en 2 aproximaciones:

- Identificar todas aquellas celdas en el modelo de elevación cuya elevación es menor a umbrales de elevación (1 y 2 m).
- Identificar todas aquellas zonas cuya pendiente es menor a un umbral y además su elevación es menor a un umbral de altura.

Una vez identificadas las zonas vulnerables, se asocian con datos y modelos de distribución de población para valorar aquellos grupos o comunidades expuestas al peligro. También se relacionan con las provincias fisiográficas para enunciar las zonas afectadas.

Aunado a los escenarios de ascenso estático del nivel del mar, en una segunda instancia se exploran varias regiones costeras donde a este aumento de nivel del mar se le suman mareas de tormenta producidas por huracanes sintéticos con diferentes intensidades. Se presenta la metodología y los 4 sitios donde se hicieron las simulaciones. En este informe se incluye la metodología y resultados en las simulaciones. El grupo del CICESE se enfocó al análisis del ascenso estático del nivel del mar y el grupo de la UNAM a la simulación de las mareas de tormenta producidas por huracanes sintéticos.

Es importante destacar que en este informe se incorporó información y modelación que no estaba contemplada en la propuesta original, sin embargo consideramos importante incluirlos para que el INECC tenga mayores elementos de análisis en los escenarios de ascenso del nivel del mar. Las adiciones a la propuesta original son el modelo de distribución de la población (LandScan, 2004) y la simulación de mareas de tormenta.

2. Objetivos de la segunda etapa, Parte II

- 1. Evaluar las zonas vulnerables en escenarios de ascenso estático de 1 y 2 m del nivel del mar.
- 2. Definir zonas planas costeras y de poca elevación como zonas vulnerables y su relación con la distribución de la población México.
- 3. Presentar una metodología y resultados preliminares en la simulación de escenarios de marea de tormenta aunados al ascenso del nivel medio del mar (de 1 a 2 m) para 4 localidades de prueba.

3. Parte II: Análisis del ascenso estático del nivel del mar

3.1. Alcances y consideraciones

Como una aproximación para analizar escenarios de ascenso del nivel del mar se evalúan las zonas vulnerables a través de modelos digitales de elevación con datos disponibles de cobertura nacional. La veracidad en la valoración estará en función de la representación y exactitud del material fuente. Las llanuras costeras, zonas con poco relieve y de pendiente suave, serán las más vulnerables. Los modelos de elevación utilizados, se consideran como la mejor opción, sin embargo el inconveniente que presentan es que la representación de las alturas es en metros con números enteros. Es decir, que la resolución en altura es en saltos de 1 m, esto puede limitar el alcance sobre todo en las zonas muy planas.

3.2. Datos y metodología

Para crear los escenarios del ascenso estático del nivel del mar, nos basamos en los modelos digitales de elevación generados por la NASA en la misión SRTM (*Space Shuttle Radar Topography Mission*) del transbordador espacial (Farr *et al.*, 2007). La metodología se describe a continuación:

1. Se descargaron de la página <u>http://srtm.csi.cgiar.org/</u> 27 modelos digitales de elevación SRTM (de la NASA) versión 4. Estos modelos de elevación de cobertura global son distribuidos en rejillas regulares (rasters) en coordenadas geográficas (Latitud-Longitud) con los valores de altura en metros y con una extensión de 5° de latitud por 5° de longitud. La representación de las alturas es con enteros binarios con signo de 16 bits. La resolución espacial de las celdas es de 3 segundos de arco. Esta medida angular corresponde aproximadamente a 90 m para las latitudes de México. Los modelos digitales de elevación (MDE) se integraron en un mosaico de la República Mexicana que se muestra en la Figura 3.1. La retícula geográfica de la figura coincide con los límites de los archivos SRTM. Como referencia se incorporan los números de columna y renglón en la nomenclatura de los archivos SRTM de la página donde se obtuvieron.

Después de evaluar el producto del INEGI *Continuo de Elevaciones de México (CEM)* versión 3 <u>http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoelevaciones.aspx</u> como fuente de elevación, se descartó por encontrar algunos errores como saltos abruptos de elevación en los bordes de unos mapas escala 1:50,000 además de considerar más avanzada la técnica de percepción remota (interferometría de radar) en la generación global de los modelos SRTM de la NASA.



Figura 3.1. Se descargaron 27 mosaicos de modelos digitales de elevación SRTM con cobertura de 5° de latitud por 5° de longitud generados por la NASA para integrarlo a un modelo de elevación de la República Mexicana.

Las zonas suceptibles de ser afectadas por los ascensos estáticos del nivel del mar, se definieron a partir del modelo de elevación, clasificando las alturas menores a 1 m y entre 1 y 2m. La clasificación de alturas en el DEM se sobrepuso a un mapa base para ubicar las zonas afectadas. Mas adelante, se presentan algunos ejemplos en la sección de resultados.

2. Determinación de las zonas susceptibles a ser afectadas considerando: la elevación y la pendiente del terreno.

Para el cálculo de la pendiente del terreno, se proyectó el modelo digital de elevación (MDE) SRTM de la República Mexicana a la proyección Cónica Conforme de Lambert con un espaciamiento de 90 m, utilizando los parámetros definidos por el INEGI para sus productos escala uno a un millón. Éstos se indican en la Tabla 3.1. En la propuesta original, para el cálculo de la pendiente del terreno se tenía contemplado proyectar el modelo de elevación de coordenadas geográficas a la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), pero debido a que la República Mexicana está segmentada en 6 zonas UTM (de la 11 a la 16), se decidió utilizar la

proyección Cónica Conforme de Lambert de cobertura nacional. Con la pendiente del terreno y su elevación se delinearon todas aquellas zonas de poco relieve (planas) cuya altitud fuera menor de 100 m.

Tabla 3.1. Parámetros de la proyección cartográfica Cónica Conforme de Lambert utilizada para México por el INEGI y adoptada para la proyección de modelos de elevación SRTM.

Parámetro	Valor
Paralelo Base Menor	17 ° 30' N
Paralelo Base Mayor	29 ° 30' N
Meridiano Central	-102 ° W
Latitud de Origen	12 ° N
Falso Este	2,500,000
Falso Norte	0
Factor de Escala	1
Datum	WGS84

3. Distribución espacial de la población

Se utilizó un modelo de distribución espacial de la población (LandScan, 2004) para asociarla con las zonas vulnerables al ascenso estático del nivel del mar. El conjunto de datos LandScan es una rejilla regular global de resolución de 30" x 30" cuyo valor de la celda es un conteo de población, estima la distribución de la población mundial en celdas de aproximadamente 1 km de resolución (30 "X 30") < <u>http://web.ornl.gov/sci/landscan/</u>>. El algoritmo LandScan, utiliza datos espaciales y el análisis de imágenes de percepción remota en un enfoque multivariado (*dasymetric*) para desagregar censos dentro de un límite administrativo. En este proyecto se utilizó una versión de LandScan (2004) como una aproximación a la distribución de la población.

3.3 Resultados y discusión de ascenso estático del nivel del mar

Con el modelo de elevación SRTM de México preparado para este proyecto y con el apoyo de un sistema de información geográfica (ArcMap 10.1), se identificaron aquellas celdas cuya elevación fuera menor o igual a 1 m y aquellas entre 1 y 2 m. Para este informe se prepararon varios mapas, uno a nivel de todo México (Figura 3.2) y varios regionales donde se observó agregación de celdas con estos atributos. Como fondo se utilizó un mapa base de *National Geographic* para ubicar las zonas vulnerables. Se elaboraron mapas regionales con escenarios de ascenso de nivel estático para: Ciudad Madero Tamaulipas, Ciudad Obregón-Guaymas Sonora, San Carlos-Bahía Magdalena, B.C.S. y la Península de Yucatán.



Zonas Suceptibles a Inundación 1 y 2 m

Figura 3.2. Zonas suceptibles de inundarse bajo escenarios del ascenso estático del nivel del mar de 1 y 2 m. Por la escala del mapa, apenas se alcanzan a distinguir las zonas vulnerables. Desctaca las llanuras y pantanos Tabasqueños, la costa baja de Quintana Roo, la costa de Yucatán, la llanura costera y deltas de Sonora y Sinaloa, Ciudad Madero y Tampico en Tamaulipas, llanuras de Magdalena en BCS, Guerrero Negro BCS, delta del río Colorado.



Figura 3.3. Zonas suceptibles de inundarse bajo escenarios del ascenso estático del nivel del mar de 1 y 2 m en la Penínusla de Yucatán. Desctaca las llanuras y pantanos Tabasqueños, Ciudad del Carmen, la costa de Campeche, Yucatán y de Quintana Roo.



Zonas Suceptibles a Inundación 1 y 2 m

Figura 3.4. Zonas suceptibles de inundarse bajo escenarios del ascenso estático del nivel del mar de 1 y 2 m en la llanura costera Tamaulipeca donde se ubican Ciudad Madero y Tampico.



Zonas Suceptibles a Inundación 1 y 2 m

Figura 3.5. Zonas suceptibles de inundarse bajo escenarios del ascenso estático del nivel del mar de 1 y 2 m. Destacan la llanura costera y los deltas de Sonora y Sinaloa.



Zonas Suceptibles a Inundación 1 y 2 m

Figura 3.6. Zonas suceptibles de inundarse bajo escenarios del ascenso estático del nivel del mar de 1 y 2 m. Destacan las llanuras de Bahía Magdalena en B.C.S., donde se ubica el Puerto de San Carlos.

Las Figuras 3.2 a la 3.6 son algunos ejemplos de las zonas que presentaron mayor agregación de celdas con elevación menor o igual a 2m en el modelo de elevación SRTM. Existen otras zonas que podrán ser exploradas con el conjunto de datos preparados y un Sistema de Información Geográfica (SIG).

4. Parte II: Escenarios de inundación por mareas de tormenta aunados al aumento estático del nivel del mar

4.1. Antecedentes

Dentro del marco del trabajo contratado al CICESE por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), titulado "Estudio para la incorporación de nuevas variables en los escenarios de cambio climático para México utilizados en la Quinta Comunicación Nacional", se determinaron las zonas de inundación por el ascenso estático del nivel medio del mar (de 1 a 2m). Los mapas generados en la sección anterior representan una excelente herramienta para evaluar las posibles zonas de inundación; sin embargo, la zona costera está sujeta a distintos peligros que son exacerbados ante un escenario de aumento relativo del nivel del mar. De esta manera, existen zonas que si bien no estarán inundadas por el aumento estático del nivel del mar, si podrán ser afectadas por eventos extremos. Así, la vulnerabilidad de la zona costera ante peligros oceanográficos será mayor a la establecida por los mapas de aumento estático del nivel del mar. Entre estos peligros destacan el oleaje y las mareas de tormenta generadas por tormentas extremas, como los ciclones tropicales en el caso de México.

En este trabajo se estudian los efectos del aumento estático del nivel del mar sobre el oleaje y la marea de tormenta, con la finalidad de mostrar cómo la vulnerabilidad de la zona costera aumenta más allá de la zona de inundación por el aumento del nivel estático. Para lograr lo anterior, se recurre a la modelación numérica de generación, propagación y disipación de oleaje, así como a la modelación hidrodinámica ante ciclones tropicales de distinta intensidad y en distintas localidades de la costa mexicana. Este trabajo no contempla otros fenómenos que también se verán agravados ante el aumento del nivel del mar como lo es la erosión costera, que tendrá un efecto directo sobre las áreas de inundación y afectación por oleaje y mareas de tormenta. Sin embargo, este trabajo demuestra la necesidad de incorporar en un futuro variables dinámicas para dimensionar los efectos del aumento relativo del nivel del mar sobre la vulnerabilidad costera.

4.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es mostrar cómo el oleaje y las mareas de tormenta, generados por eventos extremos, afectan la zona costera bajo distintos escenarios de aumento del nivel medio del mar. Para cumplir dicho objetivo se tienen los siguientes objetivos específicos.

- 1. Generación de campos de viento para ciclones tropicales
- 2. Modelación de la generación, propagación y disipación de oleaje
- 3. Modelación de la marea de tormenta

A continuación se presenta la metodología utilizada en esta sección del trabajo.

4.3 Metodología

Para cumplir el objetivo del estudio es necesario habilitar modelos numéricos que permitan determinar las zonas afectadas por oleaje y marea de tormenta en la zona costera. Las áreas de estudio son dos en el Golfo de México (Tampico e Isla de Holbox) y dos en el Océano Pacífico (Bahía de Manzanillo y La Paz). La selección de zonas se basó en que cada una de estas zonas está sujeta a la presencia de ciclones tropicales, pero cada una tiene características geomorfológicas particulares. A continuación se da una breve descripción de cada zona.

La Isla de Holbox se localiza en la costa norte de la Península de Yucatán en el Golfo de México. La plataforma continental en esta zona es muy extensa y con una pendiente muy suave. La isla presenta un relieve muy bajo, con valores máximos de aproximadamente 5 m sobre el nivel medio del mar, con lo cual es una zona muy vulnerable ante eventos extremos de oleaje y sobreelevación del nivel del mar.

La zona costera de Tampico se localiza en la costa de Tamaulipas en el Golfo de México. La plataforma continental es de menor extensión que la de la Isla de Holbox, pero sigue siendo extensa y de pendiente suave. En esta zona está la desembocadura del Río Pánuco y es una zona costera de relieve bajo, sin embargo existen zonas extensas por encima de los 10 m sobre el nivel medio del mar.

La bahía de Manzanillo se localiza en Colima en el Océano Pacífico. Presenta una pendiente más abrupta y una plataforma continental más estrecha que los casos anteriores. La zona es montañosa con alturas muy por encima del nivel medio del mar a poca distancia de la línea de costa, sin embargo, la zona urbana es una zona baja vulnerable a la inundación por sobrelevación del nivel del mar.

La Bahía de La Paz se localiza en Baja California Sur, en el Mar de Cortés. Presenta profundidades relativamente bajas y una pendiente suave, aunque en menor proporción que las localidades del Golfo de México. La costa tiene un relieve variado, con zonas extensas de bajo relieve, como el islote El Mogote, y zonas con mayor altura a pocos metros de la costa, como la zona urbana de La Paz. Sin embargo, no existen zonas muy altas cercanas a la línea de costa, más allá de la parte norte al este de la bahía.

Considerando las distintas localidades es posible ilustrar distintos efectos de los eventos extremos y la influencia del aumento estático del nivel del mar. Los eventos extremos de oleaje y marea de tormenta serán caracterizados a partir del forzamiento con campos de viento de ciclones tropicales. A continuación se describe el proceso de selección de eventos a simular, la generación de campos de viento y la modelación numérica.

4.3.1 Selección de eventos a simular

La selección de eventos a simular se realizó en función a eventos históricos que hayan afectado las localidades de estudio. En base a la revisión de eventos se seleccionaron los siguientes:

- Holbox: Huracán Wilma 2005
- Tampico: Tormenta tropical Arlene 2011
- Manzanillo: Huracán Winifred 1992
- La Paz: Huracán Henriette 2007

La

Figura 4.1 muestra los eventos seleccionados. De estos eventos se mantuvo la trayectoria, sin embargo se modificó la intensidad de los vientos máximos para tener eventos sintéticos de tormenta tropical, huracán categoría 3 y huracán categoría 5, dando un total de 12 eventos. De esta manera, se realizaron las simulaciones de oleaje y marea de tormenta manteniendo las trayectorias de los eventos históricos, pero con distinta intensidad, para cada uno de los escenarios de incremento estático del nivel del mar.



Figura 4.1. Eventos seleccionados para la generación de eventos sintéticos.

4.3.2 Campos de viento

Una vez establecidos los eventos sintéticos a simular, se procedió a la generación de los campos de viento con variación espacio-temporal. En los trabajos realizados por Robles Díaz (2012) y Ruiz Salcines (2013) se evaluaron distintos modelos paramétricos para la generación de campos de viento de ciclones tropicales, entre ellos los de Young and Sobey (1981), Holland (1980), Emanuel and Rotunno (2011), Depperman (1947), Jelesnianski et al. (1992) y Emanuel (2004). Con base en dichos trabajos se decidió utilizar el modelo de Emanuel and Rotunno (2011), el cual se basa en la siguiente ecuación:

$$V(r) = \frac{2r\left(R_m V_m + \frac{1}{2}fR_m\right)}{R_m^2 + r^2} - \frac{fr}{2}$$

Donde:

V(r) = Velocidad del viento en un radio r

- r = Radio existente del centro del vórtice a cada elemento en la malla
- Rm = Radio de vientos máximos del evento
- Vm = Intensidad de vientos máximos

F = Fuerza de Coriolis

Los campos de viento se generaron sobre una malla rectangular con resolución de 0.5° cubriendo en su totalidad cada uno de los dominios computacionales utilizados en los modelos numéricos descritos a continuación.

4.4. Modelación numérica

Para la generación y propagación del oleaje generado por los eventos sintéticos se usó el modelo espectral de oleaje de tercera generación, MIKE 21 SW, basado en mallas no estructuradas. A continuación, se da una descripción de las mallas computacionales y cada uno de los modelos (que son parte del MIKE 21 SW) empleados en este trabajo. El MIKE 21 SW se explica en la Sección 4.4.2.

4.4.1 Mallas de cálculo y topobatimetría

La batimetría utilizada en este trabajo fue la ETOPO1 (Amante and Eakins 2009), con resolución de 1°, y la topografía de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), obtenida dentro del programa mundial SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), descrita en Farr et al. (2007). Para el caso de Holbox, se complementó la información con levantamientos locales realizados por el Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros del Instituto de Ingeniería de la UNAM. La información topobatimétrica se interpoló a las mallas computacionales de cada dominio.

Las mallas computacionales utilizadas en la modelación numérica son mallas flexibles compuestas por elementos triangulares. Estas mallas permiten tener una mayor resolución en la zona de interés,

reduciendo el tiempo computacional con elementos de menor resolución en gran parte del dominio. La resolución mínima de las mallas es de 10 km y la máxima de 100 m. En las Figuras 4.1 a la Figura se muestran las batimetrías y mallas computacionales utilizadas. Como se puede observar, existe una resolución muy fina en las zonas de interés, como son los centros poblacionales de Holbox, Tampico, Manzanillo y La Paz.



Figura 4.1. Batimetría (panel superior) y malla computacional (panel inferior) para el modelo de Holbox, mostrando todo el dominio (panel izquierdo) y un detalle en la zona de interés (panel derecho).



Figura 4.2. Batimetría (panel superior) y malla computacional (panel inferior) para el modelo de Tampico, mostrando todo el dominio (panel izquierdo) y un detalle en la zona de interés (panel derecho).



Figura 4.3. Batimetría (panel superior) y malla computacional (panel inferior) para el modelo de Manzanillo, mostrando todo el dominio (panel izquierdo) y un detalle en la zona de interés (panel derecho).



Figura 4.4. Batimetría (panel superior) y malla computacional (panel inferior) para el modelo de La Paz, mostrando todo el dominio (panel izquierdo) y un detalle en la zona de interés (panel derecho).

4.4.2 Modelo de Oleaje

Para la generación y propagación del oleaje generado por los eventos sintéticos se usó un modelo espectral de oleaje de tercera generación, MIKE 21 SW, basado en mallas no estructuradas. Este modelo incluye dos tipos de formulaciones, la formulación paramétrica direccionalmente desacoplada y una formulación totalmente espectral. El modelo se basa en la ecuación de conservación de acción de oleaje descrita en (Komen et al. 1994) y (Young 1999). A continuación se presenta una breve descripción de la formulación empleada, la cual es descrita a detalle en Sørensen et al. (2004).

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

$$N(\sigma, \theta) = \frac{\mathsf{E}(\sigma, \theta)}{\sigma}$$

En aplicaciones a gran escala, la ecuación de balance de acción de oleaje se formula en coordenadas esféricas, donde la evolución del espectro de oleaje en una posición está dada por la latitud \emptyset , y la longitud λ , en un instante t, de la siguiente manera:

$$\frac{\delta N}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta \theta} c_{\emptyset} N + \frac{\delta}{\delta \lambda} c_{\lambda} N + \frac{\delta}{\delta \sigma} c_{\sigma} N + \frac{\delta}{\delta \theta} c_{\theta} N = \frac{S}{\sigma}$$

La fuente de energía *S*, representa una sobreposición de distintas funciones fuentes que describen los múltiples fenómenos físicos está dada por:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf}$$

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

La discretización de las ecuaciones de gobierno se realiza utilizando el método de volúmenes finitos centrado en la celda, tanto para el espacio geográfico como espectral, utilizando una malla no estructurada para el dominio geográfico. La integración en tiempo se basa en una aproximación de paso fraccional aplicando un método de multi-secuencia explícito para la propagación de acción de oleaje.

Algunos de los datos de entrada para el modelo son la malla con la batimetría de la zona de estudio (Figs. 4.4.1.1 a 4.4.1.5); la fricción del fondo; las condiciones iniciales de nivel de la superficie libre; las condiciones de frontera que puede ser cerrada, condiciones de oleaje (parámetros o espectros), así como las condiciones de viento. En el caso de este estudio, se utilizaron fronteras cerradas con condiciones de viento de los campos de viento obtenidos para cada uno de los eventos sintéticos.

Los resultados que arroja el modelo numérico en cada uno de los elementos de la malla y para cada paso de tiempo consisten en los parámetros de oleaje (altura, periodo, dirección, energía), así como espectros de oleaje para localidades seleccionadas. Además de obtener los resultados en todo el dominio es posible extraer series temporales en puntos determinados, así como secciones transversales de los parámetros de oleaje en zonas de interés.

4.4.3. Modelo Hidrodinámico

El modelo MIKE 21 HD de malla flexible (FM) se basa en la solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujos incompresibles bajo las suposiciones de Boussinesq y de presión hidrostática (DHI 2012). Así, el modelo se conforma con las ecuaciones de continuidad, momento, temperatura, salinidad y densidad (solo en función de temperatura y densidad), bajo un esquema cerrado de turbulencia. Las ecuaciones de gobierno utilizan coordenadas cartesianas y se presentan a continuación.

Ecuación local de continuidad:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S$$

Las ecuaciones de momento para las componentes x- e y- son respectivamente:

$$\begin{split} &\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial v u}{\partial y} + \frac{\partial w u}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \\ &\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \\ &\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial u v}{\partial x} + \frac{\partial w v}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \\ &\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \end{split}$$

donde *t* es el tiempo; x, y, z las coordenadas cartesianas; u, v, w las componentes de velocidad en la dirección x, y, z; η la elevación de superficie libre; *d* la profundidad; *f* el parámetro de Coriolis; *g* la aceleración gravitacional; ρ la densidad del agua; ρ_0 la densidad de referencia del agua; P_a la presión atmosférica; F_u y F_v son los términos horizontales del esfuerzo; *S* la magnitud de la descarga debido a fuentes puntuales y $u_{s,vs}$ es la velocidad de descarga. La discretización espacial de las ecuaciones fundamentales se realiza por el método de celdas centradas de volúmenes finitos, utilizando mallas no estructuradas en el plano horizontal.

Como en el modelo de oleaje, aquí, también se necesitan datos de entrada similares: como la malla con la batimetría de la zona de estudio; la resistencia del fondo; las condiciones iniciales de nivel de la superficie libre y/o los componentes de velocidad; las condiciones de frontera que puede ser cerrada, nivel de la superficie libre o la descarga; así como otras fuerzas relevantes como pudiera ser la velocidad y dirección del viento obtenida de los eventos sintéticos, fuentes y sumideros de descargas, y en aplicaciones marinas las mareas y los tensores de radiación del oleaje.

Los resultados que arroja el modelo numérico en cada uno de los elementos de la malla y para cada paso de tiempo consisten en la elevación de la superficie libre y profundidad, velocidades y flujos

en u y v, de los cuales es posible derivar otros parámetros. Además de obtener los resultados en todo el dominio es posible extraer series temporales en puntos determinados, así como secciones transversales de los niveles, y flujos en zonas de interés. Este modelo permite determinar zonas de inundación asociadas a cada uno de los eventos sintéticos.

4.4.4 Estrategia de modelación y escenarios de cambio climático

Los modelos descritos anteriormente pueden ser utilizados de manera independiente. Sin embargo, se consideró que para este estudio es importante tomar en cuenta por un lado la superficie libre en la modelación de oleaje, y por otro, los tensores de radiación de oleaje sobre las corrientes simuladas en el modelo hidrodinámico. En el caso de escenarios de aumento del nivel del mar y de ciclones tropicales es importante incluir estos efectos en cada modelo, pues tendrán un efecto importante en los resultados. Así, se procedió a la modelación de la siguiente manera:

- 1. Modelación hidrodinámica de cada uno de los eventos sintéticos para obtener la variación espacio-temporal de la superficie libre.
- 2. Modelación de oleaje incluyendo la superficie libre obtenida en el paso anterior, a fin de incluir el efecto de esta sobre la propagación y disipación del oleaje. En esta simulación se obtienen los parámetros de oleaje y los tensores de radiación.
- 3. Modelación hidrodinámica incluyendo los tensores de radiación obtenidos en el modelo de oleaje, a fin de obtener las corrientes generadas por oleaje en zonas someras, además de las corrientes generadas por los vientos del evento ciclónico.

Al utilizar los modelos de esta manera se obtiene una mejor representación de los procesos a simular, lo que permite una mejor representación de los efectos del aumento del nivel del mar sobre los procesos estudiados.

Los escenarios simulados para cada una de las mallas y cada uno de los eventos sintéticos son los siguientes:

- 1. Situación actual (nivel medio del mar = 0 m)
- 2. Incremento de 1 m del nivel del mar (nivel medio del mar = 1 m)
- 3. Incremento de 2 m del nivel del mar (nivel medio del mar = 2 m)

La nomenclatura utilizada para los resultados es la siguiente:

LOC_CAT_NM

Donde:

LOC: Localidad (Holbox: HLX; Tampico: TCO; Manzanillo: ZLO; La Paz: LPZ)

- CAT: Categoría del ciclón tropical (Tormenta tropical: TSO; huracán categoría 3: H03; huracán categoría 5: H05)
- NM: Escenario de aumento del nivel medio del mar (situación actual: 00; incremento de 1 m: 01; incremento de 2 m: 02)

De esta manera, el evento LPZ_H3_02 corresponde a un huracán categoría 3 en La Paz en un escenario de incremento de 2 m del nivel medio del mar.

4.5 Resultados y discusión

A continuación se presentan por localidad los resultados de campos de vientos máximos, oleaje y nivel del mar. Los resultados de todas las simulaciones se presentan en los anexos, mientras que en el cuerpo del documento solo se muestran las figuras necesarias para discutir los resultados.

4.5.1 Isla de Holbox

Holbox es parte de la reserva de la biósfera y Área de Protección de Flora y Fauna Yum Balam. Es refugio de especies en peligro de extinción y tiene un gran valor eco-turístico; dentro de la isla, todas las calles son de arena blanca, no hay pavimento y existen sólo algunos automóviles.

Debido al poco relieve de la Isla de Holbox, un aumento estático del nivel medio del mar es suficiente para causar problemas importantes al pueblo localizado en este sitio. Sin embargo, el oleaje y la marea de tormenta asociados a la presencia de un ciclón tropical puede ser devastador. Esto sucedió en el 2005 cuando se presentó el Huracán Wilma, el cual generó una marea de tormenta que inundó todo el pueblo, y oleaje que erosionó las playas y ocasionó graves daños a la infraestructura. Por esta razón, se seleccionó la trayectoria del huracán Wilma (2005) para la generación de eventos sintéticos que nos permitan evaluar el efecto del incremento del nivel del mar sobre los eventos extremos en zonas costeras de relevancia social y turística.

Con base en la metodología descrita anteriormente, se determinaron los campos de vientos a lo largo del paso del ciclón en cada una de sus categorías. A modo de ejemplo, la Figura 4.5 muestra la envolvente de vientos máximos para el evento de huracán categoría 3 (los otros eventos son similares y solamente varía la intensidad de los vientos). Como se puede deducir de la figura, un evento ciclónico de esta naturaleza generará fuerte oleaje y sobrelevación por la marea de tormenta en toda la zona de la isla de Holbox y laguna adyacente.



Figura 4.5. Envolvente de vientos máximos (m/s) para un huracán categoría 3 con la trayectoria del huracán Wilma (2005).

Si consideramos el caso de una tormenta tropical es posible discernir los efectos del aumento del nivel del mar sobre la altura de ola significante. En la Figura 4.6 se muestra la envolvente de altura de ola significante para los distintos escenarios de aumento estático del nivel del mar. En el caso de un aumento de tan solo 0.5 m podemos observar que ya existe un incremento en la altura de ola significante en la zona costera. Particularmente se nota dicho aumento en la zona de la laguna, aunque es perceptible en la zona del mar, al Este de la isla.

La altura de ola incrementa en las zonas más someras puesto que existe menos fricción del fondo al aumentar la profundidad de la columna de agua en un mismo punto. De esta manera, en zonas donde el oleaje apenas tiene un efecto bajo el escenario actual, el oleaje puede llegar con mayor altura en un escenario de incremento del nivel del mar. Esto es claramente discernible en el caso de un huracán categoría 3 o categoría 5, donde los escenarios de aumento del nivel del mar muestran oleajes de mayor altura.

En el caso de huracán categoría 3 (Figura 4.7) encontramos oleaje de mayor altura en la zona de línea de costa al aumentar el nivel del mar. Por ejemplo, en la zona del centro poblacional el escenario actual arroja valores entre 1 y 2 m de altura significante, que se incrementan con el escenario de aumento del nivel del mar, llegando a ser hasta de 4 m en el escenario de 2 m de aumento del nivel del mar. Lo mismo sucede con la parte de costa al sur de la laguna, donde se encuentra el centro poblacional de Chiquilá, y en la zona de bajos a la entrada de la laguna. En dichas zonas, la altura de ola pasa de 3 m en el escenario actual, a 4 m en el escenario de aumento del nivel del mar.

En el caso del huracán categoría 5 (Figura 4.7), el cambio en la altura de ola también es notable al aumentar el nivel del mar, sin embargo, la situación actual ante dicho escenario es ya muy desfavorable para las localidades de Holbox y Chiquilá.



Figura 4.6. Envolvente de altura de ola significante máxima ante una tormenta tropical en el escenario actual (panel superior izquierdo), y bajo escenarios de aumento relativo del nivel del mar de 0.5 m (panel superior derecho), 1 m (panel inferior derecho) y 2 m (panel inferior izquierdo), en la zona de Holbox.



Figura 4.7. Envolvente de altura de ola significante máxima ante un huracán categoría 3 en el escenario actual (panel superior izquierdo), y bajo escenarios de aumento relativo del nivel del mar de 0.5 m (panel superior derecho), 1 m (panel inferior derecho) y 2 m (panel inferior izquierdo), en la zona de Holbox.



Figura 4.8. Envolvente de altura de ola significante máxima ante un huracán categoría 5 en el escenario actual (panel superior izquierdo), y bajo escenarios de aumento relativo del nivel del mar de 0.5 m (panel superior derecho), 1 m (panel inferior derecho) y 2 m (panel inferior izquierdo), en la zona de Holbox.

En la Figura 4.8 se muestra la diferencia entre las envolventes de altura significante máxima con el escenario de aumento de 2 m del nivel del mar y el escenario actual para una tormenta tropical como para un huracán categoría 5. Esta figura muestra como la zona costera puede experimentar oleaje de hasta 1.2 m de mayor altura en un escenario de aumento estático del nivel medio del mar.



Figura 4.9. Diferencias entre envolvente de altura de ola significante máxima bajo el escenario de aumento de 2 m del nivel del mar y el escenario actual ante una tormenta tropical, en la zona de Holbox.

La interpretación del efecto del aumento estático del nivel del mar ante eventos que generan mareas de tormenta (e.g. ciclones tropicales) es menos directa que el efecto sobre el oleaje, ya que la sobreelevación de la superficie libre se debe tanto a la marea de tormenta como al efecto del aumento del nivel del mar en cada escenario. En la Figura 4.10 se muestra la superficie libre para una tormenta tropical en el escenario actual y en el escenario de un aumento relativo del nivel del mar. Dicha figura muestra como en la laguna existen valores de hasta casi 3.5 m de sobrelevación en el escenario de 2 m de aumento del nivel del mar, además de mostrar inundaciones en la localidad de Holbox y Chiquilá de más de 3 m. Estos resultados muestran como aumenta la vulnerabilidad de estas zonas en comparación con la situación actual.



Figura 4.10. Envolvente de marea de tormenta máxima ante una tormenta tropical en el escenario actual (panel izquierdo), y bajo el escenario de aumento relativo del nivel del mar de 2 m (panel derecho), en la zona de Holbox.

4.5.2 Tampico-Cd. Madero

La zona de Tampico-Madero, Tamaulipas es una zona muy vulnerable al paso de ciclones tropicales, no solo ante los efectos marinos, sino también a inundaciones por desbordamiento del Río Pánuco. En este sentido, la marea de tormenta puede funcionar como un tapón hidráulico, impidiendo el desfogue oportuno del río y exacerbando las inundaciones por desbordamiento (Appendini et al. 2014). En este caso se analiza la trayectoria del huracán Arlene por ser uno de los últimos eventos en afectar la zona. En la Figura 4.11 se muestra la envolvente de los vientos máximos para caso del huracán categoría 3. Si bien la zona de la desembocadura del Río Pánuco no está directamente en la zona de mayor intensidad de viento, si se encuentra en una posición desfavorable ante este evento.



Figura 4.11. Envolvente de vientos máximos (m/s) para un huracán categoría 3 con la trayectoria del huracán Arlene (2011) en la zona de Tampico-Cd. Madero, Tamaulipas.

A diferencia de la zona de Holbox, la plataforma continental es más estrecha y la zona urbana presenta zonas más elevadas. Sin embargo, existen varias lagunas y el Río Pánuco, donde un evento ciclónico puede generar efectos destructivos debido al oleaje y la marea de tormenta, que son exacerbados bajo un escenario de incremento estático del nivel del mar.

La Figura 4.12 muestra los resultados de oleaje para las simulaciones de tormenta tropical y huracán categoría 5 bajo el escenario actual y el escenario de aumento de 2 m del nivel del mar. En esta figura es casi imperceptible el aumento de la altura de ola en el caso de tormenta tropical. Sin embargo, para el huracán categoría 5 se aprecia como en el escenario de aumento del nivel del mar el oleaje tiene mayor penetración en la costa.



Figura 4.12. Envolvente de altura de ola significante máxima (m) en el escenario actual (paneles izquierdos) y el escenario de aumento de 2 m del nivel del mar (paneles derechos) ante una tormenta tropical (paneles superiores) y un huracán categoría 5 (paneles inferiores), en la zona de Tampico.

La Figura 4.13 muestra las diferencias entre las envolventes máximas del escenario actual y el de aumento de 2 m del nivel del mar, para un evento de tormenta tropical y un huracán categoría 5. En el caso de tormenta tropical se presentan diferencias de hasta 1.2 m de altura de ola en la zona de cercana a la rompiente, mientras que para un huracán categoría 5 la zona de incremento de altura de ola es mucho mayor y el oleaje presenta mayor penetración a tierra, en relación a la línea de costa: Otro efecto es que existe generación y propagación de oleaje en la zona de lagunas al presentarse el escenario de aumento del nivel del mar, lo cual genera nuevas zonas vulnerables al oleaje y los procesos asociados como es la erosión.



Figura 4.13. Diferencias entre envolvente de altura de ola significante máxima bajo el escenario de aumento de 2 m del nivel del mar y el escenario actual ante una tormenta tropical (panel izquierdo) y un huracán categoría 5 en la zona de Tampico.

En relación a la marea de tormenta, la Figura 4.14 muestra la superficie libre para el caso de un huracán categoría 5 ante el escenario actual y el escenario de aumento de 2 m del nivel del mar. Bajo el escenario actual, existe una inundación considerable de la franja costera, con valores en torno a 4 m. Sin embargo, ante el caso de aumento de 2 m del nivel del mar, las inundaciones por la marea de tormenta son mayores a 5 m y cubren áreas más extensas a lo largo de la franja costera. A diferencia del escenario actual, en el escenario de incremento del nivel del mar se generan sobreelevaciones de hasta 5 m en la zona de las lagunas.



Figura 4.14. Envolvente de superficie libre máxima de marea de tormenta por un huracán categoría 5 bajo el escenario actual (panel izquierdo) y el escenario de aumento de 2 m del nivel del mar en la zona de Tampico.

4.5.3 Bahía de Manzanillo

La Bahía de Manzanillo, a diferencia de las otras localidades, presenta una pendiente abrupta y una plataforma continental muy estrecha. Debido a esta característica geomorfológica el aumento estático del nivel del mar tiene una repercusión menor en cuanto a zona de inundación con respecto a las otras zonas estudiadas. Como resultado, la influencia del cambio del nivel del mar sobre los efectos de eventos ciclónicos es limitada, aunque puede tener una importante repercusión local.

En la Figura 4.15 se muestra la envolvente de los vientos máximos para el caso de un huracán categoría 3. Al igual que en el caso anterior, la localidad de Manzanillo no se ubica en la zona más vulnerable ante este evento, sin embargo si es de esperar oleaje intenso y sobreelevación del nivel del mar por la marea de tormenta.



Figura 4.15 Envolvente de vientos máximos (m/s) para un huracán categoría 3 con la trayectoria del huracán Winifred (1992).

En la figura 4.16 se muestra la altura de ola resultante del huracán categoría 5 en el escenario actual y el escenario de aumento de 2 m del nivel del mar, sin que se pueda apreciar una diferencia significante. Esto se debe a la pendiente abrupta del fondo, donde los cambios en el oleaje por el fondo son debidos al gradiente en la batimetría más que a la diferencia del nivel del mar entre los escenarios. A pesar de que a simple vista no existen diferencias apreciables, si hay diferencias sutiles que pueden tener importantes repercusiones en la franja costera. En la figura 4.17 se muestran las diferencias de oleaje entre el escenario actual y el de un aumento de 2 m del nivel del mar, para una tormenta tropical y un huracán categoría 5. En el caso de la tormenta tropical se observa que las diferencias se presentan en la zona frontal de la barra de la laguna de Cuyutlán, con valores menores a 1m. Sin embargo, para el caso de un huracán categoría 5 encontramos diferencias de hasta más de 2 m en dicha zona y valores de más de 1 m para toda la bahía de Manzanillo. Estos resultados muestran que a pesar de que los cambios en el oleaje aparentemente no son significativos como resultado del aumento del nivel del mar, si existe una repercusión importante en la cual la costa estará sujeta a mayor energía de oleaje ante un incremento del nivel del mar. Esto quiere decir

que las zonas con plataforma angosta también se vuelven más vulnerables al oleaje ante escenarios de aumento del nivel del mar.



Figura 4.16 Envolvente de altura de ola significante máxima en el escenario actual (panel izquierdo) y el escenario de aumento de 2 m del nivel del mar (panel derecho) ante una tormenta tropical en la bahía de Manzanillo.



Figura 4.17. Diferencias entre envolvente de altura de ola significante máxima bajo el escenario de aumento de 2 m del nivel del mar y el escenario actual ante una tormenta tropical (panel izquierdo) y un huracán categoría 5 (panel derecho) en la bahía de Manzanillo.

La Figura 4.18 y la Figura 4.19 muestran las envolventes de nivel del mar máximo alcanzado para el escenario actual y el escenario de aumento de 2 m del nivel del mar, para una tormenta tropical y un huracán categoría 5 respectivamente. Para el caso de tormenta tropical encontramos que la marea de tormenta es mínima y solo es apreciable dentro de la laguna de Cuyutlán. Sin embargo, incluso en la laguna, el efecto del aumento de 2 m del nivel del mar no promueve que el evento de tormenta tropical genere sobreelevaciones mayores a las generadas por la situación actual. Por otro lado, para el caso del huracán categoría 5, el aumento estático del nivel del mar si promueve que exista mayor marea de tormenta y que aumenten las zonas de inundación. Esto ocurre tanto dentro de la laguna

de Cuyutlán como también para la zona de la barra de la laguna en su parte marina, y en las zonas bajas de la bahía de Manzanillo. En el caso de la bahía, existen zonas donde la marea de tormenta puede ser incluso mayor de 3 m (5 m del nivel del mar), siendo que estas zonas no están sujetas a inundación bajo la situación actual, incluso con la presencia de un huracán categoría 5. De esta manera, los resultados muestran la importancia de estudiar el aumento dinámico del nivel del mar incluso en zonas donde la pendiente es abrupta y existen grandes profundidades cerca de la costa.



Figura 4.18. Envolvente de superficie libre máxima de marea de tormenta por una tormenta tropical bajo el escenario actual (panel izquierdo) y el escenario de aumento de 2 m del nivel del mar en la bahía de Manzanillo.



Figura 4.19. Envolvente de superficie libre máxima de marea de tormenta por un huracán categoría 5 bajo el escenario actual (panel izquierdo) y el escenario de aumento de 2 m del nivel del mar en la bahía de Manzanillo.

4.5.4 La Paz

La Paz tiene la característica de estar ubicada en una bahía donde la ubicación de la zona urbana es muy desfavorable ante ciertas trayectorias de eventos ciclónicos. Esta ubicación es incluso más desfavorable en el caso de huracanes que pasan de Sur a Norte al Este de la ciudad, como en el caso de Henriette (2007) en el cual el ojo del huracán pasó aproximadamente a unos 40 km de la zona urbana. Al pasar aproximadamente a la misma distancia que el radio de vientos máximos, el viento del ciclón acumula el agua al fondo de la bahía, siendo la situación más desfavorable para la localidad de La Paz. Es por esta razón que se seleccionó el evento de Henriette (2007) para la trayectoria y no el huracán John (2006) el cual pasó directamente sobre La Paz, pero generó menor marea de tormenta. Esto se ejemplifica en la Figura 4.20 donde se muestra la envolvente de vientos máximos para el caso de un huracán categoría 3 con la trayectoria de John (2006) y la de Henriette (2007). Considerando un evento ciclónico y la dirección de los vientos, se deduce que Henriette empujó más agua dentro de la bahía que en el caso de John, lo cual se comprobó con la modelación numérica (no presentada en este trabajo).



Figura 4.20 Envolvente de vientos máximos (m/s) con la trayectoria del huracán Henriette (2007) (panel izquierdo) y el huracán John (2006) (panel derecho) con vientos de huracán categoría 3.

Al igual que en los casos anteriores, el aumento estático del nivel del mar resulta en un incremento en la altura de ola en la franja costera. En el caso de tormenta tropical, el escenario de aumento de 2 m del nivel del mar genera oleaje de mayor altura, pero sin llegar a diferencias de 1 m en altura de ola (Figura 4.21). En el caso de huracán categoría 5 el escenario de aumento de 2 m del nivel del mar genera oleajes mayores incluso de 1 m de altura de ola en relación a la situación actual. Por otro lado, el escenario de aumento del nivel del mar genera zonas de peligro con oleaje de más de 1 m en zonas en las cuales no existe oleaje bajo la situación actual (Figura 4.22). En la Figura 4.24 se muestra la diferencia de la altura de ola entre el escenario de aumento del mar de 2 m, tanto para una tormenta tropical como para un huracán categoría 5, donde claramente se muestran las zonas en las cuales se incrementará la altura de ola en un escenario de incremento del nivel del mar. En el caso del huracán categoría 5 es claro el aumento en la altura de ola, incluso dentro de la laguna de La Paz.



Figura 4.21. Envolvente de altura de ola significante máxima en el escenario actual (panel izquierdo) y el escenario de aumento de 2 m del nivel del mar (panel derecho) ante una tormenta tropical en la bahía de La Paz.



Figura 4.22. Envolvente de altura de ola significante máxima en el escenario actual (panel izquierdo) y el escenario de aumento de 2 m del nivel del mar (panel derecho) ante un huracán categoría 5 en la bahía de La Paz.



Figura 4.23. Diferencias entre envolvente de altura de ola significante máxima bajo el escenario de aumento de 2 m del nivel del mar y el escenario actual ante una tormenta tropical (panel izquierdo) y un huracán categoría 5 (panel derecho) en la bahía de La Paz.

En relación a la marea de tormenta, se repite el patrón presente en las otras localidades, donde se generan nuevas zonas de inundación que no estarían sujetas a inundación bajo el escenario actual, o bajo un escenario que solamente contemple el aumento estático del nivel del mar. La Figura 4.24. muestra estas nuevas zonas de inundación tanto para el caso de tormenta tropical como para el caso de un huracán categoría 5. En este último caso, es posible encontrar mareas de tormenta de más de 5 m en zonas en las cuales incluso no existiría inundación en el caso actual o en el caso de aumento estático del nivel del mar, lo cual demuestra claramente la importancia de incluir procesos dinámicos en los escenario de aumento del nivel del mar.



Figura 4.24. Envolvente de superficie libre máxima de marea de tormenta por un huracán categoría 5 bajo el escenario actual (panel izquierdo) y el escenario de aumento de 2 m del nivel del mar en la bahía de La Paz.

5. Conclusiones

Los resultados presentados en este estudio muestran la importancia de incluir escenarios dinámicos de aumento del nivel del mar, debido a que los escenarios estáticos no dimensionan la problemática del aumento del nivel del mar. En primer lugar, el aumento estático del nivel del mar es de manera paulatina, con lo cual la zona que sea afectada tendrá tiempo a adaptarse a este cambio. Sin embargo ante un evento extremo no existe un periodo de adaptación, la presencia de un evento extremo genera peligros en pocas horas, elevando el nivel del mar, creando corrientes de fuerte intensidad y generando oleaje destructivo. Es razonable asumir que estas nuevas zonas expuestas a eventos extremos tendrán muy baja resiliencia. Finalmente, con escenarios de aumento estático del nivel del mar es posible delimitar nuevas zonas de inundación, pero no permite dimensionar los eventos que en sí causan daños materiales y pérdidas humanas, como el caso de ciclones tropicales, ni delimitar nuevas zonas expuestas a estos peligros. Debido a lo anterior, es imprescindible considerar eventos extremos dentro de los escenarios de aumento estático del nivel del mar, a fin de poder dimensionar la magnitud del peligro que representan dichos escenarios.

Una de las conclusiones principales de este estudio es que el aumento del nivel del mar permite una mayor penetración del oleaje en la costa, lo cual incrementa el peligro de oleaje y aumenta la vulnerabilidad en zonas que ante el escenario actual pudieran no ser vulnerables. Esto incluye las zonas de lagunas costeras, donde el incremento estático del nivel del mar permite que en un punto determinado, se presente oleaje más alto ya que la pérdida de energía del oleaje por fricción, se reduce al aumentar el nivel de la superficie libre. Esto podría traducirse en procesos de incremento en la erosión costera, exposición al oleaje de infraestructura, a la necesidad de reevaluación de los criterios de diseño de estructuras marinas (e.g., puertos, plataformas, terminales marítimas, estructuras de protección costera).

Por otro lado, al considerar eventos extremos, existe un mayor incremento en escenarios de aumento del nivel del mar, ya que al incremento estático se suma el incremento dinámico (i.e. marea de tormenta). Así, se generan zonas afectadas que no lo son bajo escenarios de aumento estático o escenarios que contemplan solo el evento extremo. Si bien en este trabajo no se presentan resultados referentes a las corrientes generadas, es importante saber que un aumento del nivel del mar por un evento dinámico (e.g. ciclón tropical), generará no solo una sobreelevación, sino también corrientes, las cuales pueden ser incluso más destructivas que la propia sobreelevación.

De esta manera, el estudio de los efectos dinámicos ante escenarios de aumento del nivel del mar es de suma importancia para poder dimensionar el peligro en la zona costera ante el cambio climático.

6. Bibliografía

- Amante, C., and B. . Eakins, 2009: ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis.
- Appendini, C. M., A. Pedrozo-Acuña, and A. Valle-Levinson, 2014: Storm surge at a western Gulf of Mexico site: variations on Tropical Storm Arlene. *Int. J. River Basin Manag.*, 1–8, doi:10.1080/15715124.2014.880709. http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15715124.2014.880709 (Accessed July 2, 2014).
- Battjes, J. A. A., and J. P. F. M. P. F. M. Janssen, 1978: Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Proceedings of the 16th international conference on coastal engineering*, Vol. 1 of, 569–587 http://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/3294 (Accessed August 23, 2013).
- Depperman, C. E., 1947: Notes on the origin and structures of philippine typhoons. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **28**, 399–404.
- DHI, 2012: MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation.
- Eldeberky, Y., and J. A. Battjes, 1996: Spectral modeling of wave breaking: Application to Boussinesq equations. *J. Geophys. Res.*, **101**, 1253, doi:10.1029/95JC03219. http://doi.wiley.com/10.1029/95JC03219 (Accessed August 23, 2013).
- Emanuel, K., 2004: Tropical Cyclone Energetics and Structure. Atmospheric Turbulence and Mesoscale Meteorology, E. Fedorovich, R. Rotunno, and B. Stevens, Eds., Cambridge University Press, p. 280.
- Emanuel, K., and R. Rotunno, 2011: Self-Stratification of Tropical Cyclone Outflow. Part I: Implications for Storm Structure. J. Atmos. Sci., 68, 2236–2249, doi:10.1175/JAS-D-10-05024.1. http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JAS-D-10-05024.1 (Accessed May 21, 2013).
- Farr, T. G. and Coauthors, 2007: The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.*, 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183. http://doi.wiley.com/10.1029/2005RG000183 (Accessed July 21, 2014).
- Hasselmann, S., and K. Hasselmann, 1985: Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part I: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral. *J. Phys. Oceanogr.*, **15**, 1369–1377.
- Hasselmann, S., K. Hasselmann, J. H. Allender, and T. P. Barnett, 1985: Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 1378–1391.

- Holland, G. J., 1980: An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Mon. Weather Rev.*, **108**, 1212–1218.
- Janssen, P. A. E. M., 1989: Wave-induced stress and the drag of air flow over sea waves. J. Phys. Ocean., 19, 745–754.
- Janssen, P. A. E. M., 1991: Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting. J. Phys. Ocean., 21, 1631–1642. http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0485(1991)021<1631:QLTOWW>2.0.CO;2.
- Janssen, P. A. E. M., P. Lionello, and L. Zambresky, 1989: On the Interaction of Wind and Waves. *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. A, Math. Phys. Sci.*, **329**, 289–301, doi:10.1098/rsta.1989.0077. http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/329/1604/289.abstract.
- Jelesnianski, C. P., J. Chen, and W. A. Shaffer, 1992: *SLOSH: Sea, lake, and overland surges from hurricanes*. Silver Spring, MD, http://slosh.nws.noaa.gov/sloshPub/pubs/SLOSH_TR48.pdf.
- Johnson, H. K., and H. Kofoed-Hansen, 2000: Influence of bottom friction on sea surface roughness and its impact on shallow water wind wave modeling. *J. Phys. Ocean.*, **30**, 1743–1756.
- Komen, G. J., L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, and P. A. E. M. Janssen, 1994: *Dynamics and modelling of ocean waves*. Cambridge University Press, Cambridge,.
- LandScan (2004)[™] High Resolution global Population Data Set copyrighted by UT-Battelle, LLC, operator of Oak Ridge National Laboratory under Contract No. DE-AC05-00OR22725 with the United States Department of Energy.
- Robles Díaz, L., 2012: Modelación paramétrica y numérica de viento y oleaje extremal, asociado a eventos de huracanes en el Atlántico Norte. Universidad de Cantabria, .
- Ruiz Salcines, P., 2013: Campos de viento para hindcast de oleaje: reanálisis, paramétricos y fusión. Universidad de Cantabria, .
- Sørensen, O. R., H. Kofoed-Hansen, M. Rugbjerg, and L. S. Sørensen, 2004: A third-generation spectral wave model using an unstructured finite volume technique. *Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, New York, 894–906.
- Young, I. R., 1999: Wind generated ocean waves. Elsevier Science, Oxford,.
- Young, I. R., and R. J. Sobey, 1981: The numerical prediction of tropical cyclone wind-waves.





Departamento de Oceanografía Física Km. 107 Carretera Tijuana-Ensenada * Ensenada, Baja California, México. Tel: +52 (646) 175 05 00 * Fax: +52 (646) 175 05 47

7. Resumen de actividades y cronograma (2 Jul - 30 Nov 2014)

PROPUESTA ECONÓMICA CICESE Estudio para la incorporación de nuevas variables en los escenarios de cambio climático para México utilizados en la Quinta Comunicación Nacional (Julio-Noviembre 2014)					
Actividad	Descripción	Productos	Informes	Responsables	
1	Plan de Actividades	Actividades y Cronograma	Primer Informe (15 Jul)	Tereza Cavazos	
2	Descarga y procesamiento de datos de modelos históricos y escenarios futuros de los modelos globales.	1. Descargar y procesar variables atmosféricas superficiales (Temperatura Superficial (°C), Precipitación (mm/mes), Presión superficial (mb), Dirección e Intensidad del Viento superficial en sus componentes U y V (uas, vas; ms) en la región Lat: 0 a 50 N y Long: 160W a 40W de las salidas mensuales históricas y de escenarios futuros (RCP4.5 y RCP8.5) de por lo menos 3 experimentos de 4 modelos acoplados globales "CNRM-CMS, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR, MRI- CGM3". 2. Ensamblar (promediar) los diferentes experimentos de cada variable para los periodos históricos y futuros. 3. Interpolar las variables bilinealmente a 0.5° por 0.5° de longitud y latitud geográficas, usando como malla base la de los datos observados del CRU. 4. Cortar el dominio espacial.		Tereza Cavazos	
3	Descarga y procesamiento de datos observados	1. Descargar y procesar las variables anteriores para los datos históricos observados a escala mensual del GPCP (para precipitación), ERA-Interim (Variables Atmosféricas) y ERSST (Temperatura Superficial del Mar) para el periodo 1979-2005.	Segundo Informe (12 Sep)	Tereza Cavazos	
4	Resultados preliminares de los datos correspondientes al período histórico (1979- 2005) con resolución mensual.	 Iniciar el análisis de métricas (ciclos anuales y RMSE) y mapas de variables de todo el dominio. Las métricas se harán para un estudio de caso: el sur/sureste mexicano caracterizado por la canicula. Elaborar el Segundo Informe 		Tereza Cavazos	
5	Escenarios de nivel del mar	1. Descargar mosaicos de modelos digitales de elevación SRTM y ensamblar para la república mexicana. Descargar modelo de elevación regional de zona de prueba del Continuo de Elevaciones de México CEN versión 3 del INEGI y comparar con SRTM. 2. Proyectar modelos regionales a sistema métrico conforme (Universal Transversa de Mercator) para la estimación de la pendiente del terreno. 3. Definir zona costera vulnerable a través de área de influencia a partir de la línea de costa y pendiente del terreno. 4. Colaborar en la realización del Segundo Informe.		Alejandro Hinojosa	
6	Evaluar y discutir los resultados históricos (observados vs modelos)	 Continuar con el análisis de métricas y análisis de mapas. Evaluar los resultados y discutir de acuerdo a estudios publicados. 		Tereza Cavazos	
7	Proyecciones futuras	 Calcular las proyecciones (totales y anomalías) a escala mensual para todo el periodo. Calcular los cambio en la climatologia para el futuro cercano (2015 – 2039) y futuro lejano (2075 – 2099) de los RCP 4.5 y RCP 8.5 de las diferentes variables de los modelos globales. Mapear los cambios estacionales de cada variable. Evaluar los resultados. 	Tercer Informe (28 Nov)	Tereza Cavazos	
8	Escenarios de nivel del mar	Generar mapas regionales de los escenarios de ascenso de nivel del mar de 1 y 2 metros para diferentes regiones costeras de México. Z. Preparar datos y metadatos de entregables.		Alejandro Hinojosa	
9	Tercer informe	Conjuntar toda la información: preparar último informe y presentación final.		Tereza Cavazos y Alejandro Hinojosa	

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES - CICESE	Mes				
	1	2	3	4	5
Elaborar un plan de trabajo detallado que incluya acciones, tiempos, productos, etc., para el desarrollo del proyecto.					
Elaborar el Primer Informe parcial (15 de Jul)					
Descargar y procesar variables atmosféricas superficiales (Temperatura Superficial (°C), Precipitación (mm/mes), Presión superficial (mb), Dirección e Intensidad del Viento superficial en sus componentes U y V (uas, vas; m/s) en la región Lat: 0 a 50 N y Long: 160W a 40W de las salidas mensuales históricas de los modelos acoplados globales "CNRM- CM5, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR, MRI-CGM3"					
Descargar y procesar las variables anteriores para (1) los 4 modelos (CNRM-CM5, HadGEM2-ES, MPI-ESM- LR, MRI-CGM3) de la página Web del CMIP5, para los escenarios de emisiones de GEI: RCP4.5 y RCP8.5, y (2) los datos históricos observados a escala mensual del GPCP (para precipitación), ERA-Interim (Variables Atmosféricas) y ERSST (Temperatura Superficial del Mar) para el periodo 1979-2005.					
Interpolar las variables bilinealmente a 0.5° por 0.5° de longitud y latitud geográficas, usando como malla base la de los datos observados del CRU.					
Resultados preliminares de los datos correspondientes al período histórico (1979-2005) con resolución mensual.					
Elaborar el Segundo Informe parcial (12 Septiembre)					
Evaluar y discutir los resultados históricos (observados vs modelos) mediante el uso de métricas para el caso del sureste Mexicano (ejemplo de zona tropical; desviación estándar, raíz del error medio cuadrático y ciclos anuales) y mapas comparativos para todo el dominio.					
Calcular las proyecciones (proyecciones totales y anomalías) del futuro cercano (2015 – 2039) y futuro lejano (2075 – 2099) de los RCP 4.5 y RCP 8.5 de las diferentes variables de los modelos globales					
Evaluar los cambios futuros de los MCG mediante la aplicación de métricas (ciclo anual y mapas de todo el dominio) usando los escenarios de emisiones de GEI: RCP4.5 y RCP8.5 con respecto al escenarios base.					
Desarrollar mapas de ascenso del nivel medio del mar (de 1 a 2 m) en las áreas costeras de México, con sistemas de información geográfica utilizando los escenarios de inundación por aumento del nivel del mar que se muestran en la página http://flood.firetree.net/?ll=31.8811,- 116.6199&z=12&m=0. Se utilizarán los Modelos Digitales de Elevación (MDE) disponibles por la NASA (<i>National Aeronautics and Space Administration</i>) para el programa mundial SRTM (<i>Shuttle Radar Topography</i> <i>Mission</i>), de la página http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp, cuya resolución espacial es de 90 x 90 metros por celda.					
Participar en reuniones de trabajo, realizadas por el INECC, con responsables de los estudios de escenarios de cambio climático, impactos, vulnerabilidad y adaptación.					
Informe Final (28 de Nov) de proyecto que incluya: indice, resumen español e inglés, introducción, antecedentes, descripción de la metodología, resultados, conclusiones, recomendaciones, próximos pasos, bibliografía y anexos.					
Preparar una presentación en Power Point con los resultados más relevantes del estudio, los cuales se expondrán ante la Coordinación de Adaptación del INECC.					

Anexo I. Ejercicio sobre áreas vulnerables

Haciendo el ejercicio propuesto en la metodología, se identificaron aquellas zonas planas (pendiente menor a 10°) y con elevación menor a 100 m (Figura I.1). De la Figura I.1 a la I.3 se resaltan las provincias fisiográficas con mayor riesgo de inundación de acuerdo a este criterio: llanuras costeras del Golfo de México (Norte y Sur), Península de Yucatán, llanura costera del Pacífico en la costa de Nayarit, Sinaloa y Sonora, delta del Río Colorado, el Desierto de San Sebastián Vizcaíno, Llanos de Magdalena en B.C.S., las Llanuras Costeras del Istmo de Tehuantepec y de Chiapas.



Figura I.1. Zonas de baja pendiente del terreno menor a 5° y 10° y elevación menor a 50 m y 100.

Para ubicar la distribución espacial de la población en relación a las zonas planas y de baja elevación, se sobrepuso el conjunto de datos LandScan (2004) clasificando sus celdas en tres clases:

- Celdas con 0 a 50 personas por celda, que representa nula o baja concentración de población y se simbolizan en las siguientes figuras sin color o transparentes,
- Celdas con 50 a 1000 personas por celda, concentración media simbolizada en amarillo, y
- Celdas con más de 1000 personas por celda, simbolizadas en rojo.





Figura I.2. Distribución de la población (LandScan 2004) y zonas cuya pendiente del terreno es menor a 5° y elevación menor a 50 m. (azul oscuro); y pendiente del terreno menor a 10° y elevación menor a 100 m. Panel superior: República Mexicana, inferior: Península de Yucatán e Itsmo de Tehuantepec.



Distribución población, zonas planas y elevación menor a 100m

Figura I.3. Distribución de la población (LandScan 2004) y zonas cuya pendiente del terreno es menor a 5° y elevación menor a 50 m. (azul oscuro); y pendiente del terreno menor a 10° y elevación menor a 100 m (azul claro). Llanura costera del Pacífico.

Se llevó a cabo un ejercicio de análisis de la población que vive cerca de la costa que sería afectada en los mencionados escenarios de pendiente y elevación del terreno. Los estados más afectados fueron Veracruz, Sinaloa y Tamaulipas.

Tabla I.1. Población en zonas vulnerables de estados costeros calculada a partir del modelo de distribución espacial de la población (LandScan, 2004) y los dos modelos de zonas vulnerables. Zona 1: planas (pendiente menor a 10°) y elevación menor a 100 metros. Zona 2: planas (pendiente menor a 5°) y elevación menor a 50 metros. Ver Figuras I.1 y I.3.

Entidad	Población en zona	oblación en zona Población en zona	
	vulnerable 1	vulnerable 2	
Veracruz	3,711,196	2,652,227	
Sinaloa	2,388,470	1,843,141	
Tamaulipas	1,944,824	1,600,986	
Tabasco	1,933,817	1,874,801	
Baja California	1,884,073	1,515,143	
Yucatán	1,765,448	1,730,334	
Sonora	1,099,173	981,091	
Oaxaca	859,197	568,769	
Chiapas	855,552	589,957	
Guerrero	795,067	627,793	
Quintana Roo	759,217	753,083	
Campeche	649,753	523,350	
Nayarit	391,058	364,976	
Baja California Sur	349,437	258,856	
Colima	229,992	207,339	
Jalisco	221,791	163,150	
Michoacán	156,213	151,567	
Total	19,994,278	16,406,563	

Productos generados en esta etapa

- Modelo de Elevación de México a partir de los datos globales de SRTM de la NASA, en coordenadas geográficas y en proyección Cónica Conforme de Lambert.
- Rejilla regular (raster) de pendiente del terreno (grados) para la república Mexicana con celdas de 90m calculado a partir del modelo SRTM en proyección Cónica Conforme de Lambert.
- Imagen con la clasificación de zonas susceptibles de inundarse con escenarios de ascenso en el nivel del mar 1 y 2 m en coordenadas geográficas con 3 segundos de arco de resolución espacial (~90m).

- Conjunto de datos vectorial de cercanía a la costa: zonas de influencia de 100, 500, 1000, 5000 y 10000 m de la línea de costa.
- Delimitación de las zonas de baja pendiente del terreno (5° y 10°) y altitud menor a 100m y 50m.