

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias en
Oceanografía Física**

Análisis del efecto de las condiciones de oleaje y morfología
sobre los procesos costeros en playas arrecifales

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Tadashi Kono Martínez

Ensenada, Baja California, México
2016

Tesis defendida por

Tadashi Kono Martínez
y aprobada por el siguiente Comité

Dra. Vanesa Magar Brunner
Directora de tesis

Dr. José Gómez Valdés

Dr. Robert McCall

Dr. Jonás De Dios de Basabe Delgado



Dr. Manuel López Mariscal
Coordinador del Posgrado en Oceanografía Física

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Tadashi Kono Martínez © 2016

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis que presenta **Tadashi Kono Martínez** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Oceanografía Física.

Análisis del efecto de las condiciones de oleaje y morfología sobre los procesos costeros en playas arrecifales

Resumen aprobado por:

Dra. Vanesa Magar Brunner
Directora de Tesis

Los arrecifes de coral son ecosistemas de vital importancia por los servicios que proporcionan al hombre, tales como: proveer condiciones óptimas para que se reproduzcan especies marinas de importancia comercial; además gracias a ellos se generan diferentes actividades recreativas y miles de empleos en el sector turístico y pesquero; al disminuir los efectos de impacto de erosión por oleaje de tormenta altamente energético e incluso inundación consecuencias del incremento del nivel del mar. Sin embargo, la capacidad de protección de los arrecifes coralinos se verá afectada de forma importante y posiblemente irreparable por el calentamiento global y acidificación del océano. Por un lado, se han observado incrementos tanto del nivel del mar como de la frecuencia e intensidad de las tormentas en zonas costeras, ambos asociados al calentamiento global. Por otro, la acidificación de los océanos ha causado estrés en arrecifes coralinos, ocasionando su blanqueamiento, degradación y cambiando su resiliencia ante las tormentas. En el presente trabajo mediante el modelo numérico XBeach se analizaron los principales forzamientos que influyen sobre los procesos costeros en playas arrecifales, con el objetivo de estudiar el posible impacto del cambio climático sobre los procesos de erosión costera en las zonas protegidas por estos arrecifes. La importancia del arrecife coralino se notó al comparar dos escenarios: uno donde el arrecife coralino se consideró saludable; mientras que otro donde el arrecife coralino fue degradado. Con ayuda de XBeach se simularon los procesos de propagación del oleaje, hidrodinámica y morfología de playa; utilizando como caso de estudio el arrecife de coral de Puerto Morelos, Quintana Roo, dado a la disponibilidad de datos. Previamente, XBeach se utilizó primero para reproducir observaciones experimentales en un canal de oleaje. Esto permitió evaluar la sensibilidad de las predicciones ante la variación de los coeficientes de fricción (c_f y f_w) y parametrizaciones de rompimiento del oleaje (γ), identificando los valores adecuados. Posteriormente en Puerto Morelos las simulaciones se realizaron a dos dimensiones (2D) en la horizontal, utilizando como forzamiento: viento, marea y oleaje registrados durante el paso del huracán Wilma del 17 al 23 de octubre del 2005. Los resultados mostraron que XBeach reproduce bien las condiciones de oleaje, y al comparar los escenarios indicaron que el arrecife de coral de Puerto Morelos provee protección a la línea de costa ante el oleaje de tormenta, principalmente en zonas de gran cobertura arrecifal. Sin embargo, el grado de protección dependerá a la vez del nivel del mar y energía infragravitatoria.

Palabras clave: **XBeach, hidrodinámica costera, oleaje de tormenta, erosión, arrecifes coralinos.**

Abstract of the thesis presented by **Tadashi Kono Martínez** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Physical Oceanography.

Analysis of the effect of wave conditions and morphology on coastal processes in reef beaches

Abstract approved by:

Dra. Vanesa Magar Brunner
Thesis Director

Coral reefs are ecosystems of vital importance for the services they provide to man, such as: providing optimal conditions for the reproduction of marine species of commercial importance; also thanks to them they generate different recreational activities and thousands of jobs in the tourism and fishing sector by reducing the effects of erosion impact by highly energetic storm surge and flood consequences of sea level rise. However, the protective capacity of coral reefs will be significantly and possibly irreparably affected by global warming and acidification of the ocean. On the one hand, there have been increases in both sea level and the frequency of intensity storms in coastal areas, both associated with global warming. On the other hand, the acidification of the oceans has caused stress on coral reefs, causing them to bleach, degradation and changing their resilience to the storms. In the present work, using the numerical model XBeach, the main forcings that influence coastal processes in reef beaches were analyzed in order to study the possible impact of climate change on coastal erosion processes in the protected areas of these reefs. The importance of the coral reef was noted when comparing two scenarios: one where the coral reef was considered healthy; while another where the coral reef was degraded. With the help of XBeach the processes of wave propagation, hydrodynamics and beach morphology were simulated; using as a case study the coral reef of Puerto Morelos, Quintana Roo, given the availability of data. Previously, XBeach was first used to reproduce experimental observations in a wave flume. This allowed to evaluate the sensitivity of the predictions to the variation of the coefficients of friction (c_f and f_w) and parameters of breaking waves (γ), identifying the appropriate values. Later in Puerto Morelos the simulations were performed in two dimensions (2D) in the horizontal, using as forcing: wind, tide and wave recorded during the passage of Hurricane Wilma from 18 to 23 October 2005. The results showed that XBeach reproduces well the wave height and hydrodynamic conditions, and comparing the scenarios indicated that the coral reef of Puerto Morelos provides protection to the coastline against storm surge, mainly in areas with high reef coverage. However, the degree of protection will depend on both sea level and infra-gravitational energy.

Keywords: **XBeach, hydrodynamics, storm surge, erosion, coral reefs**

Dedicatoria

A mis padres Julia y Oswaldo; y hermanos Daniel y Kenji, por todo su apoyo incondicional y todas sus muestras de cariño y amor, pues sin ellos.... no estaria aquí.

A mi tía Lidia que en paz descanse por haberme enseñado e inspirado a seguir adelante y recto hasta la cima a pesar de las adversidades.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada con el número 392199, así como al CICESE y Departamento de Oceanografía Física por su apoyo económico para estudiar la maestría.

Al instituto de ciencias aplicadas en el campo del agua Deltares por su apoyo logístico y económico para realizar mi estancia.

A mi directora de tesis Vanesa por toda su paciencia y apoyo académico, económico y logístico proporcionado durante toda mi estancia en el programa de posgrado.

A Robert McCall, por todo su apoyo y paciencia para enseñarme a utilizar XBeach, así como por sus comentarios y sugerencias para este trabajo.

A los miembros del comité: Dr. José Gómez y Dr. Jonas De Basabe por sus comentarios y sugerencias durante el desarrollo de este trabajo.

A Armando Trasviña quien me motivo la idea de introducirme a estudiar los procesos costeros.

A Julio Candela y Cesar Coronado por haberme proporcionado los datos para elaborar esta tesis.

A mis amigos y compañeros de generación Marco, Panchisco, Chilango, Diego, Mario, Rosita, Jess y Sandy por todos los cotorreos que pasaron y los que seguirán. A Javi, Fati y Alicia por su valiosa amistad y todo su apoyo (sobre todo cuidando a Jazz :3) durante toda mi estancia. A Sandy, Mario y Mau por su valiosa amistad también y risas que pasamos y seguiran pasando así como por haber pertenecido a la mejor casa (cubículo).....327. A todos mis compañeros, amigos y colegas del CICESE por sus comentarios, contribuciones y sugerencias realizadas durante las reuniones sociales. A los colegas y amigos que viven en Manzanillo por su apoyo moral y sus buenas vibras para acabar a tiempo la tesis.

Tabla de contenido

Página

Resumen en español	i
Resumen en inglés	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Lista de figuras	vii
Lista de tablas	x
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Dinámica de la zona costera	2
1.2 Antecedentes	5
1.3 Hipótesis.....	9
1.4 Objetivo general.....	9
1.4.1 Objetivos particulares.....	9
Capítulo 2. Metodología: Modelo numérico XBeach	10
2.1 Introducción	10
2.1.1 Sistema de coordenadas y malla de XBeach	11
2.1.2 Ecuación de acción del oleaje.....	12
2.1.3 Disipación del oleaje.....	13
2.1.4 Balance de energía en la zona de rompientes.....	16
2.1.5 Ecuaciones de aguas someras	17
2.1.6 Ecuaciones de transporte de sedimentos	19
Capítulo 3. Calibración y Validación de XBeach	21
3.1 Modelo físico unidimensional a escala del arrecife coralino en Guam	21
3.1.1 Simulaciones numéricas	22
3.1.2 Análisis de datos y sensibilidad del modelo	23
3.1.3 Calibración del rompimiento del oleaje	27
3.2 Caso de estudio: Arrecife de Puerto Morelos, Quintana Roo.....	31
3.2.1 Simulación numérica de Puerto Morelos, Quintana Roo	34
3.2.2 Análisis de datos y calibración del modelo.....	35

Capítulo 4. Resultados y Discusión del arrecife de Puerto Morelos	40
4.1 Simulación de diferentes escenarios.....	40
4.2 Resultados de los cambios morfológicos	41
4.3 Escenarios con arrecife de coral saludable	43
4.3.1 Caso calibrado vs caso sin viento.....	43
4.3.2 Caso calibrado vs caso estacionario	46
4.3.3 Caso calibrado vs caso marejada	49
4.4 Escenarios con arrecife de coral reducido	52
4.4.1 Caso calibrado vs caso arrecife reducido.....	52
4.4.2 Caso calibrado vs caso año 2100	55
4.4 Evaluación de la respuesta de la playa arrecifal ante el impacto por erosión.....	58
Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones	60
Literatura citada	62

Lista de figuras

Figura 1. Esquema general de las diferentes secciones de la zona costera.....	3
Figura 2. Distribución de arrecifes de coral en el mundo obtenido de http://www.wri.org/	3
Figura 3. Distribución global conocida de los arrecifes coralinos tropicales aguas cálidas y aguas frías (profundos). Fuente : UNEP-GRID Arendal.....	4
Figura 4. Distribución de los principales arrecifes coralinos (color azul) en el Caribe mexicano.	8
Figura 5. Sistema de coordenadas XBeach.....	11
Figura 6. Representación esquemática del experimento de Demirbilek <i>et al.</i> (2007) en el canal de oleaje de la Universidad de Michigan.	21
Figura 7. Resultados del análisis de sensibilidad para los diferentes c_f empleados en las 21 pruebas. a) Bias de la altura significativa de la ola (H_{m0}). b) Bias del nivel del agua. c) Raíz del error cuadrático medio de la altura significativa. d) Raíz del error cuadrático medio de el nivel del agua. La línea roja denota el error estandar de las observaciones <i>in situ</i>	25
Figura 8. Resultados del análisis de sensibilidad para los diferentes f_w empleados en las 21 pruebas. a) Bias de la altura significativa de la ola (H_{m0}). b) Bias de el nivel del agua. c) Raíz del error cuadrático medio de la altura significativa. d) Raíz del error cuadrático medio de el nivel del agua. La línea roja denota el error estandar de las observaciones <i>in situ</i>	26
Figura 9. Resultados estadísticos de los diferentes coeficientes de rompimiento del oleaje propuesto por Roelvink (1993). a) Bias de la altura significativa de la ola (H_{m0}). b) Bias del nivel del agua. c) Raíz del error cuadrático medio de la altura significativa. d) Raíz del error cuadrático medio del nivel del agua. La línea roja denota el error estándar de las observaciones <i>in situ</i>	28
Figura 10. Resultados estadísticos de los diferentes coeficientes de rompimiento del oleaje propuesto por Daly <i>et al.</i> (2010). a) Bias de la altura significativa de la ola (H_{m0}). b) Bias del nivel del agua. c) Raíz del error cuadrático medio de la altura significativa. d) Raíz del error cuadrático medio del nivel del agua. La línea roja denota el error estándar de las observaciones <i>in situ</i>	29
Figura 11. Resultados estadísticos para las ondas de frecuencia baja y alta. a) Bias de la altura significativa del oleaje de alta frecuencia ($H_{S_{SW}}$) y baja frecuencia ($H_{S_{IG}}$). b) Raíz del error cuadrático medio de la altura significativa del oleaje de alta frecuencia ($H_{S_{SW}}$) y baja frecuencia ($H_{S_{IG}}$). La línea roja denota el error estandar de altura significativa de las ondas de alta frecuencia, mientras que la línea negra denota el error estándar de altura significativa de las ondas de baja frecuencia, en las posiciones en las que se encuentran los sensores	30
Figura 12. Comparación de las mediciones contra los resultados del modelo utilizando los parámetros óptimos. a) Nivel del agua. b) Altura significativa de las ondas de alta frecuencia. c) Altura significativa de las ondas de baja frecuencia.	30
Figura 13. Localización del arrecife de Puerto Morelos, Quintana Roo. Izquierda: Península de Yucatán. Derecha: Elevación y batimetría de la zona de estudio. Triangulo negro: Centro del pueblo. ...	31

Figura 14. Mapa de elevación y batimetría del arrecife de Puerto Morelos. Los puntos negros representan los anclajes de ADCP obtenidos por (Coronado <i>et al.</i> , 2007).	33
Figura 15. Imagen satelital en el canal visible del huracán Wilma impactando en Puerto Morelos, obtenida el 21 de octubre del 2005 a las 1625 UTC. Fuente: Observatorio de la Tierra, NASA (http://earthobservatory.nasa.gov).	34
Figura 16. Forzamientos utilizados en XBeach para el periodo de interes. a) Altura significativa del oleaje registrada por el instrumento LPM3 durante el paso del huracán Wilma. b) Magnitud del viento en Puerto Morelos obtenida por el Inland Wind Model. c) Nivel de marea obtenido en Puerto Morelos por el modelo Delft3D.	35
Figura 17. Altura significativa de las ondas infragravitatorias (IG) en la primera columna. Altura significativa de las ondas cortas (SW) en la segunda columna.....	36
Figura 18. Corrientes correspondientes a la simulación calibrada comparada con las corrientes observadas.....	38
Figura 19. Zonas de erosión y acreción reportadas. Al norte una zona que presentó overwash reportada por Mulcahy <i>et al.</i> (2016). Al centro acreción de playa cercana a la UNAM reportada por Mariño-Tapia <i>et al.</i> (2014). Al sur zona hotelera erosionada reportada en una Manifestación de Impacto Ambiental.	39
Figura 20. Escenarios de arrecife utilizados para simular diferentes condiciones. a) Arrecife saludable. b) Arrecife reducido ~3m.	40
Figura 21. Perfiles de playa extraídos (P1-P9) durante el inicio y final de la simulación del huracán Wilma. Las líneas rojas denotan el perfil de playa extraído.	41
Figura 22. Perfiles de playa inicial y final para el periodo de simulación (calibrado) . La línea negra punteada denota el inicio del nivel medio del mar para cada perfil. Zona sur: a) Perfil 1, b) Perfil 2 y c) Perfil 3. Zona central: d) Perfil 4, e) Perfil 5 y f) Perfil 6. Zona norte: g) Perfil 7, h) Perfil 8 y i) Perfil 9.....	43
Figura 23. Comparación de las corrientes simuladas para el caso sin viento (SV) con el caso calibrado y las observadas.....	44
Figura 24. Comparación de la altura significativa de las ondas infragravitatorias (IG) (columna de la izquierda). Comparación de la altura significativa de las ondas cortas (SW) (columna de la derecha).....	45
Figura 25. Perfiles de playa inicial y final para el periodo de simulación (sin viento). La línea negra punteada denota el inicio del nivel medio del mar para cada perfil. Zona sur: a) Perfil 1, b) Perfil 2 y c) Perfil 3. Zona central: d) Perfil 4, e) Perfil 5 y f) Perfil 6. Zona norte: g) Perfil 7, h) Perfil 8 y i) Perfil 9.....	46
Figura 26. Comparación de las corrientes simuladas para el caso estacionario (E) con el caso calibrado y las observadas.....	47

- Figura 27. Columna izquierda: Comparación de la altura significativa de las ondas infragravitatorias (IG). Columna derecha: Comparación de la altura significativa de las ondas cortas (SW).....48
- Figura 28. Perfiles de playa inicial y final para el periodo de simulación (estacionario) . La línea negra punteada denota el inicio del nivel medio del mar para cada perfil. Zona sur: a) Perfil 1, b) Perfil 2 y c) Perfil 3. Zona central: d) Perfil 4, e) Perfil 5 y f) Perfil 6. Zona norte: g) Perfil 7, h) Perfil 8 y i) Perfil 9.....49
- Figura 29. Comparación de las corrientes simuladas para el caso marejada (M) con el caso calibrado y las observadas.....50
- Figura 30. Comparación de la altura significativa de las ondas infragravitatorias (IG) primera columna. Comparación de la altura significativa de las ondas cortas (SW) segunda columna.....51
- Figura 31. Perfiles de playa inicial y final para el periodo de simulación (marejada) . La línea negra punteada denota el inicio del nivel medio del mar para cada perfil. Zona sur: a) Perfil 1, b) Perfil 2 y c) Perfil 3. Zona central: d) Perfil 4, e) Perfil 5 y f) Perfil 6. Zona norte: g) Perfil 7, h) Perfil 8 y i) Perfil 9.....52
- Figura 32. Comparación de las corrientes simuladas para el caso arrecife reducido (AR) con el caso calibrado y las observadas.....53
- Figura 33. Columna izquierda: Comparación de la altura significativa de las ondas infragravitatorias (IG). Columna derecha: Comparación de la altura significativa de las ondas cortas (SW).....54
- Figura 34. Perfiles de playa inicial y final para el periodo de simulación (arrecife reducido) . La línea negra punteada denota el inicio del nivel medio del mar para cada perfil. Zona sur: a) Perfil 1, b) Perfil 2 y c) Perfil 3. Zona central: d) Perfil 4, e) Perfil 5 y f) Perfil 6. Zona norte: g) Perfil 7, h) Perfil 8 y i) Perfil 9.....55
- Figura 35. Comparación de las corrientes simuladas para el caso año 2100 con el caso calibrado y las observadas.....56
- Figura 36. Comparación de la altura significativa de las ondas infragravitatorias (IG) primera columna. Comparación de la altura significativa de las ondas cortas (SW) segunda columna.....57
- Figura 37. Perfiles de playa inicial y final para el periodo de simulación (futurístico) . La línea negra punteada denota el inicio del nivel medio del mar para cada perfil. Zona sur: a) Perfil 1, b) Perfil 2 y c) Perfil 3. Zona central: d) Perfil 4, e) Perfil 5 y f) Perfil 6. Zona norte: g) Perfil 7, h) Perfil 8 y i) Perfil 9.....58
- Figura 38. Diferencias en el impacto por inundación de overwash respecto al caso base. a) Zonas de inundación (azul) durante el pico de la tormenta caso base. b) Diferencia de resultados CB vs AR. c) Diferencia de resultados CB vs SV. d) Diferencia de resultados CB vs E. e) Diferencia de resultados CB vs M. f) Diferencia de resultados CB vs 2100. Los colores azules indican diferencias negativas respecto al caso base, mientras que los rojos indican diferencias positivas.59

Lista de tablas

Tabla 1. Condiciones de oleaje iniciales para las diferentes pruebas de laboratorio tomadas de Demirbilek et al. (2007).....	22
Tabla 2. Coeficientes numéricos utilizados para calibrar los resultados de XBeach.....	23
Tabla 3. Resultados del sesgo y la raíz del error cuadrático medio de las ondas infragravatorias (IG) y ondas cortas (SW).....	37

Capítulo 1. Introducción

Los arrecifes de coral son ecosistemas de vital importancia por los servicios que le proporcionan a la humanidad, por ejemplo: son de los ambientes con mayor biodiversidad del planeta, y proveen condiciones adecuadas para que se reproduzcan especies marinas de importancia comercial; miles de empleos en el sector turístico y pesquero, así como diversas actividades recreativas en el mar, son posibles gracias a ellos; ayudan a proteger la costa y las comunidades residentes en ella, al disminuir los efectos de erosión causada por olas altamente energéticas generadas por tormentas o huracanes, e inundaciones relacionadas por el aumento en el nivel del mar.

Sin embargo, el calentamiento global está teniendo un efecto también importante, tanto en la degradación de los arrecifes de coral a causa de la acidificación de los océanos, como en los procesos que dominan la dinámica de la zona costera (Agardy y Alder, 2005; Young *et al.*, 2011) y que provocan, entre otros, problemas la erosión de la línea de costa por pérdida de sedimentos. Este incremento en la erosión de playas ocurre por el impacto de olas de tormenta de mayor altura, por inundaciones debidas al aumento del nivel del mar y cambios en patrones de las corrientes costeras. El incremento en intensidad en tormentas genera olas de tormenta con mayor energía que al romper en la línea de costa, remueven mayor cantidad de sedimento, mientras que el incremento en frecuencia no permite que las playas se recuperen durante los periodos de calma que tienen lugar entre eventos de tormenta consecutivos (Russell, 1993; Elfrink y Baldock, 2002; Roelvink *et al.*, 2009). Las mareas de tormenta se ven también intensificadas debido a los cambios en la dinámica de los sistemas de baja presión.

La morfodinámica costera también se ve afectada por 1) la construcción de estructuras costeras (Odériz *et al.*, 2014), ya que estas estructuras alteran la hidrodinámica y los procesos de transporte de sedimentos de la zona, y por 2) la reducción de aporte de cauces de ríos, ya que sin la entrada de sedimentos se dificulta la recuperación de la línea de costa por transporte de sedimentos aportados costa arriba por corrientes litorales (Álvarez *et al.*, 2006). Para proponer mejores soluciones ante el problema de la erosión costera, es importante estudiar la interacción del oleaje, corrientes y viento con el transporte de sedimentos y la morfología costera. De esta manera se puede evaluar el impacto de diferentes estructuras que posiblemente podrían evitar la erosión en la zona en la que se encuentran (Roelvink *et al.*, 2009; McCall *et al.*, 2010; van Dongeren *et al.*, 2013; Odériz *et al.*, 2014).

1.1 Dinámica de la zona costera

Las tormentas tropicales generan oleaje de energía alta el cual se propaga hacia la línea de costa. Cuando la profundidad se reduce a la mitad de la longitud de onda (distancia de cresta a cresta) de las olas, estas comienzan a “sentir” el fondo marino. En primer lugar, la onda se refracta, es decir sufre un cambio de dirección, donde el frente de ola se posiciona de forma paralela a las líneas de misma profundidad (isobatas). Posteriormente al acercarse a la zona de rompientes la velocidad disminuye y la longitud de onda tiende a incrementar (por conservación de energía) modificando su pendiente, por lo que en algún momento la ola sufre inestabilidad y rompe, transmitiendo la energía a la zona costera. Al romper el oleaje, se generan chorros de agua, corrientes costeras, corrientes en el fondo marino, y saltos hidráulicos, los cuales causan procesos de transporte a través de esfuerzos friccionales, turbulencia, y levantamiento de sedimentos (Beach y Sternberg, 1988; Elfrink y Baldock, 2002).

La zona de interacción entre oleaje y fondo marino se puede dividir en tres: la zona de trasplaya (*backshore*), la zona de lavado (*swash*) y la zona de rompientes (*surf*), como se ilustra en la Figura 1. Por otro lado, se conoce que el 80% de las costas en el mundo presenta diferentes tipos de estructuras sumergidas (Emery y Kuhn, 1982) como barras de arena, arrecifes rocosos y arrecifes coralinos, los cuales interactúan con el oleaje y disipan su energía de diferente manera (Ferrario *et al.*, 2014). La energía disipada genera turbulencia, corrientes, y un incremento en el nivel medio del mar (*setup*). Las corrientes generadas que son paralelas/perpendiculares a la línea de costa inducen el transporte de sedimentos (Storlazzi *et al.*, 2004).

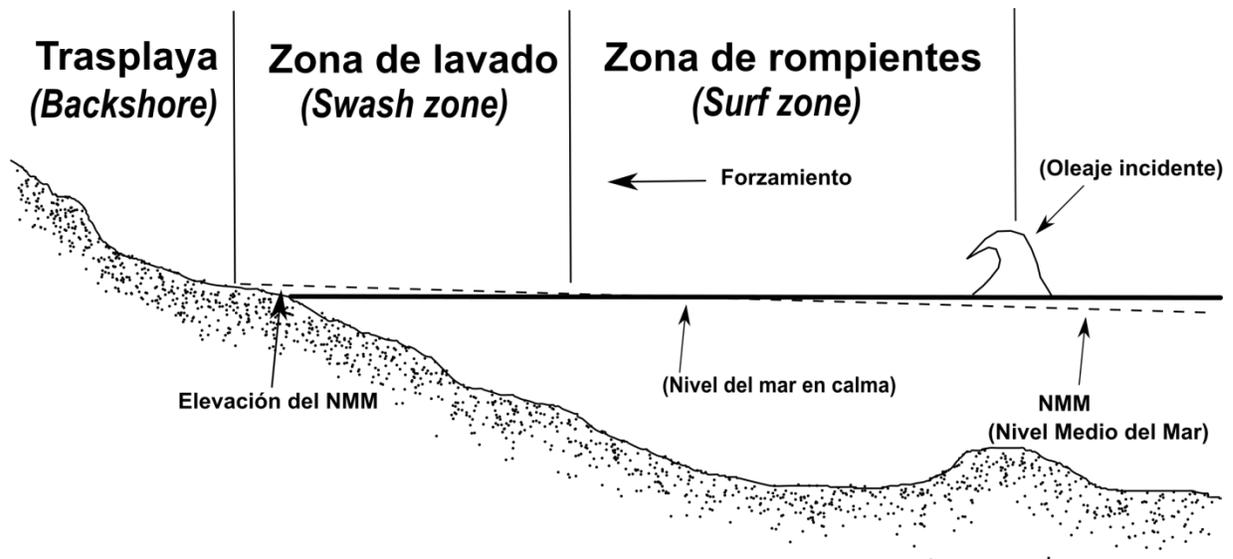


Figura 1. Esquema general de las diferentes secciones de la zona costera

Dinámica sobre los arrecifes

Los arrecifes coralinos son estructuras físicas que se encuentran parcialmente/completamente sumergidas y distribuidas por todo el mundo (

Figura 2). Se caracterizan por estar hechos de carbonato de calcio secretado por los corales, organismos invertebrados microscópicos; además de ser de los ecosistemas más productivos y con mayor riqueza biológica del planeta. Su papel ecológico es vital ya que participan en los ciclos biogeoquímicos globales y proveen zonas de crianza para diferentes especies marinas (Wolanski y Sarsenski, 1997; Falter *et al.*, 2004; Ferrario *et al.*, 2014).

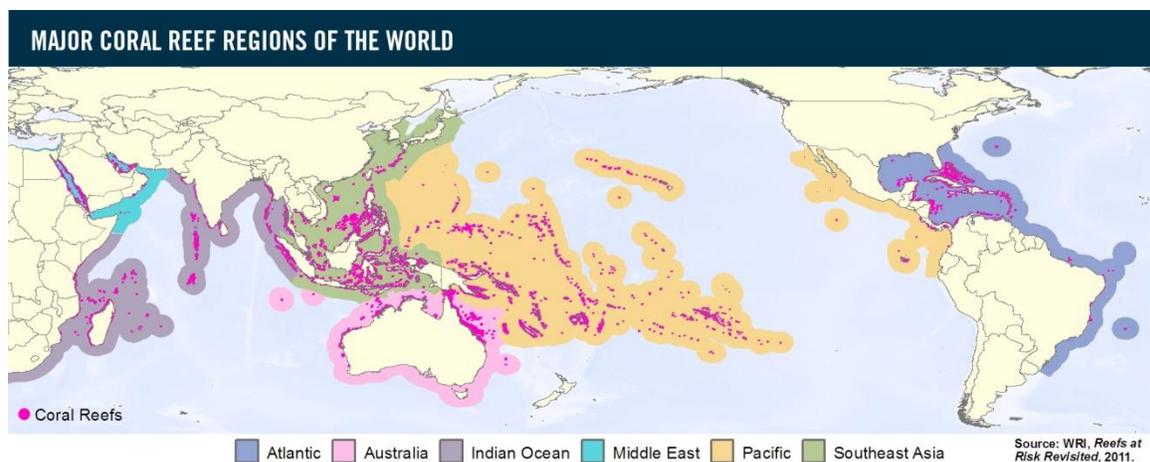


Figura 2. Distribución de arrecifes de coral en el mundo obtenido de <http://www.wri.org/>

En base a su distribución, los arrecifes se pueden clasificar como corales de aguas frías o aguas tropicales. Los de aguas frías son aquellos que se localizan por arriba de las latitudes medias, a temperaturas del agua de hasta 4 °C, a profundidades de hasta 40 m, y su tasa de crecimiento es de 5-25 mm/año (Figura 3). Por otro lado, los corales de aguas tropicales encuentran entre las latitudes medias y bajas, a temperaturas por arriba de los 16 °C, en aguas someras de baja turbidez, y con una tasa de crecimiento promedio de 1-100 cm/año (Figura 3).

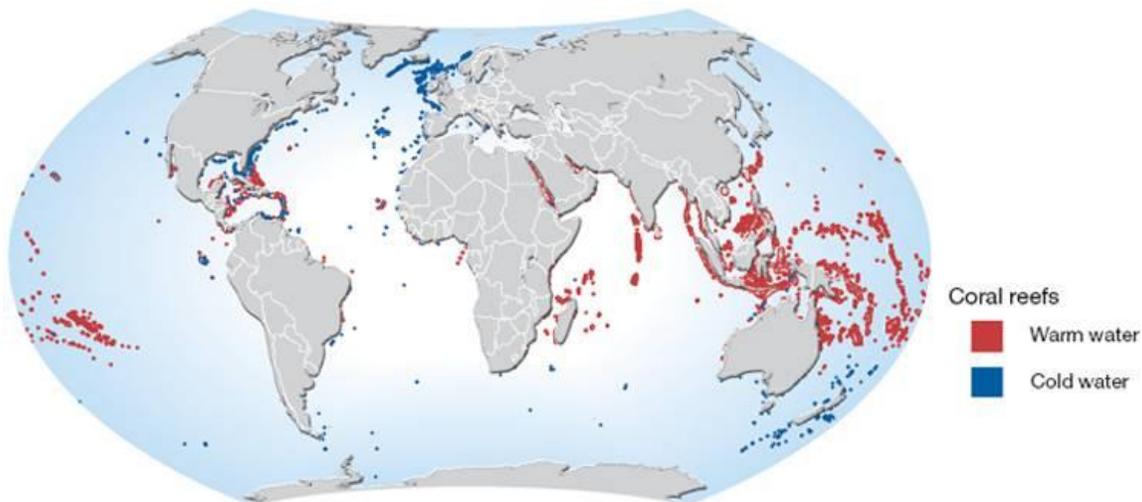


Figura 3. Distribución global conocida de los arrecifes coralinos tropicales aguas cálidas y aguas frías (profundos). Fuente : UNEP-GRID Arendal.

Además, de acuerdo a su formación topográfica los arrecifes de coral pueden ser clasificados en los siguientes tres grupos principales (Darwin, 1842): 1) los arrecifes periférico (*fringing reefs*) están conectados con la línea de costa y en algunas ocasiones pueden contener una laguna arrecifal; 2) arrecifes barrera (*barrier reefs*), están separados de la línea de costa y contienen una laguna arrecifal grande como es el caso de la Gran Barrera de Coral en Australia; 3) atolones (*atolls*) son arrecifes en el océano abierto que rodean completa o parcialmente una laguna.

En México, los arrecifes coralinos se encuentran tanto en la costa del Pacífico como en la del Caribe y golfo de México. Están agrupados dentro de seis zonas importantes: la península y el golfo de California, el Archipiélago de las islas Revillagigedo, las Islas Marías, la costa del Pacífico sur, el golfo de México y Banco de Campeche y por el mar Caribe. Los arrecifes del Pacífico mexicano se caracterizan por ser pequeños, estar geográficamente aislados entre sí y tener menor resistencia a los factores de estrés a diferencia de los del Caribe mexicano (Pandolfi *et al.*, 2003).

Los arrecifes coralinos cumplen la función de rompeolas proveyendo protección a la costa ante el oleaje incidente (Hearn, 1999; Sheppard *et al.*, 2005; Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2013; Ferrario *et al.*, 2014). La energía del oleaje sobre un arrecife de coral es atenuada y redistribuida sobre todas las frecuencias del espectro del oleaje. La altura del oleaje tiende a disminuir y romper conforme se acerca a la llanura arrecifal (*reef flat*) (Young, 1989). Esto permite incrementar el nivel del mar y generar un gradiente de presión, lo que conlleva a la generación de corrientes. Dicho forzamiento es conocido como esfuerzos de radiación; posteriormente las corrientes generadas y los mecanismos turbulentos transportaran los sedimentos, sin embargo este patrón descrito dependerá de la profundidad en la que se encuentre el arrecife de coral (Hearn, 1999).

Recientemente Ferrario *et al.* (2014) realizaron un análisis económico, donde comparan el costo de diseño y mantenimiento de un rompeolas con la creación de un programa de recuperación y conservación de arrecifes de coral. Los autores concluyen que invertir en arrecifes como estructuras de protección tiene más beneficio como medida de mitigación para la erosión costera. Dado al servicio ecológico que ofrecen los arrecifes, han tomado importancia para las autoridades locales y federales y se han realizado esfuerzos para la conservación de estos ecosistemas. Sin embargo, para desarrollar programas de conservación de arrecifes que sean efectivos es fundamental estudiar la hidrodinámica regional en playas arrecifales, para cada tipo de arrecife coralino.

1.2 Antecedentes

Sobre la superficie del agua en zonas arrecifales se ha observado un patrón característico de oscilaciones irregulares relacionadas a fluctuaciones de la altura y periodo (2-3 minutos) del oleaje incidente. Dichas oscilaciones son conocidas como ondas largas u ondas infragravitatorias (Munk, 1949).

La zona de lavado se encuentra influenciada principalmente por la energía de frecuencia baja, manifestado en la forma de ondas infragravitatorias (OI; de aquí en adelante) (Tucker, 1954). Las OI son ondas de gravedad sobre la superficie caracterizadas por tener frecuencias de $\sim 0.004 - 0.04$ Hz (30 s – 5 min). Son generadas por el viento y oleaje de fondo (*swell*) que al llegar a la zona de rompientes por los procesos no lineales permiten una transferencia de energía desde las altas frecuencias (0.04 - 4 Hz) del espectro de onda hacia las bajas frecuencias (0.004 – 0.04 Hz) (Herbers *et al.*, 1995; Ruessink *et al.*, 1998); y mediante los esfuerzos de radiación, generan corrientes litorales y alimentadoras describiendo

los patrones de circulación en celdas a lo largo de la playa.

Al igual que el oleaje, las OI tienen altura significativa (H_s) y pueden propagarse en dirección perpendicular u oblicua a la línea de costa; al llegar a la zona de trasplaya son reflejadas hacia mar adentro (Komar, 1976; Lee *et al.*, 1998; Elgar *et al.*, 2001). A través de mediciones de oleaje en la zona de lavado, algunos autores han reportado un incremento en la energía de frecuencia baja en el espectro del oleaje, correspondiente al periodo de las OI. Por otra parte otros estudios reportan un incremento de esta misma energía durante condiciones de tormenta (Russell, 1993; Raubenheimer y Guza, 1996); la cual dependerá de las características batimétricas, morfológicas y dirección del espectro de oleaje incidente en la zona (Huntley *et al.*, 1981). Esto implica que la presencia de barreras físicas como los canales de navegación, escolleras, revestimientos, bancos de arena sumergidos e incluso arrecifes coralinos puede aumentar o disminuir la amplitud de la energía de frecuencia baja (Thornton *et al.*, 2007) el cual es el forzamiento dominante en el transporte de sedimentos (Beach y Sternberg, 1988; Aagaard y Greenwood, 1994; 1995).

Para el estudio del oleaje-corrientes y morfología costera sobre zonas arrecifales se han utilizado diferentes metodologías, desde observaciones de campo mediante boyas de oleaje, perfiladores de corrientes y perfiladores de playa (Coronado *et al.*, 2007), hasta experimentos de laboratorio en canales o cuencas costeras (Demirbilek *et al.*, 2007), así como modelos numéricos que describen las ecuaciones de flujo y oleaje en aguas someras (Roelvink *et al.*, 2009; McCall *et al.*, 2010; Nwogu y Demirbilek, 2010; Zijlema *et al.*, 2011; Odériz *et al.*, 2014).

Las mediciones de campo proveen información suficiente de la dinámica de la zona, siempre y cuando el número de instrumentos instalados permita una caracterización adecuada tanto del oleaje como las corrientes. Además, proveen información útil para calibrar las parametrizaciones que emplean algunos modelos numéricos a escalas tanto regionales como locales. Los modelos numéricos permiten tener mayor resolución espacial y temporal del oleaje, las corrientes, el transporte de sedimentos y la morfodinámica (es decir, de los procesos costeros en la zona), lo cual es fundamental para describir la hidrodinámica de la zona.

Existen diferentes modelos numéricos morfológicos (GENESIS, UNIBEST, XBeach-G, entre otros) e hidrodinámicos (MIKE 21, SWASH, Delft3D, entre otros), sin embargo para este trabajo se requiere estudiar la interacción del oleaje con las corrientes, morfodinámica de la línea de costa y la morfología del arrecife coralino, por lo que se utilizará el modelo numérico XBeach (Roelvink *et al.*, 2009), dado que

resuelve estos tres últimos procesos de forma simultánea a través de un sistema de ecuaciones acopladas. XBeach fue diseñado para analizar la evolución de dunas costeras bajo condiciones de oleaje de tormenta, sin embargo se ha utilizado para pronosticar la evolución de la línea de costa en diferentes escenarios de oleaje incidente (Roelvink *et al.*, 2009; Odériz *et al.*, 2014). Por ejemplo en el mar Adriático al norte de Italia se utilizó XBeach como un sistema de alerta en tiempo real con el objetivo de identificar las posibles zonas de impacto ante dos eventos de tormenta registrados (Harley *et al.*, 2011). Los resultados de XBeach mostraron un patrón similar de erosión a las mediciones en campo tomadas después de la tormenta, concluyendo que las predicciones son mejores cuando se utiliza el modelo en dos dimensiones (2D). En otro estudio, McCall *et al.* (2010) utilizaron este mismo modelo para evaluar la erosión costera ante el impacto del huracán Ivan en la Isla de Santa Rosa en Florida, durante septiembre del 2004, comparando las predicciones obtenidas con las mediciones de la línea de costa obtenidas *in-situ* mediante instrumentación LiDAR (Light Detection and Ranging). Los resultados reproducen el patrón de erosión de playa y dunas capturando más del 66% de la varianza registrada por las mediciones *in-situ*.

Uno de los estudios más relevantes que se enfocan específicamente en el análisis de los procesos costeros en zonas arrecifales usando XBeach, es el estudio de van Dongeren *et al.* (2013); en el que se analiza la hidrodinámica y la disipación de energía del oleaje generado por un evento *swell* de 5 días de duración en el arrecife de Ningaloo localizado al noroeste del continente Australiano; caracterizado por ser un arrecife tipo periférico. Los resultados de XBeach reprodujeron el patrón de circulación registrada por los ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) localizados en el arrecife y cerca del mismo. Los registros de oleaje mostraron dominancia de la energía de frecuencia baja correspondiendo al periodo de las OI principalmente sobre la llanura arrecifal y dentro de la laguna. La disipación de esta misma dependerá de la profundidad a la que se encuentre el arrecife según el momento considerado del ciclo de la marea. Por otra parte Quataert *et al.* (2015) utilizaron XBeach en 1D para evaluar las características morfológicas del atolón de Kwajalein en la Isla Roi-Namur, República de las Islas Marshall; encontrando que la hidrodinámica de los arrecifes se rige por: el ancho de la llanura arrecifal, la pendiente del frente arrecifal, rugosidad del fondo, nivel de agua y las condiciones fuera de la costa. Ellos concluyeron que aquellas zonas donde los arrecifes coralinos son estrechos y donde la pendiente del frente arrecifal sea de $\sim 1:10$ o más pronunciada y la llanura arrecifal sea lisa es propensa al impacto del oleaje, erosionando e inundando la costa.

En México, una de las zonas de arrecifes de coral más grande e importante se ubica en el mar del Caribe, cuya parte mexicana pertenece a la península de Yucatán (Figura 4). Sobre esta zona se han llevado a cabo investigaciones para evaluar propuestas para la recuperación de playas y arrecifes ante el impacto

de erosión por el oleaje de tormenta y actividades humanas (Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2013; Odériz *et al.*, 2014).

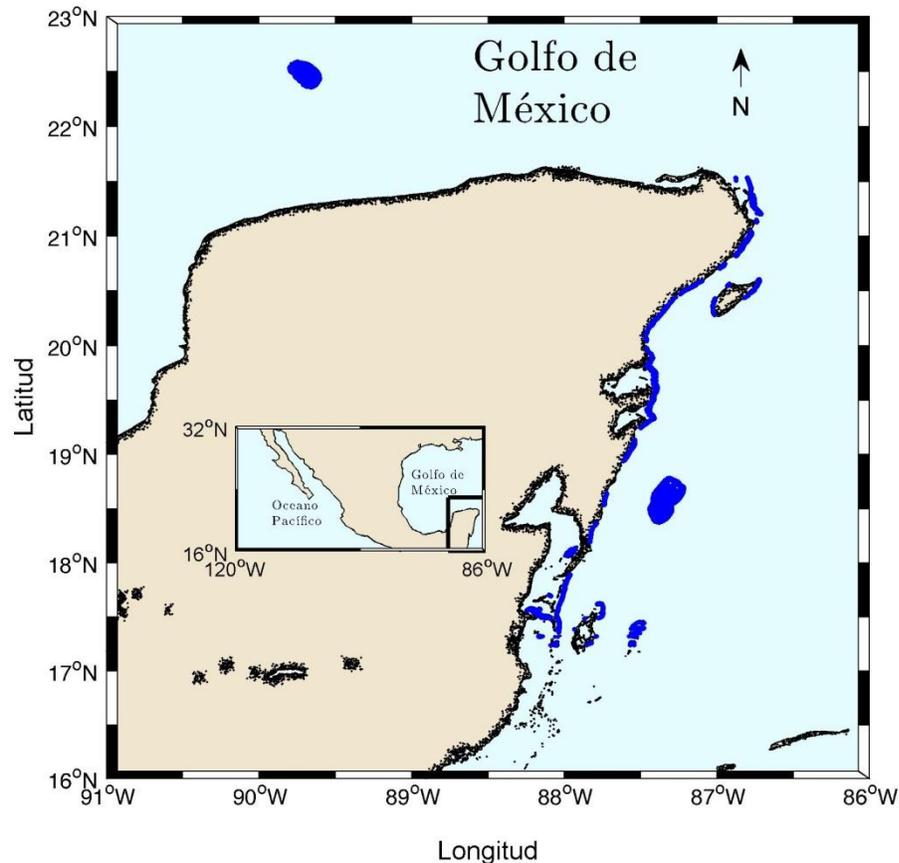


Figura 4. Distribución de los principales arrecifes coralinos (color azul) en el Caribe mexicano.

De manera particular sobre el arrecife de Puerto Morelos y dada la disponibilidad de datos, el caso de estudio del presente trabajo, se han realizado estudios de hidrodinámica y morfología costera, y se ha encontrado que el mecanismo dominante sobre esta zona es el oleaje (Coronado *et al.*, 2007; Torres-Freyermuth *et al.*, 2012; Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2013). Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.* (2013) encontraron que este arrecife provee una protección importante a la línea de costa que se encuentra detrás de la barrera arrecifal, reduciendo 85% de la altura de oleaje incidente y como consecuencia, el perfil de playa en la zona protegida por el arrecife se logra mantener estable. En base a los resultados generados por el modelo numérico SWAN que utilizaron, concluyeron lo siguiente: la energía disipada por el arrecife depende de la profundidad en la que se encuentra el mismo; la distancia entre la cresta del arrecife y la línea de costa determina el grado de vulnerabilidad de la playa ante los cambios morfológicos ocasionados por el oleaje; y la degradación de la cresta del arrecife por un metro resulta en

un incremento del 10% en la energía del oleaje incidente.

En este trabajo se pretende estudiar el papel fundamental que tienen los arrecifes de coral en la protección de la línea de costa y las posibles consecuencias ante la degradación ocasionada por la actividad antropogénica como es el calentamiento global y la acidificación del océano bajo condiciones de oleaje normales y de tormenta, utilizando el modelo numérico XBeach. El capítulo 2 describirá las ecuaciones y características del modelo numérico que será utilizado para llevar a cabo los objetivos del trabajo. En el capítulo 3 se describirá la calibración, validación y aplicación del modelo comparando diferentes escenarios propensos a ocurrir. El capítulo 4 se enfocará en los resultados y discusión. Por último el capítulo 5 concluirá la investigación.

1.3 Hipótesis

El arrecife de coral de Puerto Morelos, proporciona protección a las playas arrecifales ante diferentes condiciones de oleaje, por lo que la degradación de este mismo tendrá como consecuencia un cambio en la hidrodinámica de la zona modificando la morfología de la playa arrecifal.

1.4 Objetivo general

Analizar la disipación de energía que proporciona el arrecife ante la erosión costera de las playas arrecifales de Puerto Morelos, Quintana Roo, bajo diferentes condiciones de oleaje: normales y de tormenta.

1.4.1 Objetivos particulares

- Evaluar el efecto de la geomorfología del arrecife de Puerto Morelos sobre la disipación de energía ante el oleaje.
- Analizar la hidrodinámica de Puerto Morelos en base a los cambios morfológicos del arrecife.

Capítulo 2. Metodología: Modelo numérico XBeach

2.1 Introducción

En el presente capítulo se describirán las ecuaciones de XBeach. Se decidió utilizar este modelo numérico dada la capacidad que tiene para simular el cambio morfológico y transporte de sedimentos junto con la hidrodinámica y oleaje, lo que permite evaluar de manera inmediata el impacto que puede tener la costa protegida por el arrecife ante el oleaje de tormentas.

XBeach es un modelo numérico “*open source*” de predicción de oleaje acoplado con hidrodinámica y morfodinámica costera; fue desarrollado por la UNESCO-IHE y Deltares. Originalmente fue diseñado para evaluar la erosión de playas y dunas costeras ante el impacto del oleaje de tormentas incluyendo los principales procesos hidrodinámicos que ocurren sobre la costa bajo dichas condiciones en aguas someras.

Para este trabajo se utilizó la versión hidrostática la cual toma en cuenta los procesos de transformación del oleaje en una sola capa. Aquí el espectro del oleaje es dividido en base a su frecuencia como Ol (0.004–0.04 Hz o 5–30 s) u ondas cortas (0.04–2 Hz o 30–300 s); esto ahorra tiempo de computación a cambio de que la fase de las ondas cortas no es simulada. Nótese que el valor de la frecuencia de separación, $f_{split} = 0.04 \text{ Hz}$, dependerá del periodo medio del oleaje incidente y por lo tanto debe ajustarse en cada caso de estudio.

Los procesos de propagación y disipación de oleaje, así como los efectos de refracción, asomeramiento y rompimiento se encuentran acoplados con las ecuaciones morfológicas como: carga de sedimentos en el fondo y suspendida, transporte de sedimentos y erosión de fondo y dunas por “*overwash*”, los cuales están generalmente bien reproducidos en el modelo (Roelvink *et al.*, 2009; McCall *et al.*, 2010).

2.1.1 Sistema de coordenadas y malla de XBeach

XBeach utiliza un sistema coordenado donde el eje x , x_{orig} está orientado hacia la costa de forma perpendicular (cross-shore), mientras que el eje y , y_{orig} es paralelo (long-shore) a la línea de costa (Figura 5). El sistema de coordenadas es relativo a las coordenadas mundiales (X_w, Y_w) horizontal-vertical hacia el origen, y α define el ángulo de rotación en sentido horario (manecillas del reloj)-antihorario (contrario a las manecillas del reloj) del eje X_w .

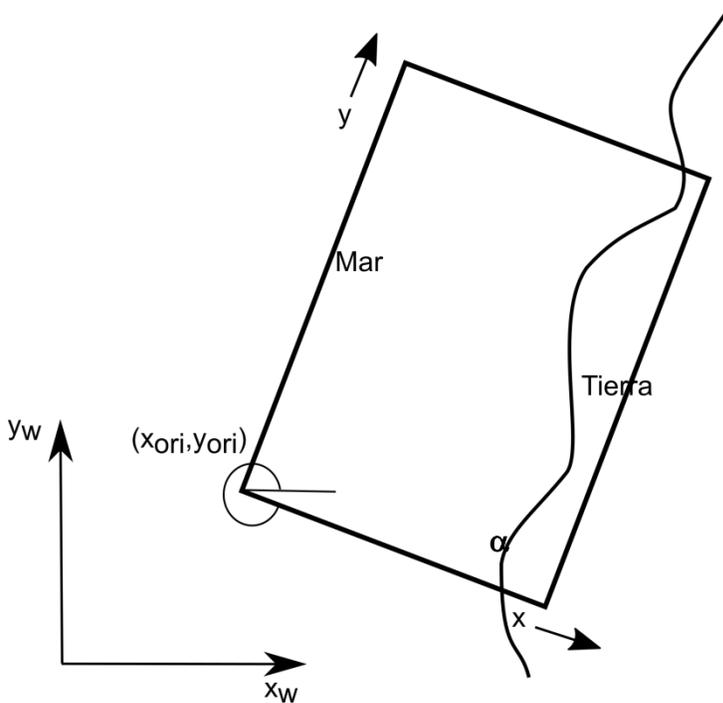


Figura 5. Sistema de coordenadas XBeach.

XBeach resuelve los procesos físicos previamente mencionados utilizando una malla rectangular, no equidistante por diferencias finitas; los datos como niveles de profundidad (batimetría), agua y concentraciones de partículas (sedimentos) se definen en los centros de la celda, mientras que las velocidades en las caras de la misma, definiendo así una malla escalonada de tipo Arakawa-C (Arakawa y Lamb, 1977). La magnitud de la velocidad (V) y el transporte de sedimentos se encuentran calculando las componentes de la velocidad u y v , las cuales se acoplan a las ecuaciones de carga y suspensión de sedimentos, definiendo la concentración de sedimentos en los centros de las celdas. El proceso de cálculo ocurre de la misma manera para los procesos de oleaje, tomando en cuenta la interacción oleaje-corriente a través de los esfuerzos radiantes y el rompimiento del oleaje. Los diferentes procesos físicos se resuelven por diferencias finitas

2.1.2 Ecuación de acción del oleaje

Primero el modelo resuelve la ecuación del balance de acción del oleaje (ec. 1). Donde la energía del oleaje que varía en el espacio y tiempo (x, y, ϑ, t) propagándose a una velocidad de fase (c) para cada una de las componentes es igual a la cantidad de energía disipada por el rompimiento del oleaje (D_w) y fricción del fondo (D_f) representada por una frecuencia intrínseca (σ):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = -\frac{D_w + D_f}{\sigma}. \quad \text{ec. (1)}$$

La acción del oleaje (A) se define como:

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t)}. \quad \text{ec. (2)}$$

donde S_w representa la densidad de energía del oleaje y a partir de la teoría lineal de ondas (WMO, 1998) esta se puede representar como la energía total es decir la sumatoria de la energía potencial y cinética:

$$E_w(x, y, t) = \int_0^{2\pi} S_w(x, y, t, \theta) d\theta;$$

$$E_w = \frac{1}{2} \rho g a^2. \quad \text{ec. (3)}$$

Aquí ρ representa la densidad del agua de mar (1024 Kg m^{-3}), g la aceleración gravitacional (9.81 m s^{-2}) y a la amplitud de la onda.

Retomando la ecuación 1, la velocidad de fase (\mathbf{c}) y velocidad de grupo (\mathbf{c}_g) de onda se pueden derivar a partir de la relación de dispersión para aguas someras obtenida de la teoría lineal de ondas (WMO, 1998):

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh kh}. \quad \text{ec. (4)}$$

donde k representa el número de onda y h la profundidad.

La velocidad de propagación para la componente “x” y componente “y” en presencia de una corriente se puede describir en un espacio geográfico de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}c_x &= c_g \cos(\theta) + u^L, \\c_y &= c_g \sin(\theta) + v^L.\end{aligned}\tag{ 5}$$

donde u^L y v^L son las componentes Lagrangianas de la corriente en una profundidad media.

La velocidad de propagación en la dirección ϑ se obtiene de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}c_\theta &= \frac{\sigma}{\sinh 2kh} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \sin(\theta) - \frac{\partial h}{\partial y} \cos(\theta) \right) + \cos\theta \left(\sin(\theta) \frac{\partial u^L}{\partial x} - \cos(\theta) \frac{\partial u^L}{\partial y} \right) \\&+ \sin\theta \left(\sin(\theta) \frac{\partial v^L}{\partial x} - \cos(\theta) \frac{\partial v^L}{\partial y} \right),\end{aligned}\tag{ 6}$$

donde h es la profundidad. El primer término de la derecha representa la refracción de fondo, mientras que los dos últimos representan la refracción de las corrientes. Es importante mencionar que XBeach no considera la generación de oleaje a partir del viento (S_m), por lo que es descartado en la simulación.

2.1.3 Disipación del oleaje

XBeach toma en cuenta tres procesos que contribuyen en la disipación del oleaje: rompimiento del oleaje (D_w), fricción o rugosidad del fondo (D_f) y fricción por vegetación (D_v); sin embargo, en este trabajo este último no será tomado en cuenta dados los objetivos del mismo.

Disipación de energía por rompimiento del oleaje

El oleaje al sentir el efecto de asomeramiento tiende a desestabilizarse por el crecimiento de la amplitud y romper. XBeach contiene cinco parametrizaciones para el rompimiento del oleaje han sido estudiados mediante experimentos en canales de oleaje. Tres parametrizaciones se emplean al utilizar como entrada oleaje no estacionario, mientras que las otras dos se utilizan para el caso de oleaje estacionario. El presente trabajo solo se enfocará en oleaje irregular por lo que solo se describirán los parámetros de rompimiento del tipo no estacionario; para conocer más sobre las otras parametrizaciones se puede consultar el manual.

Roelvink (1993) propuso la siguiente formulación para el coeficiente de disipación de energía por rompimiento:

$$\overline{D_w} = \frac{\alpha}{T_{rep}} Q_b E_w, \quad \text{ec. (7)}$$

donde Q_b representa la fracción de ondas que rompen, α representa el coeficiente de disipación de oleaje, T_{rep} es el periodo representativo y E_w es la energía total del oleaje. Q_b es determinado de la siguiente forma:

$$Q_b = 1 - \exp\left(\left(-\frac{H_{rms}}{H_{max}}\right)^n\right), \quad \text{ec. (8)}$$

donde n es un parámetro libre reescrito en términos de energía por (Klopman, 1989) H_{rms} es la raíz cuadrática media de la altura de la ola y H_{max} la altura máxima de la ola, las cuales se obtienen de la siguiente forma:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{8E_w}{\rho g}},$$

$$H_{max} = \gamma \cdot (h + \delta H_{rms}). \quad \text{ec. (9)}$$

Aquí γ representa el índice de rompimiento donde 0.55 es el valor utilizado por default, mientras que δH_{rms} representa la fracción de altura de la ola. Por último, E_w es obtenido de la ecuación (3).

Sin embargo, existen otras posibles formas calcular la disipación por rompimiento (ec. 7). Por ejemplo, una variante de la ecuación (7) incluye la razón H_{rms}/h , donde h es la profundidad:

$$\overline{D_w} = \frac{\alpha}{T_{rep}} Q_b E_w \frac{H_{rms}}{h}. \quad \text{ec. (10)}$$

La ecuación (10) es más adecuada que la ecuación (7) cuando el rompimiento del oleaje depende de la profundidad que de la altura máxima. Por otra parte Daly *et al.* (2010) propusieron dos soluciones para Q_b donde establecen que el rompimiento del oleaje ocurre cuando la altura de ola excede un límite crítico (γ), y que este no puede ocurrir al no exceder el límite requerido:

$$\begin{cases} Q_b = 1 \text{ si } H_{rms} > \gamma h , \\ Q_b = 0 \text{ si } H_{rms} < \gamma h. \end{cases} \quad \text{ec. (11)}$$

La disipación total del oleaje por rompimiento es distribuida proporcionalmente sobre las direcciones mediante:

$$D_w(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{E_w(x, y, t)} \bar{D}_w(x, y, t). \quad \text{ec. (12)}$$

Al generarse el oleaje, este posee momento y dirección paralela al sentido de propagación de la ola. Sin embargo, cuando el oleaje rompe genera turbulencia lo que implica un forzamiento que se propaga en todas las direcciones del sistema el cual se conoce como esfuerzos de radiación, los cuales interactúan con el flujo del sistema y se definen de acuerdo a su componente (usando la teoría lineal de ondas) de la siguiente forma (Longuet-Higgins y Stewart, 1962):

$$\begin{aligned} S_{xx,w}(x, y, t) &= \int \left(\frac{c_g}{c} (1 + \cos^2 \theta) - \frac{1}{2} \right) S_w d\theta, \\ S_{xy,w}(x, y, t) &= S_{yx,w}(x, y, t) = \int \text{sen}\theta \cos\theta \left(\frac{c_g}{c} S_w \right) d\theta, \\ S_{yy,w}(x, y, t) &= \int \left(\frac{c_g}{c} (1 + \text{sen}^2 \theta) - \frac{1}{2} \right) S_w d\theta. \end{aligned} \quad \text{ec. (13)}$$

donde $S_{xx,w}$ es la componente longitudinal, $S_{yy,w}$ la componente transversal y $S_{xy,w}$ o $S_{yx,w}$ son los esfuerzos de radiación de corte.

Disipación por fricción del fondo

El oleaje al interactuar con el fondo pierde energía por disipación, Jonsson (2011) encontró una expresión matemática para parametrizar este efecto mediante un coeficiente adimensional f_w :

$$D_f = \frac{2}{3\pi} \rho f_w \left(\frac{\pi H_{rms}}{T_{m01} \sinh kh} \right)^3. \quad \text{ec. (14)}$$

donde f_w es el coeficiente de fricción del oleaje y T_{m01} el periodo promedio definido por los momentos cero y primero del espectro del oleaje. Algunos autores han encontrado que este coeficiente tiene una importancia particular en zonas donde el fondo tiene una rugosidad alta (van Dongeren *et al.*, 2013; Quataert *et al.*, 2015). XBeach aplica este coeficiente de fricción a la ecuación de acción del oleaje (ec. 1),

y no está relacionado con la fricción del fondo, c_f , en la ecuación de flujo (la cual se describirá en la sección 2.1.5).

2.1.4 Balance de energía en la zona de rompientes

El rompimiento del oleaje transmite momento al dominio, esta energía se representa mediante la ecuación del balance de energía por rompimiento del oleaje (ec. 20), estableciendo que esta última se propagará en todo el dominio siendo disipada por el rompimiento del oleaje nuevamente (D_w) y disipación de la misma (D_r):

$$\frac{\partial S_r}{\partial t} + \frac{\partial c_x S_r}{\partial x} + \frac{\partial c_y S_r}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta S_r}{\partial \theta} = D_w - D_r. \quad \text{ec. (15)}$$

En la ecuación anterior, la energía por rompimiento en cada dirección se representa por S_r , mientras que D_r de acuerdo con Reniers *et al.* (2004) se obtiene de la siguiente expresión:

$$\bar{D}_r = \frac{2g\beta_r E_r}{c}, \quad \text{ec. (16)}$$

donde \bar{D}_r la disipación promedio por rompimiento, β_r es la pendiente del rompimiento del oleaje, c la velocidad de fase (ec. 4) y E_r es la densidad de energía por rompimiento. La disipación de la energía de rompimiento total es distribuida proporcionalmente sobre las direcciones del oleaje mediante:

$$D_r(x, y, t, \theta) = \frac{S_r(x, y, t, \theta)}{E_r(x, y, t)} \bar{D}_r(x, y, t). \quad \text{ec. (17)}$$

Donde la contribución de la energía de rompimiento para cada componente de los esfuerzos de radiación está dada por:

$$\begin{aligned} S_{xx,r}(x, y, t) &= \int \cos^2 \theta S_r \, d\theta, \\ S_{xy,r}(x, y, t) &= S_{yx,r}(x, y, t) = \int \sin \theta \cos \theta S_r \, d\theta, \\ S_{yy,r}(x, y, t) &= \int \sin^2 \theta S_r \, d\theta. \end{aligned} \quad \text{ec. (18)}$$

donde $S_{xx,r}$ es la componente longitudinal, $S_{yy,r}$ la componente transversal y $S_{xy,r}$ o $S_{yx,r}$ son los esfuerzos de radiación de corte.

Tomando en cuenta los esfuerzos de radiación determinados en la ecuación del balance de acción del oleaje (ec. 13) y los del rompimiento del oleaje (ec. 18), el esfuerzo de radiación total para cada componente se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} F_x(x, y, t) &= -\left(\frac{\partial S_{xx,w} + S_{xx,r}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy,w} + S_{xy,r}}{\partial y}\right). \\ F_y(x, y, t) &= -\left(\frac{\partial S_{xy,w} + S_{xy,r}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy,w} + S_{yy,r}}{\partial y}\right). \end{aligned} \quad \text{ec. (19)}$$

Donde cada componente direccional del oleaje (x, y, θ) en presencia de una corriente, tendrá una velocidad de propagación en el espacio geográfico y espectral (ec. 5 y ec. 6)

2.1.5 Ecuaciones de aguas someras

Las ecuaciones que XBeach utiliza para simular las variaciones de la superficie del agua y flujo tomando en cuenta el oleaje y las corrientes inducidas por el oleaje son las siguientes:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - f v^L - v_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) &= \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h}, \\ \frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} + f u^L - v_h \left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) &= \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h}, \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h u^L}{\partial x} + \frac{\partial h v^L}{\partial y} &= 0. \end{aligned} \quad \text{ec. (20)}$$

Aquí τ_{bx}^E , τ_{by}^E son los esfuerzos cortantes de fondo (*bed shear stresses*), τ_{sx} , τ_{sy} son las componentes del esfuerzo del viento en la superficie del mar, η es el nivel del mar, F_x , F_y (ec. 19) son las componentes de los esfuerzos de radiación inducidos por el oleaje, v_h es la viscosidad horizontal y f es el parámetro de Coriolis.

Para tomar en cuenta el flujo inducido por el oleaje y el flujo de retorno, la velocidad de la profundidad promedio es utilizada (Andrews y McIntyre, 1978; Walstra *et al.*, 2000). Las ecuaciones de momento y continuidad están formuladas en términos de la velocidad Lagrangiana (v^L), la cual se define como la distancia que recorre una partícula de fluido en un periodo de onda dividido entre este último. Esta velocidad se relaciona con la Euleriana por:

$$u^L = u^E + u^S; v^L = v^E + v^S. \quad \text{ec. (21)}$$

Donde u^S, v^S representa la deriva de Stokes en los eje x y y , respectivamente (Philips, 1977):

$$u^S = \frac{E_w \cos \theta}{\rho h c}; v^S = \frac{E_w \sin \theta}{\rho h c}. \quad \text{ec. (22)}$$

Aquí E_w es obtenida de la teoría lineal de ondas (ec. 3).

Esfuerzos cortantes de fondo

La fricción del fondo ejercida sobre el flujo es determinada por la velocidad Euleriana y orbital las cuales dependerán de la rugosidad del fondo, utilizando la aproximación propuesta por Ruessink *et al.* (2001):

$$\begin{aligned} \tau_{bx}^E &= c_f \rho u_E \sqrt{(1.16 u_{rms})^2 + (u_E + v_E)^2}, \\ \tau_{by}^E &= c_f \rho v_E \sqrt{(1.16 u_{rms})^2 + (u_E + v_E)^2}. \end{aligned} \quad \text{ec. (23)}$$

donde c_f representa el coeficiente de fricción de flujo. Este coeficiente regularmente es un orden de magnitud menor a f_w en zonas de arrecife de coral (van Dongeren *et al.*, 2013; Quataert *et al.*, 2015). La velocidad orbital (u_{rms}) se obtiene a partir de la teoría lineal del oleaje mediante la siguiente expresión:

$$u_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\pi H_{rms}}{T \sinh(kd)}. \quad \text{ec. (24)}$$

Esfuerzo del viento

Las componentes del esfuerzo del viento se expresan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \tau_{sx} &= \rho_a C_d W |W_x|, \\ \tau_{sy} &= \rho_a C_d W |W_y|. \end{aligned} \quad \text{ec. (25)}$$

donde ρ_a es la densidad del aire, C_d es el coeficiente de arrastre del viento y W representa la velocidad del viento.

2.1.6 Ecuaciones de transporte de sedimentos

Para simular el transporte de sedimentos XBeach utiliza la ecuación de advección-difusión en profundidad promedio propuesta por Galappatti y Vreugdenhill (1985):

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hCu^E}{\partial x} + \frac{\partial hCv^E}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right] = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s}, \quad \text{ec. (26)}$$

donde C representa la concentración de sedimentos, D_h es el coeficiente de difusión de los sedimentos y h la profundidad del agua. El tiempo de adaptación (T_s) dependerá de las características locales como profundidad y la velocidad de caída del sedimento.

La concentración equilibrio (C_{eq}) es calculada utilizando la formulación propuesta por Soulsby-Van Rijn (Soulsby, 1997):

$$C_{eq} = \frac{A_{sb} + A_{ss}}{h} \left(\left(|u^E|^2 + 0.018 \frac{u_{rms}^2}{C_d} \right)^{0.5} - u_{cr} \right)^{2.4} (1 - \alpha_b m). \quad \text{ec. (27)}$$

Aquí A_{sb} , A_{ss} son los coeficientes de carga de fondo y suspensión respectivamente, los cuales dependerán de las características locales como: profundidad, tamaño de grano y densidad relativa del sedimento. El coeficiente de arrastre (C_d) es generado por la velocidad del flujo. Por lo que para activar el mecanismo de movimiento de los sedimentos la velocidad Euleriana (u^E) y la orbital (u_{rms}) deben exceder una velocidad crítica (u_{cr}) que dependerá de las propiedades del sedimento. El último término en la ecuación (27) representa los efectos de pendiente del fondo.

Determinación en los cambios morfológicos

XBeach utiliza los gradientes del transporte de sedimentos para calcular las variaciones de la profundidad, los cuales se obtienen de la siguiente forma:

$$q_x = hCu_E - v_h h \frac{\partial C}{\partial x} - f_{slope} |u^L| h \frac{\partial z_b}{\partial x},$$

$$q_y = hCv_E - v_h h \frac{\partial C}{\partial y} - f_{slope} |v^L| h \frac{\partial z_b}{\partial y} . \quad \text{ec. (28)}$$

donde f_{slope} representa la pendiente de fondo, v_h es la viscosidad horizontal y z_b representa el cambio morfológico en espacio. Para ver el cambio en el tiempo este es calculado de la siguiente manera:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{f_{mor}}{(1-p)} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0, \quad \text{ec. (29)}$$

en donde p representa la porosidad del sedimento y f_{mor} el factor de aceleración morfológica, el cual se puede utilizar para realizar diferentes pruebas de sensibilidad en los coeficientes de XBeach disminuyendo el tiempo de cómputo.

La erosión de dunas implica que el transporte de sedimentos del dominio seco al húmedo, lo cual se encuentra regido dentro de XBeach por el siguiente criterio:

$$\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| > m_{cr} , \left| \frac{\partial z_b}{\partial y} \right| > m_{cr} . \quad \text{ec. (30)}$$

El cual establece que si la pendiente del fondo cerca de la línea de agua sobre la playa excede un valor crítico determinado por el usuario (m_{cr}) el cambio morfológico perpendicular a la costa estará dado por:

$$\begin{aligned} \Delta z_b &= \left(\frac{\partial z_b}{\partial x} - m_{cr} \right) \Delta x , \frac{\partial z_b}{\partial x} > 0. \\ \Delta z_b &= - \left(\frac{\partial z_b}{\partial x} - m_{cr} \right) \Delta x , \frac{\partial z_b}{\partial x} < 0. \end{aligned} \quad \text{ec. (31)}$$

Mientras que el cambio morfológico a lo largo de la costa será determinado de la misma manera:

$$\begin{aligned} \Delta z_b &= \left(\frac{\partial z_b}{\partial y} - m_{cr} \right) \Delta y , \frac{\partial z_b}{\partial y} > 0. \\ \Delta z_b &= - \left(\frac{\partial z_b}{\partial y} - m_{cr} \right) \Delta y , \frac{\partial z_b}{\partial y} < 0. \end{aligned} \quad \text{ec. (32)}$$

Capítulo 3. Calibración y Validación de XBeach

3.1 Modelo físico unidimensional a escala del arrecife coralino en Guam

Para evaluar y validar el desempeño del modelo numérico XBeach, se utilizaron datos experimentales de laboratorio tomados en un canal de oleaje-viento de la Universidad de Michigan (Demirbilek *et al.*, 2007). Las dimensiones del canal consistieron en 35 m de largo, 0.7 m de ancho y 1.6 m de alto, con paredes y fondo lisos. El experimento consistió en 80 pruebas diferentes, entre ellas se tomaron las 21 en las cuales el viento no se consideró (Demirbilek *et al.*, 2007). Para simular el arrecife de coral, sobre el canal se construyó un modelo a escala 1:64 de policloruro de vinilo (PVC) representativo del arrecife periférico (“*fringing reef*”) de la Isla de Guam, en Micronesia al sureste de la costa (Pacífico Occidental). El perfil del arrecife se conformó por tres pendientes de 1:5, 1:18.8 y 1:10.6, desde el frente arrecifal (“*fore reef*”) hasta el borde arrecifal (“*reef edge*”), seguido de una llanura arrecifal (“*reef flat*”) de superficie plana, y por último una playa con una pendiente de 1:12. La variación de la superficie del agua a lo largo del canal fue registrada mediante 9 sensores ubicados a lo largo del canal de la siguiente forma: tres fuera del frente arrecifal, tres sobre el frente arrecifal, uno sobre el borde arrecifal y por último dos sobre la llanura arrecifal. Los sensores se programaron para tomar datos a una frecuencia de 20 Hz durante 15 minutos, donde se obtuvieron 18,000 datos por cada sensor. Posteriormente se generó oleaje irregular con altura significativa (H_s) de 3.2 a 8.5 cm y periodos pico T_p de 1.0 a 2.5 s. Adicionalmente se establecieron diferentes niveles de agua (h_r) sobre la llanura arrecifal representando el régimen de mareas bajas y altas sobre el arrecife de coral. En la Figura 6 se muestra el montaje experimental.

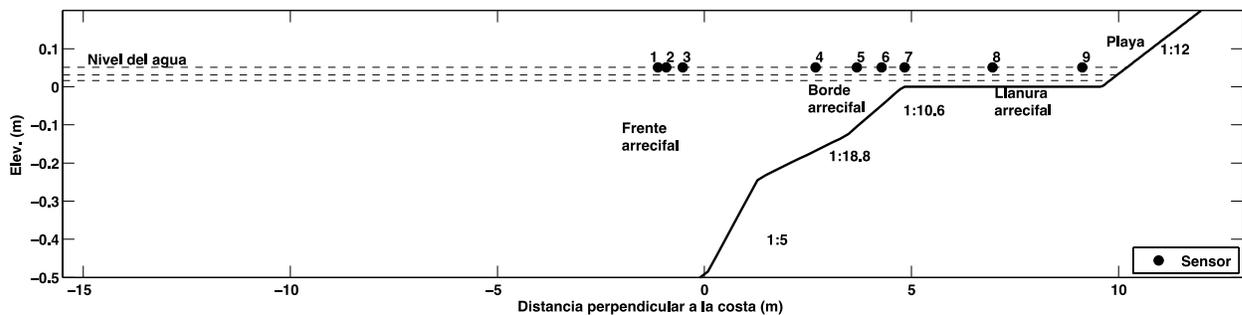


Figura 6. Representación esquemática del experimento de Demirbilek *et al.* (2007) en el canal de oleaje de la Universidad de Michigan.

3.1.1 Simulaciones numéricas

La propagación del oleaje sobre el canal de oleaje en XBeach fue realizada en una capa vertical a lo largo del canal (modelo 1D), utilizando un tamaño de malla de 0.02 m con un límite de profundidad de agua de 0.005 m. El periodo de duración de las simulaciones fue de 900 s con un paso de tiempo de 0.1 s global y 0.05 s para los puntos que representan los sensores en el canal. Para cada una de las simulaciones se utilizó el coeficiente de rompimiento del oleaje propuesto por Roelvink (1993) y predeterminado por XBeach. Los valores iniciales con los que se forzó la frontera para la propagación de oleaje se muestran en la Tabla 1; estas se obtuvieron de las condiciones iniciales impuestas por Demirbilek *et al.* (2007).

Tabla 1. Condiciones de oleaje iniciales para las diferentes pruebas de laboratorio tomadas de Demirbilek et al. (2007).

Prueba	h_r (cm)	H_s (cm)	T_p (s)
20	5.1	6.1	1.25
16	5.1	5.2	1.5
17	5.1	7.8	1.5
21	5.1	8.2	1.75
18	5.1	8.5	2
19	5.1	8.3	2.5
26	1.6	5.8	1
27	1.6	5.5	1.25
28	1.6	4.7	1.5
29	1.6	7.1	1.5
30	1.6	7.6	1.75
31	1.6	8.5	2
32	1.6	7.9	2.5
44	3.1	3.2	1
45	3.1	6.1	1
46	3.1	5.9	1.25
47	3.1	5.0	1.5
48	3.1	7.5	1.5
57	3.1	7.7	1.75
58	3.1	8.5	2
59	3.1	8.2	2.5

Para poder calibrar los resultados de XBeach con las observaciones se utilizaron diferentes valores numéricos en los coeficientes friccionales de flujo y oleaje (c_f y f_w ; respectivamente) en las 21 diferentes pruebas para posteriormente comparar con las observaciones. Los valores de c_f y f_w que se tomaron se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Coeficientes numéricos utilizados para calibrar los resultados de XBeach

Coeficiente de fricción (flujo)	Valor numérico	Coeficiente de fricción (oleaje)	Valor numérico
	0.001		0.01
	0.005		0.05
cf	0.01	fw	0.1
	0.05		0.3
	0.1		0.6

Finalizadas las simulaciones, se obtuvieron las series de tiempo de la altura significativa del oleaje modelada (H_{m0}) y nivel del agua modelado (ZS). Los puntos extraídos representan la posición de los sensores utilizados en el trabajo de (Demirbilek *et al.*, 2007), y fueron comparados con la altura significativa de ola obtenida por estos últimos (H_s), utilizando pruebas estadísticas como la raíz del error cuadrático medio, RMSE (ec. 38) y el sesgo, o Bias (ec. 39).

$$RMSE(m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_{m0,i} - H_{s,i})^2}{n}} \quad \text{ec. (33)}$$

$$BIAS(m) = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{m0,i} - H_{s,i})}{n} \quad \text{ec. (34)}$$

Donde $n = 21$ representa el número de simulaciones realizadas.

3.1.2 Análisis de datos y sensibilidad del modelo

Dentro del análisis de sensibilidad el sensor 4 no se tomó en cuenta dada la discrepancia entre los resultados del modelo y lo observado al igual que (Nwogu y Demirbilek, 2010). La altura significativa del oleaje simulado por el modelo se calculó al determinar el momento cero (m_0) del espectro de energía de la variación de la superficie del agua:

$$m_0 = \int_0^{f_{ny}} E(f) df, \quad \text{ec. (40)}$$

donde f_{ny} es la frecuencia de Nyquist. Posteriormente la H_{m0} se obtuvo de la siguiente manera:

$$H_{m0} = H_{1/3} = 1.416H_{rms} = (1.416)2(\sqrt{2m_0}) = 4\sqrt{m_0}. \quad \text{ec. (41)}$$

Las alturas significativas de la ola obtenida, fueron separadas en infragravitatorias (H_{IG}) y cortas (H_{SW}) por una frecuencia de división (f_{split}) establecida en base al periodo pico del oleaje:

$$f_{split} = 0.5 \frac{1}{T_p} \quad \text{ec. (42)}$$

Por lo tanto, las ondas infragravitatorias fueron aquellas cuya frecuencia es menor a f_{split} ; su *altura significativa* se determinó a través de la ecuación:

$$H_{SIG} = 4 \sqrt{\int_0^{f_{split}} E(f) df} \quad \text{ec. (43)}$$

Por su parte, las ondas cortas fueron clasificadas aquellas cuya frecuencia es mayor o igual a f_{split} ; y su *altura significativa* se determinó a través de la ecuación:

$$H_{SW} = 4 \sqrt{\int_{f_{split}}^{f_{ny}} E(f) df} \quad \text{ec. (44)}$$

En los resultados de calibración la H_{m0} mostró sensibilidad al variar los coeficientes de fricción c_f y f_w (Figura 7 y Figura 8) debido al rompimiento del oleaje y nivel de agua sobre el frente arrecifal (h_r). Sin embargo, las variaciones de la superficie libre (ZS) fueron mínimas ante los cambios de los coeficientes de fricción.

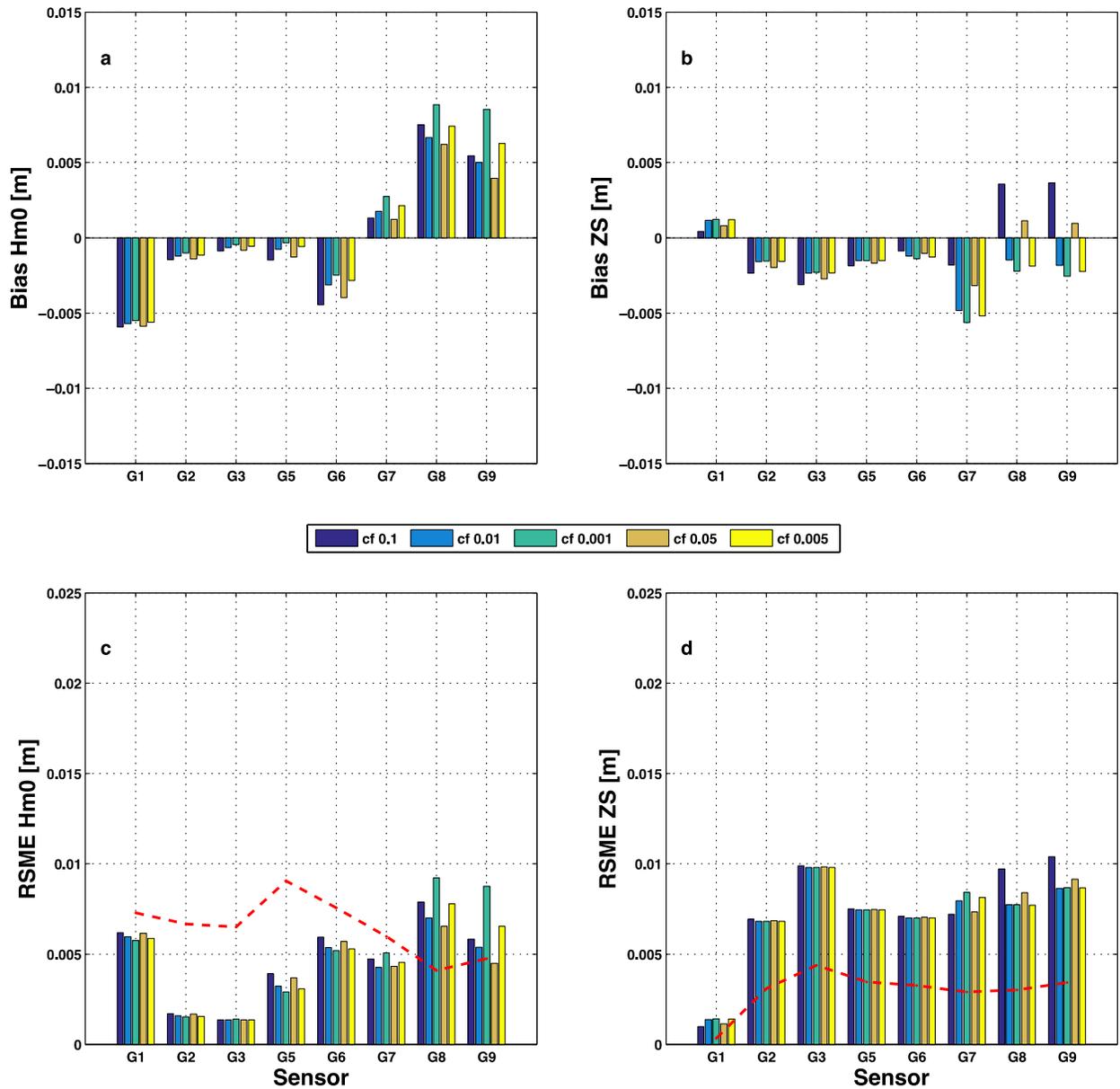


Figura 7. Resultados del análisis de sensibilidad para los diferentes c_f empleados en las 21 pruebas. a) Bias de la altura significativa de la ola (H_{m0}). b) Bias del nivel del agua. c) Raíz del error cuadrático medio de la altura significativa. d) Raíz del error cuadrático medio de el nivel del agua. La línea roja denota el error estandar de las observaciones *in situ*

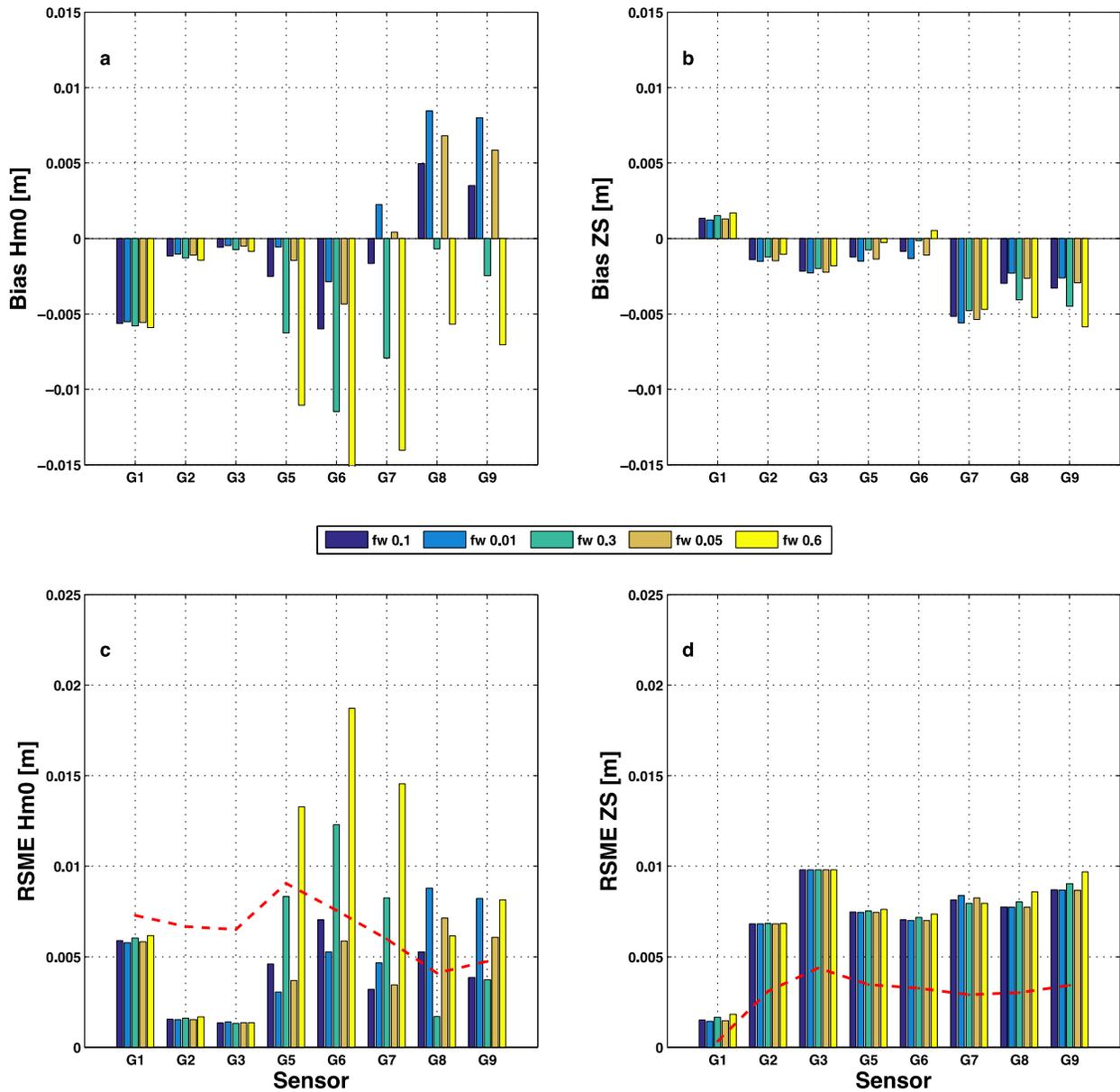


Figura 8. Resultados del análisis de sensibilidad para los diferentes f_w empleados en las 21 pruebas. a) Bias de la altura significativa de la ola (H_{m0}). b) Bias de el nivel del agua. c) Raíz del error cuadrático medio de la altura significativa. d) Raíz del error cuadrático medio de el nivel del agua. La línea roja denota el error estándar de las observaciones *in situ*.

Las variaciones de los coeficientes friccionales en las 21 pruebas mostraron que un $c_f = 0.05$ y un $f_w = 0.3$ son los valores óptimos para poder calibrar los resultados del modelo, dado que mostraron un error cuadrático medio bajo comparado con el error estándar de las mediciones puntuales (ver Figura 7c y Figura 8c).

3.1.3 Calibración del rompimiento del oleaje

Para evaluar la importancia del rompimiento del oleaje se utilizaron dos parametrizaciones diferentes una propuesta por Roelvink (1993) y otra por Daly *et al.* (2010). Utilizando los valores numéricos de fricción óptimos encontrados, se llevaron a cabo nuevamente las 21 simulaciones para calibrar el coeficiente rompimiento del oleaje (γ) el cual varió de 0.45 a 0.65.

Los resultados de los dos tipos de parametrizaciones del rompimiento del oleaje muestran el mismo patrón en la reducción del error cuadrático medio (Figura 9 y Figura 10) donde la zona de rompimiento dependerá del valor que se le asigne a γ . Sin embargo la parametrización propuesta por Roelvink (1993) con un valor de 0.65 muestra menor error a diferencia de la propuesta de Daly *et al.* (2010) (ver Figura 9c y Figura 10c). Esto se debe a que esta última fue formulada para casos con fondos variables, por lo que dependiendo del caso de estudio será la parametrización de rompimiento a elegir por el usuario.

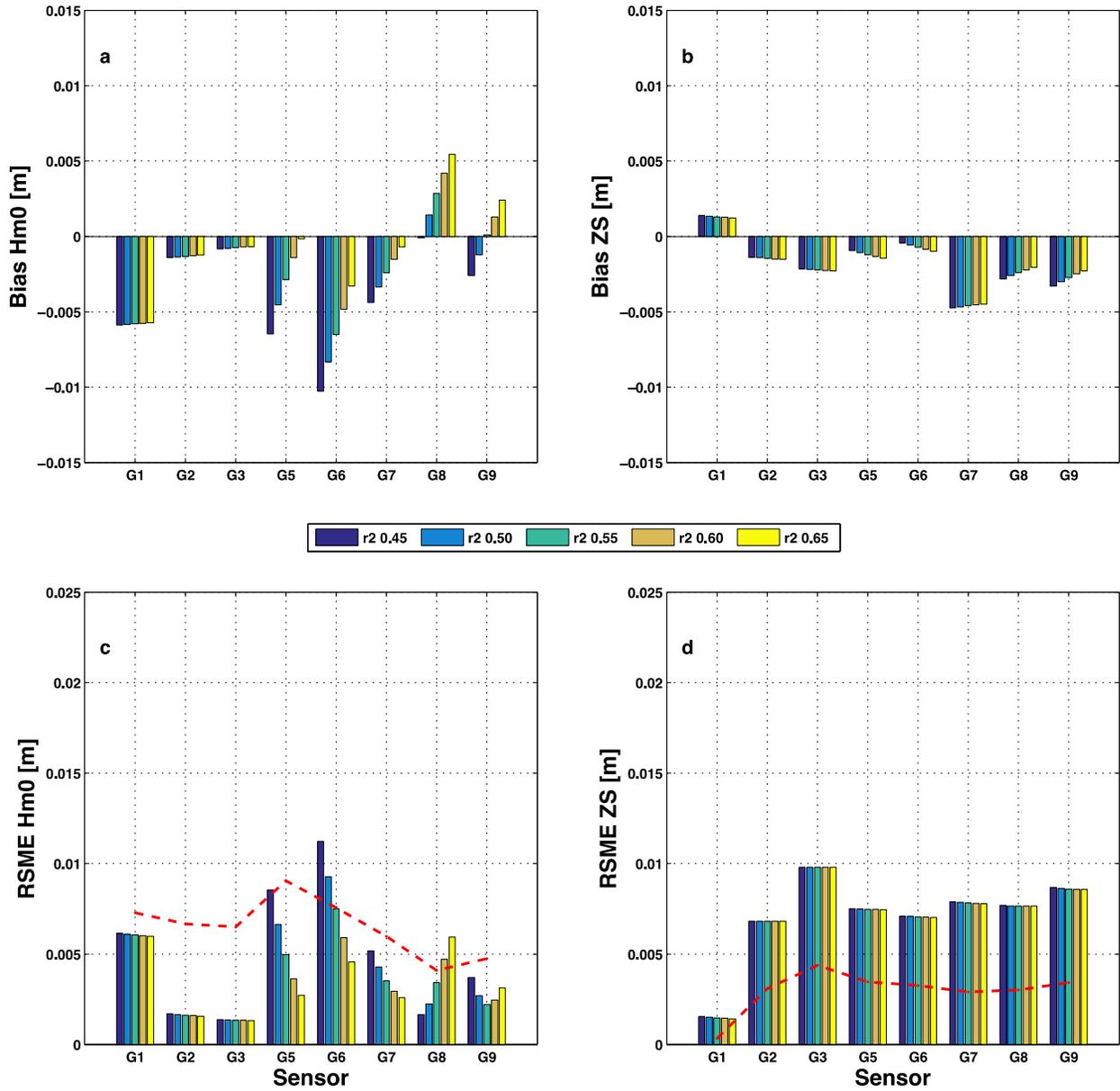


Figura 9. Resultados estadísticos de los diferentes coeficientes de rompimiento del oleaje propuesto por Roelvink (1993). a) Bias de la altura significativa de la ola (H_{m0}). b) Bias del nivel del agua. c) Raíz del error cuadrático medio de la altura significativa. d) Raíz del error cuadrático medio del nivel del agua. La línea roja denota el error estándar de las observaciones *in situ*.

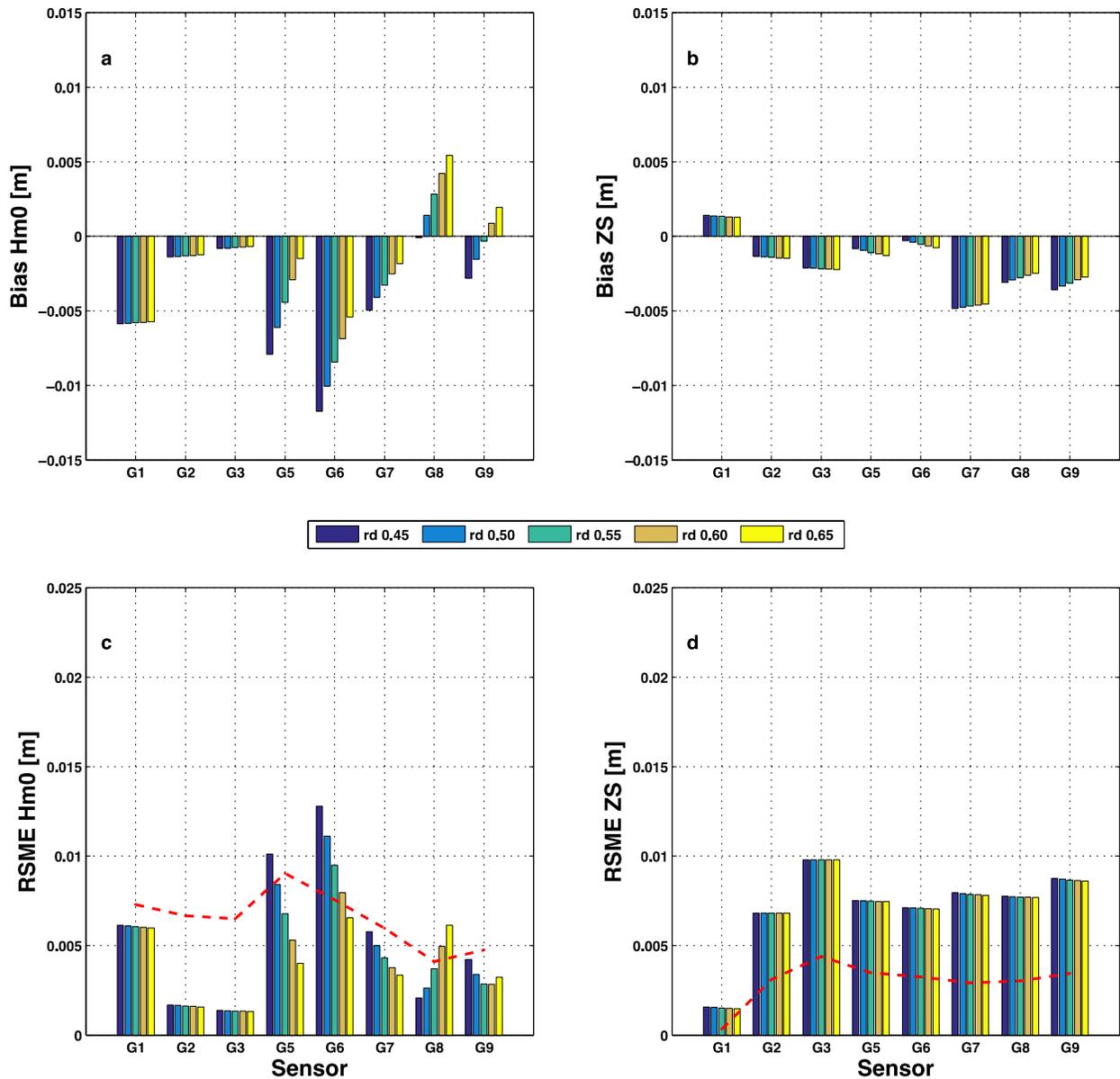


Figura 10. Resultados estadísticos de los diferentes coeficientes de rompimiento del oleaje propuesto por Daly *et al.* (2010). a) Bias de la altura significativa de la ola (H_{m0}). b) Bias del nivel del agua. c) Raíz del error cuadrático medio de la altura significativa. d) Raíz del error cuadrático medio del nivel del agua. La línea roja denota el error estándar de las observaciones *in situ*.

Una vez calibrado el modelo a partir de los coeficientes numéricos óptimos ($c_f = 0.05$; $f_w = 0.1$ y $\gamma = 0.65$) las 21 pruebas fueron simuladas nuevamente para obtener la H_{sIG} y H_{sSW} mediante la ecuación (43) y (44) respectivamente (Figura 11). Utilizando estos coeficientes XBeach mostró una buena aproximación en la H_{sIG} y H_{sSW} , con un coeficiente de correlación lineal $R=0.97$, y $R=0.98$, respectivamente. Sin embargo, respecto al nivel del agua, aunque XBeach reproduce relativamente bien los valores tiende a subestimarlos un poco, ya que en este caso $R=0.84$ (ver Figura 12).

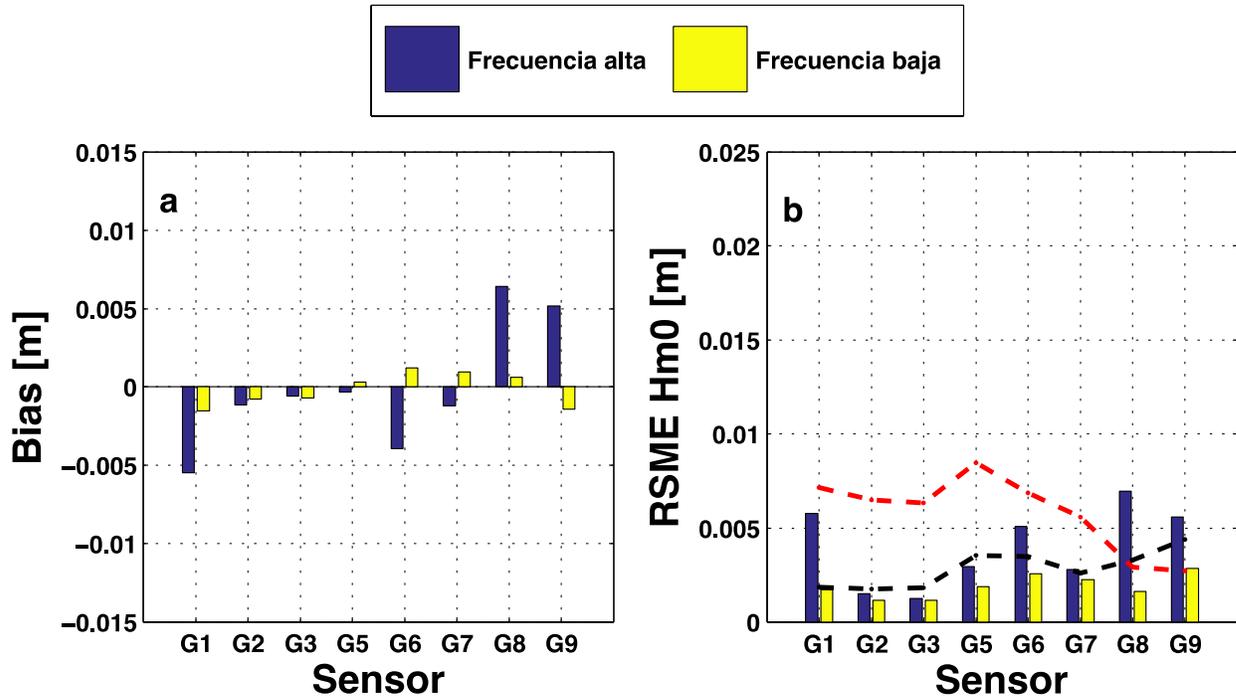


Figura 11. Resultados estadísticos para las ondas de frecuencia baja y alta. a) Bias de la altura significativa del oleaje de alta frecuencia ($H_{s_{SW}}$) y baja frecuencia ($H_{s_{IG}}$). b) Raíz del error cuadrático medio de la altura significativa del oleaje de alta frecuencia ($H_{s_{SW}}$) y baja frecuencia ($H_{s_{IG}}$). La línea roja denota el error estándar de altura significativa de las ondas de alta frecuencia, mientras que la línea negra denota el error estándar de altura significativa de las ondas de baja frecuencia, en las posiciones en las que se encuentran los sensores

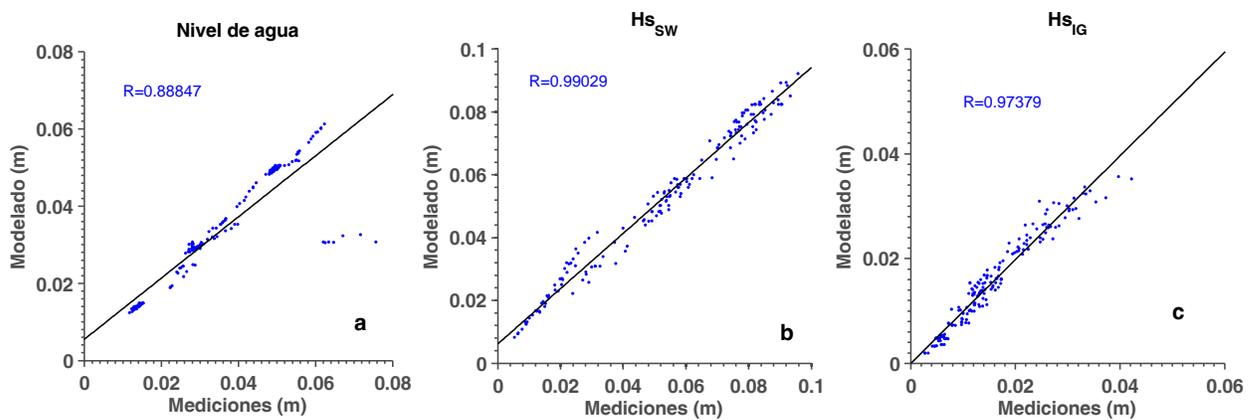


Figura 12. Comparación de las mediciones contra los resultados del modelo utilizando los parámetros óptimos. a) Nivel del agua. b) Altura significativa de las ondas de alta frecuencia. c) Altura significativa de las ondas de baja frecuencia.

3.2 Caso de estudio: Arrecife de Puerto Morelos, Quintana Roo

Para evaluar la zona de arrecifes de coral y calibrar los resultados de XBeach en 2D se utilizó como caso de estudio el arrecife de coral de Puerto Morelos, el cual se localiza en el estado de Quintana Roo, a 30 km al sur de Cancún en el noreste de la península de Yucatán.

Características del arrecife de Puerto Morelos

El arrecife de coral se caracteriza por ser un arrecife periférico paralelo a la línea de costa cuya longitud es de ~ 4 km. La línea de costa y el arrecife se encuentran separados por una laguna cuyo ancho varía entre 550 y 1500 m; con una profundidad promedio de 3.5 m. El fondo se compone principalmente por arena calcárea y prados de pasto marino. Sobre la cresta del arrecife se encuentra una pendiente que llega hasta profundidades de 20-25 m, asemejándose a una plataforma de varios kilómetros de ancho. El área se caracteriza por la presencia de bancos de coral sumergidos, los cuales se encuentran expuestos al oleaje proporcionando protección y disipando la energía de este mismo dentro de la laguna. Hacia el sur cerca del centro del pueblo se encuentra un canal de ~ 400 m de ancho paralelo al arrecife y línea de costa cuya profundidad es de ~ 8 m conectando con el mar del Caribe. Al norte se localizan dos entradas: una de 1200 m de ancho conocida localmente como “Boca Grande”, y otra de 300 m conocida como “Boca Chica”; ambas con una profundidad promedio de ~ 6 m (ver Figura 13).

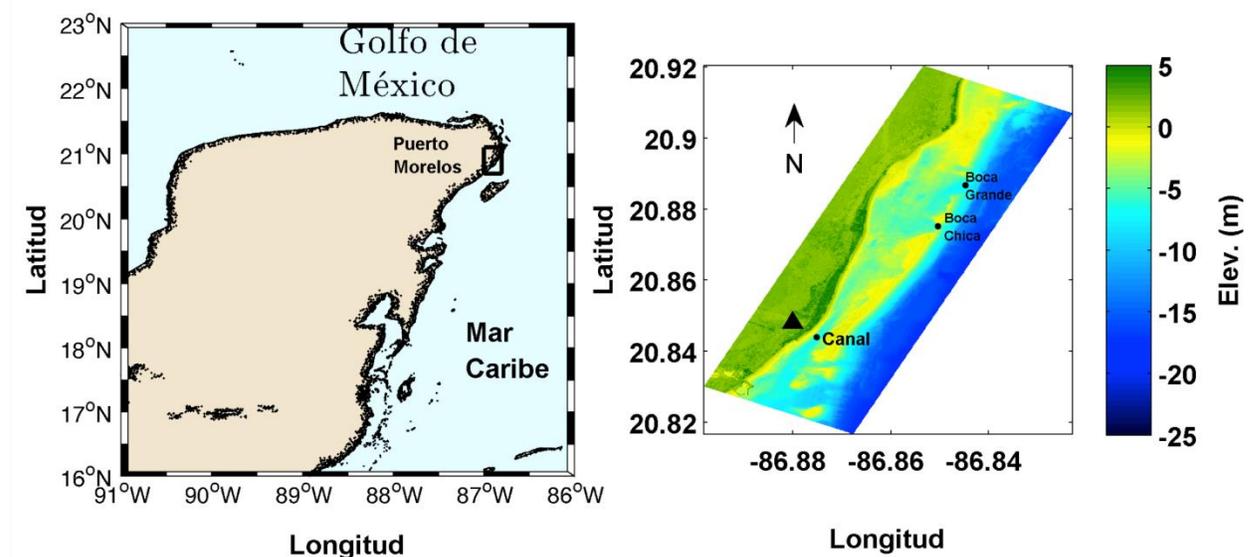


Figura 13. Localización del arrecife de Puerto Morelos, Quintana Roo. Izquierda: Península de Yucatán. Derecha: Elevación y batimetría de la zona de estudio. Triangulo negro: Centro del pueblo.

La circulación sobre este arrecife se encuentra dominada por el oleaje incidente que al romper sobre el frente arrecifal transmite momento al flujo promedio mediante los esfuerzos de radiación. Al llegar el oleaje a la zona de trasplaya se refleja hacia mar adentro a través de los canales de la laguna, donde los flujos de retorno pueden alcanzar velocidades de hasta $\sim 1.5 \text{ m s}^{-1}$ bajo condiciones de tormenta. El rango de mareas es pequeño, de $\sim 0.17 \text{ m}$, y carácter semi-diurno mixto (Coronado *et al.*, 2007). La mayor parte del año el oleaje proviene del este/sureste con una altura significativa (H_s) de 0.5-1.5 m y un periodo (T_p) de 4-6 s; sin embargo durante el invierno es común encontrar oleaje del norte con alturas de 2-3 m y periodos de 6-8 s. Durante el verano, la presencia de tormentas tropicales u otras generan oleaje intenso con alturas de 6–12 m y periodos de 6-12 s (Coronado *et al.*, 2007).

Toma de datos de oleaje e hidrodinámica

Para calibrar el modelo, se utilizaron los datos de oleaje y corrientes del arrecife de Puerto Morelos que se obtuvieron del trabajo de Coronado *et al.* (2007) colectados durante octubre 2005. La toma de datos se llevó a cabo con cinco instrumentos Nortek 1MHz Aquadopp Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP) anclados en diferentes puntos de la laguna de Puerto Morelos (Figura 14): LPM0 en el centro del canal ubicado al sur de la laguna a una profundidad de 8 m; LPM1 dentro de la laguna a una profundidad de 3.5 m; LPM2 en Boca Chica a una profundidad de 6 m; LPM3 sobre el frente del arrecife a una profundidad de 22 m; y LPM4 en Boca grande a una profundidad de 6m. Los ADCPs registraron el perfil de corriente cada 15 minutos, mientras que el oleaje superficial fue tomado cada hora, con paquetes de 1,024 muestras a una frecuencia de 1 Hz.

Obtención de los datos de línea de costa

Los datos de línea de costa se obtuvieron de los modelos digitales de elevación del INEGI (<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/>), los cuales se construyeron mediante instrumentación tipo LiDAR con una resolución de 5 m durante el periodo 2011-2012. La batimetría de la zona de estudio se obtuvo de la base de datos de CONABIO (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>), la cual utilizó el satélite WorldView-2 cuya resolución espacial es de 0.5 m y cuyo límite de profundidad detectable es de 16 m (Cerdeira-Estrada *et al.*, 2012).

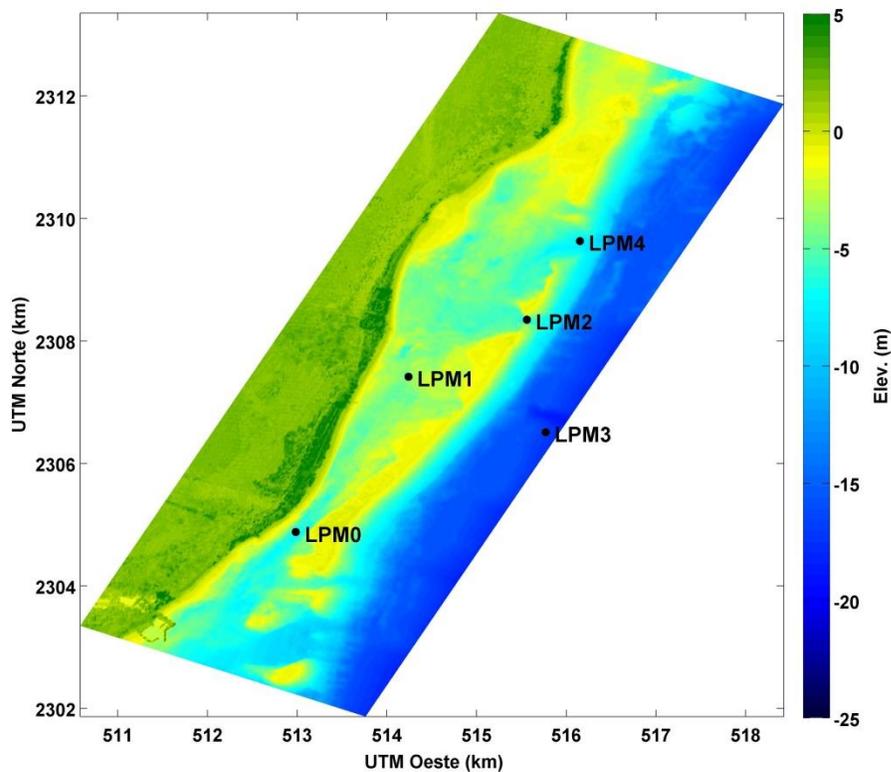


Figura 14. Mapa de elevación y batimetría del arrecife de Puerto Morelos. Los puntos negros representan los anclajes de ADCP obtenidos por (Coronado *et al.*, 2007).

Huracán Wilma sobre el arrecife de Puerto Morelos

El periodo de la toma de datos coincidió con el paso del huracán Wilma. Este último se empezó a formar el 15 de octubre del 2005 sobre el mar Caribe al sur de Jamaica como una depresión tropical. Para el 17 de octubre se convirtió en tormenta tropical que posteriormente alcanzó el grado de huracán, a las 2000 UTC del 18 de octubre. Su intensificación ocurrió del 18 al 19 de octubre registrando una presión atmosférica mínima de 892 hPa; lo que permitió reforzar la intensidad del viento hasta los 280 km/h (huracán categoría 5). Finalmente el 21 de octubre tocó tierra sobre la línea de costa de Puerto Morelos, Quintana Roo, como huracán categoría 4 Saffir-Simpson (Figura 15). El ojo del huracán pasó sobre la isla de Cozumel y posteriormente sobre tierra comenzó a desplazarse lentamente hacia el norte, hasta localizarse al oeste de Cancún causando sobre toda la costa de la península de Yucatán destrucción de proporciones épicas, principalmente sobre la zona hotelera, localizadas sobre la zona de dunas (Pasch *et al.*, 2006). Finalmente para el 23 de octubre, el huracán logró seguir su trayectoria por el noroeste de la península, internándose al golfo de México. Los datos del viento se obtuvieron del modelo "Inland Wind

Model” utilizado para pronóstico de los vientos máximos durante la recalada de los ciclones tropicales (Kaplan y DeMaria, 1995)



Figura 15. Imagen satelital en el canal visible del huracán Wilma impactando en Puerto Morelos, obtenida el 21 de octubre del 2005 a las 1625 UTC. Fuente: Observatorio de la Tierra, NASA (<http://earthobservatory.nasa.gov>).

3.2.1 Simulación numérica de Puerto Morelos, Quintana Roo

Las simulaciones numéricas para Puerto Morelos fueron realizadas en dos dimensiones (2D), utilizando una malla de 596 x 470 donde el tamaño de celda fue de 25 m de largo (Δy) x 10 m de ancho (Δx). El forzamiento sobre la frontera oceánica se estableció mediante el espectro de energía del oleaje obtenido por el instrumento LPM3 (frente arrecifal) localizado ~2 km de la línea de costa (Figura 16a). Posteriormente, las series de tiempo obtenidas de las simulaciones fueron exportadas a la posición de los ADCPs (ver Figura 14) a la misma frecuencia, para posteriormente comparar los resultados mediante las pruebas estadísticas como el Bias y el RMSE.

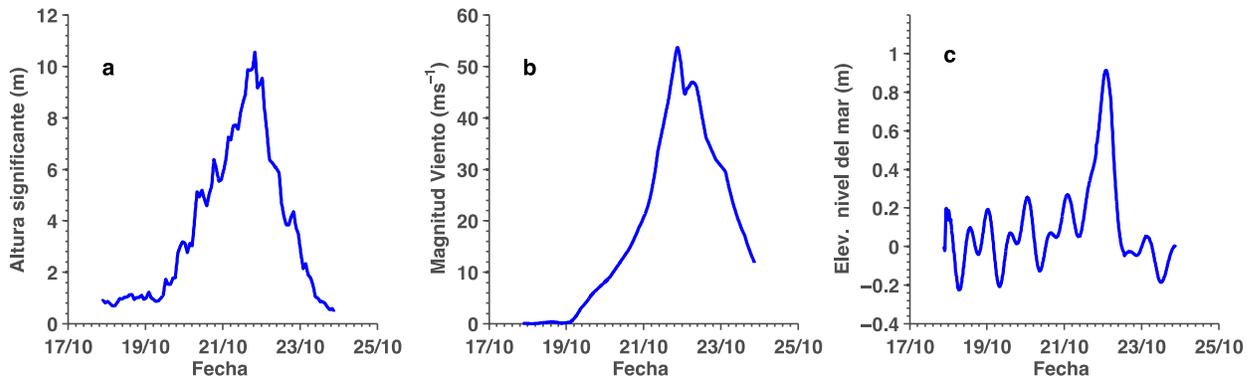


Figura 16. Forzamientos utilizados en XBeach para el periodo de interes. a) Altura significativa del oleaje registrada por el instrumento LPM3 durante el paso del huracán Wilma. b) Magnitud del viento en Puerto Morelos obtenida por el Inland Wind Model. c) Nivel de marea obtenido en Puerto Morelos por el modelo Delft3D.

3.2.2 Análisis de datos y calibración del modelo

Para simular los efectos de rugosidad del arrecife coralino se utilizó primero un $c_f = 0.1$ y un $f_w = 0.6$. Estos valores se tomaron como referencia del trabajo de van Dongeren *et al.* (2013), los cuales eran los óptimos para el arrecife de Ningaloo, ubicado al noroeste de Australia. Posteriormente se calcularon las alturas significativas para el oleaje de baja y alta frecuencia. Utilizando los valores de c_f y f_w mencionados, los resultados sugieren que el arrecife de coral presenta gran cobertura sobre la zona ejerciendo más disipación comparada con las observaciones de los diferentes anclajes (Figura 17). Por lo tanto, se utilizaron los valores establecidos por default del modelo es decir $c_f = 0.003$ y un $f_w = 0.0$. Los resultados de XBeach muestran una mejor aproximación a las mediciones, principalmente en la H_s de las ondas infragravitatorias; respecto a las ondas cortas, el patrón de altura es reproducido en todos los puntos a excepción del punto LPM0, donde los efectos de corriente de retorno con el oleaje no son simulados por XBeach (Figura 17).

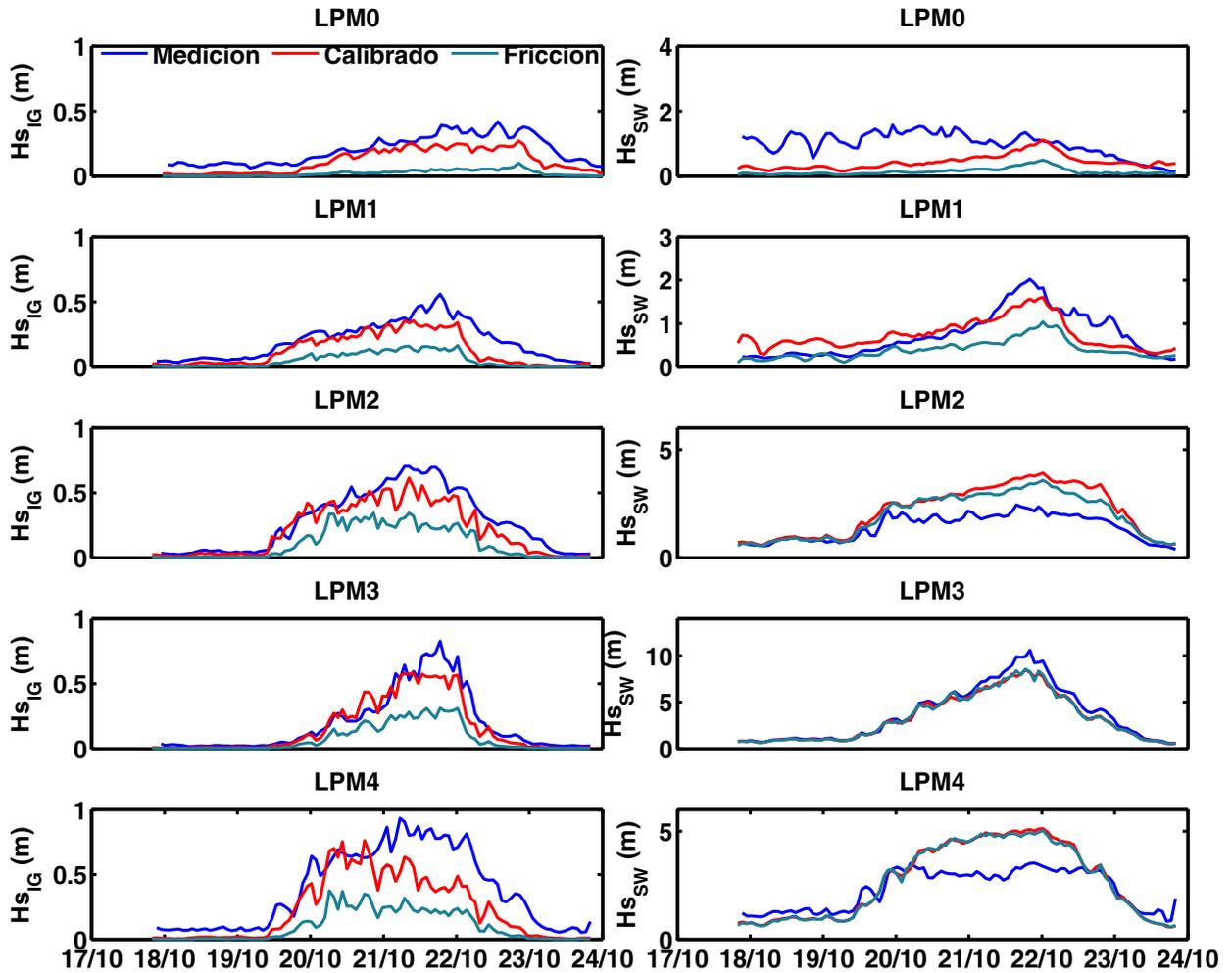


Figura 17. Altura significativa de las ondas infragravitatorias (IG) en la primera columna. Altura significativa de las ondas cortas (SW) en la segunda columna.

Una vez calibrado XBeach con los coeficientes óptimos ($f_w = 0$ y $c_f = 0.003$) se compararon los resultados de las corrientes medidas y simuladas. Los resultados de XBeach mostraron un sesgo negativo en la H_s de las ondas IG; los puntos que presentaron error mayor al 30% fueron LPM0 con 42%, LPM1 con 39% y LPM4 con 42% (Tabla 3). A pesar de utilizar los coeficientes friccionales por default, XBeach simuló mayor disipación de energía en las ondas IG (Figura 17) sobre estos puntos, la discrepancia se puede deber a la resolución de la batimetría obtenida por el satélite WorldView2 cuya resolución espacial es de 0.5 m. Se ha visto que una batimetría de alta resolución puede representar la rugosidad del fondo aproximando de esta forma los resultados del modelo numérico a casos reales (Demirbilek *et al.*, 2007). La H_s de las ondas cortas (SW) con un porcentaje de error $\geq 40\%$ fueron LPM0 con 65%, LPM2 con 62% y LPM4 con un 40% (Tabla 3). En este caso XBeach simuló una fricción adecuada para las ondas cortas (SW) comparando el punto LPM1 y LPM3. Sin embargo, para los primeros puntos la H_s es sobreestimada,

donde LPM0 corresponde al umbral del canal de navegación, LPM2 al umbral de la “Boca chica” y LPM4 corresponde al umbral de “Boca grande”. Aparte de la resolución de la batimetría para las ondas cortas, XBeach durante las simulaciones no toma en cuenta los procesos de interacción de oleaje corrientes sobre los umbrales o canales de navegación, donde se ha observado que la H_s puede amplificarse o reducirse por rompimiento (Briggs y Demirbilek, 1996).

Tabla 3. Resultados del sesgo y la raíz del error cuadrático medio de las ondas infragravatorias (IG) y ondas cortas (SW).

Estación	Bias IG	RMSE (m)	IG (%)	RMSE IG	Bias SW	RMSE (m)	SW (%)
LPM0	-0.0073	0.0874	41.9867	-0.5502	0.6820	65.1473	
LPM1	-0.0717	0.0951	39.1476	0.0099	0.2956	33.2850	
LPM2	-0.0629	0.1015	28.3542	0.7420	0.9432	61.8707	
LPM3	-0.0294	0.0769	26.0628	-0.4048	0.6656	14.1696	
LPM4	-0.1469	0.2000	41.8057	0.4139	0.9970	40.3899	

Respecto a las corrientes, XBeach mostró una buena reproducción de la dirección de las corrientes en los puntos correspondientes a las observaciones en LPM0, LPM1 y LPM3, sin embargo, sobre las bocas (LPM2 y LPM4) hay discrepancia con las observaciones (Figura 18).

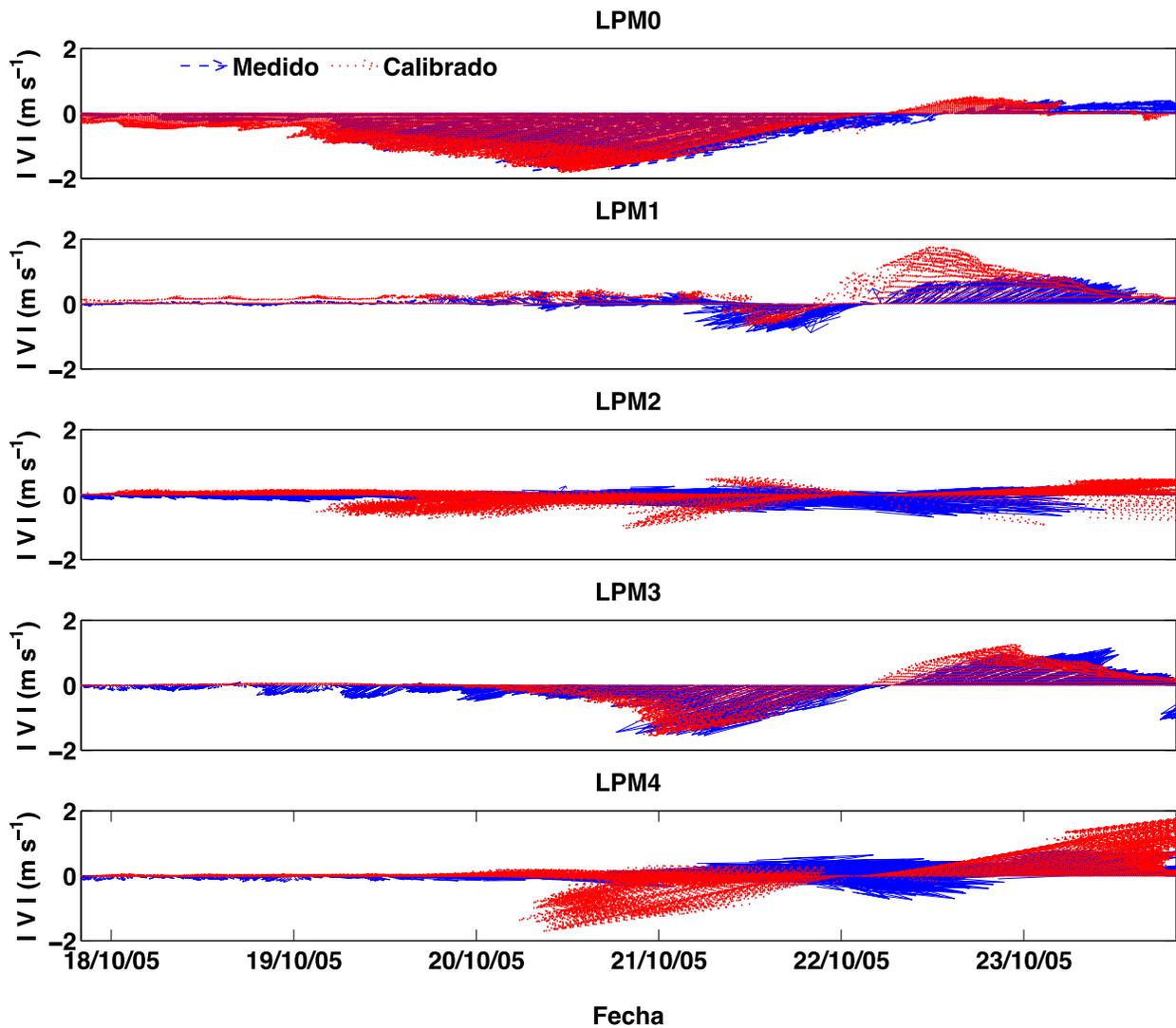


Figura 18. Corrientes correspondientes a la simulación calibrada comparada con las corrientes observadas

Validación cualitativa de impacto de erosión

Los resultados de erosión y acreción no se validaron cuantitativamente dada la ausencia de mediciones de la línea de costa justo después del paso del huracán, sin embargo, algunas zonas de erosión y acreción se validaron de manera cualitativa en base a reportes de impacto del huracán Wilma (Mariño-Tapia *et al.*, 2014; Mulcahy *et al.*, 2016). La zona norte fue inundada durante el pico de la tormenta por *overwash* presentando mayor erosión; por otra parte la zona central recibió menos impacto de erosión, donde la acreción fue dominante; y por último parte de la zona sur (entrada sur del arrecife) fue erosionada por *overwash* durante el pico de la tormenta (ver Figura 19).

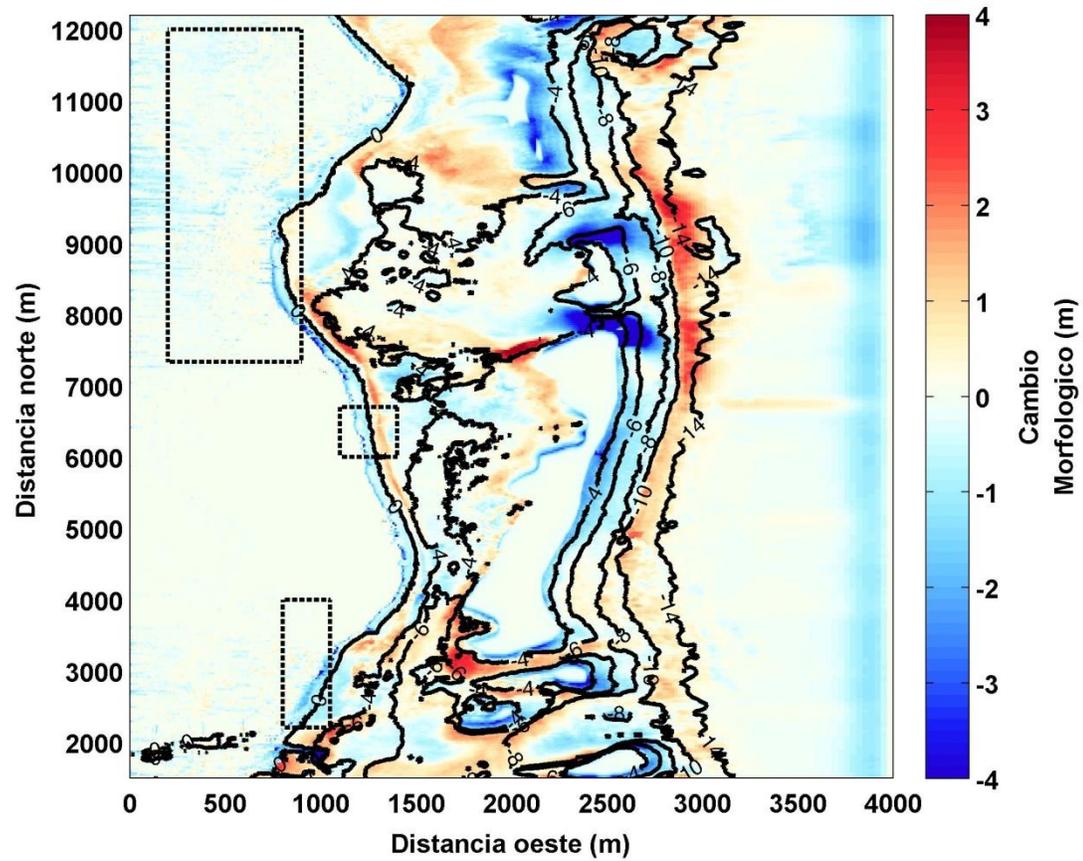


Figura 19. Zonas de erosión y acreción reportadas. Al norte una zona que presentó overwash reportada por Mulcahy et al. (2016). Al centro acreción de playa cercana a la UNAM reportada por Mariño-Tapia et al. (2014). Al sur zona hotelera erosionada reportada en una Manifestación de Impacto Ambiental.

Capítulo 4. Resultados y Discusión del arrecife de Puerto Morelos

4.1 Simulación de diferentes escenarios

Una vez calibrados los resultados de XBeach, con el objetivo de identificar los forzamientos y evaluar el impacto del arrecife coralino ante los efectos del cambio climático y acidificación del océano, se simularon escenarios que representan un arrecife de coral saludable y un arrecife de coral reducido (ver Figura 20), además de varios escenarios bajo diferentes tipos de forzamientos.

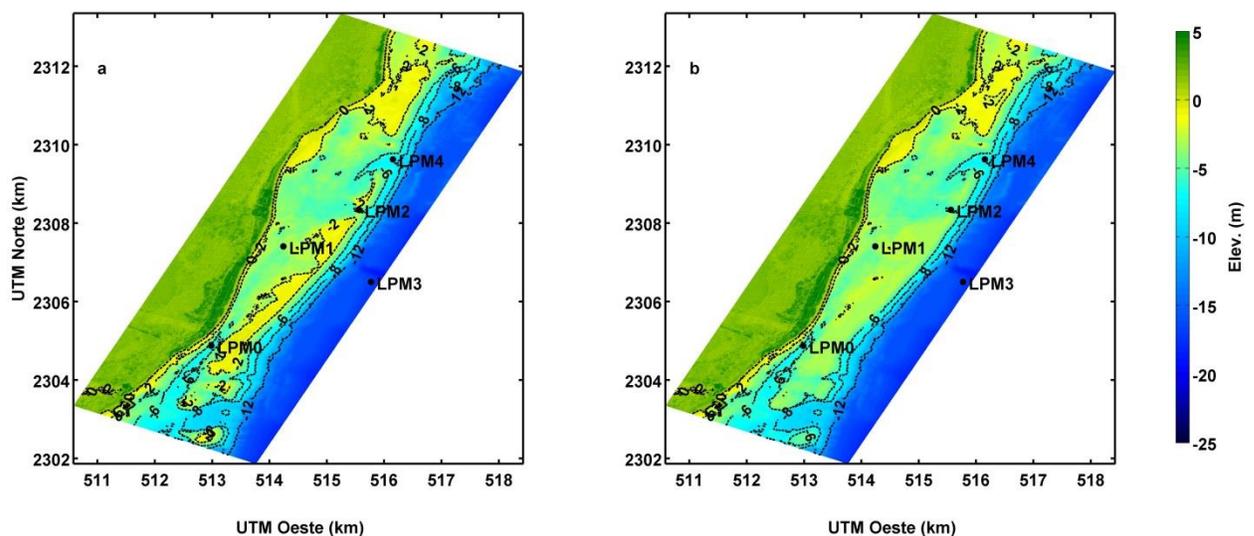


Figura 20. Escenarios de arrecife utilizados para simular diferentes condiciones. a) Arrecife saludable. b) Arrecife reducido ~3m.

Escenarios con arrecife saludable

Para el caso con arrecife saludable se simularon diversos escenarios con el fin de identificar las fuerzas principales ante el cambio morfológico. El primer escenario consistió en despreciar el efecto del viento en las ecuaciones de flujo (Caso sin viento; SV). El segundo consistió en despreciar la energía de las ondas infragravitatorias utilizando el módulo de oleaje estacionario (Caso estacionario; E). Y por último el tercero consistió en incrementar el nivel del mar registrado durante el periodo pico del huracán por 0.5 m, en relación al nivel medio del mar registrado en esa misma zona (Caso marejada; M).

Escenarios con arrecife reducido

Para este caso se simularon escenarios potenciales o propensos a ocurrir como consecuencia del cambio climático y la acidificación del océano. El primer escenario consistió en imponer las mismas condiciones del huracán Wilma (Caso arrecife reducido; AR), mientras que para el segundo se incrementó el nivel del mar por 0.38 m, correspondiente al nivel pronosticado para el año 2100 (Caso futurístico; F).

4.2 Resultados de los cambios morfológicos

Para evaluar los cambios morfológicos sobre las playas arrecifales - es decir aquellas playas localizadas detrás de la barrera arrecifal - al inicio y el final de la simulación del oleaje de huracán se extrajeron nueve perfiles de playa con el fin de identificar las zonas con mayor erosión (Figura 21). La zona sur del arrecife de Puerto Morelos se representa por los perfiles 1, 2 y 3; la zona central es representada por los perfiles 4, 5 y 6; mientras que la zona norte es representada por los perfiles 7, 8 y 9 (Figura 21).

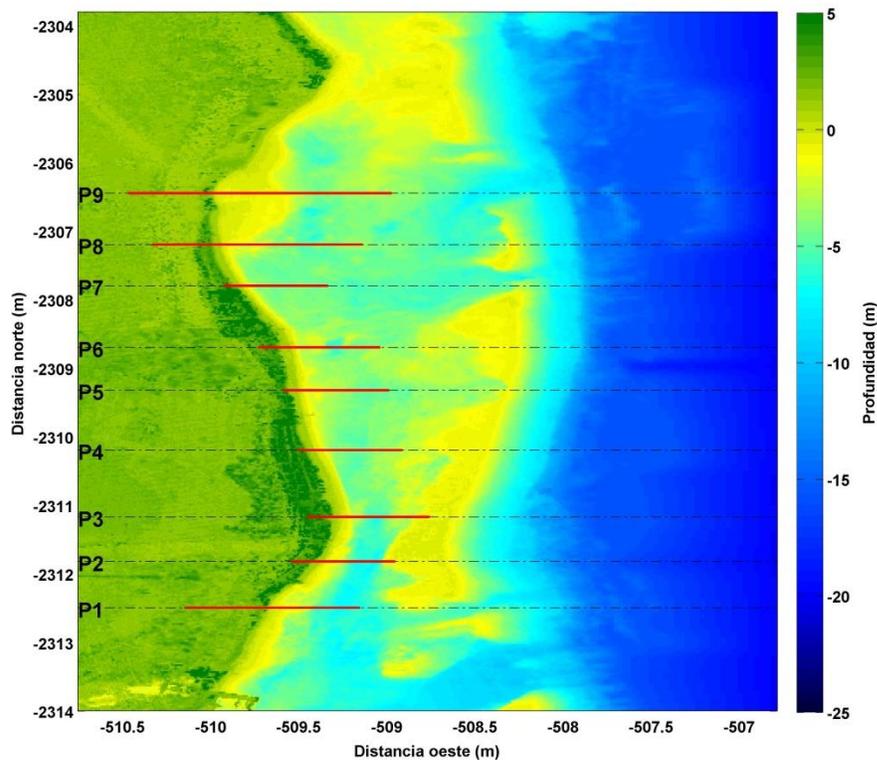


Figura 21. Perfiles de playa extraídos (P1-P9) durante el inicio y final de la simulación del huracán Wilma. Las líneas rojas denotan el perfil de playa extraído.

Los perfiles de playa finales se tomaron de la simulación del caso calibrado dada la aproximación de los datos modelados a los datos observados. Sobre la zona sur posterior al paso del huracán se observó impacto de erosión sobre las dunas de playa, donde parte del sedimento fue transportado y depositado sobre el canal de navegación del arrecife. En el perfil 1 (Figura 22a) se observó un mayor impacto del oleaje sobre la línea de costa por “overwash”, dado el cambio morfológico observado unos 500 m tierra adentro. Sin embargo, en el perfil 2 y perfil 3 (Figura 22b y Figura 22c) no se observó mucho impacto, esto sugiere que estos dos últimos presentan mayor grado de protección que el perfil 1. La localización del perfil 1 se encuentra más expuesta a la entrada de oleaje de energía alta. Pues en esta localización hay poca cobertura de arrecifes coralinos sobre la entrada sur de la laguna arrecifal. La zona central comparada con las otras dos zonas, presentó menos cambios morfológicos; los perfiles finales denotaron acreción de las playas (Figura 22d-f). La cobertura del arrecife refleja mayor disipación de la energía del oleaje y a la vez menor erosión de playa, coincidiendo con los resultados de diferentes estudios en los que se ha analizado la dinámica de playas en esta zona (Ruiz de Alegria-Arzaburu *et al.*, 2013; Mariño-Tapia *et al.*, 2014). Por último, en la zona norte (Figura 22g-i) se observó mayor erosión ocasionado por overwash hasta más de 500m tierra adentro principalmente sobre los perfiles 8 y 9 (Figura 22h y Figura 22i). En el perfil 7 (Figura 22g) el impacto por overwash tierra adentro fue de ~100 m, menor a los dos perfiles consecutivos, sugiriendo que la duna localizada sobre el perfil 7 pudo proveer amortiguación de la erosión ante el oleaje incidente.

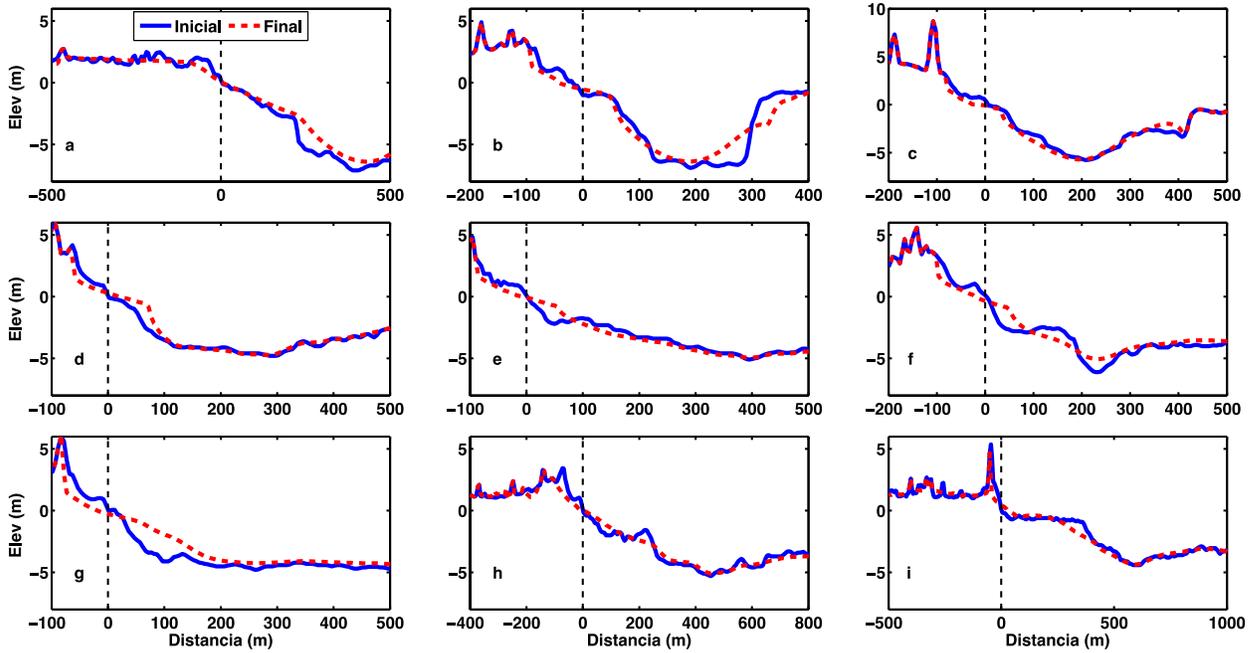


Figura 22. Perfiles de playa inicial y final para el periodo de simulación (calibrado) . La línea negra punteada denota el inicio del nivel medio del mar para cada perfil. Zona sur: a) Perfil 1, b) Perfil 2 y c) Perfil 3. Zona central: d) Perfil 4, e) Perfil 5 y f) Perfil 6. Zona norte: g) Perfil 7, h) Perfil 8 y i) Perfil 9.

4.3 Escenarios con arrecife de coral saludable

4.3.1 Caso calibrado vs caso sin viento

El patrón de circulación a lo largo del tiempo correspondiente a la posición de los puntos de medición mostró diferencias en la dirección de las corrientes principalmente sobre los puntos LPM0, LPM1 y LPM3 durante la recalada del huracán (Figura 23). Esto demostró que el viento es importante en la circulación del arrecife sobre los puntos mencionados.

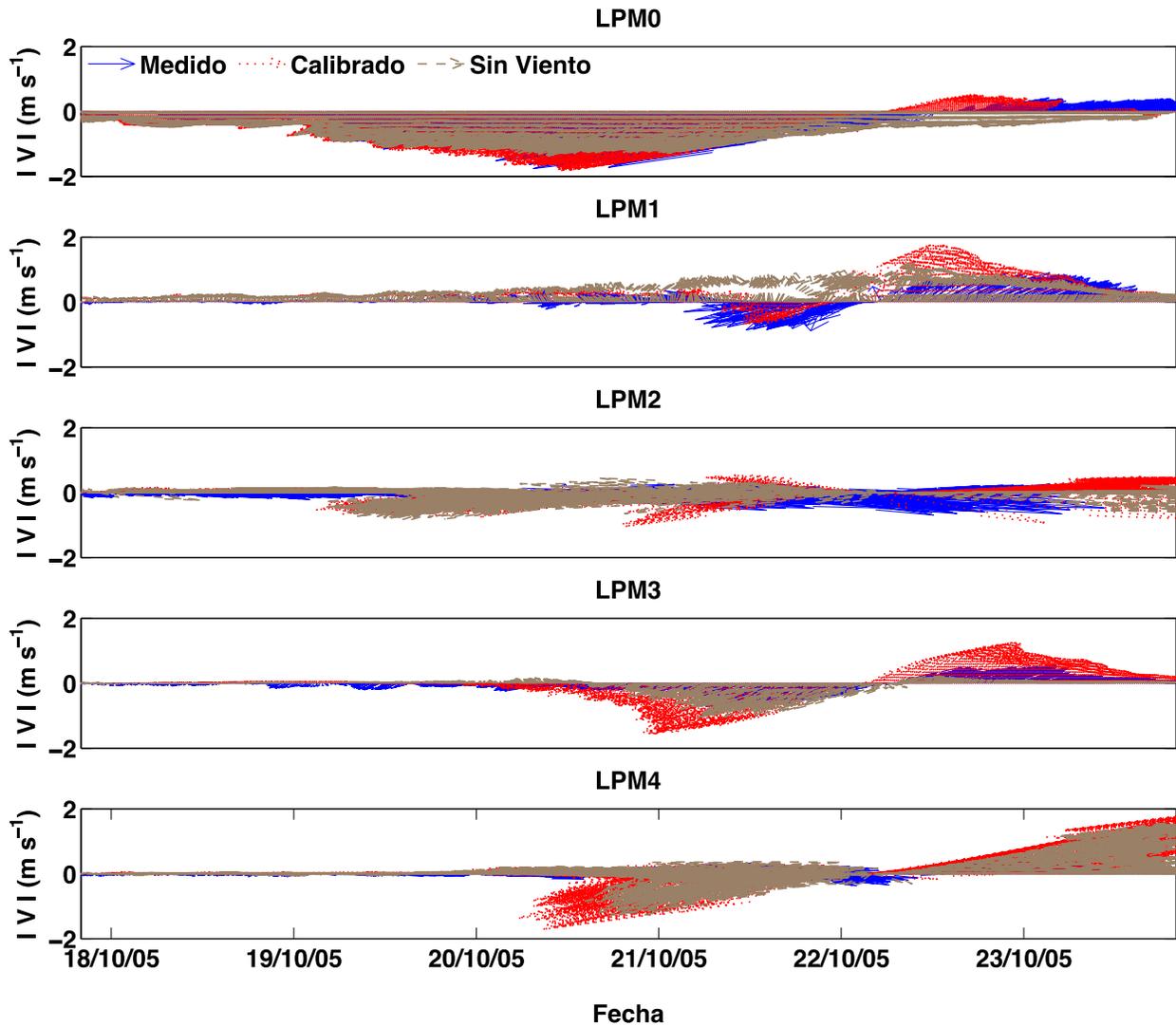


Figura 23. Comparación de las corrientes simuladas para el caso sin viento (SV) con el caso calibrado y las observadas.

Por otra parte, el patrón de circulación en esta simulación a lo largo del tiempo sobre los puntos LPM2 y LPM4 se asemejó al patrón de circulación del caso calibrado. La variabilidad en estos dos puntos pudo ser ocasionada por la resolución espacial de la batimetría utilizada para la simulación. Dicha resolución es de ~ 0.5 m en la horizontal, la cual se debe a que los gradientes de profundidad que hay sobre estos dos puntos no están bien definidos en la altimetría obtenida del satélite WorldView-2. Por lo tanto, la rugosidad del fondo no está representada correctamente en el modelo XBeach. Esto es evidente al comparar la H_s de las SW; pues los esfuerzos friccionales aquí son casi nulos y entonces la H_s modelada es mayor a la observada. Respecto a la H_s de las IG al comparar las simulaciones con el caso calibrado el patrón y magnitud fue similar, lo cual sugiere que el viento no influye sobre las ondas IG y SW (Figura 24).

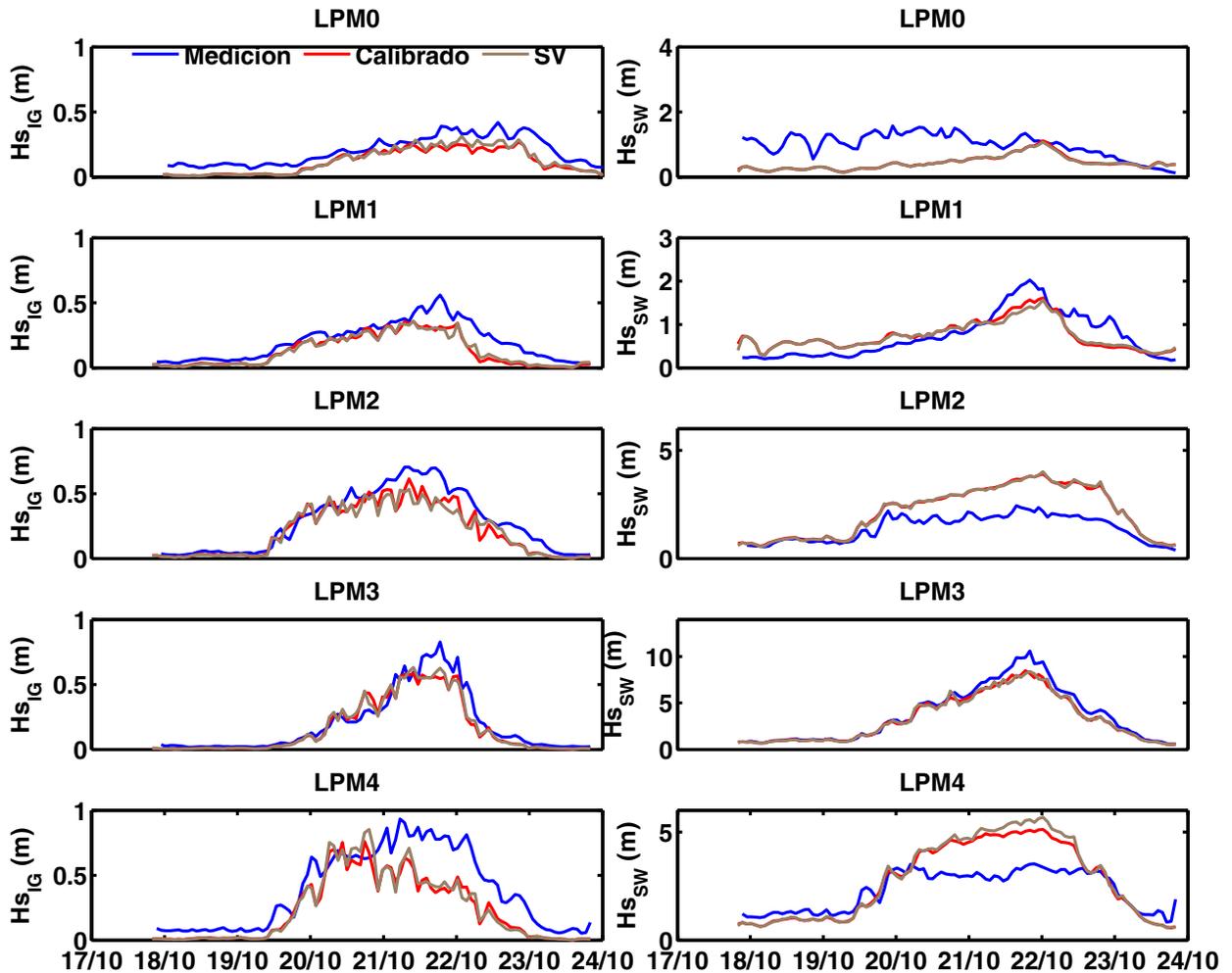


Figura 24. Comparación de la altura significativa de las ondas infragravitatorias (IG) (columna de la izquierda). Comparación de la altura significativa de las ondas cortas (SW) (columna de la derecha).

El impacto de erosión sobre la zona sur, central y norte del arrecife de Puerto Morelos fue similar a lo observado en el caso calibrado. Sin embargo, el impacto de inundación por overwash tierra adentro fue mínimo, esto se observó en el perfil 1 (Figura 25a) de la zona sur y los perfiles 8 y 9 (Figura 25h y Figura 25i) en la zona norte, donde la cantidad de sedimentos removidos de los perfiles de playa es menor comparada con el caso calibrado (Figura 25).

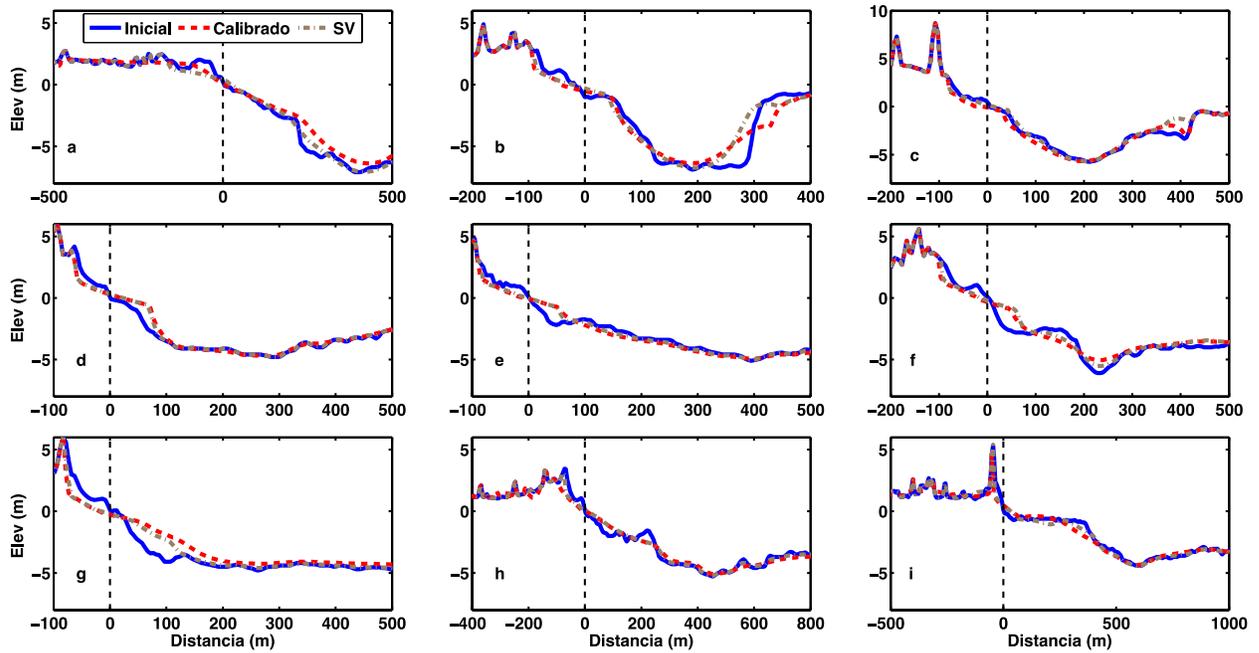


Figura 25. Perfiles de playa inicial y final para el periodo de simulación (sin viento). La línea negra punteada denota el inicio del nivel medio del mar para cada perfil. Zona sur: a) Perfil 1, b) Perfil 2 y c) Perfil 3. Zona central: d) Perfil 4, e) Perfil 5 y f) Perfil 6. Zona norte: g) Perfil 7, h) Perfil 8 y i) Perfil 9.

4.3.2 Caso calibrado vs caso estacionario

La circulación sobre el arrecife a lo largo del tiempo mostró un patrón similar a lo observado y calibrado. Sin embargo, sobre las bocas en LPM2 y LPM4 persiste la variabilidad de las corrientes durante el periodo de la recalada (Figura 26).

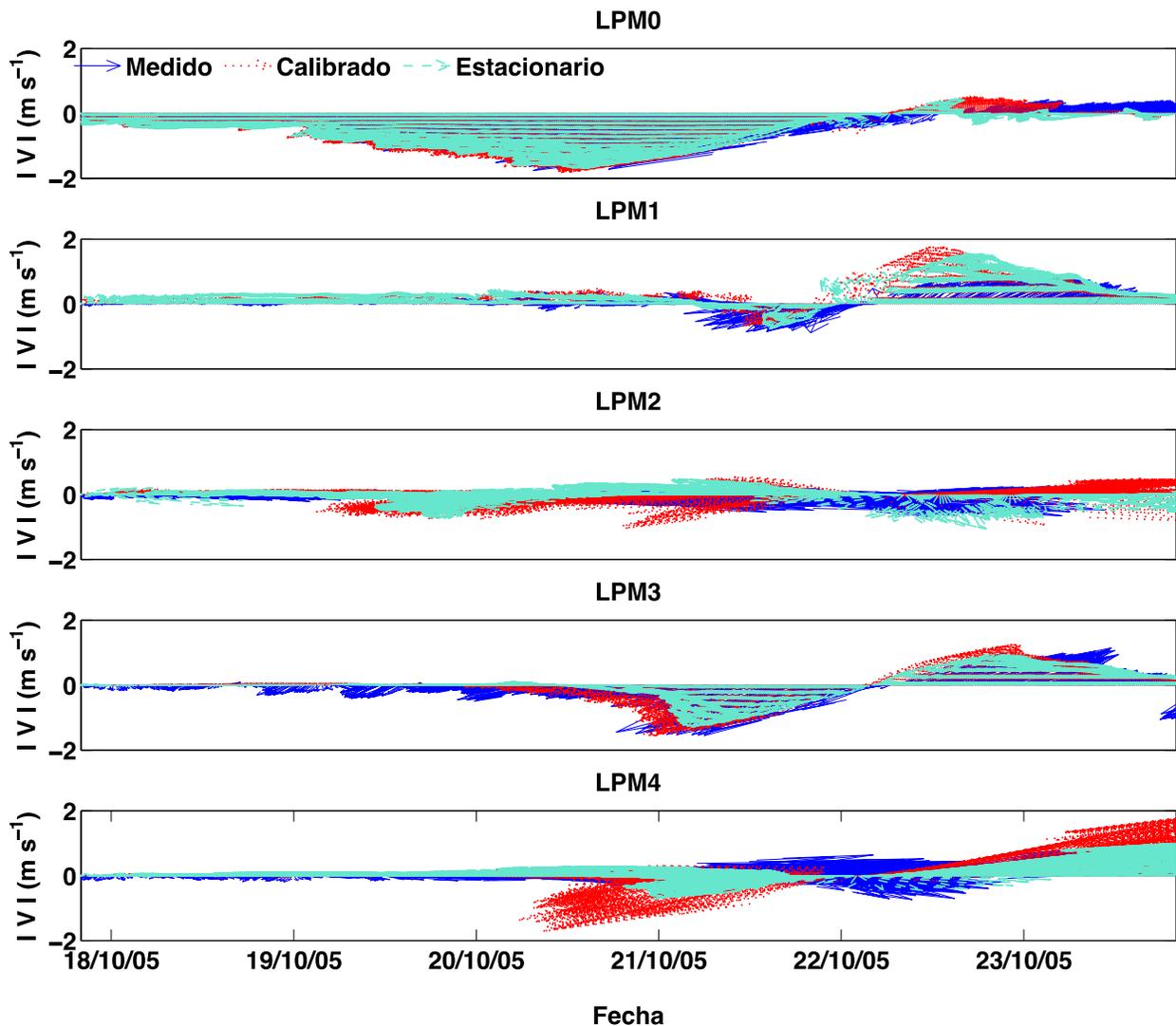


Figura 26. Comparación de las corrientes simuladas para el caso estacionario (E) con el caso calibrado y las observadas.

En este escenario la energía de las ondas *IG* no es reproducida; sin embargo, se observó que la *Hs* de las *SW* presentaron mayor reducción comparado con el caso calibrado (Figura 27). Esta diferencia puede ser la influencia del transporte de sedimentos, pues se ha observado mayor desplazamiento litoral y perpendicular a la costa inducido por la energía de las ondas *IG*, dado que aquí esta última es nula, la cantidad de sedimentos removida en el fondo es menor conservando la rugosidad del fondo y permitiendo una mayor disipación del oleaje. Pues dicho desplazamiento de sedimentos se observó en los perfiles de playa finales, mostrando menor desplazamiento comparado con los perfiles finales observados en el caso calibrado (Figura 28).

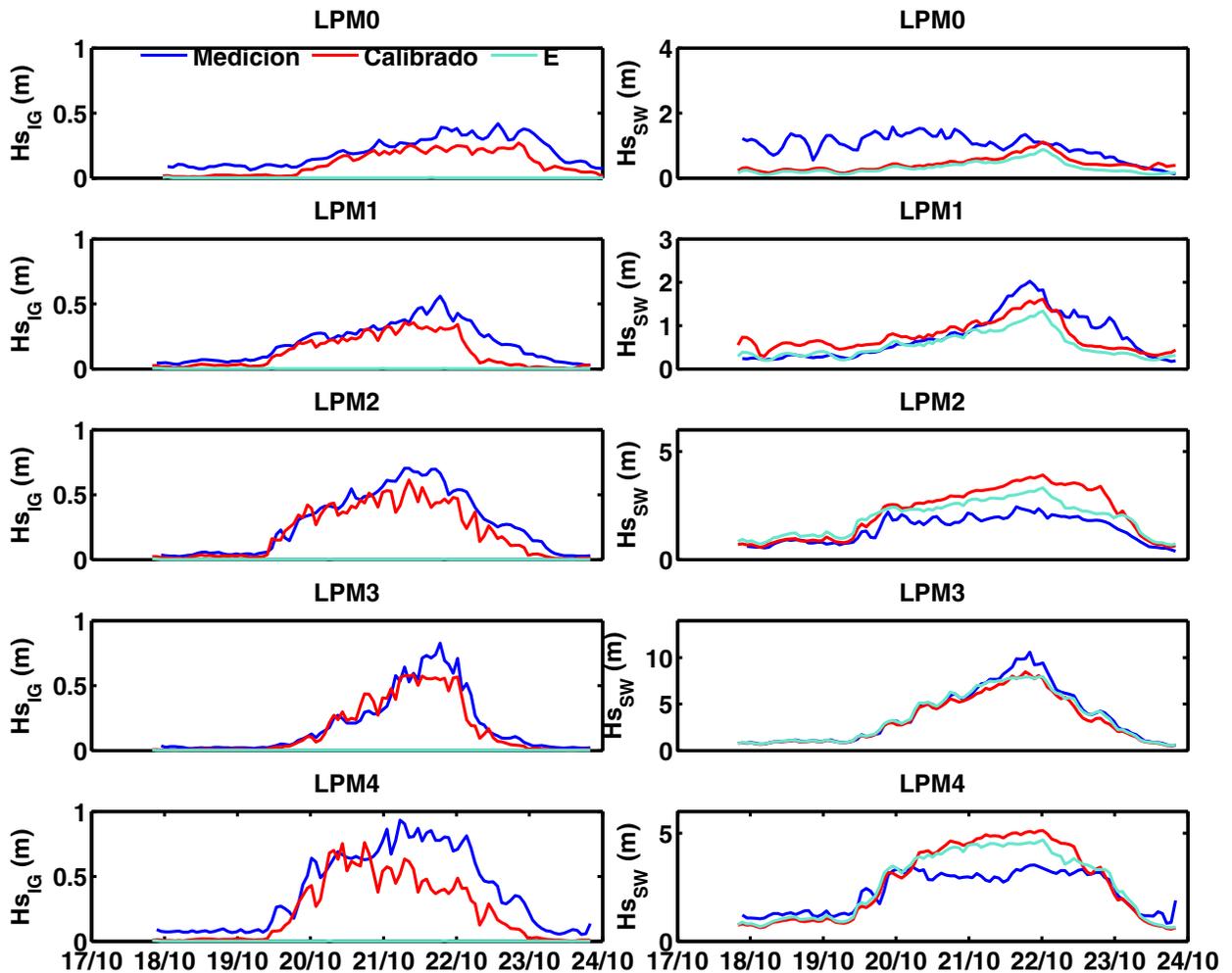


Figura 27. Columna izquierda: Comparación de la altura significativa de las ondas infragravitatorias (IG). Columna derecha: Comparación de la altura significativa de las ondas cortas (SW).

El impacto de erosión de las playas y por inundación tierra adentro es mínimo dado que los cambios morfológicos son menores a los registrados en el caso calibrado. Tanto en la zona sur (en particular el perfil 1; ver Figura 28a) como en la norte (perfil 8 y perfil 9; ver Figura 28h y Figura 28i) el impacto de inundación por overwash fue mínimo. Esto sugiere que la energía de las *IG* tiene mayor influencia en el impacto por inundación y en el transporte de sedimentos (Figura 28).

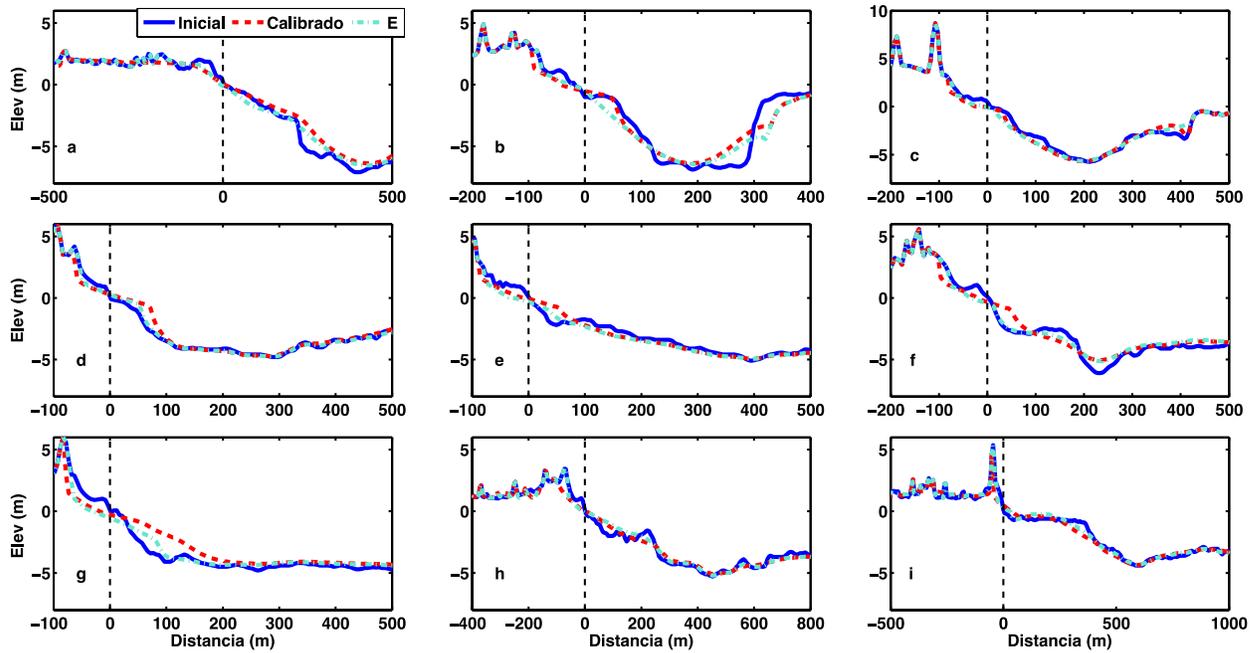


Figura 28. Perfiles de playa inicial y final para el periodo de simulación (estacionario) . La línea negra punteada denota el inicio del nivel medio del mar para cada perfil. Zona sur: a) Perfil 1, b) Perfil 2 y c) Perfil 3. Zona central: d) Perfil 4, e) Perfil 5 y f) Perfil 6. Zona norte: g) Perfil 7, h) Perfil 8 y i) Perfil 9.

4.3.3 Caso calibrado vs caso marejada

Al incrementar 0.5 m el pico máximo de la marea registrada durante el paso del huracán Wilma y comparar la circulación sobre el arrecife con el caso calibrado; el patrón de dirección se asemejó, pero las magnitudes fueron ligeramente mayores a las del caso calibrado (Figura 29).

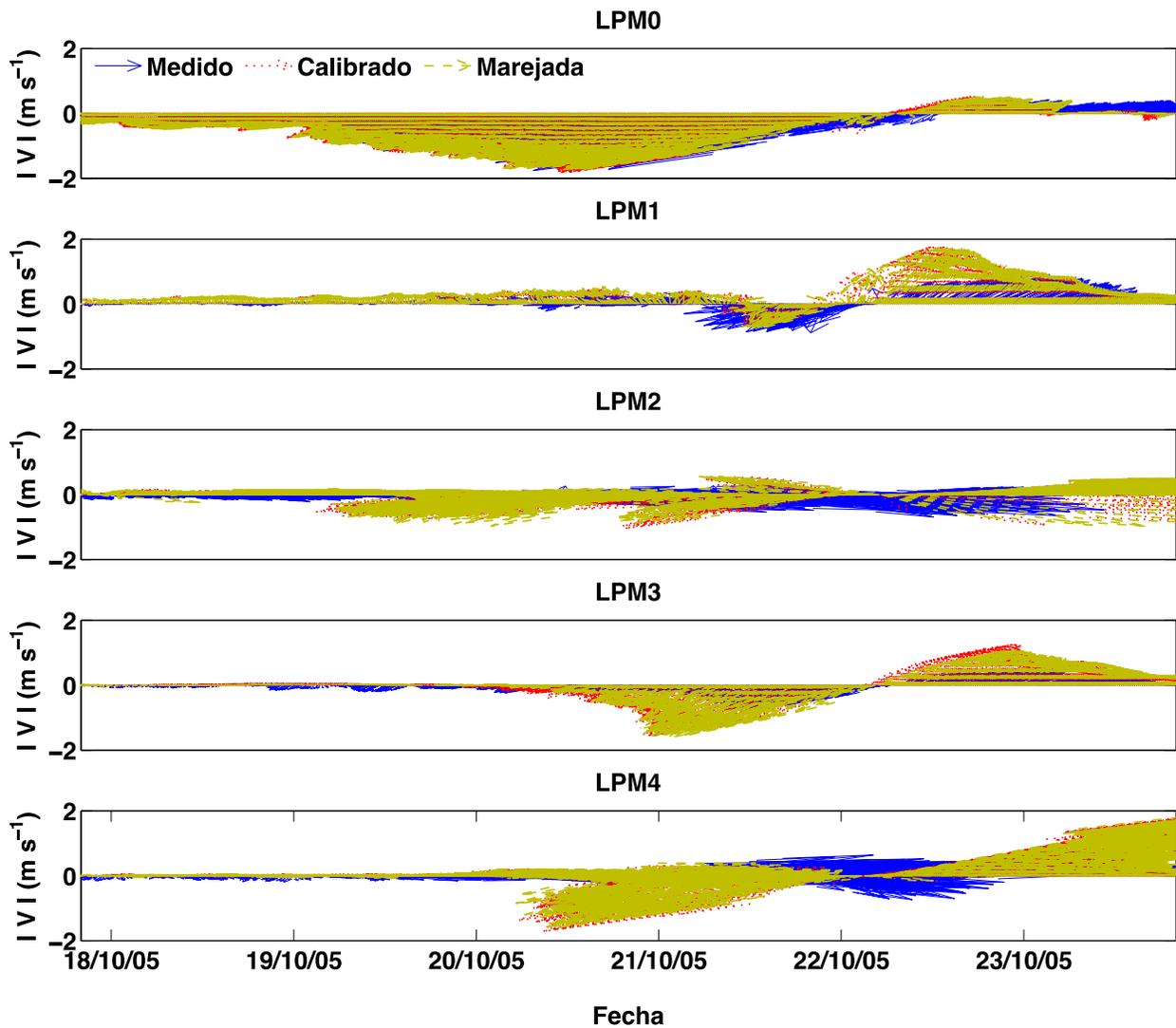


Figura 29. Comparación de las corrientes simuladas para el caso marejada (M) con el caso calibrado y las observadas.

El patrón de oleaje descrito por la H_s de las ondas IG y SW fue similar al caso calibrado; durante el periodo pico, la H_s de las ondas SW mostró una diferencia de altura de ~ 0.5 m denotando la influencia del incremento generado al pico máximo del nivel del mar registrado (Figura 30).

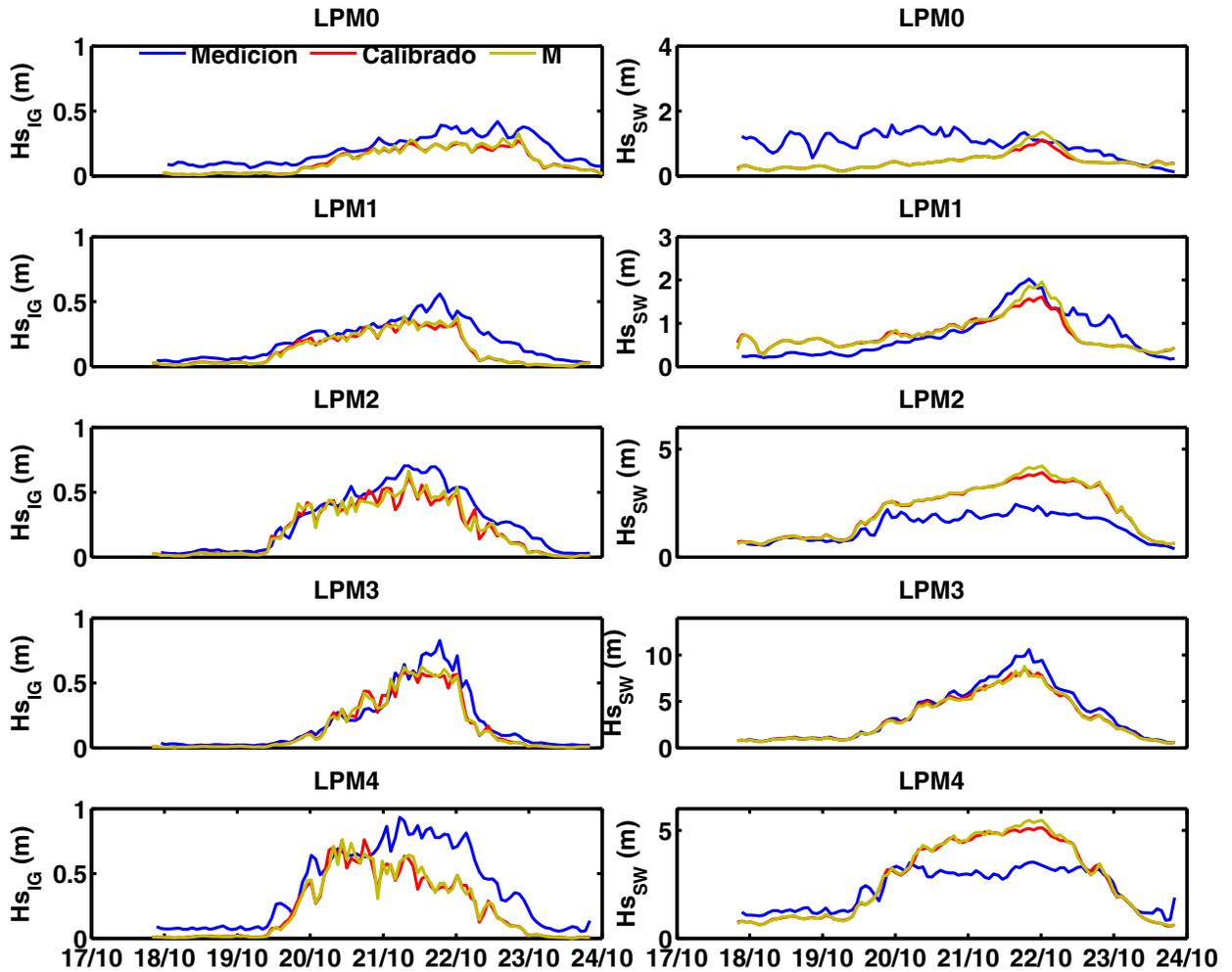


Figura 30. Comparación de la altura significativa de las ondas infragravitatorias (IG) primera columna. Comparación de la altura significativa de las ondas cortas (SW) segunda columna.

El impacto de erosión de playas sobre este escenario es mucho mayor al caso calibrado. Sobre la zona sur (perfil 1; ver Figura 31a) y norte (perfil 8 y perfil 9; ver Figura 31h y Figura 31i), mostraron una inundación por overwash que se extendió más de 500 m costa dentro (Figura 31).

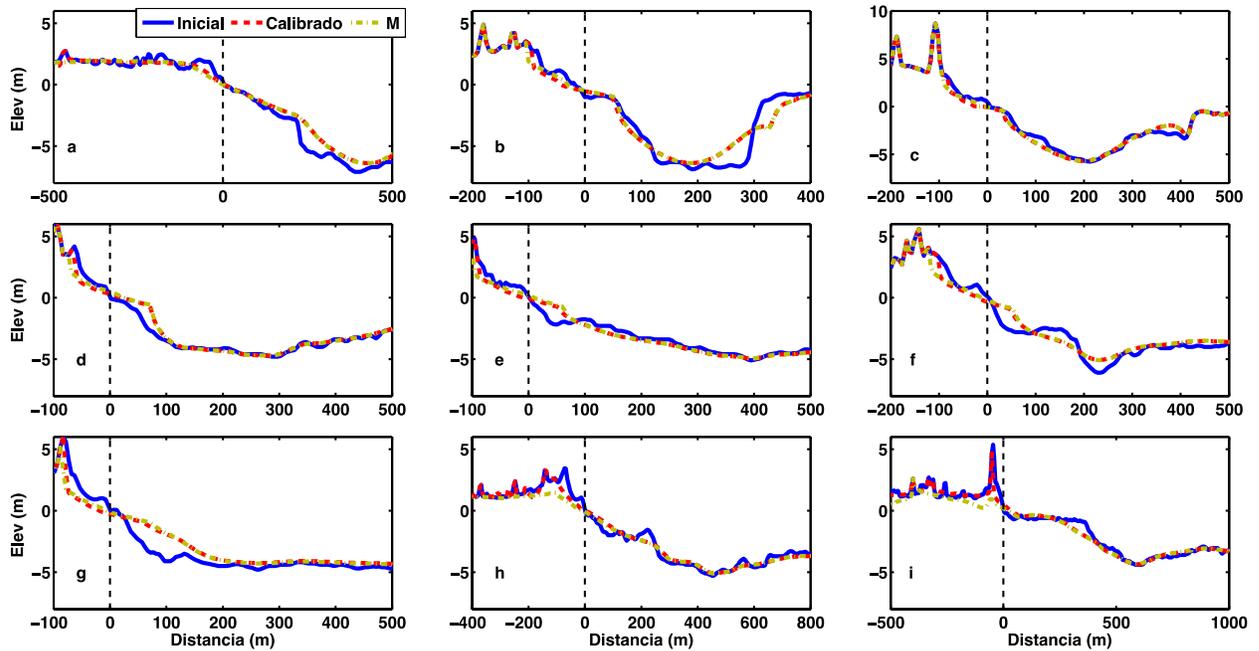


Figura 31. Perfiles de playa inicial y final para el periodo de simulación (marejada) . La línea negra punteada denota el inicio del nivel medio del mar para cada perfil. Zona sur: a) Perfil 1, b) Perfil 2 y c) Perfil 3. Zona central: d) Perfil 4, e) Perfil 5 y f) Perfil 6. Zona norte: g) Perfil 7, h) Perfil 8 y i) Perfil 9.

4.4 Escenarios con arrecife de coral reducido

4.4.1 Caso calibrado vs caso arrecife reducido

Los escenarios donde el arrecife de coral es reducido $\sim 3\text{m}$, tienen la finalidad de evaluar el efecto de protección que proporciona a la línea de costa. Para este caso de estudio el arrecife de coral dentro de XBeach fue considerado una estructura no rígida no erosionable, donde la rugosidad del fondo fue suavizada con una interpolación. Los forzamientos físicos fueron los mismos que el caso calibrado y los resultados del patrón de circulación sobre el arrecife coralino se aproximaron a los resultados de este último en particular los puntos LPM0, LPM1 y LPM3. Sobre las dos bocas se observó una circulación hacia el sur durante la recalada del huracán patrón distinto al observado y caso calibrado (Figura 32).

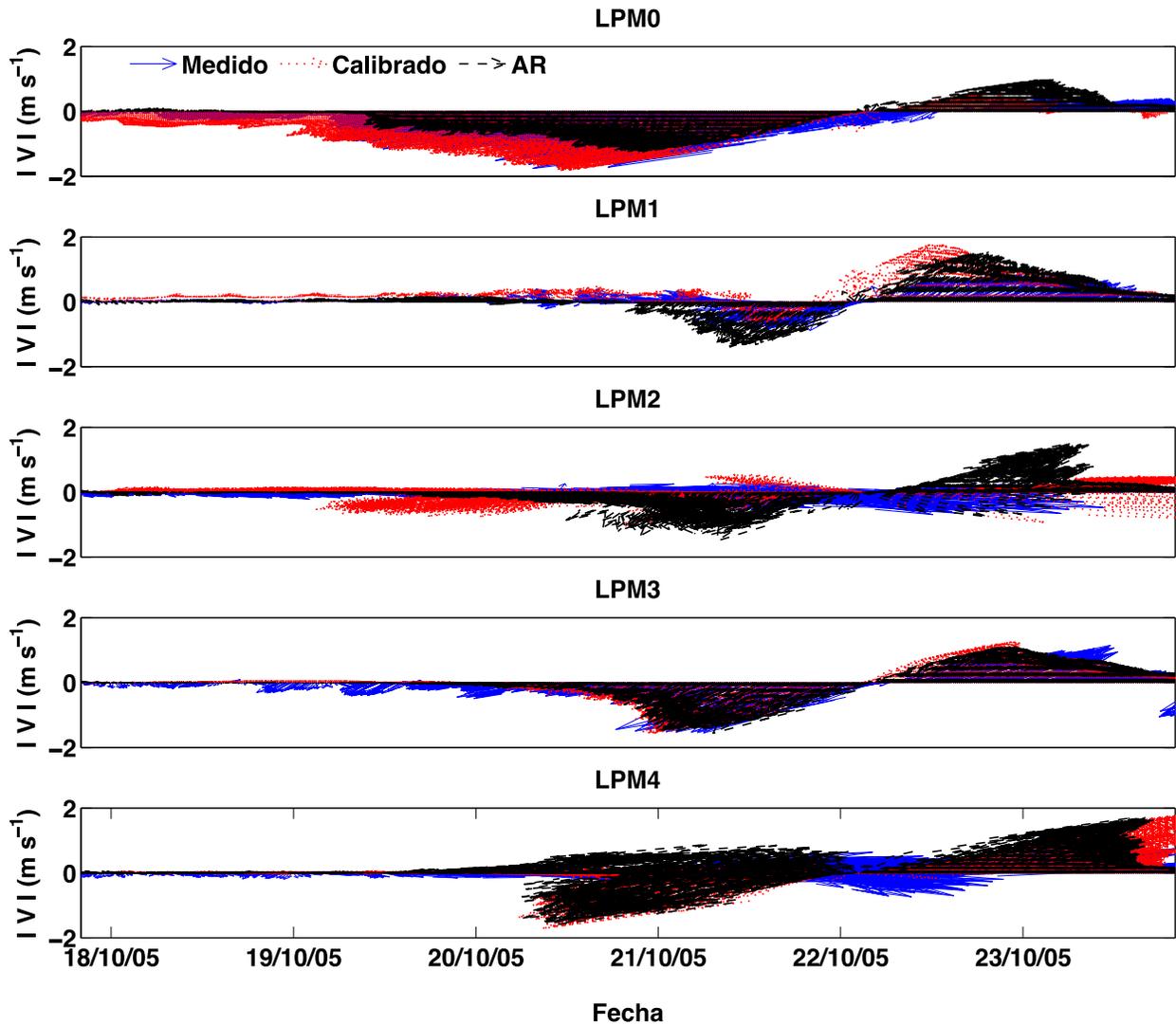


Figura 32. Comparación de las corrientes simuladas para el caso arrecife reducido (AR) con el caso calibrado y las observadas.

Respecto al oleaje, la H_s de las SW incrementó dado a la ausencia de arrecife coralino, principalmente en los puntos LPM0, LPM1 y LPM2 cuya localización presentaban mayor cobertura arrecifal, pues la H_s sobre LPM3 y LPM4 fue similar a los resultados del caso calibrado. Por otra parte, la H_s de las ondas IG simulada en este escenario fue ligeramente mayor al caso calibrado, en particular sobre el punto LPM2 (Figura 33).

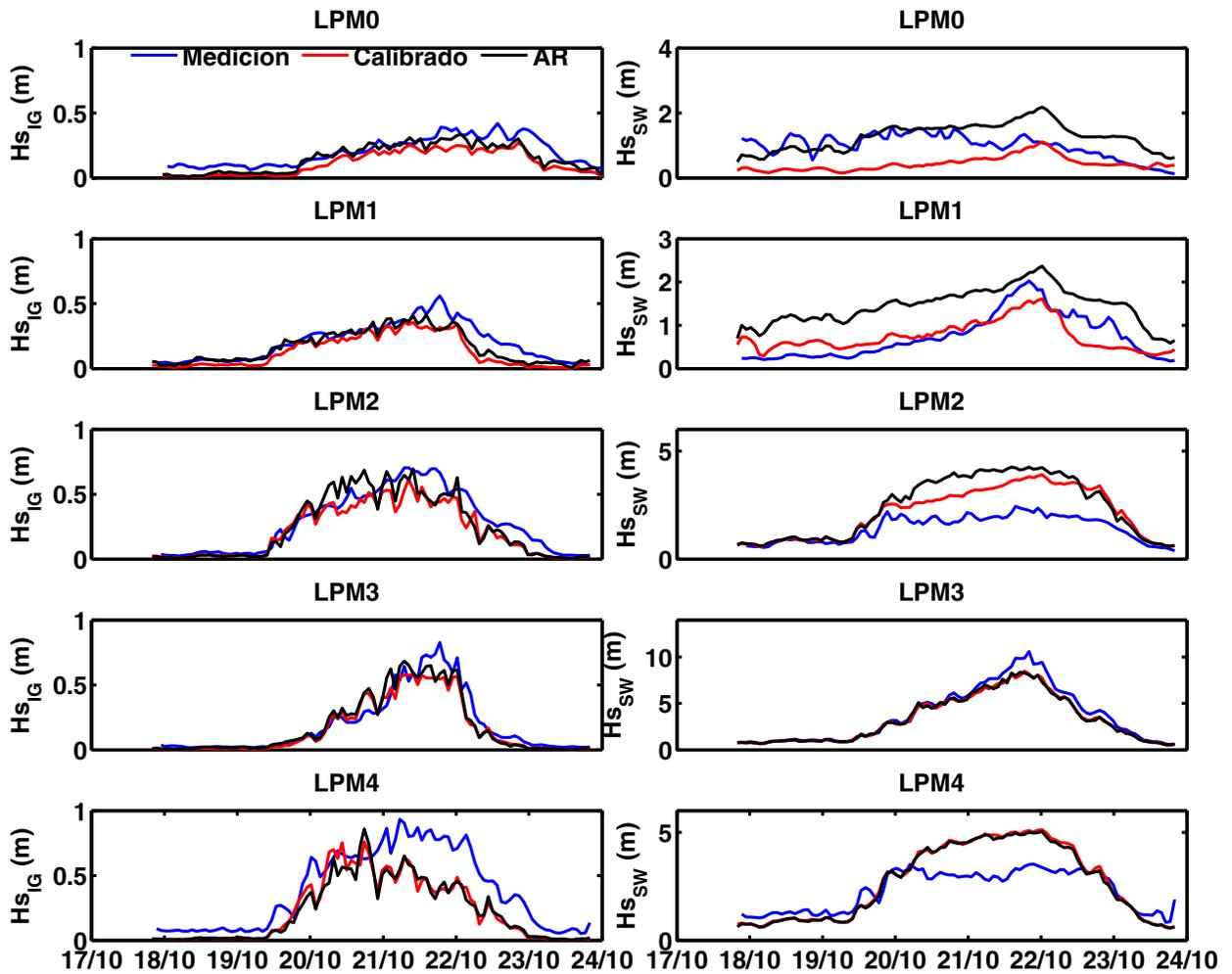


Figura 33. Columna izquierda: Comparación de la altura significativa de las ondas infragravitatorias (IG). Columna derecha: Comparación de la altura significativa de las ondas cortas (SW).

El impacto de erosión a la línea de costa fue mayor al caso calibrado. Esto se observó en la erosión de las dunas a todo lo largo (tanto la parte sur, central y norte) del arrecife (Figura 34).

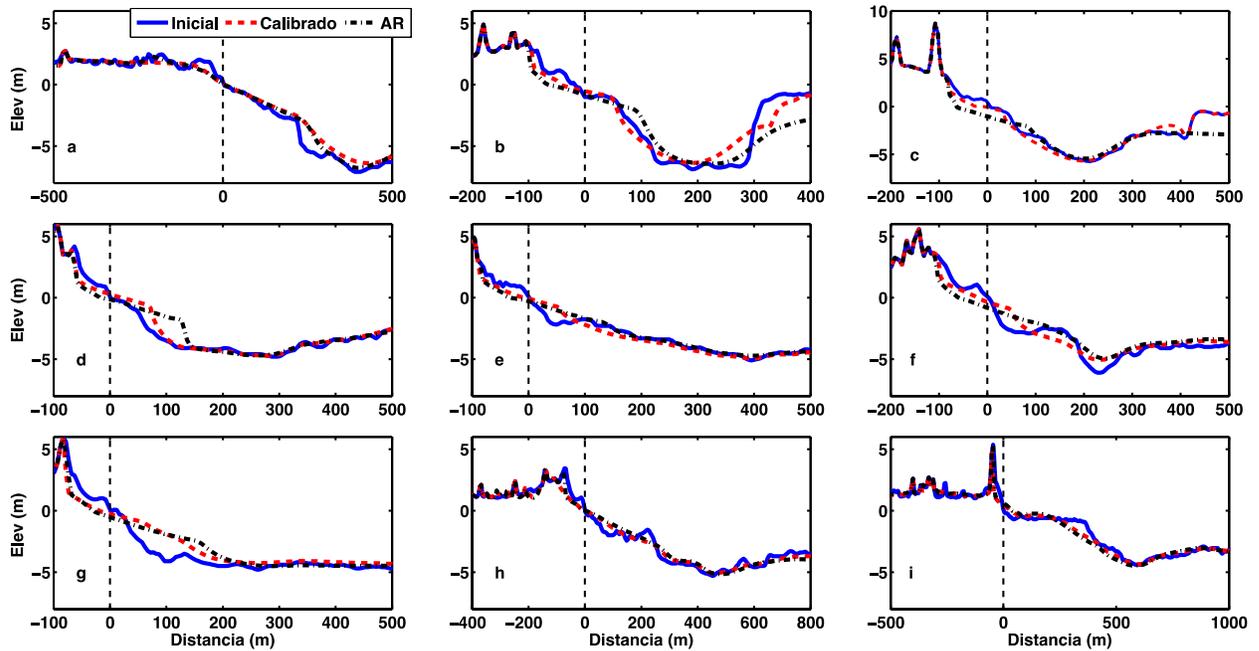


Figura 34. Perfiles de playa inicial y final para el periodo de simulación (arrecife reducido) . La línea negra punteada denota el inicio del nivel medio del mar para cada perfil. Zona sur: a) Perfil 1, b) Perfil 2 y c) Perfil 3. Zona central: d) Perfil 4, e) Perfil 5 y f) Perfil 6. Zona norte: g) Perfil 7, h) Perfil 8 y i) Perfil 9.

4.4.2 Caso calibrado vs caso año 2100

Para este caso las condiciones del arrecife y forzamientos fueron los mismos que el caso anterior a excepción del forzamiento por la marea. Para este último se consideró la elevación del nivel del mar pronosticado para el año 2100 basándose en una tasa de elevación de 0.38 cm/año, por lo que a la serie de tiempo del nivel del mar se le adicionaron 0.38 m. Los patrones de circulación sobre el arrecife coralino se aproximaron a la circulación observada y calibrada en particular los puntos LPM0, LPM1 y LPM3. Aquí los resultados sobre LPM2 difieren al patrón observado y calibrado, sin embargo son similares al patrón del escenario anterior, por lo tanto si comparamos la hidrodinámica de este último punto en todos los escenarios (Figura 23, Figura 26, Figura 29, Figura 32 y Figura 35) sugiere que la circulación del arrecife coralino de Puerto Morelos dependerá de la morfología y estado de salud del arrecife.

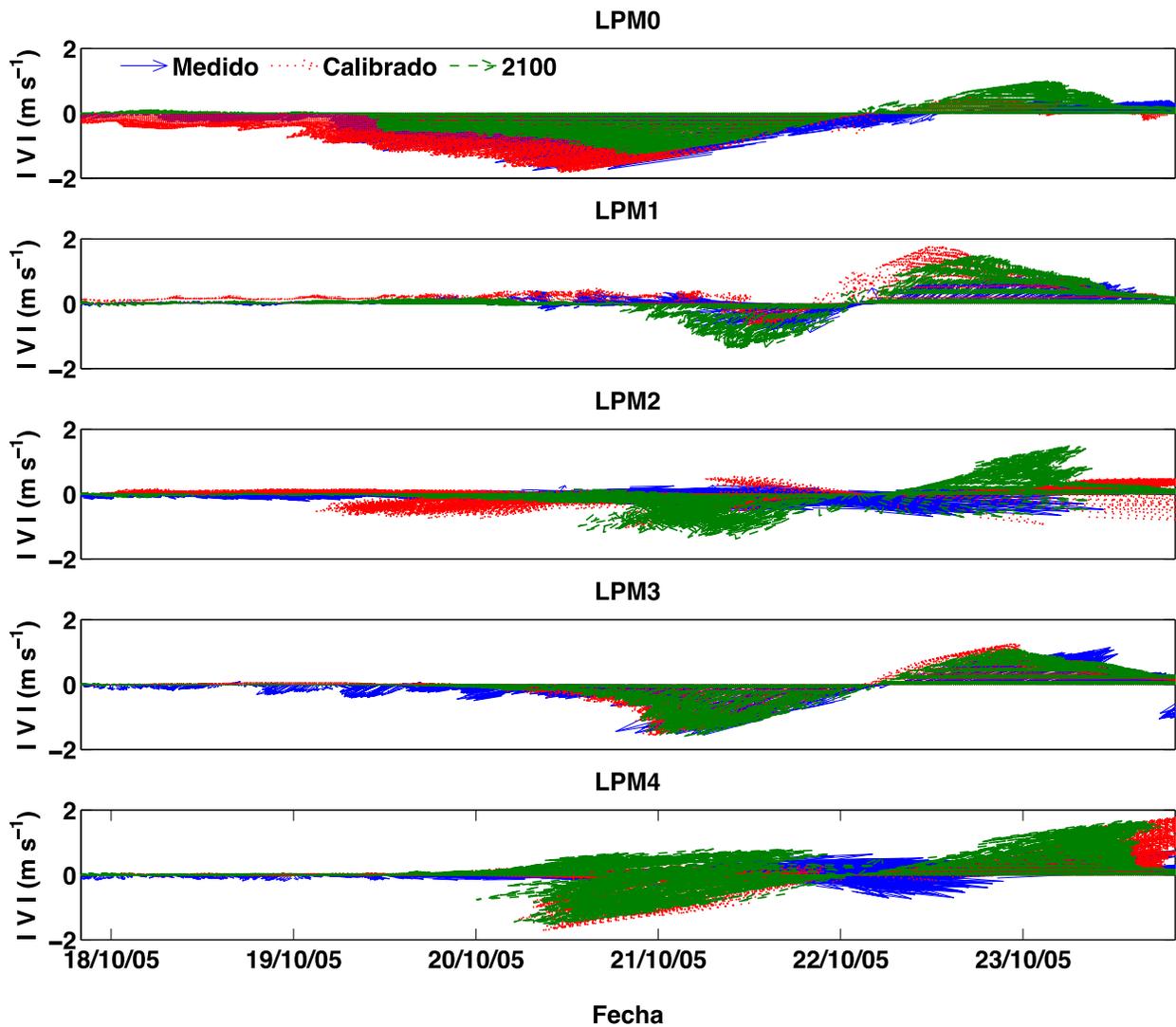


Figura 35. Comparación de las corrientes simuladas para el caso año 2100 con el caso calibrado y las observadas.

La altura significativa tanto de las ondas IG y SW fue similar a los resultados del arrecife reducido, se observó que la H_s de las SW incrementó dada la ausencia de arrecife coralino. Sin embargo, la H_s de las ondas IG fueron ligeramente mayores que el caso anterior, denotando que la elevación del nivel del mar influye en la altura de las ondas IG (Figura 36).

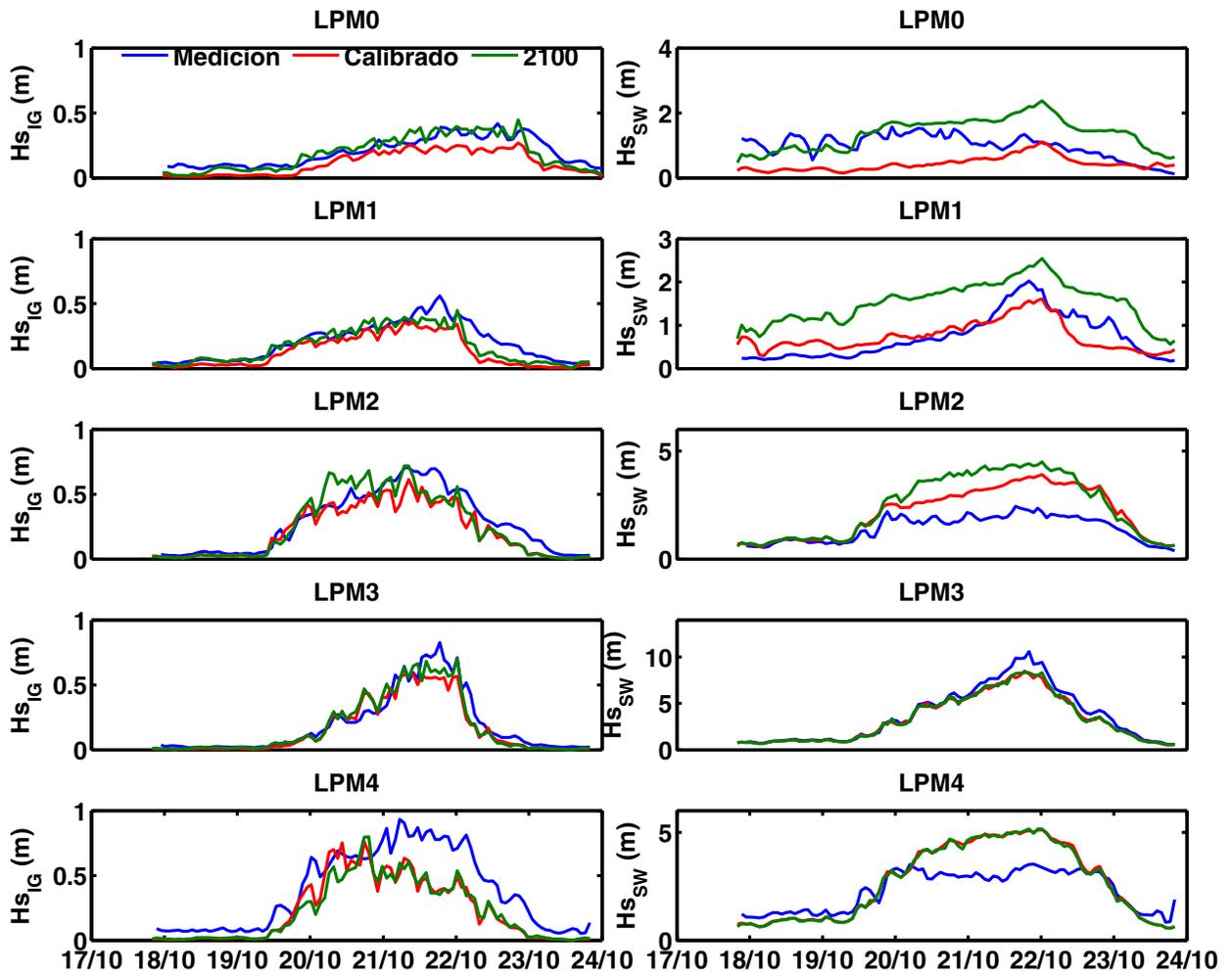


Figura 36. Comparación de la altura significativa de las ondas infragravitatorias (IG) primera columna. Comparación de la altura significativa de las ondas cortas (SW) segunda columna.

Los perfiles de playa de este escenario muestran mayor impacto de erosión a la línea de costa que el caso calibrado. Sobre la zona norte el impacto por inundación es mayor, dado que la duna sobre el perfil 8 fue erosionada (Figura 37).

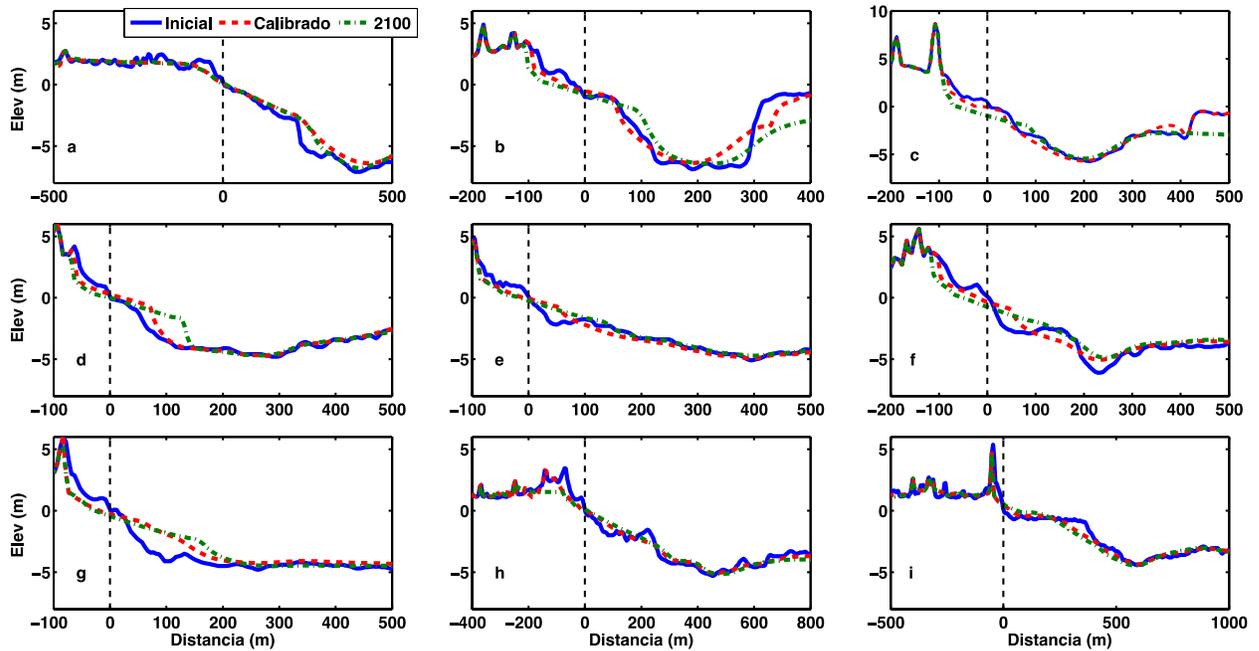


Figura 37. Perfiles de playa inicial y final para el periodo de simulación (futurístico) . La línea negra punteada denota el inicio del nivel medio del mar para cada perfil. Zona sur: a) Perfil 1, b) Perfil 2 y c) Perfil 3. Zona central: d) Perfil 4, e) Perfil 5 y f) Perfil 6. Zona norte: g) Perfil 7, h) Perfil 8 y i) Perfil 9.

4.4 Evaluación de la respuesta de la playa arrecifal ante el impacto por erosión

Comparando todos los resultados de impacto por inundación generada por overwash, la Figura 38 muestra las diferencias de todos los escenarios, los colores azules denotan mayor impacto, mientras que los colores rojos denotan protección; por lo tanto aquel escenario con un arrecife de coral “saludable” donde la energía de las ondas IG es nula, proporcionó menor impacto de inundación y erosión de la línea de costa, principalmente en la zona central (Figura 38d); sin embargo algunas de las edificaciones (es decir, casas habitacionales y complejos turísticos) que se encontraban a una distancia mayor o igual a los 20m de la pleamar máxima de acuerdo a la NOM-146-SEMARNAT-2005, fueron destruidos y dañados por el oleaje incidente pues se observó erosión sobre estas zonas en los perfiles de playa (Figura 28), sin embargo la mayor parte de los daños fue ocasionado por las rachas máximas del viento durante el pico de la tormenta (Pasch *et al.*, 2006). Sobre la zona sur y norte dada la poca cobertura de arrecife fueron zonas reportadas por destrucción y erosión de los complejos turísticos y zonas de manglar al paso del huracán Wilma. Por otro lado, el escenario con mayor impacto por inundación fue el caso marejada en donde se incrementó por 0.5 m el nivel del mar durante el pico de la marejada. El mayor impacto se observó en la zona norte y sur (Figura 38e). En contraste, el caso futurístico para el año 2100 en donde el nivel del mar se incrementó 0.38 m, fue el segundo escenario con mayor impacto por inundación, a pesar de que el arrecife de coral estuviera degradado (Figura 38f). Por lo tanto se demuestran tres cosas:

un arrecife de coral saludable proporciona mejor protección ante los impactos por inundación (Figura 38b); la energía de las ondas IG está relacionada al impacto por erosión e inundación por overwash (Figura 38d); y por último el daño a la línea de costa está relacionado al incremento del nivel del mar (Figura 38e y Figura 38f).

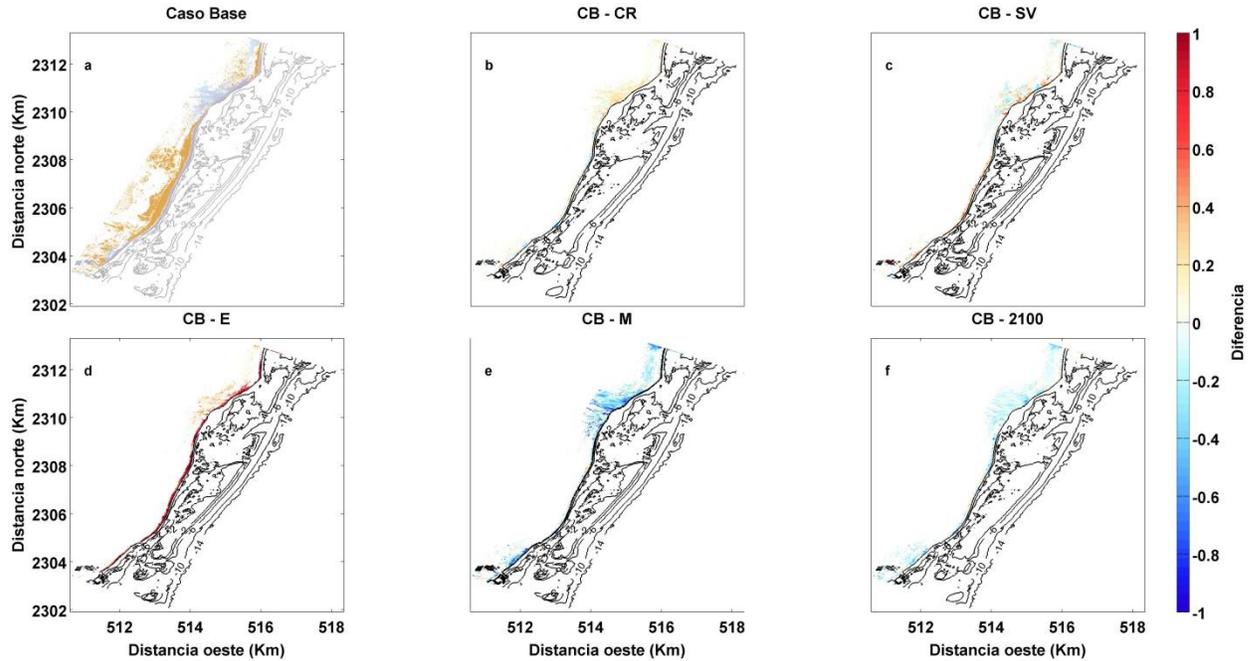


Figura 38. Diferencias en el impacto por inundación de overwash respecto al caso base. a) Zonas de inundación (azul) durante el pico de la tormenta caso base. b) Diferencia de resultados CB vs AR. c) Diferencia de resultados CB vs SV. d) Diferencia de resultados CB vs E. e) Diferencia de resultados CB vs M. f) Diferencia de resultados CB vs 2100. Los colores azules indican diferencias negativas respecto al caso base, mientras que los rojos indican diferencias positivas.

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones

En este trabajo se estudió la importancia que tiene el arrecife coralino de Puerto Morelos como protector ante el impacto de erosión por el oleaje de tormenta utilizando XBeach, un modelo numérico desarrollado y mejorado por Deltares para evaluar la evolución de la línea de costa ante el oleaje incidente sobre arrecifes de coral. La importancia de los coeficientes friccionales se denotó al realizar la validación en una dimensión (1D), utilizando datos del canal de oleaje de la Universidad de Michigan, en donde se mostró que la altura del oleaje dependerá de la rugosidad y fricción del fondo representados por f_w y c_f respectivamente; así como de la formulación de rompimiento de oleaje utilizado. Posteriormente, la validación en dos dimensiones (2D), se calibró con algunos registros de oleaje obtenidos con 5 instrumentos durante el paso del huracán Wilma durante octubre del 2005 y algunos datos de línea de costa obtenidos por LiDAR. Para evaluar la importancia del arrecife coralino se compararon dos escenarios: uno donde el arrecife de coral se consideró saludable, y otro donde el arrecife coralino se encuentra degradado. En ambos se evaluó el impacto de los diferentes forzamientos como oleaje, marea, viento y energía infragravitatoria, y se identificaron aquellos asociados al impacto de erosión costera. También se mostraron los posibles impactos a los que se encuentra sujeta esta zona si el arrecife coralino se ha deteriorado. Por lo tanto, las conclusiones y recomendaciones principales de este trabajo son:

- El arrecife de coral de Puerto Morelos provee protección a la línea de costa ante el oleaje de tormenta, principalmente sobre la zona central debido a la morfología particular del arrecife en esa zona. Sin embargo el grado de protección dependerá del nivel del mar que a la vez dependerá de la magnitud del viento.
- La energía de frecuencia baja (ondas infragravitatorias) es un factor de gran importancia en los procesos de erosión costera, en particular en la zona norte donde se tiene menor cobertura de arrecife coralino.
- De los escenarios que se estudiaron, los que tuvieron mayor impacto para la línea de costa fueron el caso marejada (en el que se incrementó el nivel del agua durante el pico de la tormenta) y el caso futurístico (donde el nivel del mar se incrementó 0.38 m).

- Para una mejor aproximación y reproducción de la hidrodinámica es recomendable utilizar forzamientos a partir de mediciones reales como la magnitud, dirección del viento y marea.
- Para poder realizar una validación cuantitativa ante el impacto de erosión por las condiciones de oleaje de huracán es recomendable tener datos previos y posteriores al paso del evento.
- Para evaluar en mayor detalle la capacidad que ofrece el arrecife coralino ante el impacto de erosión por condiciones de huracán es recomendable simular un escenario adicional donde la estructura coralina haya sido removida por completo.

Literatura citada

- Aagaard, T. & Greenwood, B. 1994, Suspended sediment transport and the role of infragravity waves in a barred surf zone, *Marine Geology*, 118(1–2), 23-48.
- Aagaard, T. & Greenwood, B. 1995, Suspend sediment transport and morphological response on a dissipative beach, *Continental Shelf Research*, 15(9), 1061-1086.
- Agardy, T. & Alder, J. 2005, Ecosystems and Human Well-Being: Current State & Trends Vol. 1, edited by R. Hassan, R. Scholes & N. Ash, p. 36, Island Press.
- Álvarez, E. , Rubio, R. & Ricalde, H. 2006, Shoreline restored with geotextile tubes as submerged breakwaters, *Geosynthetics*, 24(3), 20-27.
- Andrews, D. G. & McIntyre, M. E. 1978, An exact theory of nonlinear waves on a Lagrangian-mean flow, *Journal of Fluid Mechanics*, 89, 609-646.
- Arakawa, A. & Lamb, V. R. 1977, *Methods of Computational Physics*, 173-265 pp., New York: Academic Press.
- Beach, R. A. & Sternberg, R. W. 1988, Suspended sediment transport in the surf zone: Response to cross-shore infragravity motion, *Marine Geology*, 80(1–2), 61-79.
- Briggs, M. J. & Demirbilek, Z. 1996, Wave-current interaction in inlets, paper presented at Proceedings 25th *Coastal Engineering Conference*, ASCE, pp. 1219-1232.
- Cordeira-Estrada, S. , Heege, T. , Kolb, M. , Ohlendorf, S. , Uribe, A. , Müller, A., *et al.* 2012, Benthic habitat and bathymetry mapping of shallow waters in Puerto morelos reefs using remote sensing with a physics based data processing, in *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 4383- 4386.
- Coronado, C. , Candela, J. , Iglesias-Prieto, R. , Sheinbaum, R. , López, M. & Ocampo-Torres, F. J. (2007), On the circulation in the Puerto Morelos fringing reef lagoon, *Coral Reefs*(26), 149-163.
- Daly, C. , Roelvink, D. , van Dongeren, A. R. & McCall, R. T. (2010), Short wave breaking effects on low frequency waves, *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32), waves.20.
- Darwin, C. R. (1842), *On the structure and distribution of coral reefs. Being the first part of the geology of the voyage of the Beagle, under the command of Capt. Fitzroy, R.N. during the years 1832 to 1836*, London: Smith Elder and Co.
- Demirbilek, Z. , Nwogu, O. G. & Ward, D. L. (2007), Laboratory study of wind effect on runup over fringing reefs. Report 1: Data report, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Miss.
- Elfrink, B. & Baldock, T. (2002), Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: a review and perspectives, *Coastal Engineering*, 45(1), 149-167.
- Elgar, S. , Gallagher, E. L. & Guza, R. T. (2001), Nearshore sandbar migration, *Journal of Geophysical Research*, 106(C6), 11623-11627.

- Emery, K. O. & Kuhn, G. G. (1982), Sea cliffs: their processes, profiles, and classification., *Geological Society of America Bulletin*, 93(7), 644-654.
- Falter, J. L. , Atkinson, M. J. & Merrifield, M. A. (2004), Mass transfer limitation of nutrient uptake by a wave-dominated reef flat community/, *Limnology*, 49(5), 1820-1831.
- Ferrario, F. , Beck, M. W. , Storlazzi, C. D. , Micheli, F. , Shepard, C. C. & Airoidi, L. (2014), The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation, *Natural Communications*, 5(3794), 9.
- Galappatti, R. & Vreugdenhill, C. B. (1985), A depth integrated model for suspended transport, *Journal for Hydraulic Research*, 23(4), 359-377.
- Harley, M. , Armaroli, C. & Ciavola, P. (2011), Evaluation of XBeach predictions for a real-time warning system in Emilia-Romagna, Northern Italy, *Journal of Coastal Research*, 64(S1), 1861-1865.
- Hearn, C. J. (1999), Wave-breaking hydrodynamics within coral reef systems and the effect of changing relative sea level, *Journal of Geophysical Research*, 104(12), 007-019.
- Herbers, T. H. C. , Elgar, S. & Guza, R. T. (1995), Generation and propagation of infragravity waves, *Journal of Geophysical Research*, 100, 24863-24872.
- Jonsson, I. G. (2011), Wave boundary layers and friction factors, paper presented at Proceedings 10th Coastal Engineering Conference, Tokyo, pp. 127-148.
- Kaplan, J. & DeMaria, M. (1995), A Simple Empirical Model for Predicting the Decay of Tropical Cyclone Winds After Landfall, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 34(11), 2499-2512.
- Klopman, G., and M.J.F. Stive. (1989), Extreme waves and wave loading in shallow water, *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32), waves.63.
- Komar, P. D. (1976), *Beach Processes and Sedimentation*, Prentice-Hall.
- Lee, G.-h. , Nicholls, R. J. & Birkemeier, W. A. (1998), Storm-driven variability of the beach-nearshore profile at Duck, North Carolina, USA, 1981–1991, *Marine Geology*, 148(3–4), 163-177.
- Longuet-Higgins, M. S. & Stewart, R. W. (1962), Radiation stress and mass transport in gravity waves, with applications to "surf beats", *Journal of Fluid Mechanics*, 13, 481-504.
- Mariño-Tapia, I. , Enriquez, C. , Silva, R. , Mendoza-Baldwin, E. , Escalante-Mancera, E. & Ruiz-Renteria, F. (2014), Comparative morphodynamics between exposed and reef protected beaches under hurricane conditions, *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), sediment-55.
- McCall, R. , van Thiel de Vries, J. , Plant, N. G. , van Dongeren, A. , Roelvink, J. , Thompson, D. M., *et al.* (2010), Two-dimensional time dependent hurricane overwash and erosion modeling at Santa Rosa Island, *Coastal Engineering*, 57(7), 668-683.
- Mulcahy, N. , Kennedy, D. M. & Blanchon, P. (2016), Hurricane-induced shoreline change and post-storm recovery: northeastern Yucatan Peninsula, Mexico, *Journal of Coastal Research*, 75(sp1), 1192-1196.

- Munk, W. H. (1949), Surf beats, in *Transactions of the American Geophysical Union*, 30, 849,854.
- Nwogu, O. & Demirbilek, Z. (2010), Infragravity Wave Motions and Runup over Shallow Fringing Reefs, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 136(6), 295-305.
- Odériz, I. , Mendoza, E. , Leo, C. , Santoyo, G. , Silva, R. , Martínez, R., *et al.* (2014), An Alternative Solution to Erosion Problems at Punta Bete-Punta Maroma, Quintana Roo, Mexico: Conciliating Tourism and Nature, *Journal of Coastal Research*, 71(SI), 75-85.
- Pandolfi, J. M. , Bradbury, R. H. , Sala, E. , Hughes, T. P. & Bjorndal, K. A. (2003), Global trajectories of the long-term decline of coral reef ecosystems., *Science*, 301, 955-958.
- Pasch, R. J. , Blake, E. S. , Cobb III, H. D. & P., R. D. (2006), Tropical cyclone report: Hurricane Wilma, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Hurricane Center.
- Philips, O. M. (1977), *The dynamics of the upper ocean*, 366 pp., Cambridge University Press.
- Quataert, E. , Storlazzi, C. , van Rooijen, A. , Cheriton, O. & van Dongeren, A. (2015), The influence of coral reefs and climate change on wave-driven flooding of tropical coastlines, *Geophysical Research Letters*(42), 6407-6415.
- Raubenheimer, B. & Guza, R. T. (1996), Observations and predictions of run-up, *Journal of Geophysical Research*, 101, 25575-25587.
- Reniers, A. , Roelvink, D. & Thornton, E. B. (2004), Morphodynamic modeling of an embayed beach under wave group forcing, *Journal of Geophysical Research*, 109(C01030), 22.
- Roelvink, D. (1993), Dissipation in random wave group incident on a beach., *Coastal Engineering*, 19, 127-150.
- Roelvink, D. , Reniers, A. , Van-Dongeren, A. , Van-Thiel-de-Vries, J. , McCall, R. & Lescinski, J. (2009), Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands, *Coastal Engineering*, 56(11-12), 1133-1152.
- Ruessink, B. G. , Houwman, K. T. & Hoekstra, P. (1998), The systematic contribution of transporting mechanisms to the cross-shore sediment transport in water depths of 3 to 9 m, *Marine Geology*, 152(4), 295-324.
- Ruessink, B. G. , Miles, J. R. , Feddersen, F. , Guza, R. T. & Elgar, S. (2001), Modeling the alongshore current on barred beaches, *Journal of Geophysical Research*, 106(C10), 22451-22463.
- Ruiz de Alegria-Arzaburu, A. , Mariño-Tapia, I. , Enriquez, C. , Silva, R. & González-Leija, M. (2013), The role of fringing coral reefs on beach morphodynamics, *Geomorphology*, 198(0), 69-83.
- Russell, P. E. (1993), Mechanisms for beach erosion during storms, *Continental Shelf Research*, 13(11), 1243-1265.
- Sheppard, C. , Dixon, D. J. , Gourlay, M. , Sheppard, A. & Payer, R. (2005), Coral mortality increases wave energy reaching shores protected by reef flats: Examples from Seychelles, *Coastal and Shelf Science*, 64(2-3), 223-234.

- Soulsby, R. (1997), *Dynamics of marine sands*, 272 pp., Thomas Telford Publications, London.
- Storlazzi, C. D. , Ogston, A. S. , Bothner, M. H. , Field, M. E. & Presto, M. K. (2004), Wave- and tidally-driven flow and sediment flux across a fringing coral reef: Southern Molokai, Hawaii, *Continental Shelf Research*, 24(12), 1397-1419.
- Torres-Freyermuth, A. , Mariño-Tapia, I. , Coronado, C. , Salles, P. , Medellín, G. , Pedrozo-Acuña, A., *et al.* (2012), Wave-induced extreme water levels in the Puerto Morelos fringing reef lagoon, *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 12, 3765-3773.
- van Dongeren, A. , Lowe, R. , Pomeroy, A. , Minh-Trang, D. , Roelvink, D. , Symonds, G., *et al.* (2013), Numerical modeling of low-frequency wave dynamics over a fringing coral reef, *Coastal Engineering*, 73, 178-190.
- Walstra, D. J. R. , Roelvink, D. & Groeneweg, J. (2000), Calculation of wave-driven currents in a 3D mean flow model, paper presented at 27th International Conference on Coastal Engineering, pp. 1050-1063, Sydney, Australia.
- WMO (1998), *Guide to wave analysis and forecasting Rep.*, Geneva, World Meteorological Organization.
- Wolanski, E. & Sarsenski, J. (1997), Larvae dispersion in coral reefs and mangroves, *American Scientist*, 85(3), 236-243.
- Young, I. R. (1989), Wave transformation over coral reefs, *Journal of Geophysical Research*, 94(C7), 9779-9789.
- Young, I. R. , Zieger, S. & Babanin, A. V. (2011), Global trends in wind speed and wave height, *Science*, 332, 4.
- Zijlema, M. , Stelling, G. & Smit, P. (2011), SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters, *Coastal Engineering*, 58(10), 992-1012.

