



Universidad Nacional Autónoma de México

Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería
Maestría en Ingeniería Civil (Área Hidráulica)
Campo disciplinario: Ingeniería de costas y ríos

**“Modelación de la respuesta morfológica a espigones y rompeolas sumergidos sobre una
playa dominada por brisas”**

Tesis

Que para optar por el grado de
Maestro en Ingeniería

Presenta:

Eduardo López Ramade

Director de Tesis:

Dr. Alec Torres Freyermuth
Unidad Académica Sisal del Instituto de Ingeniería

Sisal, Yucatán abril 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Medellín Mayoral Gabriela

Secretario: Dr. Appendini A. Christian M.

1^{er}. Vocal: Dr. Torres Freyermuth Alec

2^{do}. Vocal: Dr. López Gonzáles José

3^{er}. Vocal: Dr. Patrick Mulligan Ryan

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Sisal, Yucatán , México

Dr. Torres Freyermuth Alec

NOMBRE



FIRMA

Resumen

En este trabajo se implemento el modelo numérico Delft3D para evaluar la respuesta morfológica a espigones y rompeolas sumergidos durante condiciones de brisas marinas en la costa norte de Yucatán. El modelo fue calibrado y validado utilizando datos de alta resolución colectados durante el trabajo de Medellín et al. (2018) . Posteriormente se aplico el modelo para simular el efecto de rompeolas sumergidos sobre la morfología y se compraron con mediciones de campañas topo-batimétricas tomadas por Torres-Freyermuth et al. (2019). Finalmente, se realizo un estudio paramétrico de rompeolas sumergidos utilizando distintas características de diseño de las estructuras para la costa norte de Yucatán.

Los resultados muestran que el modelo es capaz de reproducir satisfactoriamente las variaciones diurnas en el oleaje y las corrientes asociadas a los eventos de brisas marinas mediante ajustes específicos sobre los parámetros libres del modelo. Para los cambios morfológicos, en el caso del espigón el modelo reproduce adecuadamente los patrones de acreción corriente arriba de la estructura, pero carece en la reproducción de los patrones de erosión corriente abajo. En el caso de rompeolas sumergidos, el modelo tiende a sobrestimar la magnitud de la acreción y la posición del punto máximo de acreción difiere con respecto a mediciones en campo. Mediante un análisis de este comportamiento se infiere que las deficiencias están asociadas a una sobre estimación en la velocidad de corrientes sobre la zona de swash.

Las ecuaciones obtenidas por el estudio paramétrico pueden utilizarse como una guía para el diseño de rompeolas para la costa norte de Yucatán. La ecuación relacionada a la estructura con un coeficiente transmisión de 0.75 muestra el menor error en comparación a mediciones en campo, lo cual coincide con el coeficiente aproximado para las estructuras generalmente utilizadas en la zona.

A mis padres y amigos.

“...in this terrifying world, all we have are the connections that we make”- BoJack Horseman

Agradecimientos

A mis padres, por todo su apoyo incondicional, su cariño y sus enseñanzas.

A Nancy, por su apoyo, cariño y compañía en nuestras aventuras a lo largo de esta etapa. 3>

A mis amigos y colegas del LIPC, quienes estuvieron en momentos de estrés y de fiesta, Paola, Cesar, los Leos, Estefanía y Wally.

A Misael, Jorge y Andrea, quienes a pesar del tiempo y la distancia siempre me han acompañado.

A mi maestro y director de tesis Dr. Alec Torres Freyermuth por proporcionarme los datos y las herramientas necesarias para elaborar esta tesis. Gracias por su paciencia, la dedicación de su tiempo y por todo el apoyo que me brindo para fomentar mi desarrollo académico y profesional en las áreas de mi interés.

A mi maestra y sinodal, Dra. Gabriela Medellín, por proporcionarme datos y guiarme con el procesamiento de ellos, además de sus revisiones y notas de este trabajo.

A mis sinodales, Dr. Christian M. Appendini y al Dr. José López, por su apoyo en la revisión y resolución de dudas durante la elaboración de este trabajo.

To Dr. Ryan Patrick Mulligan, for receiving me at Queen's University for a research stay and helping with the modelling aspect of this work.

Al apoyo técnico del ISC Gonzalo Uriel Martín Ruiz y al resto de los técnicos e investigadores del LIPC.

Al CONACYT por la beca 2018-000068-02NACF-23014 para realizar la Maestría en Ingeniería Civil en la UNAM y a el financiamiento de los proyectos Investigación Científica Básica CONACTY (CB-2016-284430), Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera (número de beca: 299063) y PAPIIT DGAPA-UNAM (IN101218).

Índice

Capítulo I. Introducción.....	1
Planteamiento del problema	2
Objetivos	2
Antecedentes	3
Capítulo II. Revisión de literatura.....	5
Procesos Costeros.....	5
Estructuras de protección costeras	6
Modelación numérica	9
Capítulo III. Área de estudio.....	13
Clima marino	14
Capítulo IV. Análisis y procesamiento de datos de campo	19
Experimento de espigón temporal (Medellín et al., 2018).....	19
Monitoreo de rompeolas sumergidos (Torres-Freyermuth et al.,2019)	25
Capítulo V. Modelo numérico	30
Descripción del modelo	30
Delft3D-WAVE.....	30
Delft3D-FLOW	32
Delft3D-SED.....	34
Estabilidad numérica.....	35
Acoplamiento.....	35
Implementación del modelo numérico	36
Calibración	40
Capítulo VI. Resultados	42
Validación.....	42
Aplicación del modelo.....	47
Estudio Paramétrico.....	48
Capítulo VII. Discusión	53
Capítulo VIII. Conclusiones.....	58
Referencias.....	60
Apéndice I. Análisis de sensibilidad de parámetros del modelo Delft3D	65
Apéndice II. Análisis de estructuras dentro del modelo	74
Apéndice III. Procedimiento de calibración	80

Capítulo I. Introducción

La zona costera tiene una gran importancia social, económica y ambiental. La población se ha incrementado a lo largo de las últimas décadas a nivel global. Por lo tanto, es necesario contar con programas de manejo sustentable y de protección costera debido a que es vulnerable a eventos de erosión e inundación asociados a tormentas. La erosión es un proceso natural en la cual la línea de costa retrocede por efectos de las variaciones del nivel del mar, energía del oleaje, aportes de sedimento y a la topografía existente. En ocasiones la erosión también ocurre debido a la intervención humana, generalmente relacionada a interrupciones en el transporte de sedimento ocasionado por estructuras y asentamientos sobre la costa o a la obstrucción total o parcial del transporte de sedimentos (Cooper y McKenna, 2008).

El uso de estructuras de protección costera duras, como revestimientos, rompeolas y espigones, son comúnmente implementados como método de mitigación de erosión. La implementación de estas estructuras es de los temas más complejos, controversiales y poco comprendidos a lo largo de la costa (Griggs, 2005). Factores como la dinámica local, la variación de técnicas de construcción, avances tecnológicos, y la urbanización de la costa hacen que los diseños de estructuras varíen de costa a costa (Walker, 1988). El diseño específico de una estructura afecta en gran medida su impacto sobre los procesos costeros y la respuesta morfológica de la playa (Nordstrom, 2000).

La costa norte de Yucatán reporta problema de erosión en algunas zonas. Este problema se debe al incremento de asentamientos sobre la costa y a la intervención antropogénica para mitigar la erosión mediante el uso de estructuras (Appendini, Salles, Mendoza, López, y Torres-Freyermuth, 2012), como espigones y rompeolas. Los espigones comenzaron a utilizarse partir de los años 1950s, usualmente contruidos por roca, madera o costales de arena. En los 1990's se comenzaron a implementar rompeolas sumergidos como una nueva alternativa (Meyer-Arendt, 2004). Sin embargo, ninguna de las estructuras ha probado ser totalmente efectiva, principalmente porque la mayoría carece de un diseño riguroso y a la falta de información confiable de la hidrodinámica y morfodinámica de la zona. De las estructuras mencionadas, se ha reportado que los espigones presentan un mayor impacto negativo en esta zona debido a su gran cantidad (Tereszkiewicz, McKinney, y Meyer-Arendt, 2018).

En años recientes se ha aplicado satisfactoriamente el uso de modelos numéricos como una herramienta para el diseño de estructuras y la evaluación de sus posibles impactos en zonas aledañas a corto y largo plazo (Eslami Arab, 2003; Eslami, Vanrijn, Walstra, Lujendijk, & Stive, 2010; Trouw, Zimmermann, Mathys, Delgado, & Roelvink, 2012; van der Baan, 2013; Vlijm, 2011). Los modelos facilitan el estudio de los procesos morfodinámicos e hidrodinámicos alrededor de estructuras costeras considerando las condiciones ambientales específicas de la zona de interés en largas escalas de tiempo. Esto ha permitido mejorar el diseño y el manejo de estructuras costeras.

En este trabajo se plantea el uso del modelo numérico Delft 3D para estudiar los efectos en la hidrodinámica y morfodinámica de playas ante la presencia de espigones y rompeolas en la costa norte de Yucatán. El uso de este modelo requiere de una calibración y validación apropiada al sitio de estudio, para la cual se utilizaron mediciones realizadas en estudios previos de la zona. De esta forma el modelo puede ser aplicado para analizar los efectos de distintos tipos de estructuras y además desarrollar fórmulas empíricas que contribuyan a mejorar su diseño en la zona de estudio.

Planteamiento del problema

En la costa del estado de Yucatán se han instalado espigones y rompeolas separados de la costa para mitigar el problema de erosión de playas. Sin embargo, en la mayoría de los casos, su construcción ha generado problemas de erosión en playas aledañas. Por lo tanto, es necesario el estudio de sus efectos sobre la hidrodinámica y la morfodinámica de playas para así poder desarrollar herramientas para el diseño de estructuras acorde a la dinámica costera en la región.

Objetivos

El objetivo general de este trabajo es implementar un modelo numérico para el estudio de la interacción del oleaje con estructuras costeras y sus implicaciones en la morfodinámica de playas. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Calibrar y validar el modelo numérico Delft3D para simular hidrodinámica y morfodinámica alrededor de estructuras de protección costera de pequeña escala en la costa norte de Yucatán.
- Utilizar el modelo numérico para el desarrollo de una fórmula paramétrica para predecir la respuesta de la playa en presencia de rompeolas sumergidos.
- Identificar limitaciones y capacidades del modelo.

Antecedentes

Existen varios estudios previos enfocados a mejorar el entendimiento de la dinámica en la costa norte de Yucatán. Appendini et al. (2012) determinaron el transporte potencial neto a lo largo de la costa de Yucatán y las zonas propensas a erosión, acreción, y estabilidad basada en el gradiente del transporte. Las diferencias entre las predicciones y las observaciones en el campo son debidas a la presencia de los Puertos de Abrigo y estructuras costeras. En el trabajo de Mendoza, Ojeda, Meyer-Arendt, Salles, y Appendini (2015) presentaron índices de vulnerabilidad a erosión e inundación para la costa de Yucatán, en el cual encontraron que aquellas zonas con mayor urbanización, falta de dunas vegetadas y playas angostas, se encuentran en mayor riesgo a procesos de erosión. El trabajo de Cuevas Jiménez, Euán Ávila, Villatoro Lacouture, y Silva Casarín (2016) también muestra índices de vulnerabilidad a través de métodos de SIG, en esta ocasión incluyen la orientación de la playa como un factor importante para determinar la vulnerabilidad. En García-Rubio, Huntley, y Russell (2012) utilizaron imágenes satelitales para obtener tasas de erosión y estimaron que Progreso tiene un retroceso de alrededor 2 m/año debido a su alta urbanización sobre la costa y su orientación. Al igual que Appendini et al. (2012), indican que la orientación de la costa es relevante ya que tiene un efecto directo sobre el ángulo de incidencia del oleaje y por lo tanto en el gradiente de transporte.

El uso de espigones de pequeña escala ha demostrado ser un método ineficiente para preservar las playas en la costa norte de Yucatán. Tradicionalmente se fabricaron espigones hechos de madera y rocas con una longitud aproximada de 15 m y una elevación de 0.5 m sobre el nivel del mar (Meyer-Arendt, 2004). Más recientemente, se han reemplazado estos materiales por sacos de arena y concreto (Tereszkiewicz, McKinney, y Meyer-Arendt, 2018). En el trabajo de Lira-Pantoja et al. (2012) se analizó el efecto del puerto de altura de Progreso sobre las playas de Chelem mediante mediciones en campo y modelación numérica. El puerto ocasiona una pérdida de alrededor de 1 m/año en la zona. Las mediciones de campo muestran que el uso de espigones de menor escala para mitigar el efecto del puerto de Progreso produce un efecto adverso corriente abajo de las estructuras, incrementando la erosión. En el trabajo de Tereszkiewicz et al. (2018) se evaluaron alrededor de 305 espigones desde Yucalpetén hasta el Puerto de Chuburná, en general la mayoría muestra ser ineficiente, el 45% de las estructuras se encuentran en buen estado y el resto se encuentran deterioradas o abandonadas. Su ineficiencia puede ser atribuida a un mal diseño ya que es difícil estandarizar los procesos de construcción de espigones debido a que su diseño debe contemplar las condiciones ambientales específicas del sitio. En el trabajo de Medellín et al. (2018) se estudió la resiliencia de la costa ante un espigón impermeable de 15 m de largo. Utilizando mediciones topo-batimétricas de alta resolución se observaron los cambios en la morfología de la playa durante la presencia de la estructura y su recuperación al removerla. La estructura acumuló alrededor de 70 m³, corriente arriba de la estructura, en 24 horas. De manera similar, Torres-Freyermuth, Hofman, Tuz-Pech, Medellín, y Roos (2020) implementaron un espigón permeable de 15 m compuesto de hexápodos de concreto y midieron los cambios morfológicos de la playa. En ambos estudios las estructuras muestran buen efecto de acreción corrientes arriba de la estructura, pero para el caso del espigón permeable los efectos adversos corriente abajo son menores.

En años recientes la implementación de rompeolas sumergidos se han propuesto como una alternativa al uso de espigones. Alvarez, Rubio, y Ricalde (2007) analizaron el uso de geotubos para generar la acreción de playa sin disminuir el transporte de sedimento hacia las zonas adyacentes. Estas estructuras muestran ser eficientes, pero se requiere de su monitoreo a largo plazo. El trabajo de Torres-Freyermuth, Medellín, Mendoza, Ojeda, y Salles (2019) realizó campañas topo-batimétricas a lo largo de un año para

medir el efecto de los rompeolas sumergidos tipo Reef-Balls y geotubos en la morfología de la playa. Los resultados del trabajo muestran una sensibilidad al coeficiente de transmisión, su geometría, su orientación y la distancia a la playa. Además, muestran que los tubos geotextiles son muy frágiles ante daños físicos, lo cual afecta su eficiencia y modifica drásticamente su tipología. Las observaciones en el campo muestran efectos adversos corriente abajo, los cuales son mayores en el caso de los geotubos. Asimismo, este estudio pone de manifiesto la necesidad de mejorar el diseño de este tipo de estructuras en la región.

El estudio de los efectos de las estructuras costeras en la hidrodinámica y morfodinámica mediante mediciones de campo puede ser costoso y en general es difícil obtener una alta resolución temporal y espacial. Una alternativa es el uso de modelos numéricos capaces de simular los procesos hidrodinámicos y morfodinámicos. Existen pocos trabajos de simulación morfológica ante estructuras en la costa norte de Yucatán, de los cuales sobresale el trabajo de González-Herrera, Solís-Pimentel, Zetina-Moguel, y Mariño-Tapia (2015) y el de Ruiz-Martínez et al. (2015). En estos trabajos se evaluaron distintos esquemas de protección, como espigones, rompeolas y rellenos de playa. En el caso de González-Herrera et al. (2015) se utilizó el modelo GENESIS y en el de Ruiz-Martínez et al. (2015) se implementó el modelo Delft3D, ambos modelos muestran resultados satisfactorios simulando cambios morfológicos alrededor de estructuras de protección. Sin embargo, estos trabajos no presentan una validación hidrodinámica y morfodinámica específica al sitio de estudio, debido a que no se contaban con mediciones de campo de alta resolución.

Con base en la revisión de artículos mencionados, este trabajo utiliza el modelo Delft3D para simular los cambios hidrodinámicos y morfológicos generados por la presencia de estructuras costeras en la costa norte de Yucatán. El modelo será calibrado y validado utilizando mediciones de campo de alta resolución, con escalas de horas a días, colectados por Medellín et al. (2018) y Torres-Freyermuth et al. (2019).

Capítulo II. Revisión de literatura

Procesos Costeros

Una onda puede definirse como un movimiento periódico en el tiempo y el espacio. En el océano ese movimiento generalmente se refiere al oleaje, responsable de la propagación de la energía, que se observa por el desplazamiento periódico de la superficie del mar. Las olas son generadas principalmente por el viento, aunque también existen otros tipos de ondas como las mareas generadas por fuerzas de atracción astronómicas y los tsunamis generados por el desplazamiento del fondo marino o deslizamientos. Una ola puede caracterizarse por su altura (H), su longitud (L) y su periodo (T). La altura de ola se define como la distancia vertical entre el valle y la cresta de una onda. La longitud de onda es la distancia horizontal entre cresta y cresta. El periodo se define como el tiempo requerido para que dos crestas consecutivas pasen por el mismo punto fijo en el espacio. El estudio de estas ondas es importante para aplicación de ingeniería costera. En aguas profundas y zonas costeras los parámetros del oleaje, como altura y periodo, son importantes para el diseño de estructuras (Lin, 2008)

A medida que el oleaje de agua profunda se propaga hacia aguas someras sufre de varios procesos de transformación como refracción, difracción, reflexión y asomeramiento por efectos del fondo, y eventualmente la rotura (Tang, Li, Meng, Shen, & Zhang, 2018). El asomeramiento ocurre cuando la ola se acerca a aguas someras, donde se reduce su velocidad y longitud de onda y aumenta su altura. Si el proceso continúa se incrementa el peralte de la ola hasta que se vuelve inestable y eventualmente rompe. Al romper la ola hay una transferencia de momento hacia el agua alrededor, lo que genera las corrientes transversales y longitudinales. Si el oleaje se propaga con un ángulo oblicuo a los contornos batimétricos, este se refracta, debido a que la celeridad de la onda depende de la profundidad local, la parte de la onda en agua menos profunda se traslada a menor velocidad que aquella en mayor profundidad ocasionando que la ola se alinee a los contornos batimétricos. La reflexión ocurre cuando la energía es reflejada total o parcialmente al interactuar con un obstáculo o la playa. La difracción se refiere a la cesión lateral de la energía de la ola a lo largo de su cresta y ocurre al chocar con un objeto o una estructura.

La morfodinámica de la zona costera depende de las características del sedimento y la acción combinada de viento, oleaje y corrientes. En la zona de surf, el oleaje ocasiona cambios considerables en el nivel del mar y puede inducir fuertes corrientes. La batimetría y el ángulo de incidencia del oleaje son factores importantes que determinan el campo de corrientes sobre la zona de surf (Franz et al., 2017). Un ángulo oblicuo a la costa genera corrientes longitudinales fuertes, mientras que un ángulo normal ocasiona fuertes corrientes transversales, con dominio en el transporte de sedimento longitudinal y transversal, respectivamente.

Los procesos en la propagación de una onda de oleaje son muy complejos, y aún más complicados en un estado de oleaje real cuando existen varias olas de diferentes tamaño, frecuencias y direcciones de propagación. La teoría más simple para describir los movimientos de una ola es la teoría de Airy, también conocida como teoría lineal o de pequeña amplitud. Esta teoría utiliza simplificaciones como que el fluido es incompresible e irrotacional, un fondo impermeable y una onda de pequeña amplitud. Esta teoría omite los procesos no lineales, por lo tanto, no aplica en aguas someras. Existen otras teorías de mayor orden como, la teoría de Stokes que incluye los efectos no lineales. Para fondos con profundidad variable se han desarrollado las ecuaciones de pendiente-suave (*mild-slope*) por Berkhoff (1972). Además, se ha

desarrollado una teoría general que incorpora todas las ecuaciones de aguas someras derivada a partir de las ecuaciones Boussinesq. Estas ecuaciones han sido utilizadas exitosamente para aplicaciones de la ingeniería costera (Dean & Dalrymple, 2001; Pintado, Malvárez, & Navas, 2010).

Estructuras de protección costeras

Las estructuras de protección costera son utilizadas para mitigar el daño a personas, propiedades, infraestructura de comunicación y de transporte ante eventos de fuerza extrema como tsunamis o huracanes los cuales pueden causar la erosión de playas (Dhanak & Xiros, 2016). Se distinguen dos tipos de estructuras en general, suaves y duras. Esta sección se enfoca principalmente en el segundo tipo. Las estructuras duras se utilizan para prevenir la erosión de la playa o impedir el transporte longitudinal del sedimento. Entre las estructuras comúnmente implementadas destacan los espigones y rompeolas separados de la costa (Dean & Dalrymple, 2001).

Espigones

Los espigones son estructuras perpendiculares a la costa que interrumpen el transporte de sedimentos longitudinal de tal manera que se deposita corriente arriba de la estructura y erosiona corriente abajo (Dhanak & Xiros, 2016). Desde el punto de vista de defensa costera, el espigón debe retener suficiente arena para resistir el retroceso de la playa durante eventos de tormenta. Esto se logra mediante el cambio de orientación de la línea de costa entre cada espigón hasta alinearse con la dirección del oleaje dominante y así reducir el transporte litoral de arena (Reeve, Chadwick, & Fleming, 2018)

Existen distintos tipos de espigones basados en sus características de permeabilidad, su longitud, su altura y forma. Los espigones pueden ser permeables o impermeables, donde los impermeables limitan todo el paso del sedimento mientras que los permeables permiten un flujo de agua y una fracción del transporte de sedimento a través de ellos. Pueden ser contruidos por rocas, madera o pilotes. Los espigones permeables han demostrado ser efectivos para retener sedimento sin efectos adversos corriente abajo. Si el espigón atraviesa toda la zona de surf, se considera largo, si sólo cubre una parte de la zona de surf es corto. La altura del espigón se clasifica en altos o bajos, en espigones bajos el sedimento puede cruzar sobre la cresta de la estructura. La forma del espigón puede variar dependiendo de su propósito, puede ser de en una línea, o en forma de T. Los de línea interrumpen y disipan las corrientes generadas por la rotura del oleaje. Los espigones en T reducen la altura de la ola mediante procesos de difracción y los espigones en Y se consideran una variación de los de T (*Coastal Engineering Manual.*; Dean & Dalrymple, 2001; Reeve et al., 2018).

La orientación, longitud, altura, permeabilidad y espaciamiento entre espigones son algunos de los parámetros que determinan el cambio en la línea de costa (*Coastal Engineering Manual*, n.d.). Trabajos como el de Diwedar (2015) han parametrizado algunas de estas variables para proponer ecuaciones de diseño de espigones. Sin embargo, los resultados solo aplican a las condiciones hidrodinámicas y morfodinámicas específicas de su sitio de estudio debido a la complejidad de los procesos que interactúan con las estructuras. Por esta razón, algunos autores como Dean & Dalrymple, (2001); Kraus, Hanson, & Blomgren, (1994) y Reeve et al., (2018) proponen diversas recomendaciones y aproximaciones generales para un buen diseño. A continuación, se presentan algunas de estas recomendaciones por dichos autores.

- Utilizar campos de espigones a lo largo de la costa en vez de una sola estructura, reduce los efectos adversos de erosión que se asocian corriente debajo de la estructura.
- Idealmente el espaciamiento entre espigones deber ser suficiente para que la acreción corriente arriba de la estructura se extienda al siguiente espigón corriente arriba.
- La longitud y el espaciamiento entre estructuras debe considerar todas las posibles combinaciones de altura de ola, periodo y dirección, esto proporcionara una guía para la geometría de los campos de espigones.
- La longitud del espigón debe considerar el rango de mareas, la pendiente de la playa y la cantidad de sedimento atrapado que se requiere.
- El extremo en tierra de la estructura debe conectarse a una estructura que no se erosionó o llegar a sobrepasar la zona de swash tierra adentro
- Durante la construcción de las estructuras deben utilizarse rellenos de arena para reducir la erosión corriente abajo
- La longitud del ultimo espigón corriente abajo es importante, la longitud de los espigones puede reducir gradualmente hasta llegar al último para reducir problemas de erosión corriente abajo
- Los espigones deben ser permeables, para permitir el paso de agua y sedimento, lo que previene erosión corriente abajo y corrientes de retorno.
- Para playas con una gran parte del oleaje predominante en una dirección, la orientación del espigón debe ser perpendicular a la rotura de la ola.

Un buen diseño de espigón puede ser efectivo para controlar el movimiento de la playa. El uso de modelos numéricos puede ayudar considerablemente a obtener el mejor diseño de la estructura y del campo de espigones tomando en cuenta todas las condiciones ambientales específicas a la zona de estudio (Eslami Arab, 2003).

Rompeolas

Los rompeolas son estructuras paralelas a la costa utilizadas en costas donde el régimen de mareas es pequeño. Estas estructuras crean una zona de baja energía de oleaje y de corrientes, lo que lleva a una zona de depositación de arena detrás de la estructura (Reeve et al., 2018). Estas estructuras pueden clasificarse con base a su permeabilidad, si es emergente o sumergido y en el número de estructuras colocadas. Las guías del diseño geométrico de los rompeolas principalmente se basan en la proporción entre la longitud de la estructura y la distancia hacia la costa, y en el espaciamiento entre estructuras y su distancia a la costa.

La acreción generada por un rompeolas unitario emergido ocurre detrás de la estructura y está dominada por los efectos de difracción sobre el oleaje y las corrientes. La acreción comienza con una saliente, la cual continúa creciendo hasta alcanzar un estado de equilibrio. Si la saliente alcanza la estructura se forma un tómbolo. La difracción y la formación del tómbolo están relacionados al ángulo de ataque del oleaje (Dean & Dalrymple, 2001). Una variable importante de calcular es la distancia de la saliente generada por un espigón. Hsu & Silvester, (1990) proponen la siguiente ecuación para predecir esta distancia:

$$\frac{X}{B} = 0.6784 \left(\frac{B}{S} \right)^{-1.2148} \quad (1)$$

donde B es la longitud del rompeolas, S es la distancia de la estructura a la costa, y X es la distancia entre la estructura y el punto máximo de la acreción. Bajo esta relación la formación de un tómbolo ($X/B=0$) se espera cuando $B/S=5.208$.

Los rompeolas sumergidos (también conocidos como rompeolas de arrecife) son una de las alternativas a los rompeolas emergidos. Su principio se basa en inducir a la rotura del oleaje para reducir su energía sobre la costa. A mayor altura del rompeolas, mayor la cantidad de energía que disipa del oleaje. Su principal ventaja es que no tiene un impacto visual sobre la playa, lo cual resulta atractivo para playas recreativas. Pero su desventaja es evidente durante eventos de tormenta ya que el rompeolas sumergido se vuelve ineficiente a medida que incrementa el nivel del mar durante la tormenta.

El efecto de un rompeolas sobre el oleaje incluye asomeramiento, reflexión, difracción y rotura. Todos estos procesos afectan la transmisión de la ola y la acreción detrás de la estructura de una manera compleja. Por esto el coeficiente de transmisión (Kt) es un parámetro útil para representar el impacto de las estructuras y es importante al considerar el diseño de las estructuras (A. Sharif Ahmadian, 2016a). Además de las características del oleaje incidente, este coeficiente depende de las características de la estructura, como, su permeabilidad por su material de construcción, su altura, su ancho y el ángulo de la pendiente de sus caras. Existen algunos estudios para el cálculo de Kt de estructuras sumergidas, pero en el trabajo de Meer, Wang, & Zanuttigh, (2004) se realiza un estudio extenso de diversos diseños de estructuras sumergidas. La siguiente ecuación fue propuesta para estructuras impermeables no porosas:

$$Kt = -0.3 \frac{R_c}{Hs_i} + 0.75 \frac{B}{Hs_i}^{-0.31} (1 - e^{-0.5(\delta)}) \quad \delta = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{Hs_i}{L_o}}} \quad (2)$$

Otra variación popular en el diseño de rompeolas son los sumergidos con una alta permeabilidad, utilizadas comúnmente para generar hábitats para organismos y defensa para la costa, como es el caso de los Reef Balls®. Para estas estructuras las ecuaciones de Meer et al. (2004) no aplican directamente, por lo que Buccino, Del Vita, & Calabrese (2014) realizaron un estudio para determinar el Kt de estas estructuras basado en los diferentes esquemas de colocación de ellas. Para Reef Balls® en línea de un solo nivel se propone la siguiente ecuación:

$$Kt = \frac{1}{1+0.3\left(\frac{R_c}{Hs_i}\right)^{-1.5} b^*} \quad b^* = \frac{B^*}{\sqrt{L_o Hs_i}} \quad B^* = Bv \quad (3)$$

Para las ecuaciones, B es el ancho de la estructura, Hs_i es la altura incidente, L_o es la longitud de onda en agua profunda, R_c es el francobordo, α es el ángulo y v es un coeficiente.

Modelación numérica

La modelación numérica se puede definir como el proceso de replicar el comportamiento real y transformarlo en un resultado numérico comprensible para el usuario (Chau, 2010). Varios modelos y técnicas de modelación se han desarrollado a la actualidad para su aplicación en diferentes áreas de la ingeniería costera. En general los modelos se utilizan para simular la interacción entre corrientes, mareas, ondas internas, oleaje, surgencias, tsunamis, y estructuras costeras. Los modelos pueden aplicarse para evaluar el efecto en la hidrodinámica causado por estructuras y su impacto en la morfodinámica sobre el fondo marino y la línea de costa. La modelación numérica tiende a ser menos costosa en comparación a las mediciones en campo y permite estudiar procesos individuales o evaluar parámetros de diseño específicos de estructuras costeras con mayor resolución espacial (Vlijm, 2011).

Los modelos costeros pueden clasificarse en diversas categorías. Por su dimensión espacial, incluyen modelos unidimensionales, bidimensionales, quasi-tridimensionales y completamente tridimensionales. Por su método de discretización numérica, diferencias finitas, elementos finitos, volúmenes finitos, elementos de frontera, elementos espectrales o por esquemas de discretización de alta resolución (A. Sharif Ahmadian, 2016a). En el caso de los modelos de propagación de oleaje, estos pueden clasificarse por sus ecuaciones de oleaje como, la teoría lineal, la de pendiente-suave, ecuaciones Boussinesq, la de balance de energía o balance de acción (incluye interacción con corrientes). Pero en general los modelos se clasifican en dos grandes grupos, modelos de resolución de fase y los de fase promediada (Pintado et al., 2010; J. A. Roelvink, 1993).

Los modelos que resuelven la fase generalmente son utilizados donde las condiciones del oleaje varían rápidamente. Estos modelos usualmente utilizan las ecuaciones Boussinesq o las de pendiente suave. Consisten en la reconstrucción de la elevación del nivel del mar en tiempo y espacio con gran precisión. Su mayor ventaja es que consideran los procesos de difracción, refracción y las interacciones no lineales entre cuádrupeltas y triadas del oleaje (Pintado et al., 2010; Ris, 1997). Su principal desventaja es la alta demanda de procesos computacionales debido a su alta resolución temporal y espacial, por lo que este tipo de modelos están limitados a regiones pequeñas, además, usualmente estos modelos no incluyen la generación de oleaje por viento o su disipación (Monbaliu, 2003).

En los modelos promediados en la fase se asume que las condiciones del oleaje varían lentamente. En estos modelos se describe la superficie irregular del mar mediante funciones espectrales de densidad de energía o de densidad de acción en la presencia de corrientes. Los modelos espectrales determinan los cambios espaciales y temporales en el espectro del oleaje en función de su frecuencia y dirección. Su mayor ventaja sobre los modelos de fase es que se utiliza el balance del espectro de energía que considera el crecimiento, propagación y disipación del oleaje basado en los esfuerzos del viento, whitecapping y la fricción por el fondo (Dhanak & Xiros, 2016), además que debido a sus aproximaciones promediadas de fase permite ser aplicada a grandes escalas con un bajo costo computacional. Sin embargo, estos modelos son limitados por cálculos de difracción e interacciones no lineales en aguas someras (Dhanak & Xiros, 2016; Monbaliu, 2003). Estas limitaciones están relacionadas generalmente al enfoque Lagrangiano de los modelos. Aplicar un enfoque Euleriano con el uso de mallas computacionales permite mejorar el cálculo de las interacciones no lineales (Ris, 1997). Estos modelos espectrales se pueden clasificar en primera, segunda y tercera generación, donde cada generación resuelve las limitaciones del anterior. Los de primera generación no incluyen el efecto de las interacciones no lineales. Los de segunda generación resuelven estas interacciones mediante una parametrización y el uso del espectro Jonswap, pero sólo

pueden resolver oleaje para ciertas clases de viento, en condiciones de viento extremas el modelo es ineficiente. Los de tercera generación resuelven las interacciones no lineales de manera explícita y no se impone ninguna restricción al espectro (Ris, 1997).

Para simular corrientes en la costa, usualmente se acopla un modelo de propagación de oleaje con modelos hidrodinámicos capaces de resolver las ecuaciones para aguas someras de Navier Stokes en dos dimensiones o tres dimensiones (Deltares, 2018a). El modelo de oleaje calcula tensores de radiación los cuales se introducen al modelo de flujo para el cálculo de corrientes. Algunas de las limitantes encontradas en estos modelos depende de la zona de estudio, al estar muy cerca de la costa el cálculo de velocidad de corriente en tres dimensiones requiere de mayor tiempo computacional, por lo que generalmente se opta por el uso de modelos promediados en profundidad (Tang et al., 2018).

Para simular el transporte de sedimento y los cambios asociados en la morfología de playas es necesario utilizar modelos morfológicos. Estos modelos generalmente funcionan mediante el acoplamiento de diferentes modelos (hidrológicos o de oleaje) dependiendo de su aplicación (Franz et al., 2017). Los modelos se pueden clasificar en dos categorías principales, modelos basados en procesos o basados en comportamiento. Los modelos de procesos consideran todos los procesos relevantes en el transporte de sedimentos, típicamente se enfocan en calcular el transporte de sedimento suspendido y el de fondo resolviendo los procesos complejos multidimensionales que surgen entre la interacción de la hidrodinámica costera, turbulencia y las partículas de sedimento (Amoudry & Souza, 2011). Entre estos modelos puede variar las formulaciones utilizadas para resolver el transporte de sedimento, algunas comúnmente utilizadas son, Bijker(1968), Bailard(1981), Innman(1981), Van Rijn (1984), Soulsby (1195), entre otras (Camenen & Larroudé, 2003). Los modelos de comportamiento utilizan parametrizaciones del comportamiento de los sedimentos a gran escala. Entre estos modelos se pueden clasificar cuatro categorías dependiendo de su escala espacial y dimensional. *Modelos de línea de costa*, describen procesos de larga escala a lo largo de la costa sobre pequeñas regiones. *Modelos de perfil de costa (2DV)*, ignoran las variaciones longitudinales de la playa y se enfocan en la evolución del perfil cross-shore. *Modelos de área de costa*, incluyen ambas dimensiones, longitudinales y transversales de la playa y pueden ser promediados en profundidad (2DH) o pueden resolver el transporte en tres dimensiones. Los *modelos locales*, se enfocan en procesos de pequeña escala como transporte en el fondo por ripples o para procesos de la capa de fondo (Amoudry & Souza, 2011).

La precisión de los resultados de los modelos está asociada a los parámetros, los métodos numéricos y las simplificaciones que los modelos utilizan. La calidad de los datos introducidos al modelo como la batimetría y la condiciones de frontera, la calibración de los parámetros dentro del modelo y el ensamble ocupado durante las simulaciones son factores importantes que determinan la calidad y precisión de los resultados (A. Sharif Ahmadian, 2016b).

La selección del modelo dependerá de los procesos que quieran estudiarse, su aplicación, el área de estudio, las escalas de tiempo y en situaciones específicas su accesibilidad. Por ejemplo, para simular procesos de difracción con gran detalle sobre la zona costera en un área pequeña, se puede utilizar un modelo fase tipo Boussinesq. Si el estudio se enfoca en procesos de muy pequeña escala y requieren de una gran precisión en una dimensión, los modelos RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) son la mejor opción. Para la ingeniería costera, usualmente se requieren modelos capaces de reproducir la mayor parte de los procesos que sufre el oleaje al propagar hacia la costa como, asomeramiento, refracción, las pérdidas de energía por fricción de fondo y generación por viento, el cálculo de corrientes y de transporte

de sedimento. Actualmente los modelos de fase promediada acoplados con modelos hidrodinámicos y morfodinámicos, cumplen con estas condiciones y requieren de un bajo costo computacional relativamente al resto de los modelos, por lo que son accesibles al usuario. A continuación, se describen brevemente algunos modelos comúnmente utilizados en la ingeniería costera y sus limitaciones asociadas.

Para la propagación de oleaje usualmente se utilizan modelos espectrales de fase promediada como WISWAVE (*Wave Information Study Wave Model*), WAVEWATCH III y WAM (*Wave Model*). Se utilizan principalmente para simular la generación de oleaje por vientos y tormentas, estos modelos están limitados a aguas profundas. Para aguas costeras puede implementarse el modelo SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*) o STWAVE, en estos modelos los cálculos de difracción e interacciones no lineales son limitados, por lo que en las zonas de muy baja profundidad como la zona de swash su aplicación es limitada. Si estos procesos son esenciales, el uso de modelos Boussinesq como FUNWAVE (*Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model*) y COULWAVE (*Cornell University Long and Intermediate Wave Model*) pueden aplicarse, estos modelos requieren un mayor costo computacional y usualmente los procesos de disipación como rotura y disipación por el fondo son parametrizados. El uso de modelos RANS, como COBRAS (*Cornell Breaking Waves and Structure*) y OpenFOAM son capaces de calcular la turbulencia y la disipación de energía por fricción y rotura del oleaje con alta precisión, pero requiere de un mayor esfuerzo computacional y de una muy alta resolución (Dhanak & Xiros, 2016).

Para simular procesos morfodinámicos e hidrodinámicos complejos, como interacción de oleaje y corrientes con estructuras, el acoplamiento de modelos es necesario. Algunos modelos comúnmente utilizados son GENESIS, Telemac, MIKE, Delft3d, y XBeach. GENESIS (*GENErilizes model for Simulating Shoreline*) se utiliza para simular los cambios en la costa por el oleaje y la presencia de estructuras. Este modelo se basa en la teoría de una línea, por lo que se asume que el perfil del fondo no cambia en el tiempo y se encuentra en equilibrio. Solo el transporte longitudinal se considera en este modelo. Telemac es un programa de código abierto desarrollado por LNHE (Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement). Este modelo puede resolver las ecuaciones de agua profunda en dos o tres dimensiones mediante métodos de elementos-finitos. Los efectos no lineales, turbulencia, fricción por el fondo, y viento son considerados. Este modelo puede considerar los efectos de estructuras costeras. MIKE desarrollado por DHI (*Danish Hydraulic Institute*), se utiliza comúnmente para simular corrientes, transporte de sedimento y oleaje para las áreas costeras. Este modelo resuelve las ecuaciones Boussinesq en 2D mediante una técnica de diferencias finitas. El modelo Delft3D consiste en varios módulos que permiten simular la generación de oleaje, corrientes, transporte de sedimentos, ríos, estuarios, calidad del agua y la interacción de la hidrodinámica con estructuras costeras. El módulo de oleaje denominado como Delft-WAVE utiliza el modelo de propagación SWAN para realizar los cálculos. XBeach fue desarrollado principalmente para simular la erosión de dunas durante eventos de tormentas. Este modelo resuelve las ecuaciones en dos dimensiones para la propagación de oleaje, corriente, transporte y cambios en el fondo, además, incluye la simulación de ondas infra gravitatorias. Este modelo puede trabajar de manera estacionaria en fase promediada, o resolver las ecuaciones no lineales en el modo no-hidrostático a costa de una alta demanda computacional (S. M. Mojabi, 2018; A. Sharif Ahmadian, 2016b).

De los modelos mencionados todos han sido aplicados satisfactoriamente para simular los efectos de espigones y rompeolas sumergidos (S. M. Mojabi, 2018). Basados en su descripción, MIKE y XBeach sugieren ser los más adecuados para este trabajo, pero el modelo MIKE no es de código libre y la alta demanda computacional de XBeach son limitantes para su aplicación. Por lo tanto, se ha seleccionado el

modelo Delft 3D desarrollado por Deltares para simular la hidrodinámica y morfodinámica, principalmente por su acceso de código libre y su capacidad de simular una amplia variedad de procesos. Los siguientes estudios han utilizado este modelo para trabajar en hidrodinámica y morfodinámica costera.

Roelvink, Walstra, Roelvink, & Walstra (2004) demuestran las ventajas de trabajar con un modelo 3D o 2DH sobre modelos 1D, siempre y cuando se utilicen las configuraciones apropiadas para que el modelo trabaje de una manera eficiente, para esto recomiendan una serie de ajustes y realizaron comparaciones entre ambos tipos de modelos para simular los cambios morfológicos que ocasionan espigones de diferentes longitudes. Eslami, Vanrijn, Walstra, Luijendijk, & Stive (2010) simularon el transporte de sedimentos alrededor de distintos tipos de espigones y validaron el modelo con mediciones de campo con resultados satisfactorios.

Li & Huang (2013) utilizaron los modelos Delft 3D y XBeach para calcular el transporte de sedimento ocasionado por tsunamis, además consideraron diferentes fórmulas de transporte de sedimento y compararon sus resultados numéricos con mediciones de campo y de laboratorio. Los resultados determinaron que ambos modelos son buenos para problemas de laboratorio, pero para condiciones reales de tsunamis Delft3D produjo mejores resultados que XBeach. En el trabajo de Trouw, Zimmermann, Mathys, Delgado, & Roelvink, (2012) también realizaron comparaciones entre ambos modelos, pero en este caso se observó el transporte de sedimento y la hidrodinámica alrededor de un espigón.

Bastidas, Knighton, & Kline (2016) realizaron un análisis de sensibilidad de distintos parámetros para calibrar el modelo durante una tormenta y validar la altura significativa de oleaje por el modelo. En su trabajo determinaron que el modelo realiza buenas predicciones, sin embargo, es de mayor importancia utilizar campos de viento precisos para forzar el modelo. Treffers, (2009) calculó alturas significantes y velocidad de corrientes longitudinales utilizando el modo 3D y 2DH del modelo, las comparaciones con mediciones de laboratorio indican que en 2DH el modelo tiene mayor precisión, sin embargo, algunas alteraciones al código para el cálculo de los esfuerzos cortantes en 3D mejoran los resultados, pero cabe resaltar que el uso del modo 3D requiere un mayor tiempo computacional.

Vlijm, (2011) calibró un modelo idealizado para simular los efectos de un rompeolas sumergido sobre la hidrodinámica y determinó cómo es afectada por los parámetros de diseño de la estructura como: la longitud del rompeolas y la distancia a la costa. Van der Baan (2013) también trabajó con un modelo idealizado de rompeolas sumergidos, pero en este caso incluyó los efectos de múltiples estructuras y analizó la respuesta que tiene la costa ante la separación que hay entre estructuras. Mojabi (1970) incluyó la porosidad en rompeolas sumergidos a través de una serie de cálculos para calibrar los coeficientes de transmisión de las estructuras y comparó resultados obtenidos por Delft 3D con otras simulaciones realizadas en modelo numérico OpenFOAM®.

Los estudios mencionados durante esta revisión han proporcionado una idea general de las capacidades y limitaciones del modelo. También, muestran que implementando una calibración adecuada los resultados del modelo son comparables ante modelos más sofisticados como XBeach. Además, varios de los trabajos incluyen el proceso de ensamble y calibración recomendado para la simulación de espigones y rompeolas, los cuales serán implementados para este trabajo.

Capítulo III. Área de estudio

Geología y localización geográfica

La costa norte del estado de Yucatán, México (Figura 1), ubicada al sureste del Golfo de México, se extiende desde Celestún (20.85N, 90.40 W) hasta el Cuyo (21.48N, -87.53W). Esta zona se caracteriza por tener una plataforma continental ancha, aproximadamente de 250 km, con una pendiente suave (1/1000) y una orientación promedio de la costa de este a oeste. Gran parte la costa cuenta con la presencia de lagunas costeras e islas de barrera. En su mayoría la costa está compuesta de arenas carbonatadas de origen biogénico con tamaños de grano entre 0.2 mm (a 0.5m de profundidad) y 0.5 mm (zona de swash). Los contornos batimétricos muestran uniformidad sobre la mayor parte de la costa hasta los 10 m de profundidad y cuentan con la presencia de un sistema de barras de arena cercanas a la costa (Figura 1) (Appendini et al., 2012; Cuevas Jiménez et al., 2016; Mendoza, Ojeda, Meyer-Arendt, Salles, & Appendini, n.d.). Este trabajo se enfoca en tres sitios localizados a lo largo de la costa de Yucatán: Sisal, El Teresiano y El Faro.

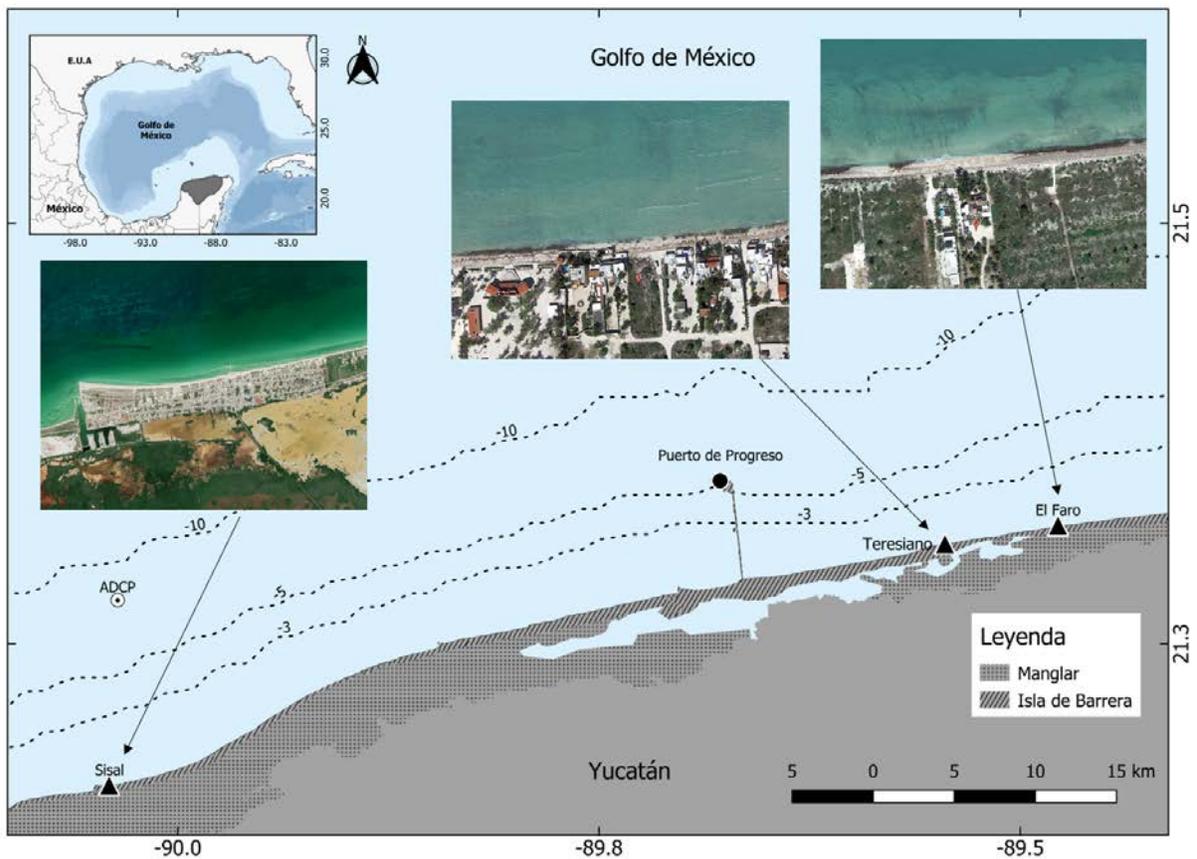


Figura 1. Localización de la zona de estudio

Sisal es un pueblo pesquero que se localiza 40 km al oeste del puerto de Progreso (21.16N, -90W). Esta zona tiene un impacto antropogénico a través de la presencia del puerto y el muelle que afectan la dinámica de la zona. Esto ha generado la acreción de la playa a lo largo de los últimos 30 años

contribuyendo a la formación de dunas vegetadas y poca infraestructura junto a la playa. Las estructuras influyen en la orientación y el ancho de playa, la cual se extiende hasta 60 m con un tamaño de grano de 0.3 mm (Medellín & Torres-Freyermuth, 2019). En el experimento del espigón realizado por Medellín et al. (2018), éste se colocó en la zona entre el muelle y el puerto para minimizar la influencia de las estructuras mencionadas.

El Teresiano se localiza aproximadamente 12 km al este del puerto de Progreso (Figura 1), en esta zona hay un alto impacto antropogénico junto a la playa. El alto número de casas al límite de la playa, la falta de dunas vegetadas y la presencia de espigones cortos han hecho de esta playa una zona altamente vulnerable a la erosión. La extensión de la playa es <5 m en los puntos críticos y durante mareas altas el olaje llega a interactuar con los muros de protección de algunas de las casas localizadas junto a la playa. Para iniciar la recuperación de playa frente a un punto crítico se instaló un rompeolas sumergido geotextil relleno de arena (Torres-Freyermuth, Medellín, Mendoza, Ojeda, & Salles, 2019).

El Faro es el sitio con menor impacto antropogénico en comparación a los sitios previos. Se ubica a 20 km al este del puerto de Progreso, únicamente se encuentran dos casas sobre 350 m de playa, y la vegetación costera aún está presente. Sin embargo, el ancho de playa en esta zona es <10 m por lo que se han implementado rompeolas sumergidos permeables tipo Reef Ball como método de conservación y acreción de playa (Torres-Freyermuth, Medellín, et al., 2019).

Clima marino

Vientos

Los vientos de la costa norte de Yucatán son controlados por eventos de escala-sinóptica asociados con frentes fríos y por eventos de brisas (marinas y terrestres). Estos eventos determinan la circulación del océano desde la plataforma interna hasta la zona de surf. Los frentes fríos de la zona del Golfo de México (también conocidos como *nortes* localmente), ocurren debido a la advección de los anticiclones de la capa baja de la atmósfera sobre el este del Pacífico o sobre Canadá y Estados Unidos hacia el ecuador, lo que lleva aire frío y polar hacia latitudes bajas (Kurczyn et al., 2020). Las brisas surgen a partir del gradiente de temperatura entre la tierra y el océano, lo que lleva a un cambio de presión y humedad de las parcelas de aire, creando una circulación perpendicular a la costa con una variación diurna (Allende-Arandía et al., 2020). En el caso de brisas marinas la circulación ocurre de mar a tierra y durante la brisa terrestre en dirección opuesta.

Los *nortes* tienen un efecto sustancial en el clima regional durante su duración, ocasionan cambios considerables sobre la atmósfera baja y la superficie del océano, como, el incremento de la velocidad del viento y de dirección, generación de oleaje, reducción en temperatura e incrementos en la velocidad de las corrientes. Estos eventos tienen una duración de 1 a 3 días, pero también se han reportado eventos de 13 días. Generalmente pueden ocurrir entre septiembre y mayo, pero la mayoría de los eventos suceden de octubre a diciembre (Kurczyn et al., 2020). Cuando el *norte* llega a la costa el viento alcanza velocidades >15 m/s con una dirección del norte (Torres-Freyermuth, Puleo, DiCosmo, et al., 2017).

Los eventos de brisas de la costa norte de Yucatán se caracterizan por la variación diurna de la dirección del viento, NE durante la brisa marina y SE en brisa terrestre. El cambio de dirección comienza alrededor de las 0800 horas durante la brisa terrestre y transición a brisa marina alrededor de las 1200 horas. La

velocidad incrementa durante esta transición, comenzado con velocidades <5 m/s durante la brisa terrestre hasta su máximo ~ 12 m/s entre las 1700 y 1800 horas en brisa marina. Estos eventos predominan todo el año, pero incrementan en intensidad de abril a agosto. Los eventos de brisas terrestres son más frecuentes e intensos en la parte oeste de la plataforma, pero escasos al norte y al este. En cuanto a los eventos de brisas marinas, estos se presentan con menor frecuencia, pero mayor intensidad en la parte oeste de la península. Los *nortes* tienen un efecto sobre las brisas, ya que reducen y modulan estos eventos, por ejemplo, antes de un evento *norte* la brisa terrestre tiende a intensificarse (Allende-Arandía et al., 2020; Kurczyn et al., 2020; Mendoza et al., 2013; Torres-Freyermuth, Puleo, Dicosmo, et al., 2017).

Mareas

Las mareas en esta zona se consideran como un régimen micro mareal mixto con un dominio diurno. El rango de mareas oscila entre 0.8 m durante mareas vivas y 0.1 m en mareas muertas (Appendini et al., 2012). La Figura 2 muestra una señal típica de marea registrada en el mes de octubre del 2017, durante la primera semana se observa la marea muerta y al finalizar la segunda semana se encuentra una marea viva.

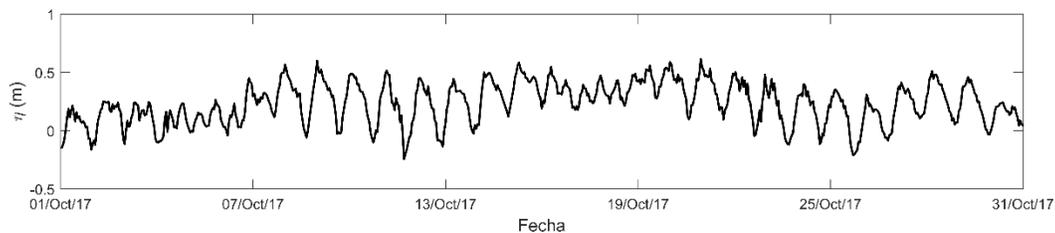


Figura 2. Serie temporal de marea para el mes de octubre del 2017, tomada del mareógrafo en el puerto de Sisal.

Oleaje

Las características del oleaje en la zona de estudio pueden representarse con una rosa de oleaje para la costa norte de Yucatán a 10 m de profundidad (Figura 3). Es notorio el dominio del oleaje del NE con alturas entre 0.5-1 m asociado a los eventos de brisas y de una componente de menor frecuencia, pero mayor magnitud del NNO con alturas mayores a 1 m generadas por eventos de *norte*. Appendini et al. (2012) demuestran que el oleaje fuera de la costa es similar a lo largo de todo el litoral de Yucatán.

En la Figura 4 se muestra variabilidad mensual del oleaje a 10 m de profundidad. La H_s presenta mayor energía entre octubre y marzo debido al incremento de eventos *nortes* con $H_s > 1.5$ m y $T_p > 6$ s provenientes del NNO. Por otra parte, un oleaje de menor energía del NE asociado a brisas ocurre entre primavera y verano con H_s entre 0.5-1 m, $T_p = 3.5$ s. En promedio abril y mayo presentan un oleaje más energético durante brisas marinas, mientras que en septiembre la energía del oleaje es mínima debido a la baja intensidad de brisas marinas y la ausencia de *nortes* (Medellín & Torres-Freyermuth, 2019).

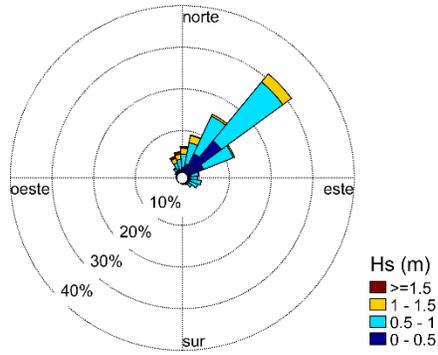


Figura 3. Rosa de oleaje para la costa norte de Yucatán a partir de datos de boya a 10 m de profundidad.

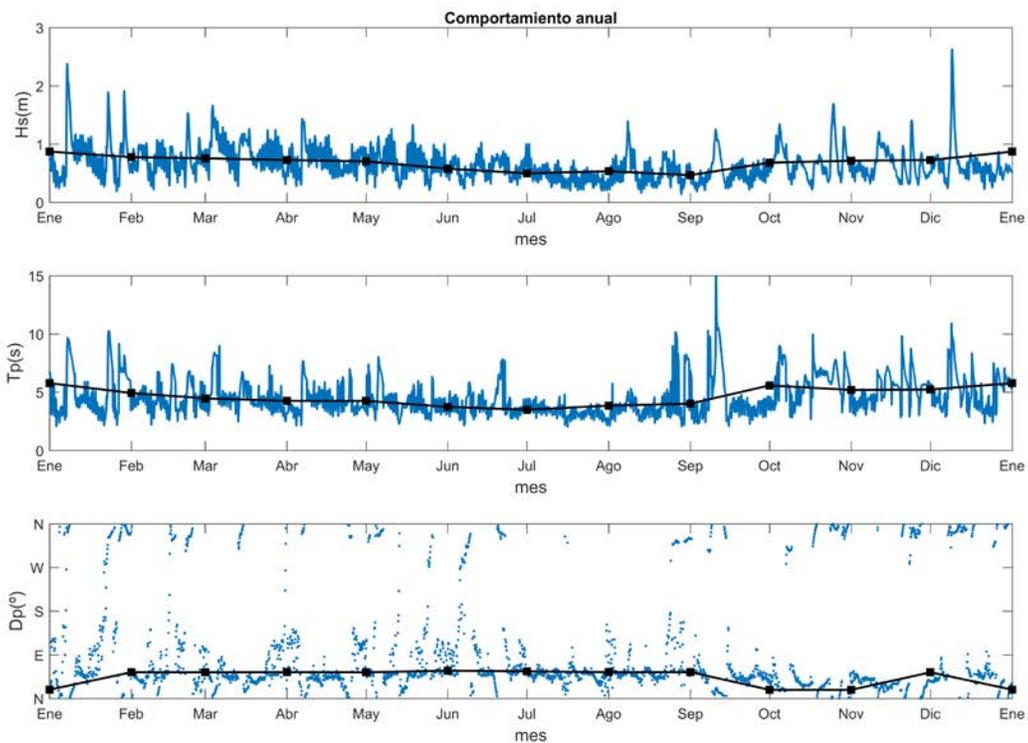


Figura 4. Variación anual del oleaje durante el 2017, de negro se indica el promedio mensual.

En la Figura 5 se describe el comportamiento típico del oleaje durante eventos de brisas(a,c,e), y *nortes* (b,d,f). En el panel (a) se muestra como el oleaje responde a la variabilidad diaria de la velocidad viento con mínimos de $H_s \sim 0.4$ m durante la brisa terrestre (fondo blanco) a las 0600 horas y máximos de ~ 0.8 m durante brisas marinas (fondo gris claro) a las 1800 horas. En el panel (c) se observa la variación de la dirección del viento entre eventos de brisas, pero el oleaje no responde a esta variación y mantiene una dirección incidente del NE. El oleaje durante estos eventos llega y rompe sobre la playa con un alto ángulo de incidencia lo cual tiene un impacto importante en la dinámica de la zona de surf y swash. Del panel (e) se observa que la presión atmosférica durante estos eventos es ~ 1010 hPa.

Los incisos *b* y *d*, de la Figura 5 muestran un ejemplo del comportamiento del oleaje durante el mes de octubre del 2017 en los que se presentan eventos de brisa y un evento de norte (fondo gris), también se

muestra el comportamiento de la presión atmosférica a lo largo de estos eventos (f). La entrada del norte asociado al incremento de presión atmosférica alrededor del 25 de octubre, ocasionó un incremento en la velocidad del viento hasta 15 m/s, una elevación de la Hs hasta 1.5 m y un cambio en la dirección predominante del viento y del oleaje proveniente del norte.

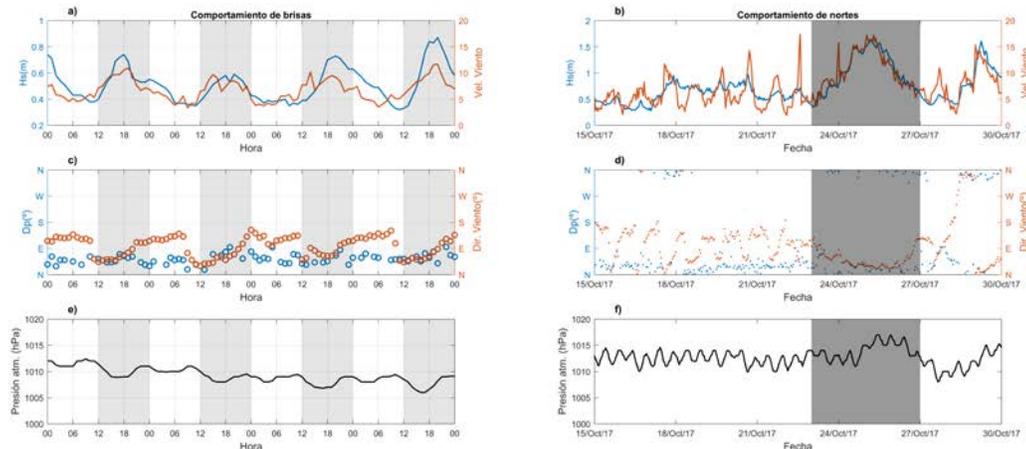


Figura 5. Comportamiento de Hs, Dp y presión atmosférica, durante eventos de brisas (a,c,d) y un evento norte (b,d,e). De gris claro se indica el evento de brisa marina y de gris oscuro el evento norte.

Corrientes

La descripción del comportamiento de las corrientes en la costa norte de Yucatán se asocia a la influencia de los vientos de brisas y *nortes* y su oleaje asociado, mareas, y la Corriente de Yucatán. En el trabajo de Torres-Freyermuth et al., (2017), se analizó detalladamente el comportamiento a través de mediciones in-situ. Algunos de sus resultados indican que:

- En la zona interna de la plataforma y antes de la zona de surf (zona offshore), las corrientes responden a la variabilidad diurna de las brisas, con velocidades máximas de 0.3 m/s en dirección al oeste durante brisas marinas y una reducción durante brisas terrestres. Durante los *nortes* la corriente puede incrementar su velocidad hasta 0.22 m/s y cambiar su dirección hacia el suroeste.
- En la zona de surf, las corrientes responden de la misma manera a la variación diurna de las brisas, pero con una mayor magnitud que en la zona offshore. Durante los *nortes* la corriente en esta zona presentan un cambio de dirección hacia el E/NE. Esta respuesta es completamente opuesta a la de la zona off-shore lo que sugiere una alta variabilidad espacial en los mecanismos que controlan la circulación junto a la costa.
- En la zona de swash, las corrientes tienen una dirección hacia el oeste durante eventos de brisas y hacia el este durante *nortes*. Además, responden a la variación diurna de brisas alcanzando velocidades hasta 0.35 m/s. Durante los *nortes* se incrementa esta velocidad.

Transporte de sedimento

La frecuencia con la que ocurren los eventos de brisas es mucho mayor que los eventos de *nortes*, por lo tanto, controlan el transporte de sedimento y la morfodinámica de la playa. En el trabajo de Appendini et al. (2012), se estima un transporte neto hacia el oeste entre 20,000 y 80,000 m³/año asociado al alto ángulo de incidencia del oleaje del NE durante los eventos de brisas. El trabajo de Medellín & Torres-Freyermuth (2019) corrobora esta tendencia y especifica que durante todo el año el transporte neto es hacia el oeste, con excepción del invierno donde el transporte neto es hacia el este, relacionado al incremento de los eventos de *nortes* durante esa temporada.

La combinación entre las condiciones de oleaje y la orientación de la playa hacen de la morfología de la costa una zona muy sensible ante cualquier perturbación en el transporte de sedimento. Esto se demostró en el experimento por Medellín et al. (2018) donde se colocó un espigón impermeable, el cual ocasionó una acreción de 70 m³ corriente arriba y una erosión de 40m³ corriente abajo en tan solo 24 horas. En otro caso, Medellín & Torres-Freyermuth (2019) estimaron un incremento en el volumen de sedimento en la playa de Sisal de 50,000 m³ en los últimos 4 años debido a la influencia del puerto y el muelle.

Capítulo IV. Análisis y procesamiento de datos de campo

En este trabajo se utilizaron los datos recolectados por Medellín et al. (2018) y Torres-Freyermuth et al.(2019). Estos datos corresponden a los sitios de Sisal y Chicxulub (Teresiano y El Faro) respectivamente y contienen información de oleaje, corrientes, mareas, vientos y perfiles topo-batimétricos en presencia de diferentes tipos de estructuras costeras. En este capítulo se describen estos estudios, así como el análisis de los datos recolectados en el marco de este trabajo.

Experimento de espigón temporal (Medellín et al., 2018)

Medellín et al. (2018) realizaron un experimento en la playa de Sisal en Yucatán, en el cual se instaló un espigón impermeable de aproximadamente 15 m (Figura 6). Los cambios morfológicos fueron medidos mediante perfiles de alta resolución temporal y espacial utilizando GPS-RTK (Figura 6). Se tomaron perfiles previos a la instalación del espigón y cada dos horas a lo largo de las siguientes 24 horas para observar la evolución batimétrica. El espigón fue removido 24 horas después y se continuó el monitoreo para observar la recuperación de la línea de costa con una frecuencia menor. Además, se registraron las condiciones hidrodinámicas y meteorológicas durante el experimento del 27 al 29 de mayo de 2015. En la zona costa afuera, a 10 m de profundidad aproximadamente 11 km de la costa, se obtuvieron datos de oleaje cada hora mediante un Perfilador de Corrientes Acústico Doppler (ADCP). Para la zona de surf, se midieron velocidades de corrientes y oleaje con un Velocímetro Doppler Acústico (ADV) Nortek Vector a una frecuencia de 16 Hz. Datos de viento y marea se recolectaron mediante un anemómetro y un mareógrafo ubicado en el puerto de Sisal. Las mediciones de nivel del mar fueron obtenidas por un mareógrafo ultrasónico instalado en el Puerto de Sisal perteneciente al Sistema Mareográfico Nacional.

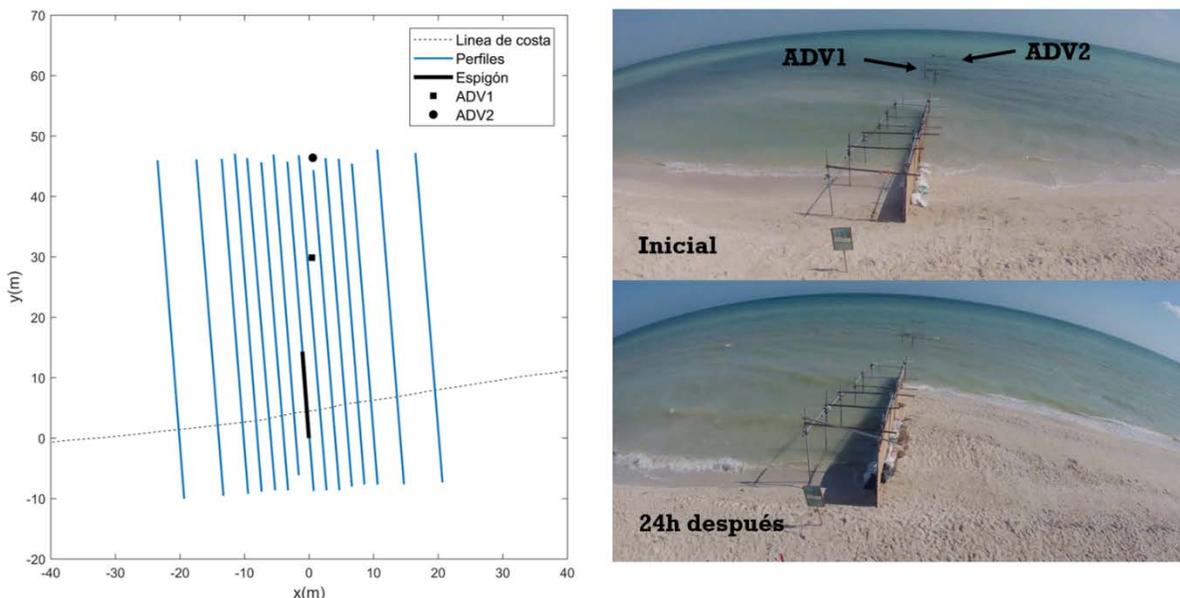


Figura 6. El panel izquierdo muestra el diseño del experimento del espigón, con la posición de la estructura, los dos ADV vectors, y los perfiles medidos. El panel derecho muestra la playa antes y 24 horas después de la instalación del espigón temporal.

Viento

Los datos de viento fueron colectados por anemómetro y promediados cada hora, a diferencia del resto de los datos estos no fueron implementados dentro del modelo, pero se utilizaron para el análisis general de las condiciones hidrodinámicas. La Figura 7 indica que durante el experimento dominaron los eventos de brisas, con cambios de velocidad de viento de 5 m/s durante brisa terrestre (fondo blanco) hasta 15 m/s durante brisa marina (fondo gris), y sus respectivos cambios de dirección de SE en brisa terrestre a NE en brisa marina.

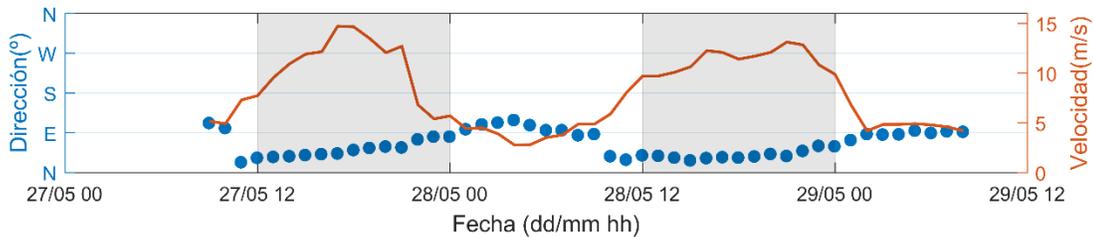


Figura 7. Velocidad y dirección del viento durante el experimento del espigón de Sisal. De fondo blanco se muestran los eventos de brisas terrestres y de fondo gris los eventos de brisas marinas.

Marea

La marea fue registrada por un mareógrafo dentro del puerto y también por el ADV2 en la zona de surf, los datos fueron promediados cada hora. La Figura 8 muestra una comparación entre ambos instrumentos para ambos días del experimento. En total la serie abarca dos ciclos de marea, durante mareas muertas, con un incremento de ~ 0.2 m y una disminución de 0.2 m. Los datos colectados por el ADV2 registran una mayor elevación en nivel del mar debido al incremento del set-up en la zona de surf durante eventos de brisas marinas, los datos del mareógrafo no se ven afectados por este proceso debido a la protección del puerto. Por esta razón los datos del mareógrafo fueron utilizados para su implementación dentro del modelo.

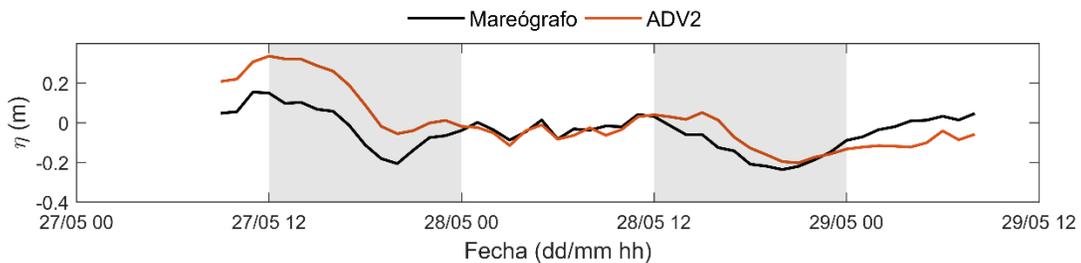


Figura 8. Registro de marea durante el experimento del espigón, la línea negra representa los datos del mareógrafo, la línea naranja los del ADV2, el fondo gris indica condiciones de brisas marinas y el blanco brisas terrestres.

Oleaje

Los datos de oleaje del ADCP a 10 m de profundidad fueron propagados a una profundidad de 4 m para utilizarse como forzamiento dentro del modelo (Figura 9). Además, se removieron irregularidades en la serie generadas durante la propagación. En ambas profundidades los datos presentan la variación diurna generada por las brisas marinas (fondo gris), a 4 m se registra una Hs máxima de 0.8 m y mínima de 0.3 m, mientras que a 10 m se presentan alturas máximas de 1 m y mínimas de 0.5 m. En promedio el oleaje tiene un periodo (T_p) de 3.5 s con una dirección (D_p) del NE en ambas profundidades.

En cuanto a los datos registrados en la zona de surf, únicamente el ADV2 registró mediciones de presión. De estos datos se removió la marea mediante una media móvil cada 15 minutos. Después se obtuvieron datos de altura de oleaje mediante el método de cruces por ceros y se calculó la altura significativa (H_s) de cada hora para asegurar condiciones estacionarias (Figura 9). Al igual que los datos de ADCP el oleaje conserva un T_p promedio de 3.5 s. Para estos datos no se cuenta con el registro de D_p . En esta zona el oleaje también responde a la variabilidad ocasionada por los eventos de brisas.

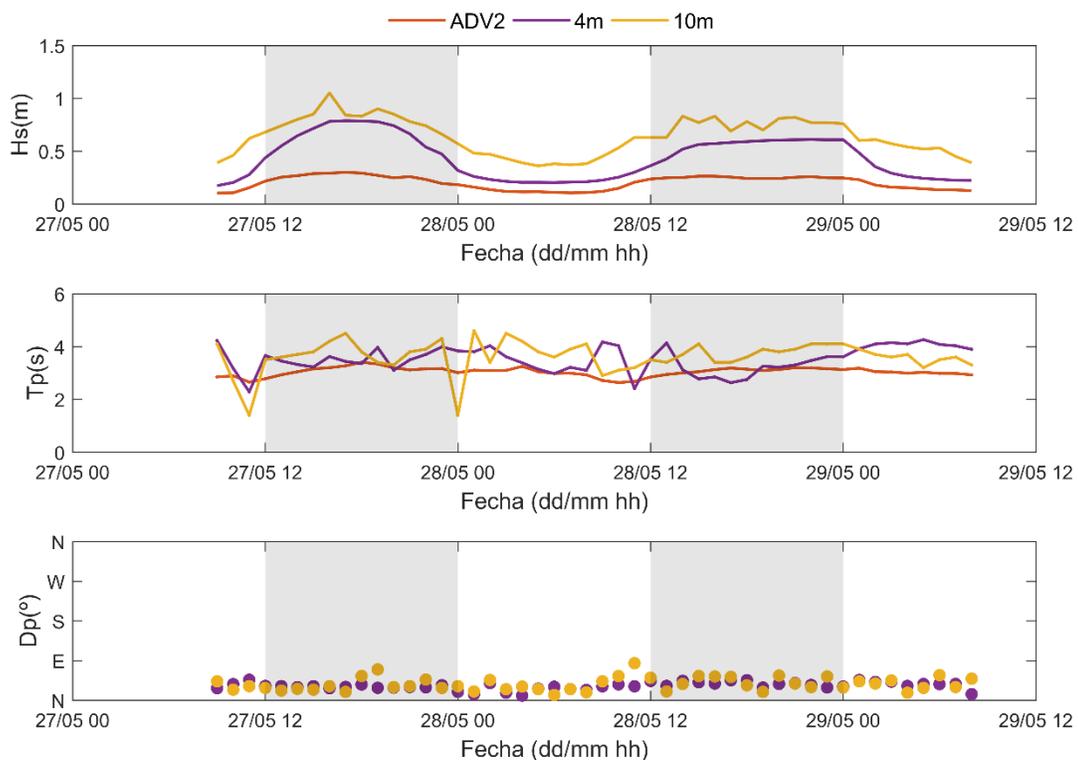


Figura 9. Condiciones de oleaje registrados por un ADCP a 10 m de profundidad, una propagación a 4 m de profundidad y el ADV2. En fondo gris se representa las condiciones de brisas marinas y en blanco brisas terrestres.

Corrientes

Los datos de corrientes fueron registrados por ambos vectores. Al igual que los datos de oleaje se obtuvo un promedio horario de las velocidades de las corrientes para tener condiciones estacionarias. La Figura 10 muestra los promedios horarios para la componente longitudinal (V) y transversal (U), donde los valores positivos indican una dirección hacia el este y hacia costa afuera respectivamente. La corriente V muestra un máximo de 0.5 m/s en ADV1 y 0.35 m/s en el ADV2, ambas con una dirección hacia el oeste. La corriente U mantiene magnitudes pequeñas en dirección costa afuera. Estas condiciones de corrientes indican que el transporte longitudinal es dominante sobre la playa.

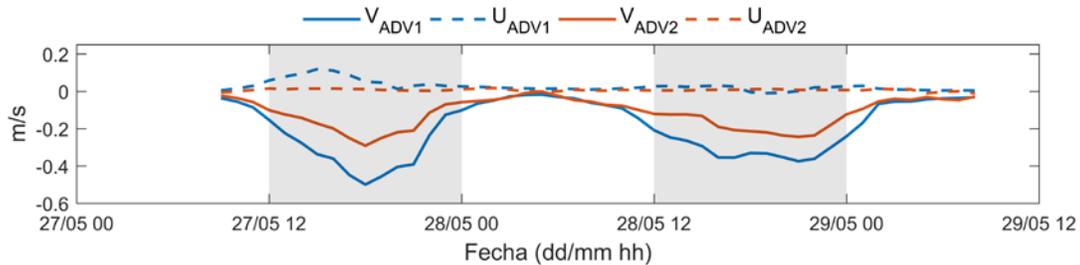


Figura 10. Velocidades para la componente longitudinal (V) y transversal (U) de las corrientes registradas por el ADV1 y ADV2 durante el experimento del espigón. En fondo gris se representa las condiciones de brisas marinas y en blanco brisas terrestres.

Batimetría

Los cambios en la topo-batimetría asociados al efecto del espigón durante las primeras 24 horas se muestra en la Figura 11. En azul se muestra la acreción y en rojo la erosión de sedimento. Corriente arriba de la estructura se registró una acumulación alrededor de 60 m^3 y un desplazamiento del contorno inicial hacia mar adentro de 5 m, mientras que corriente abajo hubo una pérdida aproximada de 40 m^3 con un desplazamiento del contorno hacia tierra de 4m. A partir de la hora 17 no se presentan cambios significativos en la magnitud de la acreción o en el desplazamiento de los contornos.

La recuperación de la playa al remover el espigón durante las siguientes 24 horas se muestra en la Figura 12. En la hora 5 se registra una disminución en la magnitud de acreción y erosión y comienza un ligero desplazamiento del sedimento del área de acreción hacia la zona erosionada. Para la hora 9 el desplazamiento es más evidente y el área de erosión es menor. En las horas 24 y 28 la costa esta llega a un estado similar a su condición inicial, pero aún con la presencia de una ligera acreción entre 0 y 10 m. Las mediciones continúan hasta 147 horas después, para este momento el contorno regresó en su totalidad al estado inicial.

Utilizando los datos de la batimetría inicial (Figura 13-a), se obtuvo un perfil característico de la zona que se extiende hasta los 4 m de profundidad. Del perfil (Figura 13-b), resalta la presencia de una barra interna y una externa de arena, los ADV se encuentran sobre y pasando la barra interna. El espigón cubre una pequeña parte de la zona de surf y la mayor parte de la zona de swash. Para implementar la batimetría inicial en el modelo, el perfil característico se repitió longitudinalmente utilizando el ángulo de orientación de la playa (Figura 13-c). De esta manera se eliminaron irregularidades en la batimetría que pudieran causar inestabilidades durante las simulaciones.

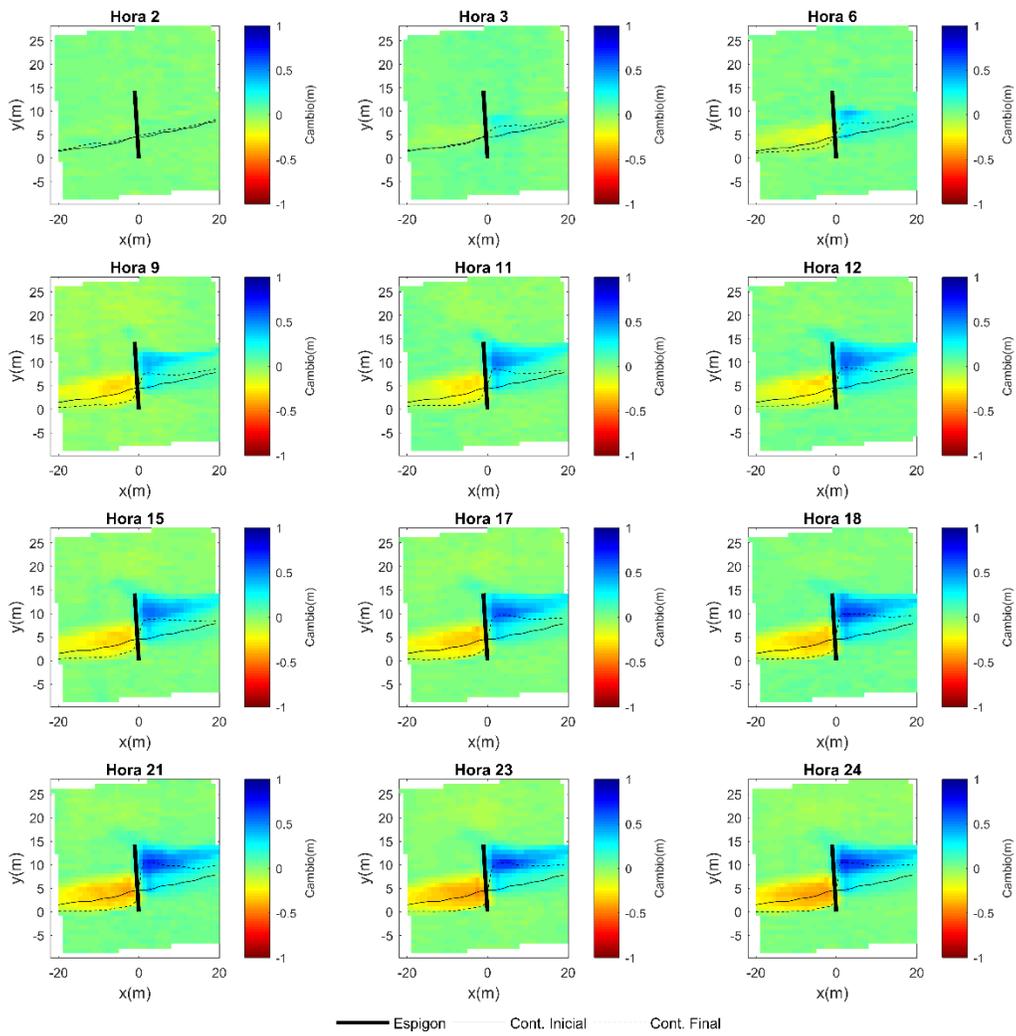


Figura 11. Cambios en la batimetría durante la presencia del espigón por 24 horas. La línea negra gruesa representa el espigón. La línea continua delgada indica la posición inicial de la costa, y la línea punteada indica su evolución. De azul se representa la acreción y de rojo la erosión.

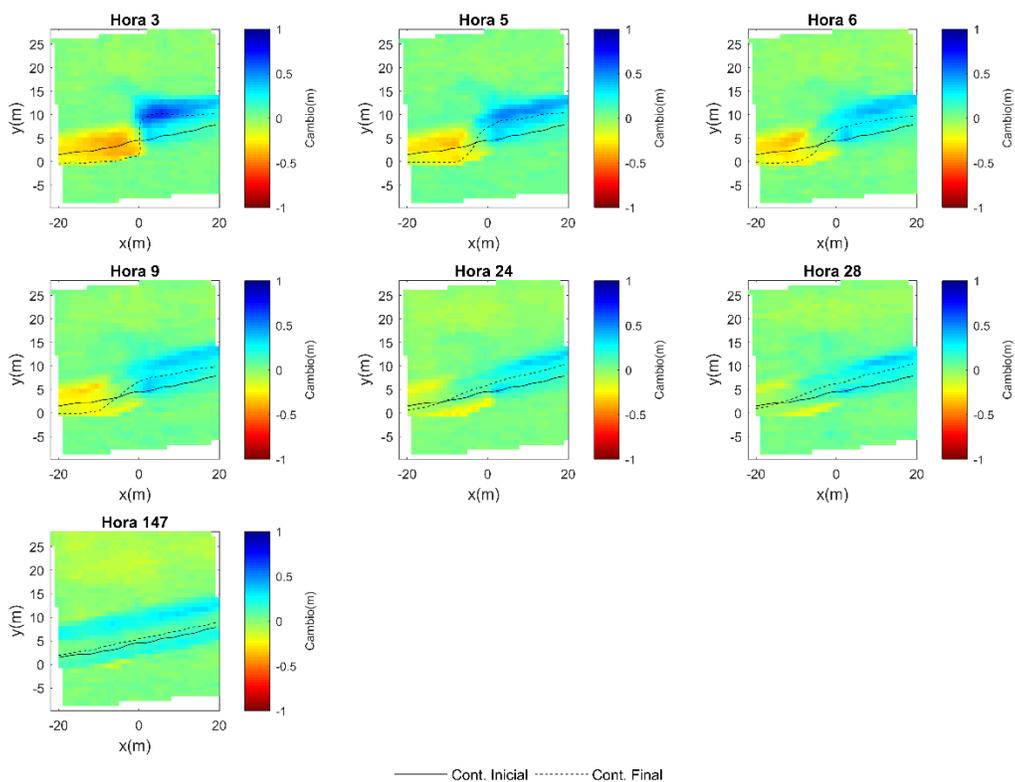


Figura 12. Recuperación de la costa al remover el espigón durante 147 horas. La línea continua indica la posición inicial de la costa, la línea punteada indica su evolución. De azul se representa la acreción y de rojo erosión.

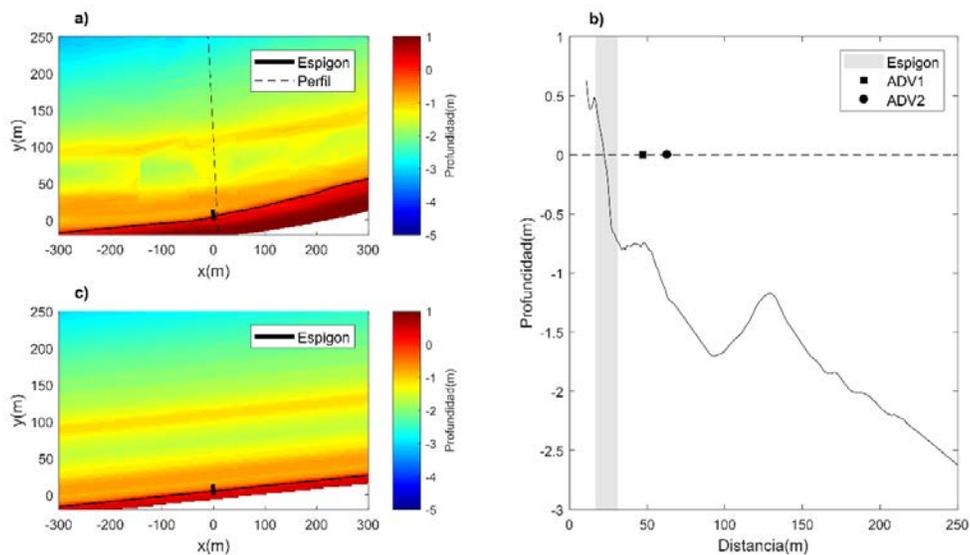


Figura 13. El panel a) muestra la batimetría medida inicial y la posición del perfil. El panel b) muestra la forma del perfil y la posición del espigón y vectores. El panel c) muestra la batimetría ajustada para el modelo.

Monitoreo de rompeolas sumergidos (Torres-Freyermuth et al., 2019)

En el 2017-2018 se llevó a cabo un programa de monitoreo realizado en la playa de Chicxulub para evaluar el comportamiento de rompeolas sumergidos (Torres-Freyermuth et al., 2019). En el Teresiano se instaló un rompeolas sumergido de 140 m construido con un geotextil relleno de arena (Figura 14-a). Como parte de su monitoreo para observar sus efectos sobre el perfil de playa, el LIPC realizó campañas topobatómicas en intervalos de tiempo que varían de 20 a 30 días a lo largo de 14 meses. De manera similar, en el sitio de El Faro se instaló un rompeolas sumergido tipo Reef Balls de 3 secciones (Figura 14-b). Cada sección con una longitud aproximada de 30 m. Para este sitio se realizaron campañas batimétricas a lo largo de 12 meses. Durante estas campañas, se colectaron datos de oleaje con un ADCP instalado a 10m de profundidad. Para la zona de surf no se cuentan con datos de corrientes u oleaje. Datos de marea fueron colectados durante estas campañas, mas no fueron procesados en este trabajo para su implementación en el modelo.

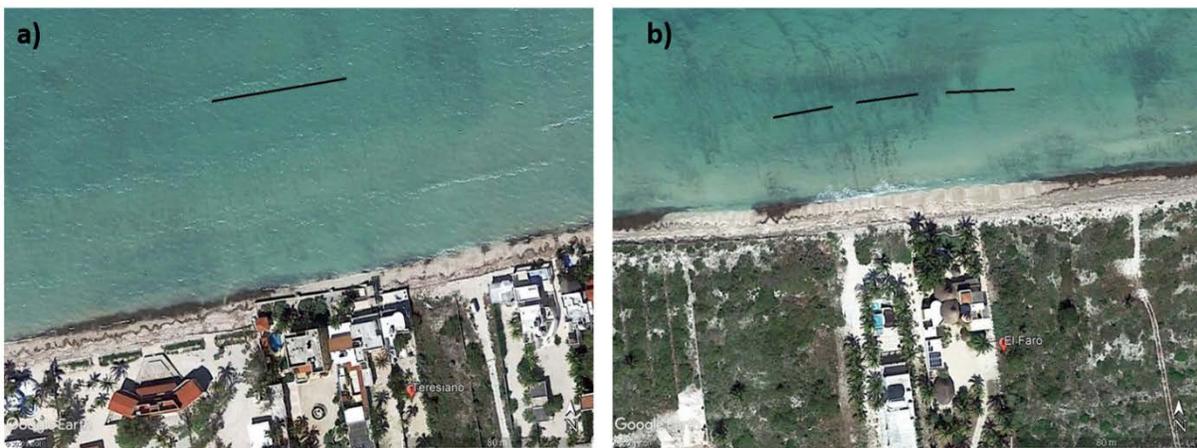


Figura 14. Ubicación de los rompeolas para los sitios del Teresiano (a) y el Faro (b).

Oleaje

Se utilizó la serie del ADCP de 10 m para reconstruir el oleaje a 4 m mediante un método de downscaling (Figura 15). Este método puede consultarse en el trabajo de Camus, Mendez, & Medina, (2011). Se utilizó la serie propagada para extraer las series temporales correspondientes a las fechas de simulación para el Teresiano y el Faro. La ausencia de datos en ciertas fechas de la serie temporal influyeron en la selección del periodo de simulación para ambos sitios. Para el Teresiano, se seleccionó del 7 de junio del 2017 al 28 de junio del 2017, y para el Faro del 24 de mayo del 2017 al 7 de junio del 2017.

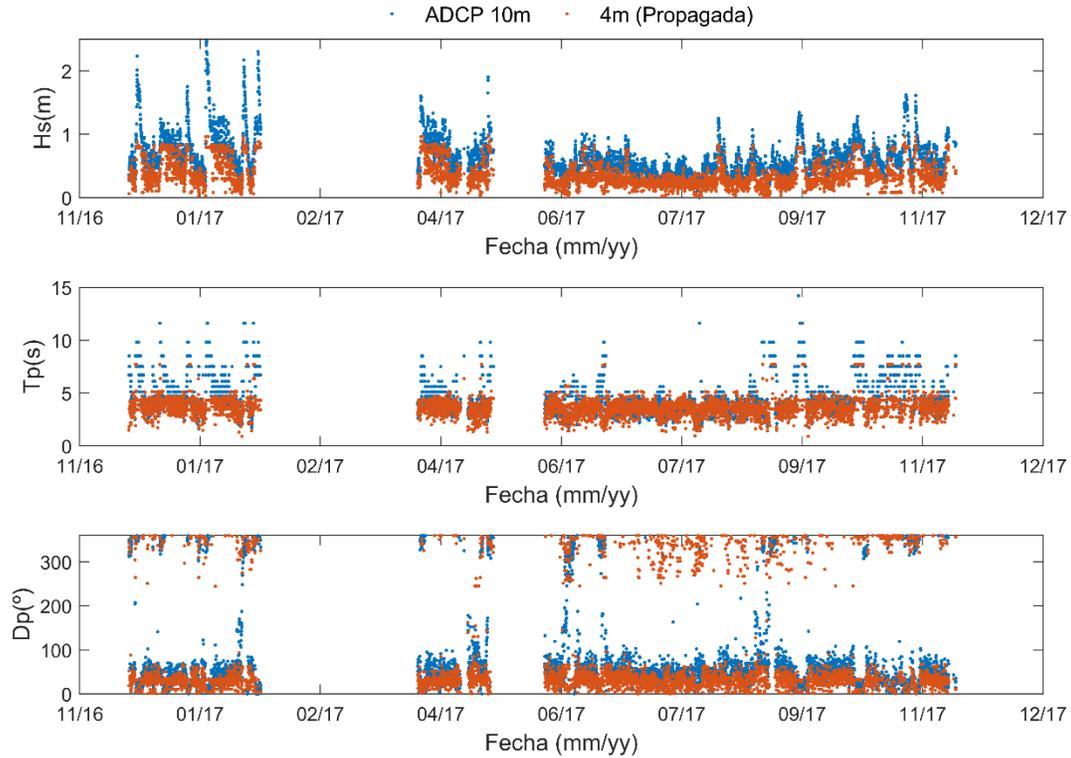


Figura 15. Serie temporal de H_s , T_p y D_p para las mediciones del ADCP a 10 m de profundidad y la reconstrucción a 4 m por un método de redes neuronales.

Batimetría

La evolución topo-batimétrica de El Teresiano se muestra en la Figura 16. A lo largo del monitoreo se observan cambios substanciales en la forma de la acreción, sin embargo, estos cambios no son únicamente asociados a las condiciones de oleaje, sino al diseño del rompeolas. Durante la campaña el rompeolas se extendió de 60 a 140 m a partir de septiembre 2017 y se reportaron cambios en la altura de la estructura debido a daños ocasionados a ella. Un mayor detalle de la evolución de la estructura se desarrolla en el trabajo de Torres-Freyermuth et al. (2019). Basado en su reporte se seleccionó el periodo con menor daño estructural y menor variabilidad en condiciones de oleaje, correspondiente al 7 Junio del 2017 al 28 de Junio del 2017. Para el modelo se utilizó la batimetría del 7 de junio como batimetría inicial (Figura 17-a). Esta batimetría se extendió hacia los 4 m de profundidad basada en las batimetrías medidas y se extendió longitudinalmente utilizando los perfiles laterales (Figura 17-b).

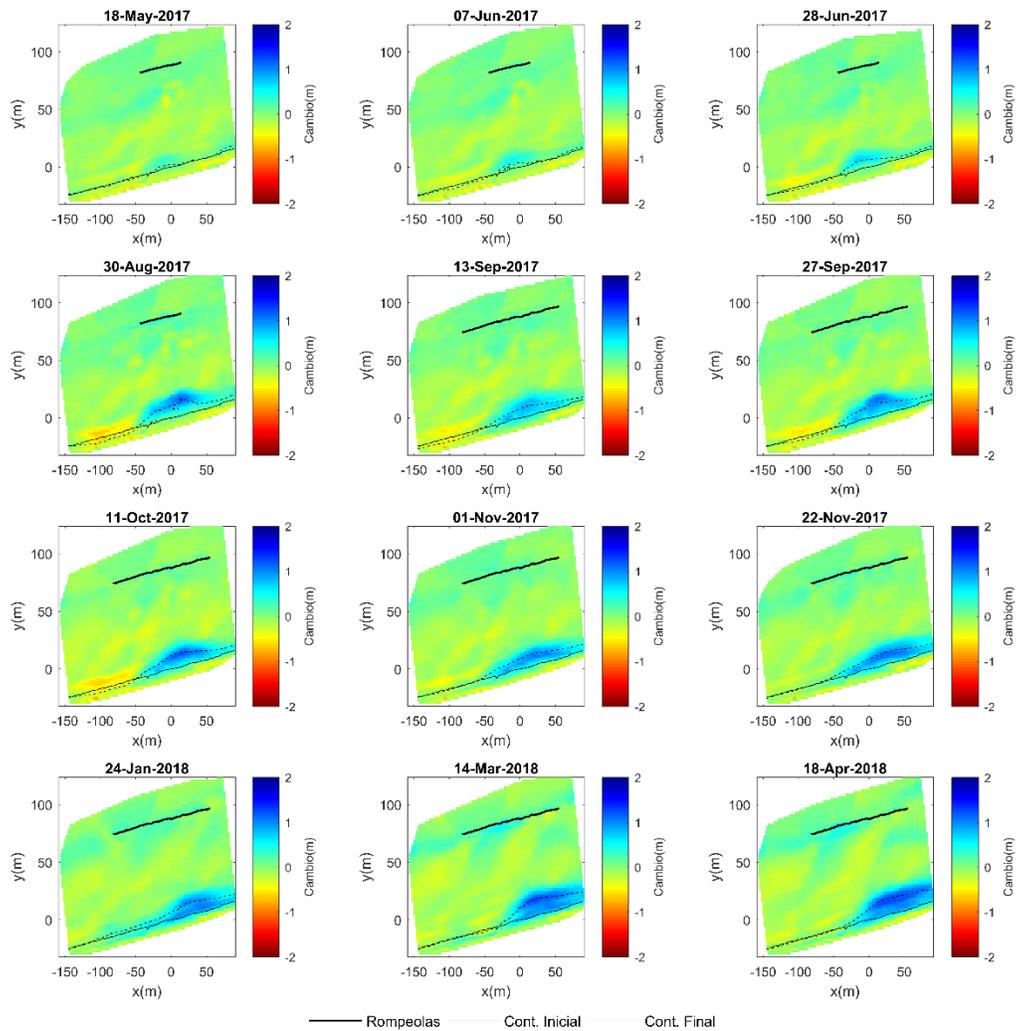


Figura 16. Evolución batimétrica por el efecto de un rompeolas sumergido geotextil para el sitio del Teresiano . La línea gruesa representa la estructura. La línea negra continua es el estado inicial de la costa y la línea punteada su evolución. Tonalidades azules indican acreción y rojos erosión.

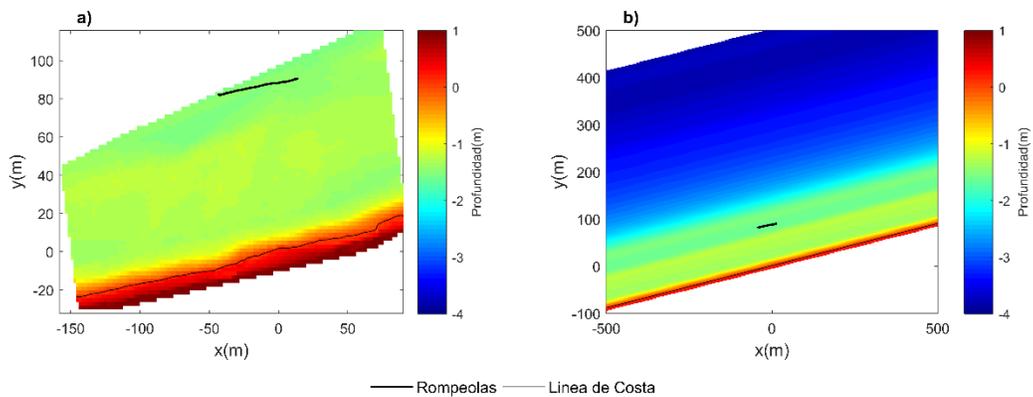


Figura 17. Panel a) muestra la batimetría inicial de El Teresiano. EL panel b) muestra la extensión longitudinal y transversal de la batimetría inicial para su implementación dentro del modelo.

Para el caso de El Faro, la evolución morfológica ocasionada por las estructura se muestra en la Figura 18. En este sitio no se reportaron cambios significativos a la estructura. Se seleccionó el periodo del 24 de mayo del 2017 al 7 de junio del 2017 basado en la duración entre batimetrías y las condiciones de oleaje presentes. Utilizando el 24 de mayo del 2017 como batimetría inicial (Figura 19-a), se aplicó el mismo proceso de extensión longitudinal y transversal a los 4 m (Figura 19-b) para implementarla en el modelo.

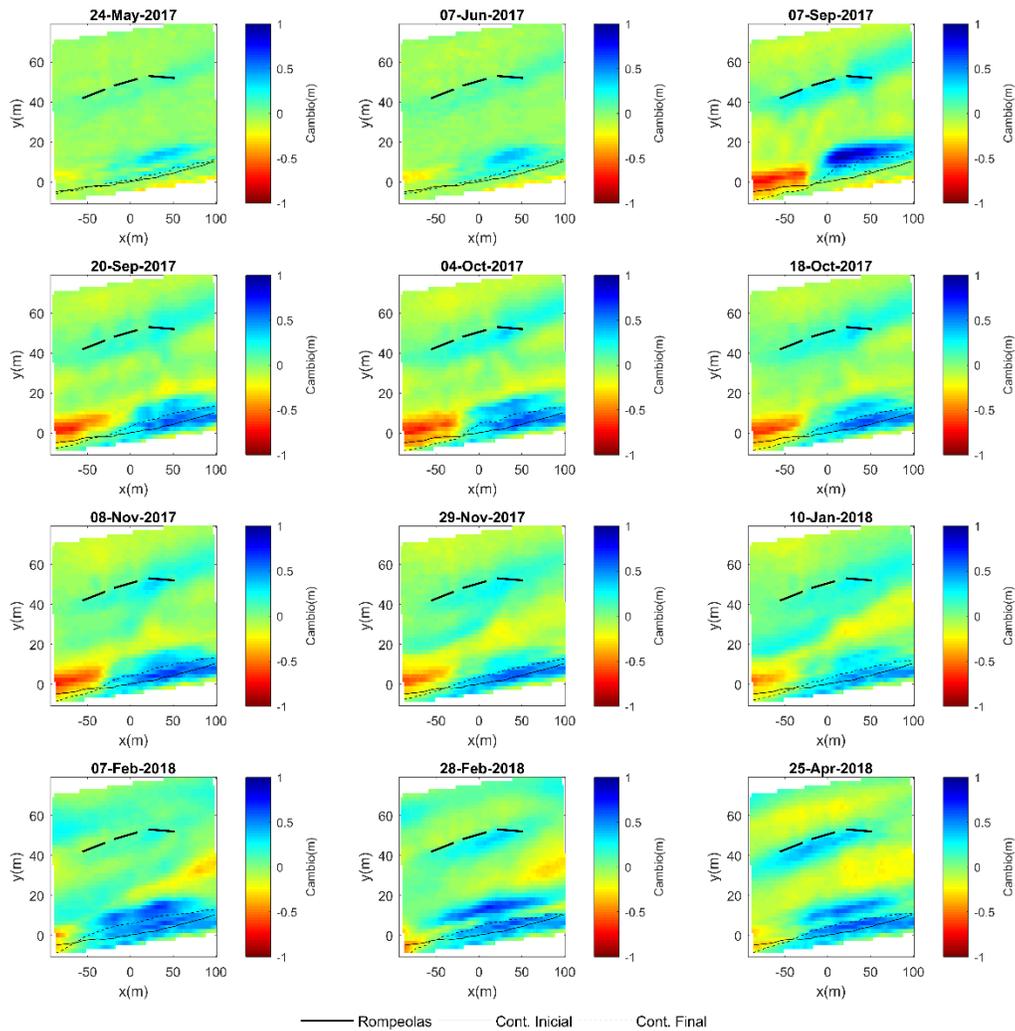


Figura 18. Evolución batimétrica por el efecto de tres secciones de Reef Balls para el sitio de El Faro. Las líneas gruesas representan la estructura. La línea negra continua es el estado inicial de la costa y la línea punteada su evolución. Tonalidades azules indican acreción y rojos erosión.

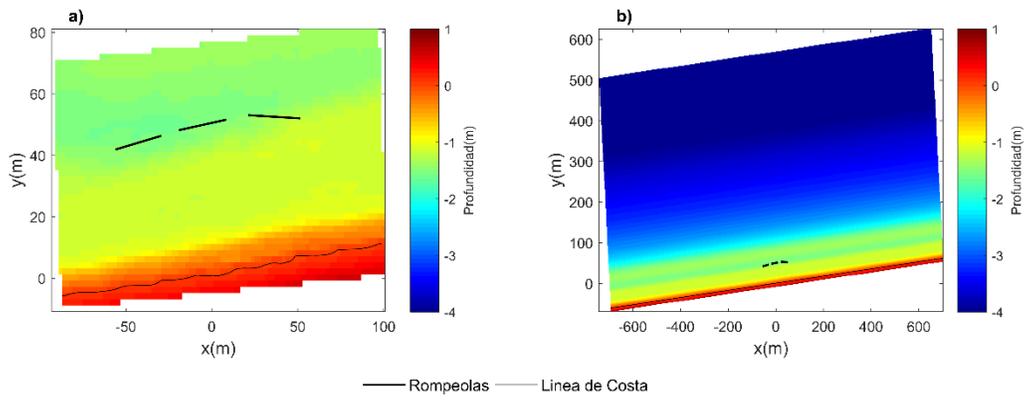


Figura 19. Panel a) muestra la batimetría inicial de El Faro. El panel b) muestra la extensión longitudinal y transversal de la batimetría inicial para su implementación dentro del modelo.

Capítulo V. Modelo numérico

En este trabajo se ha implementado el modelo numérico Delft3D para simular los efectos en la morfología de la playa inducidos por espigones y rompeolas sumergidos. Esto requiere de la calibración del modelo numérico que se lleva a cabo mediante un extenso análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo y un diseño apropiado de mallas, condiciones de frontera, y forzamientos del modelo. Este capítulo describe los módulos del modelo numérico utilizados y resume los puntos más importantes del análisis y la selección de los parámetros para la calibración del modelo numérico.

Descripción del modelo

Delft 3D es un programa computacional desarrollado por *Delft Hydraulics* utilizado para la simulación de procesos hidrodinámicos y morfodinámicos cercanos a la costa con un enfoque multidisciplinario. Esto se logra mediante diversos módulos dentro del programa dedicados a resolver fenómenos específicos, como la hidrodinámica (Delft3D-FLOW), propagación de oleaje (Delft3D -WAVE), transporte de sedimentos (Delft3D -SED), calidad del agua (Delft3D -WAQ), y ecología (Delft3D-ECO). Estos módulos pueden ser utilizados de manera independiente o acoplados entre ellos para resolver problemas específicos.

Por otra parte, el programa incluye herramientas que facilitan el procesamiento de datos y el ensamble del modelo, como:

- Delft3D-RFGRID: se utiliza para generar y modificar mallas computacionales, sobre las cuales trabajan los módulos del programa.
- Delft3D-QUICKIN: genera, edita, e interpola datos de batimetría sobre mallas computacionales. Esta herramienta también puede generar mapas de rugosidad, viscosidad, entre otros parámetros.
- Delft3D-QUICKPLOT: se utiliza para visualizar y animar los resultados del modelo, además facilita la exportación de resultados para su procesamiento en MATLAB.

En este trabajo se utilizan únicamente los módulos WAVE, FLOW y SED para simular los efectos de estructuras sobre la hidrodinámica y la morfodinámica de playas. Las herramientas previamente mencionadas fueron utilizadas para la implementación del modelo y el procesamiento de resultados.

Delft3D-WAVE

Este módulo utiliza el modelo espectral de oleaje de tercera generación SWAN. El modelo implementa la ecuación discreta de balance de acción sobre mallas estructuradas (rectilíneas, curvilíneas) o no estructuradas (triangulares) para simular los efectos de la propagación, refracción, asomeramiento, generación, disipación, e interacciones no lineales del oleaje. Además, el modelo considera los efectos de transmisión, reflexión y difracción del oleaje asociados a la presencia de obstáculos como rompeolas. SWAN utiliza esquemas numéricos implícitos, los cuales son más robustos y eficientes sobre aguas someras, por lo que, en general el modelo puede ser aplicado en estuarios, lagos, islas de barrera, canales y en la zona costera. El uso de mallas permite realizar anidaciones desde regiones grandes en aguas profundas utilizando mallas gruesas hacia regiones pequeñas en aguas somera con mallas de mayor resolución (Delft University of Technology, 2006).

El modelo puede ser utilizado en modo estacionario o no estacionario. El modo estacionario debe ser utilizado cuando la residencia del oleaje en la malla computacional es relativamente corta en comparación a la escala de tiempo de las condiciones geofísicas como viento o mareas. El caso no-estacionario utiliza corridas cuasi-estacionarias (Deltares, 2018b).

La evolución de espectro del oleaje se describe por la ecuación de balance de acción espectral (Ec. 4). La cual es una ecuación diferencial de primer orden con las variables independientes de tiempo (t), frecuencia relativa (σ) y dirección de propagación (θ). La variable dependiente es la densidad de acción (N) la cual se relaciona con la densidad de energía (E) como $N = E/\sigma$ y se conserva durante su propagación en presencia de corrientes, mientras que la densidad de energía no (Delft University of Technology, 2006). En coordenadas cartesianas la ecuación se define como:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (4)$$

El primer término del lado izquierdo representa la tasa de cambio de densidad en el tiempo, este término se omite en el modo estacionario. El segundo y el tercer término representan la propagación de la acción en el espacio geográfico x e y , respectivamente. El cuarto término representa el desplazamiento de frecuencias relativas por variaciones en la profundidad y corrientes. El quinto término representa la refracción por profundidad y corrientes. El término a la derecha representa los efectos de generación, disipación e interacciones no lineales. En aguas someras seis procesos contribuyen a este término:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (5)$$

Los términos denotan, generación de oleaje por viento (S_{in}), transferencia no lineal de la energía del oleaje por interacciones por triadas (S_{nl3}) y cuádrupletas (S_{nl4}), los últimos tres términos representan la disipación del oleaje por efectos de whitecapping ($S_{ds,w}$), la fricción del fondo ($S_{ds,b}$) y la rotura del oleaje ($S_{ds,br}$). Cabe resaltar que el proceso de difracción no es representado en la ecuación (Booij, Ris, & Holthuijsen, 1999).

La generación por viento se describe utilizando el mecanismo de resonancia por Philips (1957) y el mecanismo de retroalimentación de Miles (1957). Las interacciones por triadas se calculan con el método de aproximación de triada agrupada (LTA) de Eldeberky (1996) y las interacciones por cuádrupletas por el método de aproximación de interacción discreta (DIA) de Hasselmann (1998). La disipación por *whitecapping* utiliza el modelo de pulso de Hasselmann (1974). La disipación por fondo es principalmente inducida por la fricción del fondo y puede estimarse utilizando el modelo JONSWAP por Hasselmann et al. (1973), el modelo de ley de arrastre de Collins (1972) y el modelo de viscosidad de remolino (*eddy viscosity*) por Madsen et al. (1988). La disipación por rotura del oleaje se calcula utilizando el modelo de rotura de Battjes y Janssen (1978) el cual incluye parámetros ajustables α y γ para la disipación de la energía y el índice de rotura, respectivamente. Una descripción detallada de las ecuaciones utilizadas para calcular cada término puede consultarse en los trabajos de Booij et al. (1999), Delft University of Technology (2006), Holthuijsen (2007), Ris (1997), y Ris, Holthuijsen, & Booij (1999).

El proceso de difracción usualmente no es representado en modelos basados en el balance de energía espectral, debido a que su implementación numérica transforma la ecuación de una diferencial de primer orden a una de cuarto orden. Además, las puntas de estructuras costeras crean singularidades en el campo de oleaje las cuales son difíciles de simular por modelos numéricos. Sin embargo, el modelo SWAN utiliza una aproximación basada en la ecuación de pendiente suave por refracción y difracción omitiendo la

información de la fase. Este proceso es descrito con precisión sobre mallas finas de alrededor 1/10 de la longitud de la onda y debe evitar utilizarse en la presencia de estructuras reflejantes que generen ondas estacionarias, como es el caso de los puertos (Holthuijsen, 2007).

Delft3D-FLOW

El módulo Delft3D-FLOW es un programa multidimensional (2DH o 3D) para simular el flujo no estacionario y el fenómeno de transporte que resulta de forzamientos por marea y meteorológicos sobre una malla rectilínea o curvilínea. El módulo resuelve las ecuaciones de continuidad, momento horizontal, y la de transporte para conservación de constituyentes. Estas ecuaciones se derivan de las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles, bajo los supuestos de aguas someras, y ondas de Boussinesq.

Si el fluido simulado es homogéneo, las simulaciones pueden realizarse en 2DH (promediadas en profundidad), por ejemplo, en la simulación de ondas de marea, elevación por tormenta, tsunamis, oscilaciones en puertos y en el transporte de contaminantes en un régimen totalmente mezclado.

La modelación en 3D se utiliza cuando las variaciones en la vertical son significativas, ocasionadas por variaciones del viento, fuerza de Coriolis, batimetría o diferencias de densidades, por ejemplo, enfriamiento de agua en costas o lagos, surgencias, intrusiones salinas en estuarios, descargas de ríos y estratificación térmica en lagos u océanos. En modelos 3D el módulo ofrece dos opciones de mallas distintas, en coordenadas σ (modelo σ) y en coordenadas cartesianas Z (modelo Z). Las ecuaciones que se resuelven son similares, pero con algunas diferencias fundamentales que se discuten en el manual.

La ecuación de continuidad se describe como:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial((d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial((d+\zeta)V\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \eta} = (d + \zeta) \quad (6)$$

Donde, U y V son velocidades promediadas, Q representa las contribución por unidad de área de descarga o extracción de agua, precipitación o evaporación. $\sqrt{G_{\xi\xi}}$, $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ son coeficientes usados para transformar coordenadas curvilíneas a rectangulares, d es la profundidad y ζ es la elevación de la superficie libre.

Las ecuaciones de momento horizontal en las direcciones ξ y η son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - fv = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \\ \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - fu = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \\ \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned}$$

Donde ν_V es un coeficiente de viscosidad. P representa el gradiente de presión. F son los esfuerzos de Reynolds y M son las contribuciones de esfuerzos externos.

El flujo en ríos, estuarios y zonas costeras transportan sustancias disueltas, salinidad o calor. En el módulo el transporte de materia y calor se resuelve por la ecuación de difusión y advección en las tres direcciones. La ecuación en coordenadas horizontales y verticales (σ) se describe como:

$$\frac{\partial(d+\zeta)c}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \left\{ \frac{\partial[\sqrt{G_{\eta\eta}}(d+\zeta)uc]}{\partial \xi} + \frac{\partial[\sqrt{G_{\xi\xi}}(d+\zeta)vc]}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial \omega c}{\partial \sigma} = \frac{d+\zeta}{\sqrt{G_{\xi\xi}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \left\{ \frac{\partial}{\partial \xi} \left(D_H \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial c}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(D_H \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) \right\} + \frac{1}{d+\zeta} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(D_V \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) - \lambda_d(d+\zeta)c + S \quad (8)$$

donde, D_H es el coeficiente horizontal de difusión, D_V el coeficiente vertical de difusión. λ_d representa los procesos de decaimiento de primer orden y S son términos de descarga de agua o calor por la superficie libre.

El módulo realiza diversos supuestos (descritos en el manual), entre ellos, el modelo utiliza los esfuerzos de Reynolds (F) para calcular la turbulencia a través de modelos de cierre de turbulencia que se relacionan a las ecuaciones de Reynolds-promediadas. Los esfuerzos Reynolds se modelan utilizando el concepto de viscosidad eddy (*eddy viscosity*). Este concepto difiere en términos de orden en diferentes casos: en simulaciones 2D y 3D, para diferentes escalas horizontales y verticales de turbulencia y para mallas finas o gruesas. En general la viscosidad eddy está en función del espacio y el tiempo, por lo que en el modelo se trata como un parámetro de calibración. Para simulaciones 2D la turbulencia se representa como el producto entre el coeficiente de viscosidad y el gradiente de velocidad a través de formulaciones Elder. El parámetro de viscosidad horizontal es mucho mayor que el de vertical. Los coeficientes de viscosidad y difusividad pueden ser constantes o calculados a través de un método llamado "Simulación de Eddy Horizontales Largos (HLES, Horizontal Large Eddy Simulation)". Ambos coeficientes son utilizados como parámetros libres en la calibración del modelo.

Para resolver las ecuaciones planteadas en el modelo se requiere de condiciones iniciales de frontera para niveles de agua y velocidades de corrientes horizontales. Estos datos pueden ser obtenidos por mediciones, tablas de marea o a partir de otros modelos. Las fronteras pueden ser cerradas (líneas de costa) o abiertas (agua). En los modelos numéricos las fronteras abiertas restringen el área computacional y deben imponerse lo más alejado posible del área de interés. Se distinguen cinco condiciones de fronteras en el modelo: nivel de agua, velocidad, descarga, Neumann, y Riemann.

La implementación de estructuras costeras en modelos numéricos puede ser complicada, principalmente especificando la condición de frontera adecuada sobre las fronteras abiertas debido a que se debe conocer las condiciones de nivel de agua y corrientes a lo largo de la frontera. El uso de fronteras Neumann resuelven este problema. Este tipo de fronteras determinan la solución correcta imponiendo un gradiente de nivel a lo largo de la costa. Esta frontera debe aplicarse transversalmente a la costa y en conjunto con una frontera de nivel de agua en la zona off-shore para encontrar la solución matemática.

Para el fondo también se aplica una condición de frontera relacionado con el esfuerzo del fondo sobre el flujo. Este esfuerzo se describe en términos del coeficiente de rugosidad Chézy. En el modelo numérico, este coeficiente se puede calcular a través de tres diferentes formulaciones: Chézy, Manning y White-Colebrook. Estas formulaciones varían si la simulación es en 2D o 3D, la diferencia depende en el grosor

relativo de las capas computacionales del fondo. Para aplicar formulaciones en 2D el perfil de velocidades vertical debe ser casi logarítmico, como en ríos, flujos en estuarios por mareas, y en la costa.

Las condiciones hidrodinámicas calculadas por este módulo pueden ser utilizadas como forzamientos en otros módulos como WAVE, ECO, SED, D-Waq PART, D-Water Quality, a través del acoplamiento entre ellos. En este trabajo utilizo el acoplamiento entre FLOW, WAVE y SED. En la versión utilizada de Delft3D, el módulo SED está incluido dentro del módulo FLOW.

Delft3D-SED

Este módulo se encarga del transporte de sedimentos, para sedimentos no-cohesivos (arenas) y cohesivos (lodos), y los cambios morfológicos a través de transporte en suspensión y de fondo. El transporte se calcula resolviendo la ecuación de advección-difusión (balance de masa):

$$\frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial t} + \frac{\partial uc^{(\ell)}}{\partial x} + \frac{\partial vc^{(\ell)}}{\partial y} + \frac{\partial (w-w_s^{(\ell)})}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{s,x}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{s,y}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{s,z}^{(\ell)} \frac{\partial c^{(\ell)}}{\partial z} \right) = 0 \quad (9)$$

donde, $c^{(\ell)}$ es la concentración de sedimento. u, v, w son las componentes de la velocidad del flujo. $\varepsilon_{s,y}^{(\ell)}$, $\varepsilon_{s,x}^{(\ell)}$, $\varepsilon_{s,z}^{(\ell)}$ son la difusividad eddy de los sedimentos y $w_s^{(\ell)}$ es la velocidad de asentamiento del sedimento.

Esta ecuación se resuelve de la misma manera que la ecuación de transporte de otros constituyentes, pero se presentan algunas diferencias para el caso de sedimentos, como, el intercambio de sedimento entre el fondo y el flujo, y la velocidad de asentamiento bajo la acción de la gravedad. La formulación para estos procesos son específicas para lodos y arenas.

En el caso de transporte de sedimentos no-cohesivos, el modelo utiliza la formulación de Van Rijn (1993) por default pero también incluye otras formulaciones como, Van Rijn (2004), Bijker(1971), Soulsby/Van Rijn, entre otras. En general, las diferencias principales entre formulaciones depende de sus parámetros de calibración, su capacidad para distinguir entre transporte de fondo o en suspensión y la inclusión del transporte asociado al oleaje. En el caso de la formulación de Van Rijn (1993) y Van Rijn (2004), se implementan los parámetros de *sus*, *bed*, *susw*, y *bedw*, que permiten ajustar el transporte en suspensión, el de fondo, el de suspensión por oleaje y el de fondo por oleaje, respectivamente. El resto de las fórmulas y una descripción detallada de cada una se presentan en el manual (Deltares, 2018a).

Al igual que para la simulación del flujo, el módulo requiere de condiciones de frontera apropiadas. El uso de fronteras Neumann con gradientes de cero, permite utilizar la función de *NeuBcSand* (o *EqmBC*). Esta función especifica que para todas las fronteras de flujo entrante, el flujo debe contener la misma concentración de sedimentos calculada en el interior del modelo. Esta condición reduce los efectos de acreción y erosión sobre las fronteras.

Los cambios morfológicos del fondo se actualizan en cada paso de tiempo, como resultado de los gradientes de transporte calculados lo que genera erosión o deposición. Esto significa que los cálculos hidrodinámicos se llevan a cabo bajo condiciones correctas del fondo. Para comenzar a actualizar la batimetría es ideal utilizar un retraso que permite al modelo entrar en un estado dinámico después de las condiciones iniciales. Para esto se utiliza el parámetro *MorStt* o *spin up*, donde se especifica el tiempo de espera para comenzar a actualizar la batimetría.

Para simulaciones a largo plazo, donde el cambio morfológico ocurre en mayor escala de tiempo que el forzamiento (como en flujo por mareas), el tiempo computacional se incrementa considerablemente. Para este problema se puede implementar un factor de escala de tiempo morfológico (*Morfac*). Este factor multiplica los flujos de erosión y acreción del fondo al flujo y viceversa por un valor de escala de tiempo. Es decir, para una simulación de una hora de cambios morfológicos, un valor *morfac* de 1 considera los cambios en tiempo real; para un valor de 24 los cambios morfológicos equivalen a un día de transporte. Para mantener estabilidad numérica este valor debe ser menor a 1,000. Sin embargo, el uso de este factor debe considerar los cambios en el transporte de sedimento por efectos de los forzamientos en la simulación, como su duración, su variabilidad y el tiempo de transición de los eventos (Deltares, 2018a).

Estabilidad numérica

En el módulo WAVE, la discretización de la ecuación utilizada por SWAN se basa en diferencias finitas por un método de líneas. Lo que significa que la integración en el tiempo es independiente de la discretización espacial. Además, la integración en el tiempo es implícita por lo que los esquemas de diferencias finitas son estables sin importar el tamaño de la malla. Los esquemas deben ser suficientemente precisos para un paso de tiempo y tamaño de malla seleccionado en base a la escala de los fenómenos. Es decir, la selección de la resolución de la malla debe ser suficiente para resolver todos los detalles relevantes para la simulación, como, la batimetría, corrientes, fricción por fondo, vegetación o el viento. La selección del paso de tiempo debe ser suficientemente pequeño para que las variaciones en el tiempo de la batimetría, corriente, nivel de agua o viento se resuelvan satisfactoriamente (Delft University of Technology, 2006).

El módulo FLOW basado en diferencias finitas, utiliza un esquema implícito llamado '*Alternate Direction Implicit (ADI)*'. Este método resuelve las ecuaciones de manera consistente, de tal manera que la precisión en el espacio es por lo menos de segundo orden. A pesar de que este método es incondicionalmente estable, para términos de precisión se requiere cumplir con una condición de estabilidad basada en el número de Courant (C_f) (Vlijm, 2011), la cual se describe como:

$$C_f = 2\Delta t \sqrt{gh \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)} \quad (10)$$

donde Δx , Δy es el tamaño de las celdas de la malla, Δt es el paso de tiempo, h es la profundidad local, y g la gravedad. Para tener simulaciones eficientes, la selección del paso de tiempo debe ser lo suficientemente grande sin exceder el número límite de Courant. Para simulaciones con pocas variaciones en la batimetría este límite es de 10, para ríos se recomienda un valor de $4\sqrt{2}$ (Deltares, 2018a).

Acoplamiento

El acoplamiento entre el módulo de FLOW y WAVE permite considerar el efecto del flujo sobre el oleaje (por set-up, refracción de corrientes y efectos del fondo) y el efecto del oleaje sobre las corrientes (por forzamientos, turbulencia y esfuerzos cortantes del fondo). Las fuerzas generadas por el oleaje pueden calcularse utilizando el tensor de radiación o la tasa de disipación. El oleaje en las costas incrementa la mezcla vertical debido a la turbulencia por la rotura de la ola, se generan corrientes longitudinales y transversales y el esfuerzo del fondo se incrementa afectando la mezcla de sedimentos que incrementa

la fricción del fondo. El acoplamiento puede ser en línea o *'offline'*, el primero realiza un intercambio de información dinámico entre módulos para considerar el efecto de corrientes en el oleaje y viceversa; el segundo solo considera el efecto de las corrientes en el oleaje (Deltares, 2018a).

Implementación del modelo numérico

El modelo consiste en el acoplamiento en línea de los módulos WAVE y FLOW con el transporte de sedimentos activado (SED). El acoplamiento ocurre cada hora con un paso de tiempo (dt) de 0.01 minutos para satisfacer la condición de estabilidad del número de Courant. El módulo WAVE propaga el oleaje y calcula los esfuerzos del oleaje por tasa de disipación, esta información se transfiere al módulo de FLOW donde se calculan las corrientes, el nivel del mar, el transporte de sedimentos y los cambios en la morfología de la playa. Los resultados de este módulo se comparten al módulo WAVE para que este utilice la nueva batimetría y considere los efectos de las corrientes en el oleaje. Este proceso se repite hasta terminar el periodo de simulación. Un esquema simplificado de este proceso se muestra en la Figura 20.

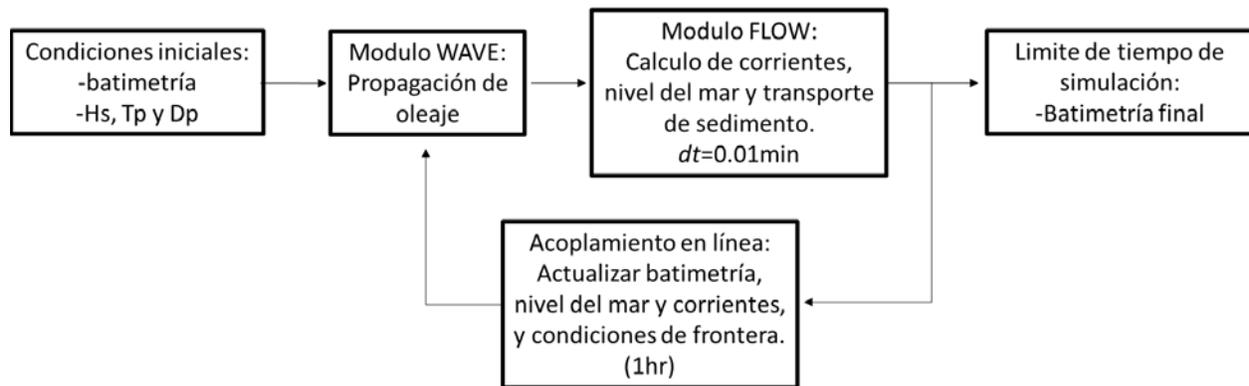


Figura 20. Esquema de flujo del ensamblaje general del modelo.

Mallas de computo

La propagación de oleaje en el módulo WAVE ocurre sobre una serie de mallas anidadas diseñadas para reducir errores en las fronteras laterales durante la propagación del oleaje. Las mallas fueron generadas utilizando RFGRID. Se comenzó por una malla gruesa de 8x4 m a partir de los 4 m de profundidad, seguida de una malla de 4x2 m, hasta alcanzar una malla fina de 2x1 m sobre la zona de surf. Un ejemplo de esta anidación se presenta en la Figura 21. Las dimensiones de las celdas (dx , dy) tienen un efecto sobre la calibración del oleaje, especialmente sobre la zona de surf (Apéndice I). Por esta razón, una vez calibrado el modelo es importante conservar las dimensiones de la malla de surf para todas las simulaciones. Para el módulo de FLOW se utilizó la misma malla de la zona de surf de 2x1 m. Esta anidación y selección de mallas se aplicó en todas las simulaciones de este trabajo.

La extensión longitudinal y transversal de las mallas son independientes al sitio de estudio, ya que dependen de la batimetría procesada en el Capítulo III. La batimetría es integrada a la malla mediante una interpolación triangular a través de QUICKIN.

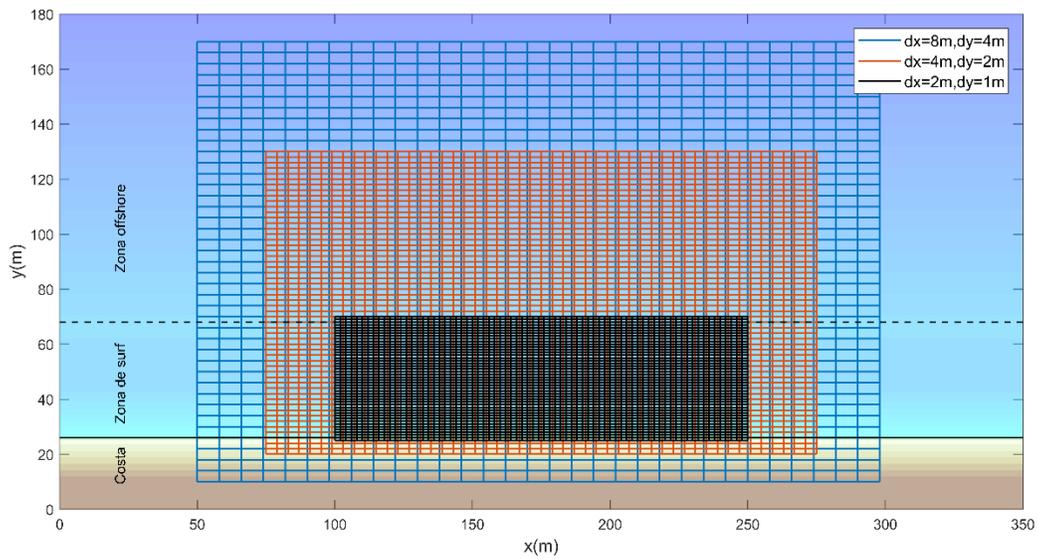


Figura 21. Ejemplo de anidación de mallas utilizado en las simulaciones.

Condiciones de contorno

En el módulo de FLOW se definieron cuatro fronteras, una off-shore, dos laterales y la frontera cerrada correspondiente a la costa. Las fronteras laterales se definieron como tipo Neumann y la frontera off-shore como nivel de agua con una baja reflectividad ($S_2=100$). El diseño de la asignación de fronteras se muestra en la Figura 22. Sobre la frontera de nivel de agua se introducen los datos horarios de la marea, mientras que las fronteras Neumann se asignan con valor de cero. De esta manera el modelo calcula automáticamente los niveles de agua, la velocidad de corriente y el transporte de sedimento en las fronteras laterales. Además, se activó el comando 'Cstbnd' para evitar la formación de fronteras artificiales a lo largo de las fronteras establecidas. Este diseño es recomendado por el manual de FLOW específicamente para simulaciones cercanas a la costa (Deltares, 2018a).

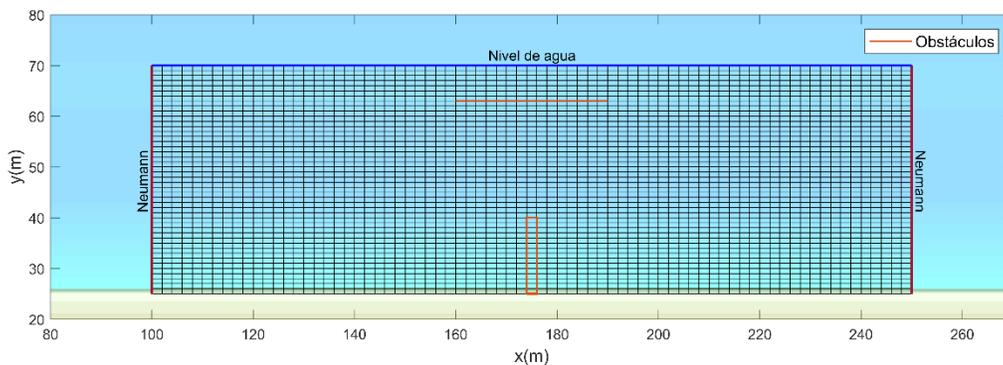


Figura 22. Posición de las condiciones de contorno utilizadas en el módulo Flow y diseño de los obstáculos dentro de la malla computacional.

Obstáculos

Para simular los efectos de las estructuras (espigón y rompeolas sumergidos) es necesario definirlos dentro de la malla computacional en ambos módulos. Existen distintas recomendaciones por el manual y estudios alternos para asignar estructuras dentro del modelo. En el caso del espigón, los trabajos de Arab (2003) y Visser (2002) determinan que la mejor manera de implementar la estructura es a través de un obstáculo cuadrado en el módulo de WAVE y como '*thin dam*' en el módulo FLOW. Para el rompeolas sumergido, trabajos como Mojabi (2016) y Vlijm (2011) recomiendan implementar la estructura como batimetría, reducir su rugosidad y establecerla como no erosionable.

Los estudios previos no utilizan estructuras a escalas pequeñas como las de este trabajo. Por esta razón se realizó un análisis para la implementación de estas estructuras descrito en el Apéndice II. Los resultados del análisis coinciden con el método de implementación del espigón, pero difieren con el del rompeolas sumergido. El análisis demostró que para este caso el rompeolas puede ser implementado como un obstáculo en el módulo WAVE en forma de segmento y modificar su coeficiente de transmisión (Kt) (Figura 22), en el módulo FLOW no se introduce ningún obstáculo, ya que los efectos de la estructura son proporcionados por el módulo WAVE al FLOW. Por otro lado, el análisis también muestra el efecto de la difracción, en ambas estructuras el efecto es significativo en los cambios morfológicos ocasionados, por lo que debe mantenerse activado durante las simulaciones.

Para considerar la permeabilidad de las estructuras se modificó el coeficiente de transmisión de los obstáculos. En el caso del espigón, al ser impermeable, se le asignó un $Kt=0$. Para los rompeolas se utilizaron las fórmulas de Meer et al. (2004) y Buccino, Del Vita, & Calabrese (2014) descritas en el Capítulo II, de las cuales se obtuvo un Kt para el rompeolas geotextil de 0.68 y para los Reef Balls de 0.78.

Considerando las limitaciones del modelo y el método de implementación de la estructura, los valores de Kt obtenidos son razonables como una aproximación, ya que estos se mantienen fijos a lo largo del tiempo. Además, la ecuación de Meer et al., (2004) no es particular para tubos geotextiles a diferencia de la ecuación por Buccino, Del Vita, & Calabrese (2014) la cual es específica para Reef Balls. Estas limitaciones y suposiciones deben tomarse en cuenta al interpretar los resultados. Existen métodos para mejorar el cálculo de Kt dentro del modelo, como su variación en el tiempo y de su porosidad (M. Mojabi, 2016), pero van más allá del alcance de este trabajo.

Forzamientos

El modelo es forzado desde el módulo WAVE con el oleaje de las series de tiempo procesadas en el Capítulo IV para cada sitio (Figura 23) a través de un archivo '*wavecon*' que permite variar las condiciones de oleaje a lo largo del tiempo de simulación. Un ejemplo de este archivo se encuentra en el manual del módulo WAVE (Deltares, 2018b). El oleaje se introduce sobre la frontera offshore y se propaga en modo estacionario con una dispersión direccional (ms) de 5. El modelo transforma el oleaje utilizando un espectro tipo Jonswap con un factor de apuntalamiento de 3.3, un espacio direccional de 72 bins y considerando frecuencias mínimas de 0.1 a 2 Hz en 48 bins. Los tres sitios incluyen información de H_s , T_p y D_p , únicamente en el sitio de Sisal se utilizaron datos de marea.

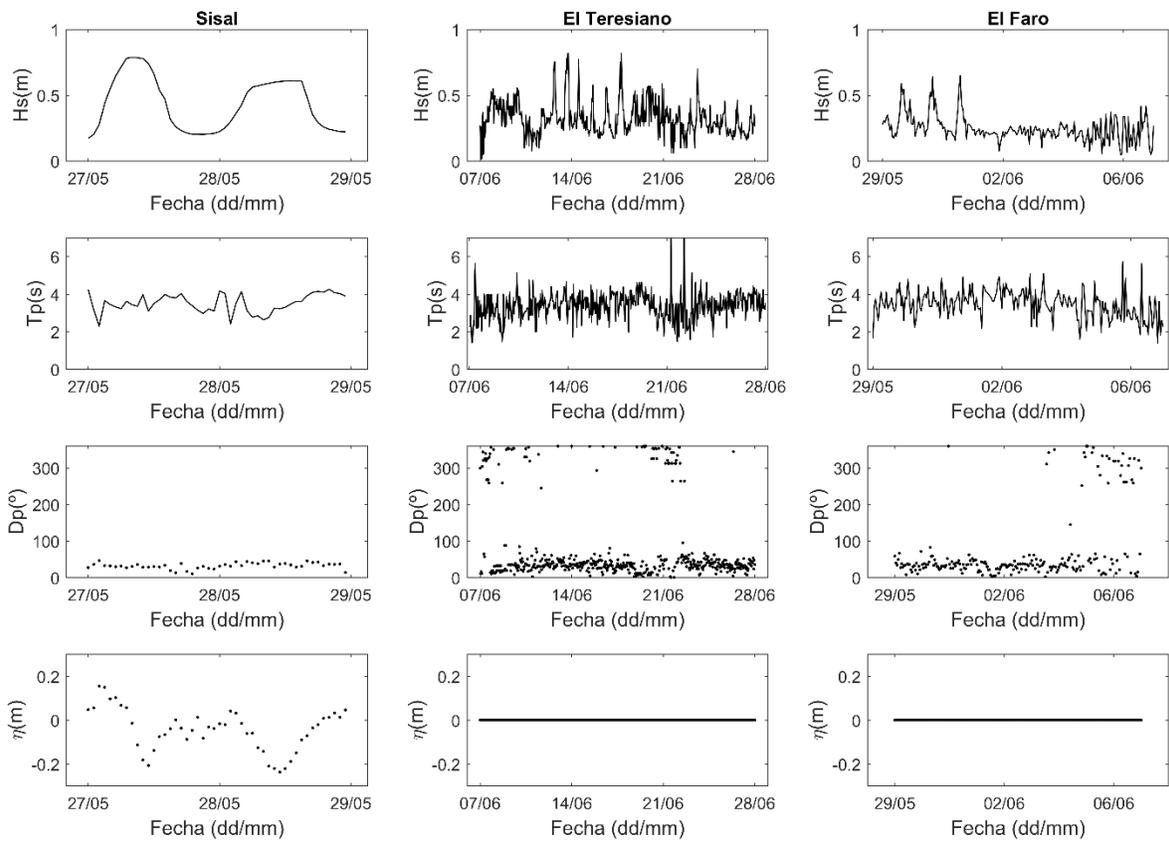


Figura 23. Series de tiempo de Hs, Tp, Dp y nivel del mar para las simulaciones en los sitios de Sisal, El Teresiano y El Faro.

Calibración

El modelo contiene un gran cantidad de parámetros libres para la calibración del módulo WAVE y del FLOW. El análisis del Apéndice I detectó aquellos con un mayor impacto sobre la calibración. En el módulo WAVE estos parámetros son *gamma*, *alpha*, el coeficiente de fricción y la profundidad mínima de cálculo. En el módulo FLOW son el coeficiente de rugosidad (Chézy), *eddy viscosity* y *dryflc*. En cuanto a los parámetros de calibración del transporte de sedimentos, la fórmula de transporte, *eddy diffusivity*, el coeficiente de suspensión por corrientes (*sus*) y oleaje (*susw*) y los de fondo (*bed* y *bedw*) son los que tienen un mayor peso.

Durante el proceso de calibración (Apéndice III) se detectaron algunas combinaciones de parámetros que se ajustaban a las mediciones en campo. La selección de la mejor combinación está en función de las comparaciones con mediciones en campo y de algunos criterios cualitativos que aplican para la costa norte de Yucatán. La Tabla I resume la selección óptima de estos parámetros y su comparación con los valores default del modelo.

Tabla I. Comparación de parámetros libres de calibración de oleaje (WAVE), corrientes (FLOW) y transporte (SED).

Módulo Wave			Módulo Flow			Módulo SED		
Parámetro	Default	Ajuste	Parámetro	Default	Ajuste	Parámetro	Default	Ajuste
<i>gamma</i>	0.7	0.6	<i>eddy viscosity</i>	1	0.1	<i>sus</i>	1	3
<i>alpha</i>	1	21	<i>Chezy</i>	65	100	<i>bed</i>	1	0
<i>fricc.</i>	0.068	0.35	<i>dryflc</i>	0.05	0.05	<i>susw</i>	1	0
<i>prof. min.</i>	0.05	0.2				<i>bedw</i>	1	0
						<i>eddy diffusivity</i>	10	0.001

La calibración del módulo WAVE consistió en la propagación del oleaje en 1D en SWAN y comparar los resultados de H_s con los valores del ADV2 de la campaña del espigón. La explicación con detalle de este proceso se describe en el Apéndice III. Los resultados muestran que la mejor combinación de parámetros es un *gamma* de 0.6, *alpha* de 21, un coeficiente de fricción tipo *Jonswap* de $0.35 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ y profundidad mínima de cálculos de 0.2 m. A diferencia de otros estudios de propagación de oleaje, el de coeficiente de fricción obtenido en la calibración es grande. Estos valores usualmente son de $0.034 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ para oleaje de swell y $0.068 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ para oleaje de viento basados en experimentos de laboratorio (Booij et al., 1999). En este caso el coeficiente asume mucha pérdida de energía por efectos del fondo a partir de los 4 m de profundidad, aunque este podría ser el caso, se desconoce el tipo de suelo presente a lo largo de todo el perfil como para justificar este valor.

Para la calibración de las corrientes en el módulo de FLOW, se utilizaron los datos de ADV1 y ADV2 para comparar resultados de velocidad de corrientes. El diseño de esta calibración se describe en el Apéndice III. Los resultados indican que un *eddy viscosity* de 0.1, un valor de rugosidad de 100 tipo Chézy y *dryflc* de 0.05 m representan de mejor manera las corrientes en la zona de surf. Al incrementar el valor de Chézy se reduce la rugosidad del fondo, por lo tanto, las corrientes aumentan en velocidad. Este parámetro usualmente se reporta entre valores de 40 a 70. Al incrementarlo hasta 100, como en este trabajo, se esperan altas velocidades de corriente en la zona de surf. Para la zona de swash la calibración se realizó cualitativamente debido a las limitaciones del modelo y a la falta de mediciones en campo en esta zona. Los parámetros de *dryflc* y la profundidad mínima de cálculo del módulo WAVE permitieron obtener una buena aproximación con valores de 0.05 m y 0.20 m, respectivamente.

Para la calibración morfodinámica se investigó el comportamiento de distintas fórmulas de transporte, el parámetro de *eddy diffusivity* y los efectos de los parámetros de calibración *sus*, *bed*, *susw* y *bedw* (Apéndice III). Se determinó que la fórmula de Van Rijn (1993) presenta mejores resultados. Para el parámetro de *eddy diffusivity* se utilizó un valor pequeño de 0.001, ya que valores mayores generan comportamientos irregulares sobre la zona de swash. El parámetro *sus* es responsable de la mayor parte del transporte de sedimento, el transporte de fondo aportado por el parámetro *bed* no se considera significativo. Los parámetros *susw* y *bedw* generan comportamientos irregulares de transporte cercanos a la costa y es recomendado aplicarlos sobre aguas profundas y en simulación de migración de barras de arena (Brière, Giardino, & Van Der Werf, 2010; Trouw et al., 2012). Por estas razones los parámetros *bed*, *susw* y *bedw* fueron desactivados, únicamente se activó el valor de *sus* con un valor de 3.

Capítulo VI. Resultados

Validación

Una vez calibrados los parámetros de los modelos se realizó la validación con el experimento del espigón de Sisal presentado en Medellín et al. (2018) y descrito en el capítulo 4. Los resultados de los modelos fueron comparados con las mediciones de campo. Para la validación hidrodinámica se comparó la H_s , η y las componentes de velocidad de corriente del modelo contra las mediciones obtenidas a partir de los ADVs localizados en la zona de rompientes. La validación morfodinámica consistió en la comparación de las mediciones topo-batimétricas contra los cambios morfológicos en el modelo.

Validación hidrodinámica

Para validar el comportamiento hidrodinámico en el modelo, se extrajeron las variables de H_s , η y velocidades de corriente promediadas en profundidad (*depth averaged velocity*). Estas variables se compararon con los datos medidos por los dos ADV vectors (Figura 24).

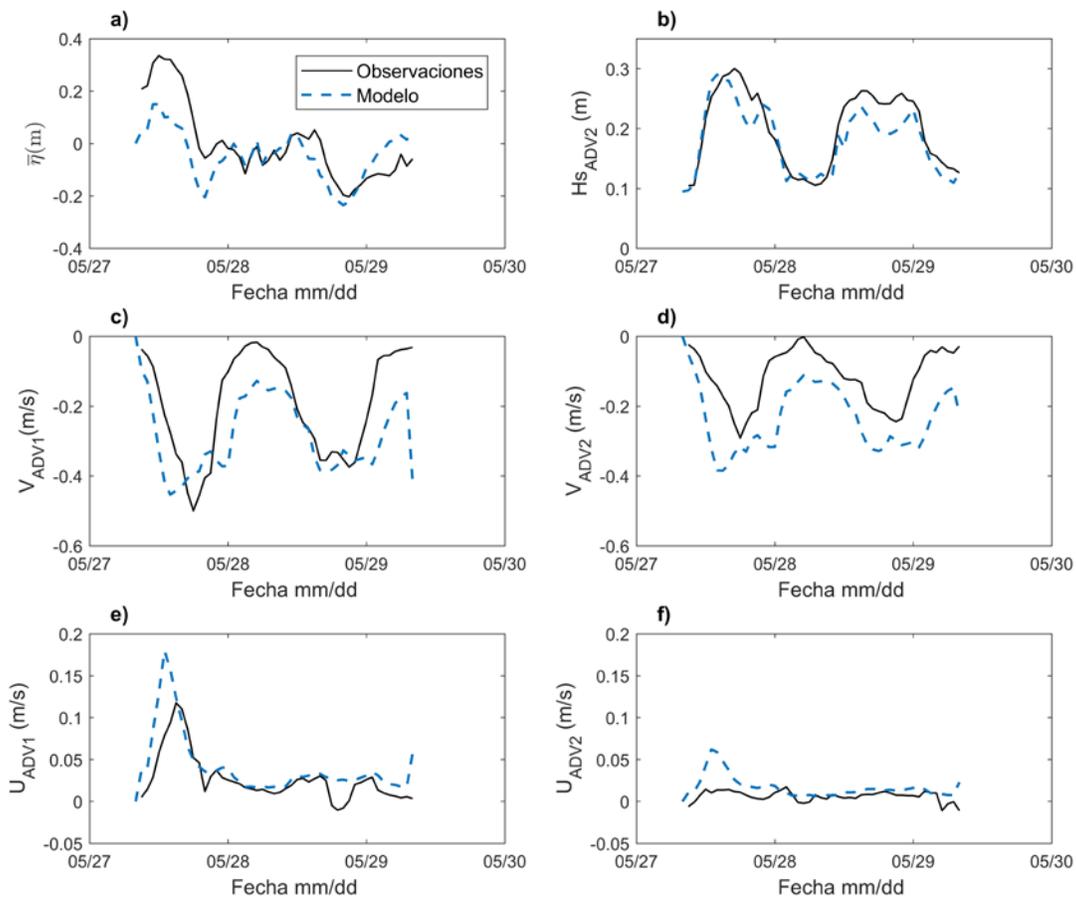


Figura 24. Comparación hidrodinámica de los resultados del modelo contra mediciones en campo con ADV de (a) η , (b) H_s , (c,d) velocidad de corriente longitudinal, V , y (e,f) transversal, U .

Para η (Figura 24-a) se encuentra una subestimación al inicio de la simulación asociada con el pico del evento de brisa marina. Esta diferencia puede estar atribuida a la falta de procesos en el modelo que contribuyan en el set-up del nivel del mar, como el generado por el viento. Por otro lado, describe de manera satisfactoria las variaciones del nivel posteriores.

El modelo numérico predice la variación diurna de la Hs (Figura 24-b) y presenta un buen ajuste para las condiciones bajas de oleaje, pero es subestimada durante condiciones de alta energía asociados a los eventos de brisas marinas. La diferencia es de alrededor 0.05 m, por lo que se considera aceptable. Diferentes combinaciones de los parámetros libres *alpha*, *gamma* y fricción pueden cambiar este comportamiento, pero se sobrestima durante baja energía. Este comportamiento se ilustra en los resultados del análisis del Apéndice III. La selección final de los parámetros queda al criterio del usuario.

La corriente longitudinal (Figura 24-c,d) captura de manera satisfactoria la respuesta a la variación diurna del oleaje. Este comportamiento es importante para simular apropiadamente las condiciones hidrodinámicas y morfodinámicas de la zona. En cuanto a la magnitud de la corriente, el modelo tiende a sobrestimar la velocidad durante condiciones bajas de oleaje. Para condiciones de alta energía de oleaje, las corrientes en el ADV1 se subestiman ligeramente durante el primer pico, pero coinciden en el segundo pico con velocidad de 0.4 m/s, en el ADV2 son subestimadas con una diferencia alrededor de 0.1 m/s para ambos eventos. El análisis del Apéndice III indica que este comportamiento es sensible a la calibración de oleaje en el módulo WAVE y los parámetros de *eddy viscosity* y rugosidad (Chézy).

En cuanto a la corriente transversal (*cross-shore*) (Figura 24-e,f), el modelo mantiene las velocidades pequeñas y en la misma dirección, comportamiento presente en las mediciones de ambos ADVs. Una comparación directa de la magnitud no es apropiada en este caso debido a que los resultados del modelo son promediados en profundidad. Para compararlas directamente se sugiere una modelación en 3D y determinar la profundidad exacta en la cual el sensor ADV fue colocado.

La comparación entre las mediciones y los resultados del modelo indican que el modelo simula adecuadamente las variables hidrodinámicas dentro de la zona de rompiente. Algunas de las diferencias encontradas en las variables se encuentran dentro de las limitaciones del modelo, mientras que otras dependen de la calibración utilizada, en el Capítulo VII se discute a fondo este aspecto. Para efectos de la modelación en este trabajo los resultados hidrodinámicos son satisfactorios.

Validación Morfodinámica

El proceso de validación morfodinámica del modelo se ha dividido en dos etapas. La primera consiste en la simulación del caso de Sisal durante la presencia del espigón (Figura 25). La segunda etapa simula la recuperación de la playa al remover la estructura (Figura 26). Durante la primera etapa el modelo presenta buena forma en la acreción corriente arriba de la estructura, sin embargo no simula el proceso de erosión que ocurre corriente abajo. Durante la etapa de recuperación el modelo erosiona la mayor parte del área de acreción, sin embargo no regresa totalmente a su estado inicial dejando la presencia de una pequeña acreción 48 después de su remoción.

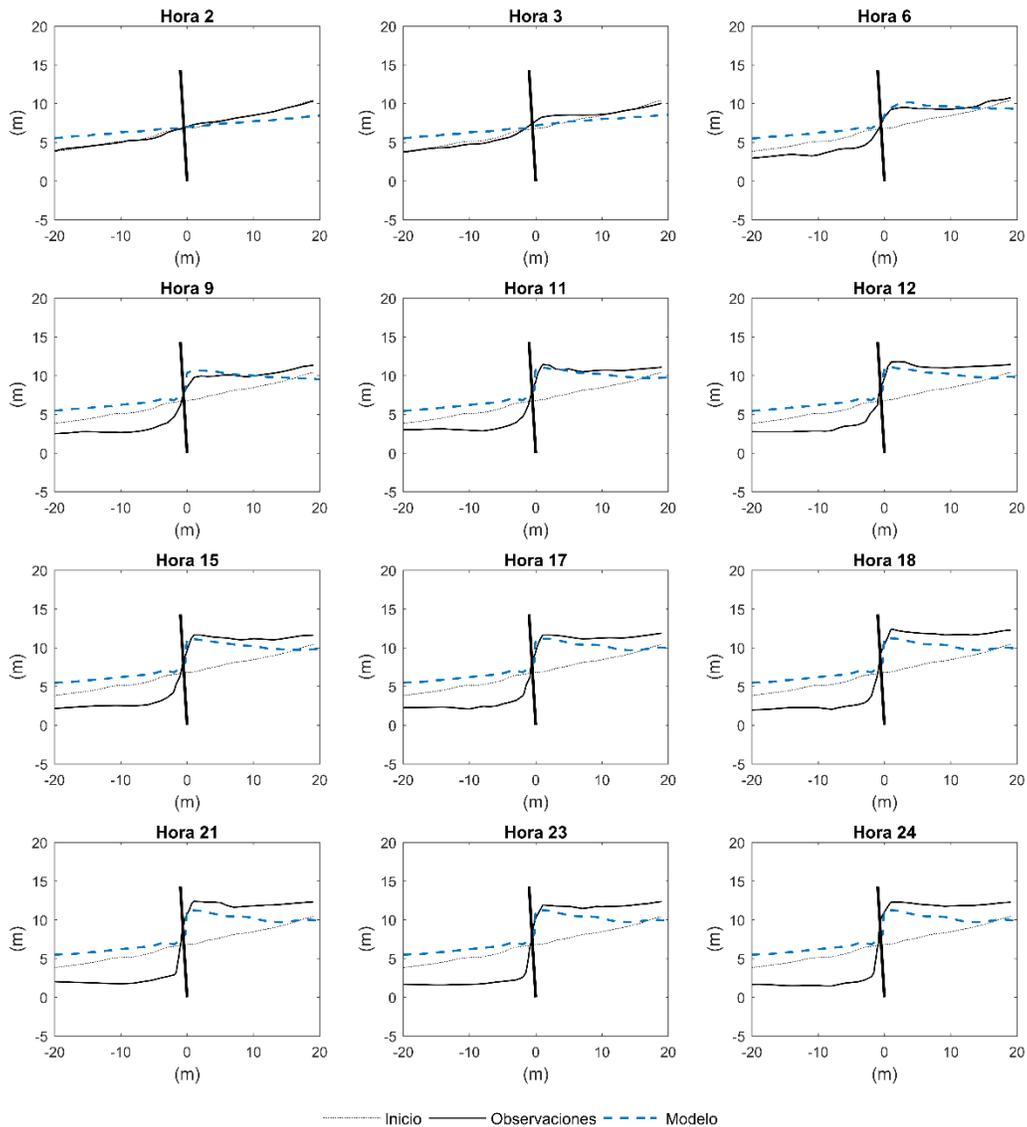


Figura 25. Comparación de cambios morfológicos entre mediciones y los resultados del modelo durante la presencia del espigón.

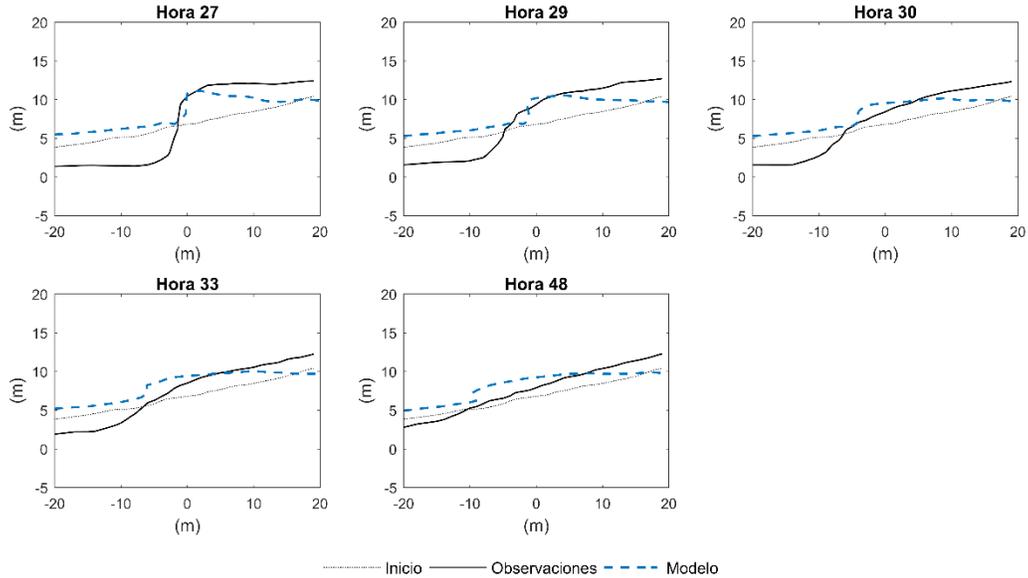


Figura 26. Comparación de cambios morfológicos entre mediciones y los resultados del modelo durante la recuperación de la playa al remover el espigón.

El inciso a) de la Figura 27 muestra los cambios del volumen de sedimento en ambos lados de la estructura. En azul se muestra la acreción corriente arriba de la estructura y en rojo la erosión corriente abajo. La línea punteada indica el momento en el que se remueve el espigón. Durante la presencia del espigón el modelo registra una acreción máxima de 40 m^3 , mientras que las mediciones 60 m^3 . El modelo no es capaz de reproducir la erosión por lo tanto no se presenta un cambio en volumen corrientes abajo, las mediciones indican una erosión de 40 m^3 . Tras remover el espigón la recuperación a la derecha de la estructura presenta una pérdida de sedimento similar a las mediciones. Corriente abajo se registra una acreción asociada al evento de recuperación en un patrón similar que a las mediciones.

El inciso b) de la Figura 27 corresponde al desplazamiento máximo del contorno 0.25 m en ambos lados de la estructura. Este contorno corresponde a una profundidad mayor al valor de profundidad mínima de cálculos seleccionada para el módulo WAVE. Durante la presencia del espigón, corrientes arriba el contorno se desplaza hacia el mar alrededor de 5 m en las mediciones y 4 m en el modelo. Del lado contrario de la estructura las mediciones muestran un desplazamiento hacia tierra de 4 m , el modelo no muestra desplazamiento ya que no hubo erosión. Al remover el espigón, el contorno a la derecha de la estructura regresa alrededor de los 2 m de desplazamiento hacia el mar en las mediciones y el modelo. Corriente abajo el contorno de las mediciones se regresa a su condición inicial alrededor de la hora 30 y se desplaza hacia el mar alrededor de 1 m para la hora 48. El modelo registra un desplazamiento similar hacia el mar a partir de la hora 30 hasta alcanzar los 2 m .

Durante la primera etapa la acreción alcanza una cuasi estabilidad 15 horas después de colocar la estructura, el modelo alcanza esta estabilidad en 10 horas. Para la segunda etapa los contornos regresan casi por completo a su estado inicial a las 48 horas, el modelo no regresa a su estado inicial en este tiempo.

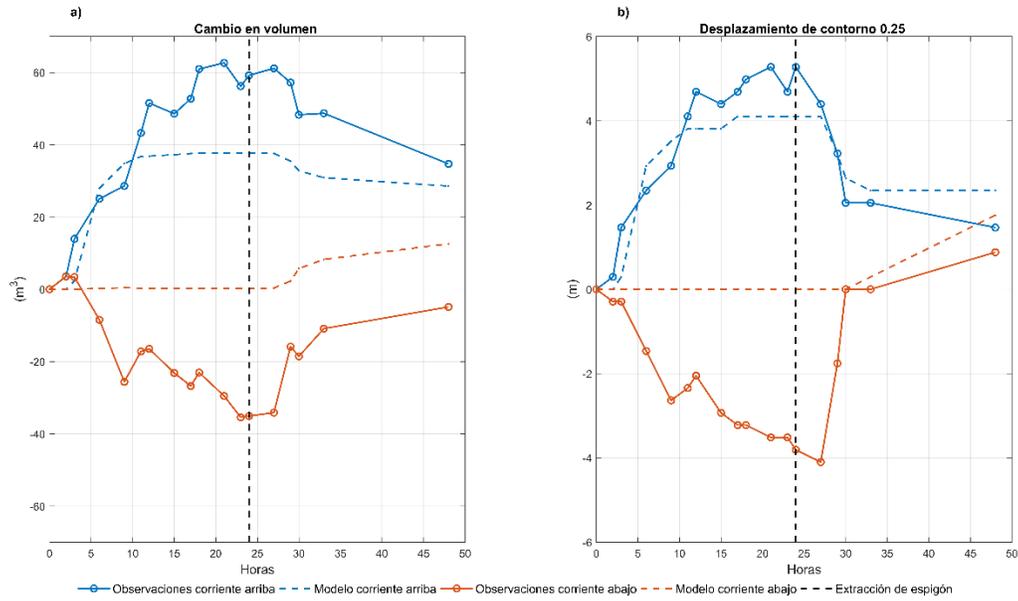


Figura 27. Comparación cuantitativa de los cambios de volumen de sedimento (a) y del desplazamiento del contorno 0.25m (b) entre las mediciones y el modelo.

Los resultados de esta validación indican que el modelo es capaz de reproducir de manera cuantitativa los patrones de acreción, pero los patrones de erosión adyacentes a la estructura no se reproducen. Este comportamiento se atribuye principalmente a irregularidades en el modelo al calcular corrientes alrededor del espigón, lo cual se discute a fondo en el Capítulo VII. Es importante considerar estas limitaciones para futuras aplicaciones del modelo.

Aplicación del modelo

El modelo calibrado y validado es aplicado para modelar el impacto de rompeolas sumergidos en la costa norte de Yucatán. Específicamente, se utilizó para los rompeolas sumergidos en la zona del Teresiano y el Faro. Los resultados de los cambios morfológicos se compararon con mediciones en campo y se analizó la capacidad del modelo de simular este tipo de estructuras. Además, el modelo numérico fue utilizado para realizar un estudio paramétrico basado en la metodología de Hsu & Silvester (1990), el cual fue evaluado con las mediciones de campo reportadas por Torres-Freyermuth et al. (2019) del Teresiano y El Faro .

Rompeolas sumergidos

Los resultados de las simulaciones del caso del rompeolas sumergido del Teresiano y los Reefballs de El Faro se muestran en la Figura 28. Para el rompeolas del Teresiano, el modelo sobrestima la acreción esperada sobre la costa. También muestra algunas formas de acreción y erosión considerables cercanas a la estructura, las cuales no están presentes en las mediciones. La zona de la acreción sobre la costa se genera alrededor de -60 m a la izquierda de donde se ubica en las mediciones. En el sitio de El Faro la acreción modelada es pequeña y similar a la medida en campo. La zona de acreción modelada se encuentra desplazada alrededor de -20 m de la ubicación de acreción medida. Alrededor de las estructuras se encuentran ligeros patrones de acreción y erosión, los cuales no son muy evidentes en las mediciones.

Los resultados del modelo indican una buena respuesta morfológica ante los rompeolas en términos cualitativos, sin embargo, algunos aspectos relacionados a la magnitud de la acreción en el caso del Teresiano y la posición de la acreción sobre la costa en ambos casos muestran ser una limitante, posiblemente relacionada a aspectos de calibración, variaciones a lo largo de la estructura asociadas a la pérdida de arena (Torres-Freyermuth et al., 2019), o a irregularidades generadas durante simulaciones a largo plazo con variaciones en el oleaje. Estos puntos se abordan en el Capítulo VII con más detalle.

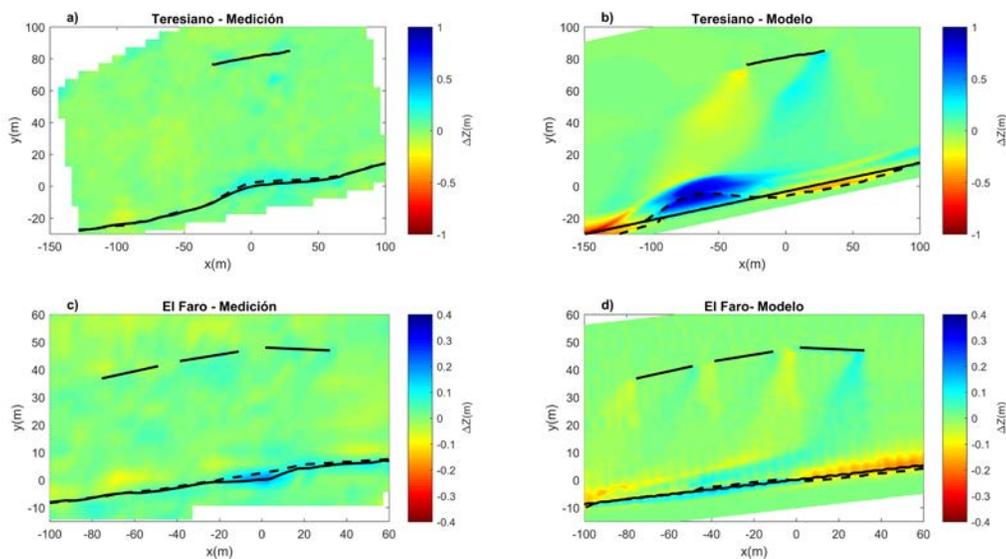


Figura 28. Comparación de los cambios morfológicos por efectos de rompeolas sumergidos entre mediciones y los resultados de simulación para el Teresiano (a,b) y El Faro (c,d).

Estudio Paramétrico

El modelo numérico fue utilizado para realizar un estudio paramétrico sobre el impacto de rompeolas en la región utilizando la metodología propuesta por Hsu & Silvester (1990), la cual relaciona la longitud del rompeolas (B), la distancia a la costa (S) y la distancia entre el punto máximo de acreción y el rompeolas (X), para predecir la acreción (Y) generada por una estructura (Figura 29). Estas variables se relacionan a través de una ecuación de la forma $\frac{X}{B} = A \left(\frac{B}{S}\right)^{-\alpha}$ donde $X = S - Y$, A y α son coeficientes con valores de $A = 0.6784$ y $\alpha = -1.2148$ para rompeolas emergidos en el trabajo de Hsu & Silvester (1990) que considera un $kt=0$ y para un oleaje normal a la costa.

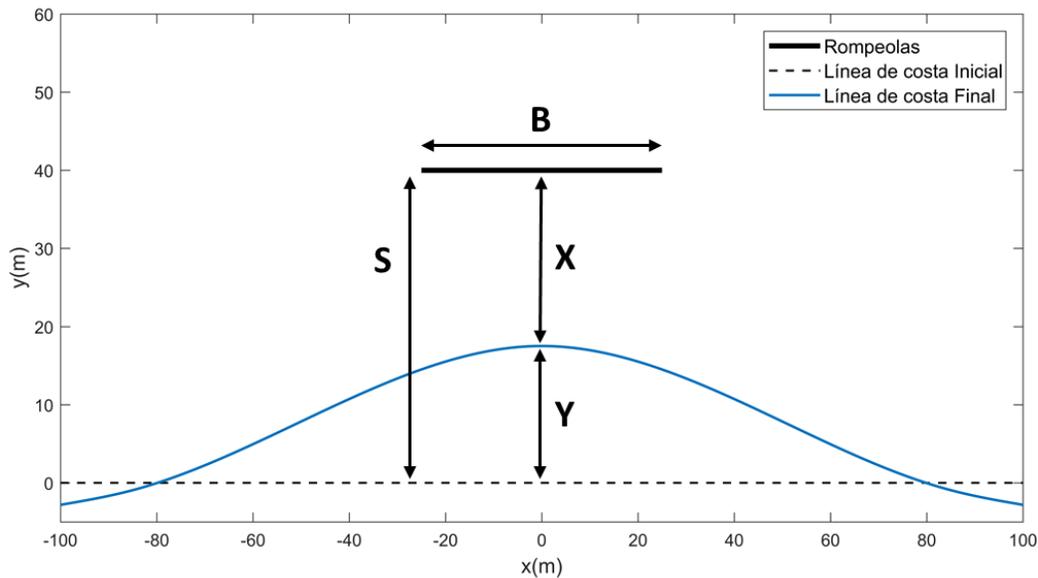


Figura 29. Definición gráfica de las variables propuesta por Hsu & Silvester (1990) para acreción generada por rompeolas.

Para este estudio se utilizó un rompeolas de longitud fija $B=40$ m y se varió la distancia a la costa utilizando cuatro diferentes valores ($S=10$ m, $S=20$ m, $S=30$ m y $S=50$ m). Además, también se varió el kt para cada escenario entre 0, 0.25, 0.5 y 0.75. En total se simuló 16 escenarios, cada escenario corrió durante 4 horas con un $morfac=6$, es decir que los cambios morfológicos equivalen a 24 h de simulación. Se utilizaron condiciones de oleaje representativas de la costa norte de Yucatán con un $H_s=0.8$ m, $T_p=3.5$ s y $D_p=35^\circ$ a los 4 m de profundidad.

La Figura 30 muestra los resultados de todos los casos organizados por la distancia a la costa de la estructura, las mediciones se realizaron respecto al contorno de 0.25 m de profundidad. La línea punteada indica la posición del contorno inicial y las líneas de colores el desplazamiento de este contorno para los diferentes kt . Para $S=10$ m la acreción final generó un tómbolo para los cuatro valores de kt . En $S=20$ m la acreción es ~ 10 m para los kt de 0, 0.25 y 0.50, para $kt=0.75$ la acreción es alrededor de 7 m. Para una $S=30$ m solo los kt de 0 y 0.25 presentan acreción de 10 m, para $kt=0.5$ la acreción es ~ 8 m y para $kt=0.75$ es de ~ 5 m. Para la estructura más alejada, $S=50$ m, la acreción máxima es de 10 m para $kt=0$, ~ 9 m para $kt=0.25$, ~ 7 m para $kt=0.50$ y de ~ 5 m para $kt=0.75$. Además, es notable que a medida que aumenta el kt , el ancho de la acreción sobre el eje longitudinal también incrementa.

Se encontró una tendencia en la posición de la acreción máxima sobre el eje longitudinal, a medida que la estructura se aleja de la costa el desplazamiento incrementa hacia la izquierda de la estructura. Para $S=10$ la acreción máxima se encuentra cercana al eje de la estructura ($x=0$ m), en $S=20$ m alrededor de -25 m, para $S=30$ m ~ -40 m, y para $S=50$ m a los -50 m. Este comportamiento también se ve sobre los resultados del modelo del caso de Teresiano y el Faro. Sin embargo, las mediciones en campo no muestran este comportamiento.

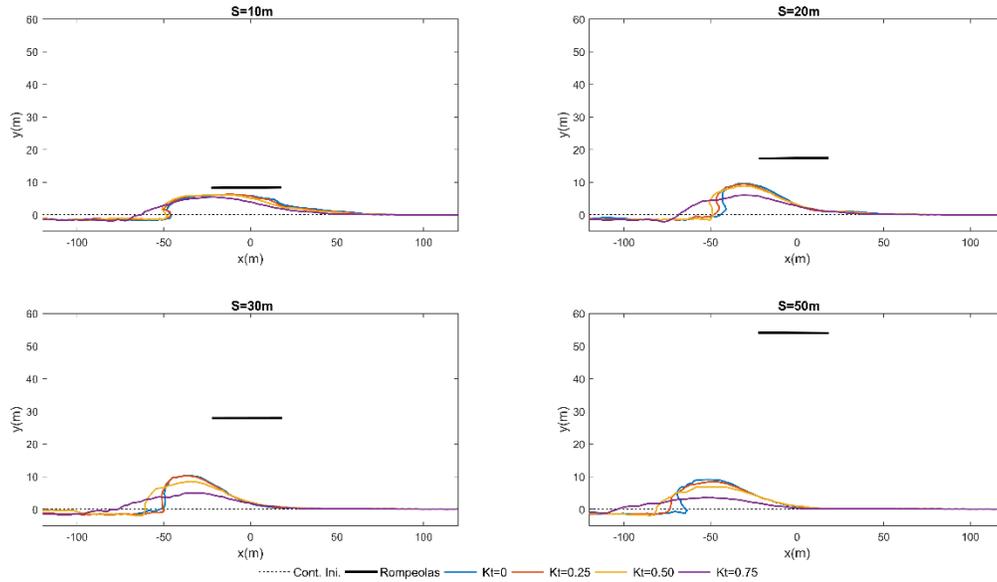


Figura 30. Resultados del análisis paramétrico ordenados por la distancia de la estructura a la costa.

Los resultados previos fueron reordenados por su kt para observar el efecto directo que tiene la distancia de la estructura con la acreción, y se muestran en la Figura 31. No existe un patrón claro presente en todos los diferentes kt . Excluyendo el comportamiento de $S=10$ m ya que en este caso la acreción formó un tómbolo, es de esperar que a medida que incrementa S la acreción disminuye, este comportamiento solo se observa para los casos donde $kt=0.5$ y $kt=0.75$. Para los otros kt , $S=30$ m presentó mayor acreción que $S=20$ m.

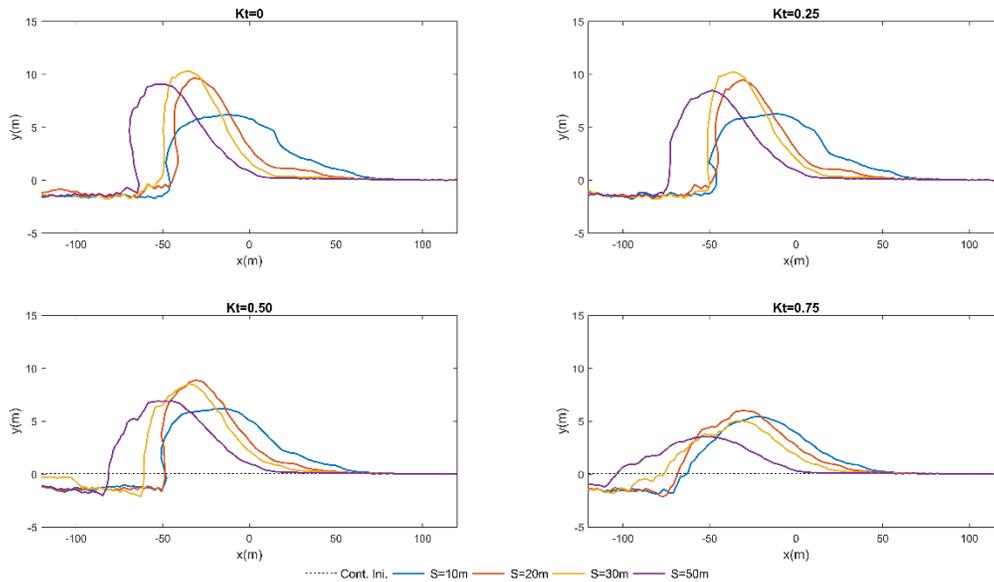


Figura 31. Resultados del análisis paramétrico ordenados por el kt de la estructura.

Se obtuvo el valor de X utilizando los resultados de las simulaciones respecto a cada kt y se les ajustó una ecuación a cada caso de la misma forma que Hsu & Silvester (1990). La Tabla II muestra los valores obtenidos de los coeficientes para cada caso. Además, utilizando los datos del trabajo de Torres-Freyermuth et al. (2019) se obtuvieron los valores de X para los sitios del Faro, El Teresiano y San Miguel para los diferentes periodos de medición y se les ajustó una ecuación donde $A = 0.88$ y $\alpha = -1.10$.

Tabla II. Coeficientes A y α para la ecuación por (Hsu & Silvester, 1990), las mediciones en campo por (Torres-Freyermuth et al., 2019) y los resultados del modelo para los diferentes kt .

Ecuación	A	α
Hsu John & Richard, (1990)	0.6784	-1.2148
Mediciones por Freyermuth et. al, (2019)	0.8753	-1.1031
Modelo - $kt=0$	0.7193	-1.4925
Modelo - $kt=0.25$	0.7275	-1.4995
Modelo - $kt=0.50$	0.7666	-1.4441
Modelo - $kt=0.75$	0.8606	-1.2945

Los resultados de las mediciones en campo se graficaron en la Figura 32 junto con las ecuaciones obtenidas por este trabajo para cada kt y la ecuación de Hsu & Silvester (1990). Las líneas ajustadas muestran un buen comportamiento en respuesta a los cambios de kt . En los casos de 0 y 0.25 las ecuaciones son muy similares, la línea de $kt=0.75$ predice la menor acreción y $kt=0.5$ se ubica en un intermedio. Esta última presenta un comportamiento muy similar a la ecuación de Hsu & Silvester (1990) para $1 < B/S < 4$. En comparación a la ecuación de Hsu & Silvester (1990), las ecuaciones para $kt=0$ y 0.25 predicen mayor acreción para $B/S > 1$ y menor para $B/S < 1$, mientras que la ecuación de $kt=0.75$ predice menor acreción en $B/S < 5$. Para estas ecuaciones el límite de formación de tómbolo es alrededor de $B/S=4.8$, mientras que para Hsu & Silvester (1990) ocurre en $B/S=5.2$.

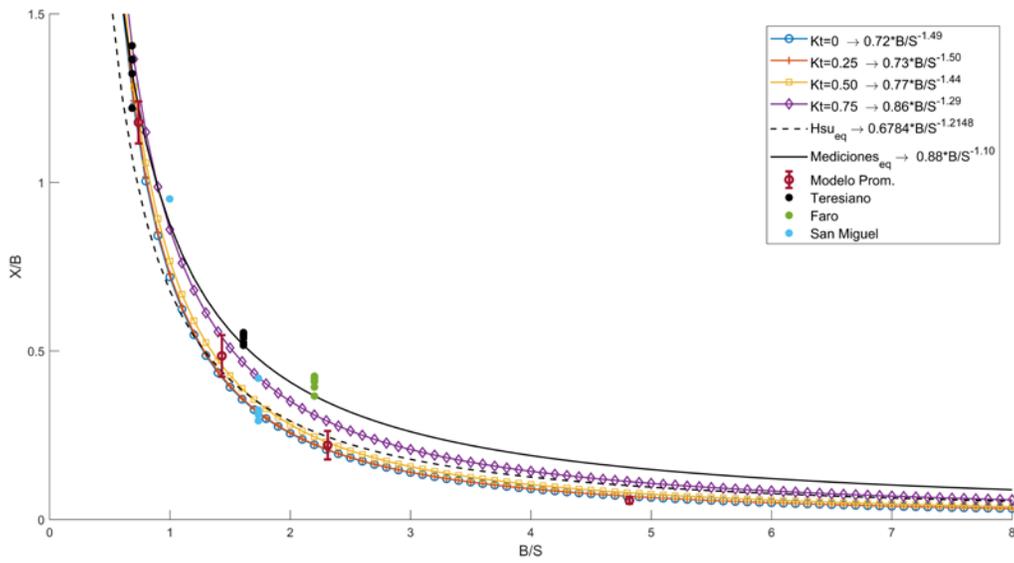


Figura 32. Curva de X/B contra B/S para las ecuaciones obtenidas para cada kt por el modelo, Hsu & Silvester (1990) y las mediciones en campo. Los puntos son datos medidos para cada sitio y el promedio de resultados del modelo.

Para las mediciones en campo, la ecuación de Hsu & Silvester (1990) y las del modelo tienden a sobrestimar la acreción para los sitios del Teresiano y El Faro cuando $B/S > 1$, en estos sitios hay un buen ajuste cuando $B/S < 1$. En San Miguel las ecuaciones del modelo tienen un buen ajuste para $kt = 0.5$, mientras que la ecuación de Hsu & Silvester (1990) subestima la acreción. Los valores de acreción estimados con cada ecuación se muestran en las Tablas III, IV Y V para el Teresiano, El Faro y San Miguel. Cada renglón representa una medición en campo tomada en distinta fecha.

La evaluación de las ecuaciones contra las mediciones puede ser compleja debido a que hay varios factores que no se toman en cuenta por las ecuaciones, como, la variación en el tiempo del kt ocasionados por daños en las estructuras o los cambios en la elevación del nivel del mar, la separación entre estructuras, o el impacto de las tormentas que alteran significativamente la morfología de la playa. Es por esto que la ecuación seleccionada debe considerarse como una aproximación. La Tabla VI muestra el error cuadrático medio de cada ecuación para cada sitio. Para los casos del Teresiano y El Faro la ecuación del $kt=0.75$ representa mejor la acreción con el menor error. Este coeficiente es consistente con el calculado para los tubos geotextiles y Reef Balls con un valor de 0.68 y 0.78, respectivamente. Para San Miguel la ecuación de $kt=0.5$ presenta el menor error.

Tabla III. Valores de B, S, Y medida y Y calculadas por diferentes ecuaciones para el sitio del Teresiano.

Teresiano								
B (m)	S (m)	B/S	Y (m)-medida	Y(m) - Hsu	Y (m)- Kt=0	Y (m)- Kt=0.25	Y (m)- Kt=0.50	Y (m)- Kt=0.75
58.28	85	0.69	3.09	22.47	11.37	10.33	7.95	3.24
58.28	85	0.69	5.47	22.47	11.37	10.33	7.95	3.24
58.28	85	0.69	7.92	22.47	11.37	10.33	7.95	3.24
58.28	85	0.69	13.89	22.47	11.37	10.33	7.95	3.24
137	85	1.61	9.03	32.96	36.66	36.28	32.29	21.44
137	85	1.61	13.13	32.96	36.66	36.28	32.29	21.44
137	85	1.61	11.31	32.96	36.66	36.28	32.29	21.44
137	85	1.61	9.69	32.96	36.66	36.28	32.29	21.44
137	85	1.61	9.97	32.96	36.66	36.28	32.29	21.44
137	85	1.61	10.39	32.96	36.66	36.28	32.29	21.44
137	85	1.61	14.21	32.96	36.66	36.28	32.29	21.44
137	85	1.61	14.21	32.96	36.66	36.28	32.29	21.44

Tabla IV. Valores de B, S, Y medida y Y calculadas por diferentes ecuaciones para el sitio de El Faro.

El Faro								
B (m)	S (m)	B/S	Y (m)-medida	Y(m) - Hsu	Y (m)- Kt=0	Y (m)- Kt=0.25	Y (m)- Kt=0.50	Y (m)- Kt=0.75
100	45.43	2.20	2.93	19.41	23.27	23.14	20.90	14.44
100	45.43	2.20	3.94	19.41	23.27	23.14	20.90	14.44
100	45.43	2.20	8.81	19.41	23.27	23.14	20.90	14.44
100	45.43	2.20	4.29	19.41	23.27	23.14	20.90	14.44
100	45.43	2.20	4.54	19.41	23.27	23.14	20.90	14.44
100	45.43	2.20	3.98	19.41	23.27	23.14	20.90	14.44
100	45.43	2.20	4.11	19.41	23.27	23.14	20.90	14.44
100	45.43	2.20	3.06	19.41	23.27	23.14	20.90	14.44
100	45.43	2.20	3.35	19.41	23.27	23.14	20.90	14.44
100	45.43	2.20	6.14	19.41	23.27	23.14	20.90	14.44
100	45.43	2.20	3.33	19.41	23.27	23.14	20.90	14.44
100	45.43	2.20	4.24	19.41	23.27	23.14	20.90	14.44

Tabla V. Valores de B, S, Y medida y Y calculadas por diferentes ecuaciones para el sitio de San Miguel.

B (m)	S (m)	B/S	Y (m)-medida	Y(m) - Hsu	Y (m)- Kt=0	Y (m)- Kt=0.25	Y (m)- Kt=0.50	Y (m)- Kt=0.75
60	60.13	1.00	3.07	19.32	16.83	16.34	13.99	8.35
115	66.26	1.74	32.59	26.33	29.93	29.66	26.50	17.78
115	66.26	1.74	18.10	26.33	29.93	29.66	26.50	17.78
115	66.26	1.74	30.55	26.33	29.93	29.66	26.50	17.78
115	66.26	1.74	29.61	26.33	29.93	29.66	26.50	17.78
115	66.26	1.74	28.94	26.33	29.93	29.66	26.50	17.78

Tabla VI. Evaluación del error cuadrático medio para cada sitio utilizando la ecuación de Hsu & Silvester(1990) y las generadas en el estudio paramétrico

	RMSE				
	Hsu	Mod. Kt=0	Mod. Kt=0.25	Mod. Kt=0.5	Mod. Kt=0.75
Teresiano	19.72	20.86	20.49	17.21	8.96
El Faro	15.10	18.94	18.81	16.58	10.17
San Miguel	8.23	7.51	7.30	6.57	10.61

Capítulo VII. Discusión

Durante este trabajo se identificaron algunos aspectos importantes que influyen en la capacidad del modelo para reproducir adecuadamente la hidrodinámica y los efectos de estructuras de pequeña escala sobre la morfología para la costa norte de Yucatán. Entre ellos, la calibración hidrodinámica, el transporte de sedimentos corriente abajo del espigón, y la simulación de cambios morfológicos a largo plazo. Esta sección discute cada uno de estos aspectos.

Calibración hidrodinámica

Los resultados del modelado numérico muestran una comparación satisfactoria con las mediciones de corrientes medidas en el campo con ADVs. El proceso de calibración y los resultados del análisis de sensibilidad de parámetros del Apéndice I indican que es posible alcanzar ajustes similares variando los parámetros libres del módulo FLOW y WAVE.

La calibración implementada en este trabajo se caracterizó por utilizar un valor alto de fricción de fondo en el módulo WAVE, este parámetro principalmente depende del material de composición, para fondos arenosos usualmente es de $0.034 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ a $0.068 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$. Sin embargo, en este estudio se utilizó un valor de $0.35 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ para garantizar que también las condiciones de baja energía del oleaje en el modelo coincidieran con las mediciones. Valores grandes usualmente se reportan para fondos con arrecifes de coral (Lalouviere, Gracia, Sierra, & Lin-ye, 2020), dado que las características del fondo para la costa de Yucatán corresponde a arenas carbonatadas un valor de la magnitud seleccionada no se justifica naturalmente. Sin embargo, podría explicarse debido a las características del diseño del modelo y el forzamiento utilizado. En este trabajo el modelo fue forzado con un oleaje de T_p promedio de 3.5 s desde los 4 m de profundidad (~ 500 m de la costa), pero se infiere que las mediciones tomadas por el ADCP a 4 m se encuentran a una mayor distancia de la costa. De acuerdo a teoría lineal dado el T_p utilizado a 4 m de profundidad el oleaje sentirá el efecto del fondo, si la disipación de las condiciones de baja energía es dominada por la fricción del fondo, se entiende que, a mayor distancia de propagación, mayor será la pérdida de energía. Idealmente el forzamiento debería comenzar cercana a la posición del ADCP, esto podría llevar a una nueva calibración con un valor de fricción menor y por lo tanto más natural. En este caso no se cuenta con la posición del instrumento y con mediciones batimétricas que cubran una mayor extensión para realizar una validación adecuada. El valor de fricción utilizado en la calibración de este trabajo puede interpretarse como una compensación de la pérdida de energía por el fondo al propagarse sobre un perfil más corto.

De las observaciones en campo es notorio que las corrientes sobre la zona de swash y el área interna de la zona de surf dominan los cambios en la morfología sobre la costa, por lo que su representación adecuada en el modelo es importante. Para la zona de swash, los procesos de runup y setup tienen el mayor impacto, de los resultados de la validación hidrodinámica es notorio que el modelo subestima el setup con respecto al ADV1 y el runup es ignorado en este tipo de modelos. Por lo tanto, la calibración se enfocó solo al ajuste de velocidad de corrientes de la zona de surf. Para esto, los parámetros *eddy viscosity*, el coeficiente de rugosidad de *Chézy*, *dryflc* y el de profundidad mínima de cálculos fueron ajustados. Para el área externa de la zona de surf el ajuste de *eddy viscosity* y *Chézy* fueron suficientes para representar las corrientes en la posición de ambos ADVs. Para el área interna se debe incluir el ajuste de *dryflc* y el de profundidad mínima de cálculos, ya que el modelo tiende sobre estimar las velocidades en aguas muy someras (Dykes, 2006). Aunque en esta área no hay referencia de mediciones, un análisis

visual de los resultados del modelo aun muestran velocidades de corrientes muy altas, sin embargo, no se encontró una combinación de parámetros para mejorar las velocidades en esta área sin afectar el resto del perfil de corrientes mar adentro.

Algunos estudios recomiendan el uso del modelo *roller* disponible en el módulo Delft3D-Flow para mejorar las velocidades de corrientes sobre la zona de surf y el transporte de sedimentos (Dykes, 2006; Treffers, 2009b; Vlijm, 2011). El modelo del *roller* resuelve el balance de energía para ondas cortas y la energía del *roller*. El *roller* retrasa la transferencia de energía de la ola hacia la corriente, lo que genera un desplazamiento de las corrientes y el setup hacia la costa, logrando una mejor interpretación del comportamiento hidrodinámico en la realidad. Este modelo está limitado a casos donde el espectro del oleaje es angosto en frecuencia y dirección (Deltares, 2018a), además contiene varios parámetros libres que requieren de ajustes, por lo que su implementación requiere de una nueva calibración. En este trabajo no se logró implantar el modelo exitosamente para condiciones de oleaje variante.

En base a los puntos mencionados anteriormente, se ha mostrado que el modelo es sensible a los parámetros libres de calibración, a los forzamientos sobre las fronteras y las batimetrías implementadas en el diseño. Si se desea mejorar la calibración del modelo es recomendable contar con medidas de H_s antes y después de cada barra de arena y zona de rompientes interior. Esto permitirá una mejor estimación de los coeficientes de rotura y disipación de energía para el módulo WAVE y una referencia de velocidad de corrientes lo más cercano a la costa posible.

Transporte de sedimento alrededor del espigón

Los resultados de la validación morfodinámica muestran que el modelo es capaz de reproducir los patrones de acreción corriente arriba del espigón, pero los patrones de erosión no son reproducidos. Se exploraron algunos motivos que explicaran la falta de este comportamiento, como, el diseño de la estructura, el uso de distintas fórmulas de transporte de sedimento, y la calibración hidrodinámica. De estas, la última es la que explica mejor la falta de patrones de erosión junto al espigón. En la Figura 33 se muestra el campo de velocidades de corrientes alrededor de la estructura, a la derecha del espigón se observa la desviación de la corriente hacia mar adentro con un incremento de velocidad en la punta de la estructura y del lado izquierdo la sombra que genera la estructura sobre las corrientes. Aunque este es el comportamiento típico de la hidrodinámica alrededor de un espigón, la magnitud de las velocidades y el área de la sombra generada no corresponde al comportamiento observado en campo.

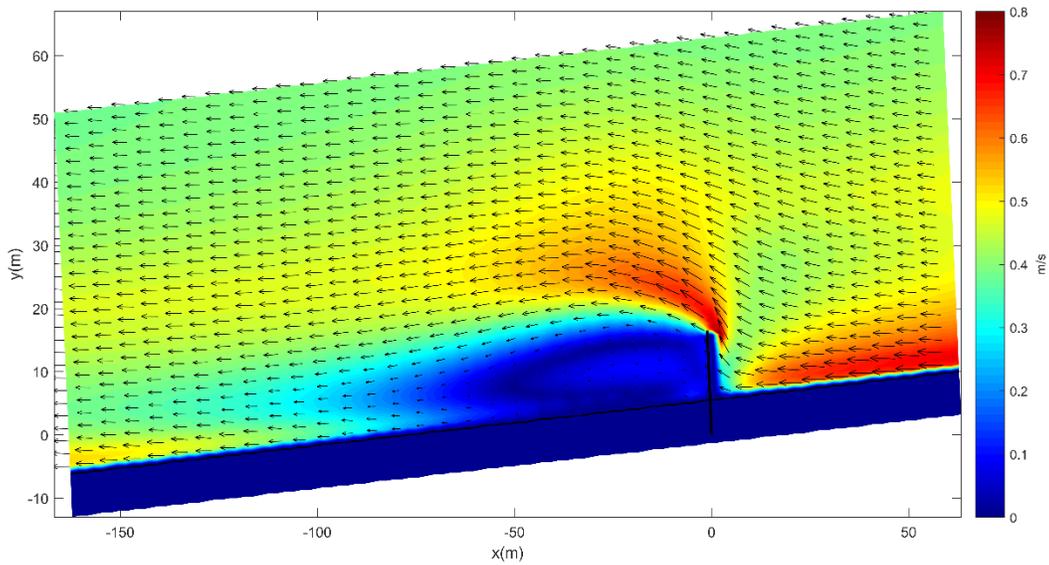


Figura 33. Campo de velocidad de corrientes alrededor de un espigón utilizando calibración óptima.

Para generar el patrón de erosión es necesario tener un gradiente de corrientes inmediato a la estructura. En este caso la sombra generada corriente abajo del espigón es muy grande ocasionando que el transporte ocurra alrededor de -60 m de la estructura (Figura 34-a). Esto se atribuye a la alta velocidad de las corrientes sobre el área interna de la zona de swash. Si la calibración hidrodinámica se modifica para disminuir esta velocidad, el transporte comienza a ocurrir más cerca de la estructura \sim -30 m pero en menor magnitud (Figura 34-b), sin embargo, no es suficientemente cercana para generar el patrón de erosión. Diferentes combinaciones se probaron para reducir lo más posible la distancia donde ocurre el transporte, pero no se encontró una calibración que lo cumpliera manteniendo una buena validación hidrodinámica.

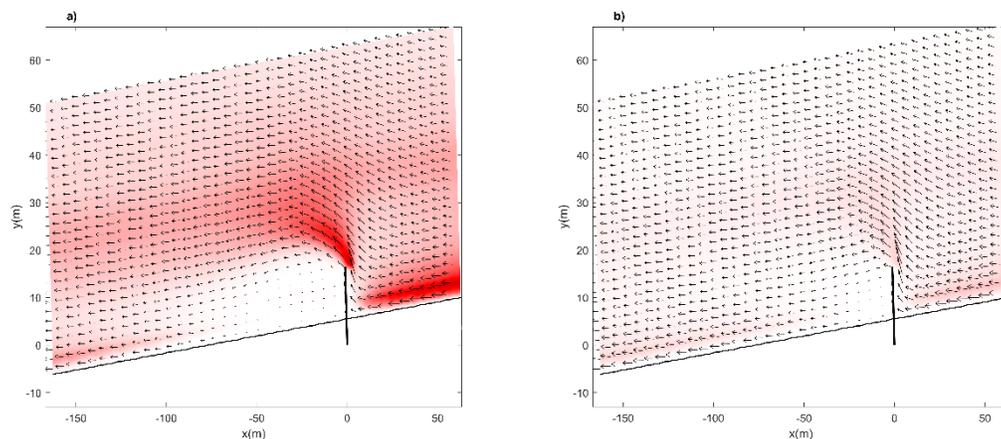


Figura 34. Dirección de las corrientes para: a) calibración con altas velocidades de corriente y b) calibración con bajas velocidad de corrientes cercanas a la costa. Las tonalidades de rojo en el fondo indican magnitud de transporte de sedimento, en blanco no hay transporte.

Al implementar el modelo *roller* se observan algunos cambios en el comportamiento del campo de velocidad de corrientes alrededor de la estructura (Figura 35-a) y en el patrón de erosión (Figura 35-b). Los resultados muestran una sombra similar ocasionada por la estructura, con la diferencia de la presencia de corrientes cross-shore junto a la estructura, este comportamiento genera el transporte y produce la erosión. Con una calibración adecuada se espera que los patrones de acreción y erosión mejoren, pero en este trabajo no se lograron simulaciones completas debido a inestabilidades numéricas al correr el modelo.

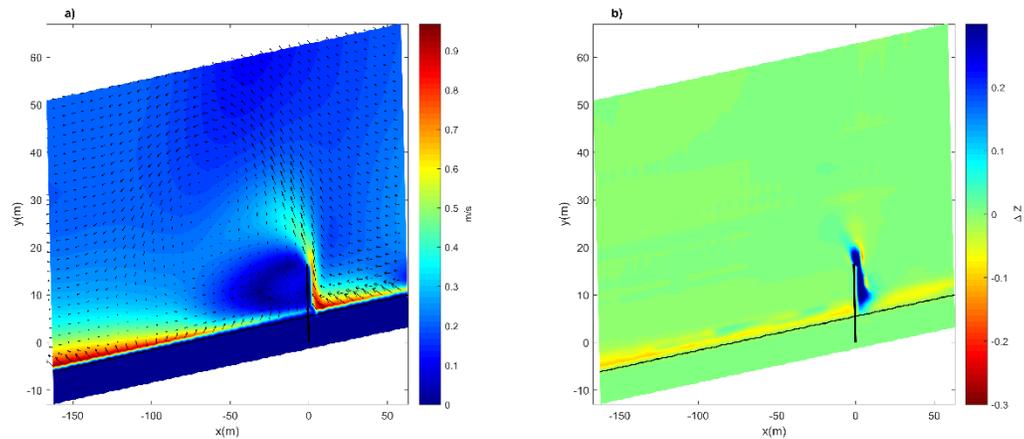


Figura 35. Ejemplo del campo de velocidad de corrientes (a) y cambios morfológicos (b) utilizando el modelo *roller*.

Las pruebas con el modelo *roller* dan un indicio de que los patrones de erosión observados en las mediciones ocurren por efectos de transporte cross-shore, el cual podría mejorar si se simulan adecuadamente los procesos de setup, runup, y flujos de retorno. Esto podría evaluarse con simulaciones no estacionarias, pero incrementaría el esfuerzo computacional. Se debe considerar que el modelo Delft3D en 2DH no simula el transporte por flujo de retorno y que el transporte cross-shore es modulado por los factores de transporte relacionados al oleaje ($susw$, $bedw$) los cuales usualmente se desactivan debido a los patrones irregulares que forman sobre la costa. Si se desea realizar la simulación no estacionaria es recomendado utilizar XBeach, ya que el modelo considera el transporte cross-shore utilizando formulaciones especiales para calcular el balance entre el transporte hacia la costa por el *skewness* y la asimetría del oleaje y el transporte hacia el mar por los flujos de retorno. A diferencia de Delft3D el modelo fue diseñado para aplicaciones que requieran del desplazamiento de la frontera de tierra por efectos del runup, overtopping o erosión de dunas (Trouw et al., 2012).

Pocas comparaciones pueden realizarse con otros trabajos respecto al desempeño del modelo Delft3D para simular los efectos en la morfología por espigones, ya que de los trabajos encontrados algunos utilizan espigones de mayor longitud, las escalas de tiempo de simulación son mayores y las condiciones hidrodinámicas son diferentes. De los trabajos de Arab (2003) y Visser, (2002) se observan patrones similares de corrientes y transporte. El trabajo de D. Roelvink et al. (2004) simula los cambios morfológicos entre espigones largos y cortos, con respuestas similares de erosión a las de este trabajo para el espigón corto. Estos se tomaron como referencia para justificar los resultados obtenidos, tomando en cuenta que, a diferencia de los otros trabajos, el modelo se validó para representar la hidrodinámica y los cambios rápidos en la morfología para el lado de acreción con estructuras de pequeña escala.

Simulación de cambios morfológicos utilizando el MORFAC

Durante las simulaciones de los casos del Teresiano y El Faro se detectó un problema en la estabilidad del modelo ya que tendía a detenerse debido a un error numérico. Al ser simulaciones en una escala de tiempo cercana a un mes, al modelo le tomaba algunos días completar las simulaciones, por lo que este tipo de errores pueden incrementar aún más el tiempo de esfuerzo computacional. Un diagnóstico de los errores del modelo mostró que la inestabilidad está relacionada a los forzamientos de oleaje utilizados en las fronteras. Algunas condiciones de oleaje con ángulos paralelos a la costa o en dirección offshore no permiten al modelo converger numéricamente.

La primera solución a este problema consiste en la depuración previa de los datos en la serie que puedan generar este error, pero esto puede ser difícil de determinar antes de comenzar las simulaciones. Además, los cambios en la serie de tiempo de las condiciones de oleaje deben ser graduales, por lo que lograr una serie de tiempo de oleaje ideal para el modelo puede resultar en un proceso muy tardado.

Una solución accesible consiste en utilizar oleaje representativo de las diferentes condiciones que se presenten en la serie temporal y utilizar el parámetro *morfac* para acelerar los cambios morfológicos reduciendo el tiempo de simulación. Este método es comúnmente utilizado para simulaciones mayores a un ciclo completo de marea (Deltares, 2018a; Trouw et al., 2012). En la costa norte de Yucatán las componentes más importantes de oleaje están asociadas a los eventos de brisas y a los *nortes*. De las series utilizadas para ambos casos no se detectaron eventos de *nortes*, por lo que se promediaron las condiciones de cada serie y se utilizó como condición representativa para el periodo de cada caso. Para el Teresiano $H_s=0.32\text{ m}$ $T_p=3.4\text{ s}$ $D_p=35^\circ$ y para El Faro $H_s=0.25\text{ m}$ $T_p=3.4\text{ s}$ $D_p=30^\circ$.

La simulación contempló una hora de cálculos con un *morfac* de 504 para el Teresiano y de 336 para el Faro, con el fin de representar el total de periodo de la serie. En la Figura 36 se muestran los resultados obtenidos para cada caso con el método *morfac*. En el caso del Teresiano, la acreción es menor a la modelada utilizando la serie de tiempo completa (Figura 28), y para el Faro la acreción es mayor. En ambos casos los patrones de acreción cercanos a la costa no están presentes, pero estos pueden formarse con las diferentes condiciones de oleaje presentes en la serie temporal completa. En general este método demostró ser útil para tener una aproximación de la magnitud de la acreción y su posición a lo largo de la costa.

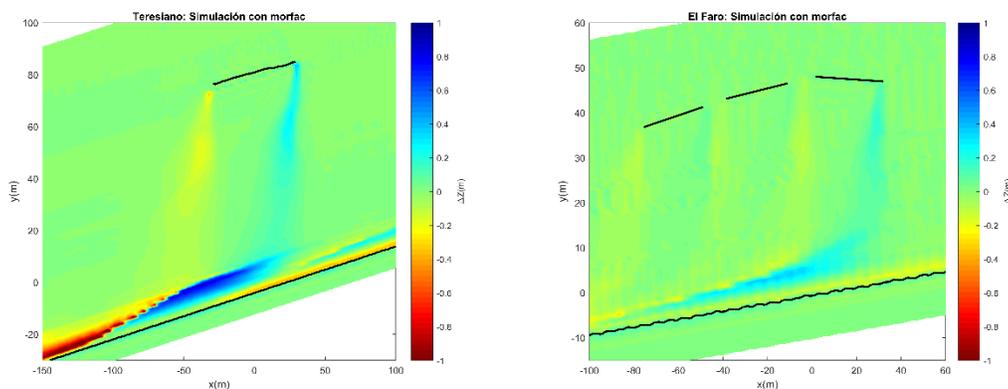


Figura 36. Cambios en la morfología utilizando el método *morfoc* para el caso del Teresiano y El Faro.

Capítulo VIII. Conclusiones

En este trabajo se calibró y validó el modelo Delft3D para simular la hidrodinámica y los cambios morfológicos (escalas de horas a días) asociados a la presencia de estructuras costeras, espigones y rompeolas sumergidos, en la costa norte de Yucatán. La comparación de los resultados del modelo numérico con las observaciones de campo muestran que el modelo es capaz de reproducir la variabilidad diurna del oleaje y las corrientes asociadas a los eventos de brisas marinas mediante el ajuste de los parámetros libres del módulo WAVE y FLOW. Asimismo, el modelo es capaz de reproducir los patrones de acreción a escalas de horas, pero es deficiente al simular los patrones de erosión alrededor de un espigón. Una posible explicación es la sobrestimación de la velocidad de corriente en el área interna de la zona de surf, limitaciones para incluir la difracción del oleaje y modelar la hidrodinámica y transporte de sedimentos en la zona de swash. Por lo tanto, se recomienda el uso de modelos no estacionarios con formulaciones para transporte crossshore y que resuelvan los procesos en la zona de swash como el modelo XBeach no-hidrostático.

El modelo calibrado fue implementado para simular cambios morfológicos por efectos de rompeolas sumergidos en escala de días para el sitio del Teresiano y El Faro. Los resultados muestran buena respuesta del modelo para simular la acreción, pero su magnitud y la posición no corresponden a las observaciones en campo, posiblemente por la sobrestimación de corriente en la zona de surf. Considerando las aproximaciones realizadas en el kt de las estructuras y la calibración hidrodinámica, los resultados son aceptables. Para futuras aplicaciones del modelo en simulaciones de largo plazo es recomendable implementar el método de morfac con una serie temporal de forzamientos de oleaje apropiada, de esta manera se reduce el tiempo computacional considerablemente.

Se utilizó el modelo numérico calibrado y validado para realizar un estudio paramétrico de rompeolas sumergidos en la costa norte de Yucatán. Se modelaron diferentes diseños de la estructura utilizando un oleaje representativo de la zona para evaluar la posición y amplitud de los cambios en la línea de costa. Los resultados del modelo numérico fueron utilizados para calibrar los coeficientes del modelo de Hsu & Silvester (1990) para la zona de estudio. Las ecuaciones obtenidas tienden a sobrestimar la acreción respecto a las mediciones en el campo. Sin embargo, mejoran la predicción de modelos existentes en la literatura. La ecuación correspondiente al $kt=0.75$ presenta el menor error de acreción. Esto es favorable ya que el kt de las estructuras sumergidas en la costa de Yucatán es consistente con este valor. Por lo tanto, el uso de esta ecuación permite obtener un diseño preliminar de las dimensiones de rompeolas en la costa de Yucatán.

Al trabajar con estructuras de pequeña escala se han encontrado algunas limitaciones en la manera de implementar las estructuras en el modelo. Idealmente las estructuras deberían implementarse como batimetría, de esta manera los procesos de asomeramientos y refracción son considerados por el modelo. Sin embargo, el límite de tamaño de las celdas de la malla computacional en el módulo WAVE es de 2×1 m en este trabajo, por lo que su representación como batimetría sería muy burda. La alternativa del uso de obstáculos es una buena aproximación. Además, al trabajar con mallas de este tamaño el cálculo de difracción se vuelve inestable y requiere de ajustes en parámetros libres para su funcionamiento.

En general el modelo ha mostrado ser una buena herramienta para simular la hidrodinámica y la morfodinámica de la costa norte de Yucatán. Los resultados obtenidos en este trabajo podrían mejorar

utilizando una calibración de oleaje más natural y un forzamiento cercano a la costa. Para esto se necesitan más mediciones en campo, preferentemente alrededor de las barras de arena y en el área interna de la zona de surf.

Referencias

- Allende-Arandía, M. E., Zavala-Hidalgo, J., Torres-Freyermuth, A., Appendini, C. M., Cerezo-Mota, R., & Taylor-Espinosa, N. (2020). Sea-land breeze diurnal component and its interaction with a cold front on the coast of Sisal, Yucatan: A case study. *Atmospheric Research*, 244(April), 105051. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105051>
- Alvarez, E., Rubio, R., & Ricalde, H. (2007). Beach restoration with geotextile tubes as submerged breakwaters in Yucatan, Mexico. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(4–5), 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2007.02.005>
- Amoudry, L. O., & Souza, A. J. (2011). *DETERMINISTIC COASTAL MORPHOLOGICAL AND SEDIMENT TRANSPORT MODELING: A REVIEW AND DISCUSSION*. (2010), 1–21. <https://doi.org/10.1029/2010RG000341.1.INTRODUCTION>
- Appendini, C. M., Salles, P., Mendoza, E. T., López, J., & Torres-Freyermuth, A. (2012). Longshore Sediment Transport on the Northern Coast of the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 285(May), 1404–1417. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-11-00162.1>
- Bastidas, L. A., Knighton, J., & Kline, S. W. (2016). Parameter sensitivity and uncertainty analysis for a storm surge and wave model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(10), 2195–2210. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-2195-2016>
- Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4), 7649–7666. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- Brière, C., Giardino, A., & Van Der Werf, J. J. (2010). Morphological modeling of bar dynamics with Delft3D: The quest for optimal free parameter settings using an automatic calibration technique. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, (February). <https://doi.org/10.9753/icce.v32.sediment.60>
- Buccino, M., Del Vita, I., & Calabrese, M. (2014). Engineering Modeling of Wave Transmission of Reef Balls. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 140(4), 04014010. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ww.1943-5460.0000237](https://doi.org/10.1061/(asce)ww.1943-5460.0000237)
- Camenen, B., & Larroudé, P. (2003). Comparison of sediment transport formulae for the coastal environment. *Coastal Engineering*, 48(2), 111–132. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(03\)00002-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-3839(03)00002-4)
- Camus, P., Mendez, F. J., & Medina, R. (2011). A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering*, 58(9), 851–862. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.007>
- Chau, K. W. (2010). *Modelling for Coastal Hydraulics and Engineering*. London: CRC Press.
- Coastal Engineering Manual*. (n.d.).
- Cooper, J. A. G., & McKenna, J. (2008). Social justice in coastal erosion management: The temporal and spatial dimensions. *Geoforum*, 39(1), 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2007.06.007>
- Cuevas Jiménez, A., Euán Ávila, J. I., Villatoro Lacouture, M. M., & Silva Casarín, R. (2016). Classification of Beach Erosion Vulnerability on the Yucatan Coast. *Coastal Management*, 44(4), 333–349.

<https://doi.org/10.1080/08920753.2016.1155038>

- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (2001). *Coastal Processes with Engineering Applications*.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511754500>
- Delft University of Technology. (2006). *SWAN - Scientific and technical documentation*. Retrieved from
<http://www.swan.tudelft.nl>
- Delft University of Technology. (2020). *USER MANUAL SWAN Cycle III version 41.31A*.
- Deltares. (2018a). *Delft3D-FLOW: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual*. (p. 214). p. 214.
- Deltares. (2018b). *Delft3D-WAVE: Simulation of short-crested waves with SWAN. User Manual*.
- Dhanak, M. R., & Xiros, N. I. (2016). *Springer Handbook of Ocean Engineering*. Retrieved from
<https://books.google.com.mx/books?id=X8FZrgEACAAJ>
- Diwedard, A. S. I. (2015). *Improving the Coastal Groins Functional Design*.
- Dykes, J. (2006). *Evaluation of Delft3D Performance in Nearshore Flows Evaluation of Delft3D Performance in Nearshore Flows*. (December).
- Eslami Arab, S. (2003). *A Numerical Study on Design of Normal & T-Head Groins*. 1–110.
- Eslami, S., Vanrijn, L. C., Walstra, D. J., Luijendijk, A. J., & Stive, M. J. F. (2010). A numerical study on design of coastal groins. *Geotechnical Special Publication, (210 GSP)*, 501–510.
[https://doi.org/10.1061/41147\(392\)48](https://doi.org/10.1061/41147(392)48)
- Franz, G., Delpey, M. T., Brito, D., Pinto, L., Leitão, P., & Neves, R. (2017). *Modelling of sediment transport and morphological evolution under the combined action of waves and currents*. 673–690.
- García-Rubio, G., Huntley, D., & Russell, P. (2012). Assessing shoreline change using satellite-derived shorelines in Progreso, Yucatán, México. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference, (3918)*, 1–13. <https://doi.org/10.9753/icce.v33.sediment.79>
- González-Herrera, R., Solís-Pimentel, A., Zetina-Moguel, C., & Mariño-Tapia, I. (2015). Modeling the northern coastline of Yucatan, Mexico, with GENESIS. *Environmental and Engineering Geoscience, 21(1)*, 47–61. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.21.1.47>
- Griggs, G. (2005). the Impacts of Coastal Armoring. *Shore and Beach, (1)*, 13–22.
- Holthuijsen, L. (2007). Waves in Oceanic and Coastal Waters. *Waves in Oceanic and Coastal Waters, by Leo H. Holthuijsen, Pp. 404. Cambridge University Press, January 2007. ISBN-10: . ISBN-13:*
- Hsu, J. R. C., & Silvester, R. (1990). Accretion Behind Single Offshore Breakwater. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 116(3)*, 362–380. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1990\)116:3\(362\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1990)116:3(362))
- Kraus, N. C., Hanson, H., & Blomgren, S. H. (1994). Modern Functional Design of Groin Systems. In *Coastal Engineering 1994* (pp. 1327–1342). <https://doi.org/10.1061/9780784400890.097>
- Kurczyn, J. A., Appendini, C. M., Beier, E., Sosa-López, A., López-González, J., & Posada-Vanegas, G. (2020). Oceanic and atmospheric impact of central American cold surges (Nortes) in the Gulf of Mexico. *International Journal of Climatology, (June)*, 1–19. <https://doi.org/10.1002/joc.6779>

- Lalouviere, H. De, Gracia, V., Sierra, J. P., & Lin-ye, J. (2020). *Impact of Climate Change on Nearshore Waves at a Beach Protected by a Barrier Reef*.
- Li, L., & Huang, Z. (2013). Modeling the change of beach profile under tsunami waves: A comparison of selected sediment transport models. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 7(1).
<https://doi.org/10.1142/S1793431113500012>
- Lin, P. (2008). *Numerical Modeling of Water Waves*. <https://doi.org/10.1201/9781482265910>
- Lira-Pantoja, M. A., Torres-Freyermuth, A., Appendini, C. M., Fernández, D. C., Salles, P., Mendoza, E. T., ... Pedrozo-Acuña, A. (2012). Chronic Beach Erosion Induced By Coastal Structures in Chelem, Yucatán. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(33), 125.
<https://doi.org/10.9753/icce.v33.sediment.125>
- Medellín, G., & Torres-Freyermuth, A. (2019). Morphodynamics along a micro-tidal sea breeze dominated beach in the vicinity of coastal structures. *Marine Geology*, 417(August), 106013.
<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.106013>
- Medellín, G., Torres-Freyermuth, A., Tomasicchio, G., Francone, A., Tereszkievicz, P., Lusito, L., ... López, J. (2018). Field and Numerical Study of Resistance and Resilience on a Sea Breeze Dominated Beach in Yucatan (Mexico). *Water*, 10, 1806. <https://doi.org/10.3390/w10121806>
- Meer, J. W. Van Der, Wang, B., & Zanuttigh, B. (2004). *Oblique Wave Transmission Over Low-Crested Structures*. 40733(September). [https://doi.org/10.1061/40733\(147\)47](https://doi.org/10.1061/40733(147)47)
- Mendoza, E. T., Ojeda, E., Meyer-Arendt, K. J., Salles, P., & Appendini, C. M. (n.d.). Assessing Coastal Vulnerability in Yucatan (Mexico). In *Coastal Management* (pp. 607–616).
<https://doi.org/10.1680/cm.61149.607>
- Mendoza, E. T., Ojeda, E., Meyer-Arendt, K. J., Salles, P., & Appendini, C. M. (2015). Assessing coastal vulnerability in Yucatan (Mexico). *Coastal Management: Changing Coast, Changing Climate, Changing Minds - Proceedings of the International Conference*, 607–616.
<https://doi.org/10.1680/cm.61149.607>
- Mendoza, E. T., Trejo-Rangel, M. A., Salles, P., Appendini, C. M., Lopez-Gonzalez, J., & Torres-Freyermuth, A. (2013). Storm characterization and coastal hazards in the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 65(sp1), 790–795. <https://doi.org/10.2112/SI65-134.1>
- Meyer-Arendt, K. J. (2004). *Human Alteration of the North Yucatán Coast, Mexico*. 65–80.
- Mojabi, M. (2016). *MODELLING OF WAVES AROUND POROUS SUBMERGED BREAKWATERS USING DELFT3D*. (May 2018).
- Mojabi, S. M. (2018). Doctoral thesis. *Journal of Engineering Mathematics*, 4(2), 186.
<https://doi.org/10.1007/BF01535092>
- Monbaliu, J. (2003). Chapter 5 Spectral wave models in coastal areas. In V. C. B. T.-E. O. S. Lakhan (Ed.), *Advances in Coastal Modeling* (Vol. 67, pp. 133–158).
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(03\)80122-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0422-9894(03)80122-8)
- Nordstrom, K. (2000). *Beaches and Dunes of Developed Coasts*.
- Pintado, E. G., Malvárez, G., & Navas, F. (2010). *Los modelos de propagación de oleaje, simulación morfodinámica y las tig*. 861–872.

- Reeve, D., Chadwick, A., & Fleming, C. A. (2018). *Coastal Engineering - Processes, Theory and Design Practice*.
- Ris, R. C. (1997). *Spectral Modelling of Wind Waves in Coastal Areas*.
- Ris, R. C., Holthuijsen, L. H., & Booij, N. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 2. Verification. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *104*(C4), 7667–7681. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/1998JC900123>
- Roelvink, D., Walstra, D.-J., Roelvink, J. A., & Walstra, D.-J. (2004). Keeping It Simple By Using Complex Models. *Advances in Hydro-Science and –Engineering*, *VI*(August), 1–11.
- Roelvink, J. A. (1993). Dissipation in random wave groups incident on a beach. *Coastal Engineering*, *19*(1), 127–150. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-3839\(93\)90021-Y](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-3839(93)90021-Y)
- Ruiz-Martínez, A. G., Mariño-Tapia, I., Baldwin, E. G. M., Casarín, S., Ortiz, C. E. E., Ruiz-mart, G., ... Recursos, D. De. (2015). Identifying Coastal Defence Schemes through Morphodynamic Numerical Simulations along the Northern Coast of Yucatan, Mexico. *Journal of Coastal Research*, *32*(3), 651. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-15-00009.1>
- Sharif Ahmadian, A. (2016a). *Chapter 1 - Introduction* (A. B. T.-N. M. for S. B. Sharif Ahmadian, Ed.). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802413-3.00001-8>
- Sharif Ahmadian, A. (2016b). *Chapter 9 - Existing Simulation and Design Tools* (A. B. T.-N. M. for S. B. Sharif Ahmadian, Ed.). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802413-3.00009-2>
- Tang, J., Li, Q., Meng, X., Shen, Y., & Zhang, M. (2018). *Numerical Modeling of Coastal Waves and Nearshore Currents on Adaptive Quadtree Grids*. *144*(5), 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000463](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000463).
- Tereszkiewicz, P., McKinney, N., & Meyer-Arendt, K. J. (2018). Groins along the Northern Yucatán Coast. *Journal of Coastal Research*, *34*(4), 911–919. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-17-00062.1>
- Torres-Freyermuth, A., Hofman, A., Clemente Tuz-Pech, J., Medellín, G., & Roos, P. C. (2020). Design and performance of permeable groins on a low-energy natural beach. *Journal of Marine Science and Engineering*, *8*(4), 1–16. <https://doi.org/10.3390/JMSE8040283>
- Torres-Freyermuth, A., Medellín, G., Mendoza, E. T., Ojeda, E., & Salles, P. (2019). *Morphodynamic Response to Low-Crested Detached Breakwaters on a Sea Breeze-Dominated Coast*. <https://doi.org/10.3390/w11040635>
- Torres-Freyermuth, A., Medellín, G., Mendoza, E. T., Ojeda, E., & Salles, P. (2019). Morphodynamic response to low-crested detached breakwaters on a sea breeze-dominated coast. *Water (Switzerland)*, *11*(4). <https://doi.org/10.3390/w11040635>
- Torres-Freyermuth, A., Puleo, J. A., Dicosmo, N., Allende-arandía, M. E., Chardón-maldonado, P., López, J., ... Candela, J. (2017). *Nearshore circulation on a sea breeze dominated beach during intense wind events*. *151*(October), 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.10.008>
- Torres-Freyermuth, A., Puleo, J. A., DiCosmo, N., Allende-Arandía, M. E., Chardón-Maldonado, P., López, J., ... Candela, J. (2017). Nearshore circulation on a sea breeze dominated beach during intense wind events. *Continental Shelf Research*, *151*(October), 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.10.008>

- Treffers, R. (2009a). *Wave-Driven Longshore Currents in the Surf Zone*. 134. Retrieved from <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A98c7b974-2c0e-464c-9b9a-2044f018965b>
- Treffers, R. (2009b). *Wave-Driven Longshore Currents in the Surf Zone - Hydrodynamic validation of Delft3D*. 137.
- Trouw, K., Zimmermann, N., Mathys, M., Delgado, R., & Roelvink, D. (2012). Numerical modelling of hydrodynamics and sediment transport in the surf zone: A sensitivity study with different types of numerical models. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, 1–12. <https://doi.org/10.9753/icce.v33.sediment.23>
- van der Baan, A. . (2013). *Developing a design criterion for the shoreline response to multiple submerged breakwaters*.
- Visser, R. (2002). *Morphological modelling in the vicinity of groynes: An extended application in Delft3D-RAM including tidal impact*.
- Vlijm, R. J. (2011). *Process-based modelling of morphological response to submerged breakwaters*. 235.
- Vuik, V. (2010). *Numerical modeling of sediment transport over hydraulic structures*. Delft University of Technology.
- Walker, H. (1988). *Artificial structures and shorelines*.

Apéndice I. Análisis de sensibilidad de parámetros del modelo Delft3D

Delft3D es un modelo robusto compuesto por distintos módulos capaces de resolver procesos específicos de oleaje, flujos y transporte. Cada módulo contiene una serie de parámetros libres que permiten los ajustes y calibración del modelo para obtener los mejores resultados posibles. Para este trabajo se analizaron los parámetros de los módulos FLOW, WAVE y SED y los efectos de la resolución de la malla computacional.

Algunos estudios como (Brière et al., 2010; Li & Huang, 2013; Trouw et al., 2012), han realizado este tipo de análisis enfocados a los problemas específicos de su sitio de estudio. En esta ocasión se utilizaron las condiciones específicas de la costa norte de Yucatán, que corresponden a un $H_s=0.75\text{m}$, $T_p=3.5\text{s}$, $D_p=35^\circ$ y un perfil batimétrico característico. El análisis muestra los efectos de cada parámetro sobre el perfil oleaje, corrientes y transporte.

Parámetros del Módulo WAVE

En este módulo se evaluaron varios parámetros físicos del modelo como, los parámetros *gamma* y *alpha* asociados a la fórmula de rotura del oleaje por Battjes y Jansen, el parámetro de fricción por fondo, las interacciones no lineales por triadas y los distintos tipos de forzamiento del oleaje dentro del modelo, además de parámetros numéricos como la profundidad mínima de cálculo. En este trabajo no se simuló viento, por lo que la generación de olas por viento y la pérdida de energía por efectos de *whitecapping* no fueron evaluados.

Al ser un modelo acoplado entre WAVE y FLOW, se analizó el efecto en los ajustes de los parámetros del módulo WAVE sobre el perfil de oleaje y sobre el perfil de velocidades de corrientes calculados por el módulo FLOW. Las Figuras 37-39 muestran estas comparaciones para el perfil de H_s (primera fila), la componente longitudinal de la corriente (segunda fila), la componente cross-shore (tercera fila) y la referencia del perfil batimétrico (última fila). En todas las figuras la línea azul corresponde a la simulación base con los parámetros *default* del módulo de oleaje, correspondiente a $\gamma=0.73$, $\alpha=1$, fricción tipo Jonswap=0.068, *triadas* desactivadas, profundidad mínima de 0.05m y el tipo de forzamiento de oleaje 'dissipation'. La línea naranja representa la simulación con los cambios en determinado parámetro.

La primera columna de la Figura 37 muestra los cambios en *gamma*, este parámetro determina la profundidad en la que la ola comienza su rotura; una disminución en este valor (línea naranja) genera rotura a una mayor profundidad, por lo tanto la generación de corrientes longitudinales comienza a mayor profundidad y se reduce la altura y la velocidad de corrientes junto a la costa. La segunda columna compara los efectos del parámetro *alpha*, el cual controla la tasa de disipación de energía durante la rotura, un incremento en este valor genera mayor disipación de energía de la ola y un aumento en la velocidad de corrientes, su efecto se ve más notorio sobre las barras de arena alrededor de 40 y 120m. El parámetro de fricción en la tercera columna, produce la pérdida de energía por el fondo, al incrementar este valor disminuye la H_s a medida que se propaga sobre el perfil.

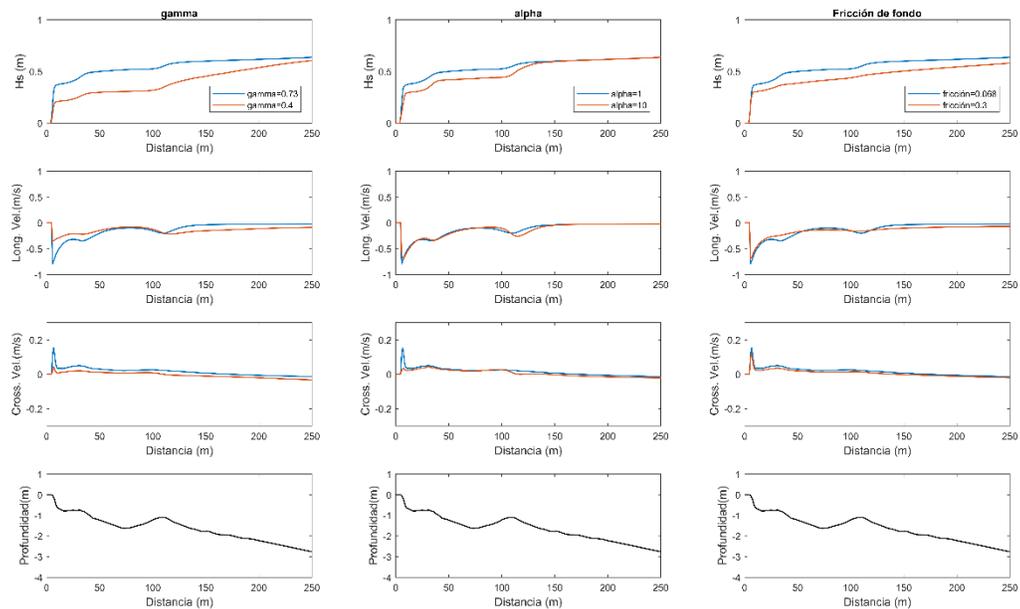


Figura 37. Efectos de parámetros sobre perfil de H_s , velocidad de corriente longitudinal (Long. Vel.) y cross-shore (Long. Vel.). Paneles inferiores son referencia del perfil batimétrico. Primera columna muestra cambios γ . Segunda columna, cambios en α . Tercera columna, cambios en fricción de fondo.

De la Figura 38, la primera columna compara los distintas formulaciones de fricción que contiene el módulo, Jonswap, Collins y Madsen et al. La comparación utilizó los valores por *default* de cada fórmula, en general Jonswap y Collins producen perfiles muy similares de H_s y corrientes, la fórmula de Madsen et al. genera mayor pérdida por fricción del fondo, pero su valor es ajustable para reducir esta pérdida.

La segunda columna de la Figura 38 muestra los efectos del 'Spreading Direccional (ms)', parámetro que el módulo requiere al colocar las condiciones de oleaje en las fronteras. Al incrementar este valor se modifica el perfil de oleaje incrementando su altura y por lo tanto también se modifica el perfil de corrientes, especialmente las velocidades longitudinales. Para el oleaje por viento la dispersión direccional es típicamente de 30° ($ms \sim 2$) y para oleaje de swell menor a 10° ($ms > 30$) (Delft University of Technology, 2020).

El parámetro de profundidad mínima en la tercera columna de la Figura 38, determina la profundidad límite en la que el módulo WAVE realiza los cálculos, su valor implica que el perfil de H_s decae drásticamente a esa profundidad. Además, este parámetro tiene un efecto considerable en el perfil de corrientes; incrementar su valor genera un asomeramiento en los picos de velocidad de la corriente sobre la zona de swash/surf. Sin embargo, la forma de este perfil también es influenciada por el parámetro de *dryflc* del módulo de FLOW, la calibración de corrientes sobre la zona de swash depende principalmente de estos dos parámetros.

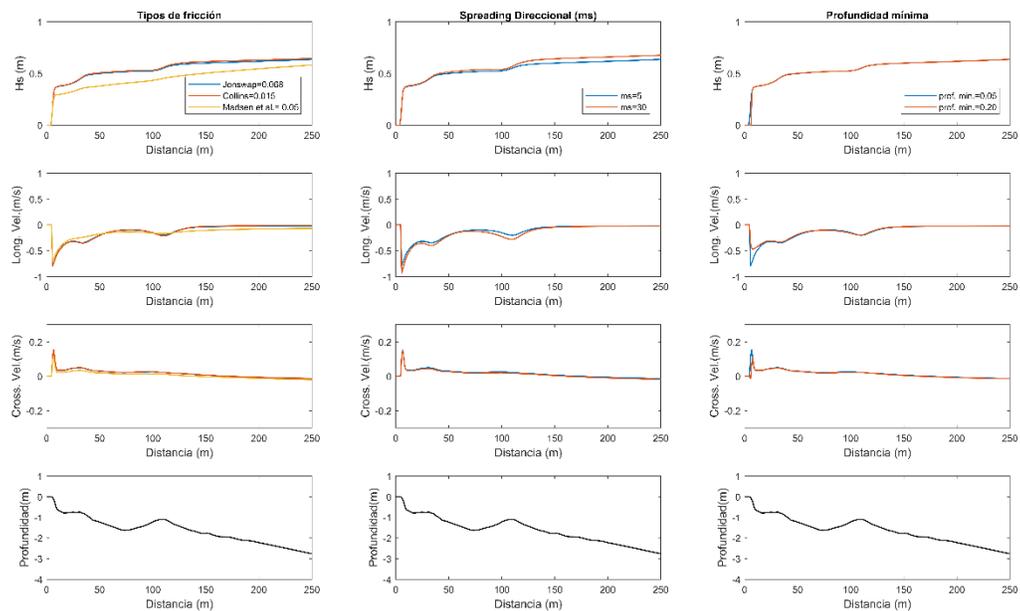


Figura 38. Efectos de parámetros sobre perfil de H_s , velocidad de corriente longitudinal (Long. Vel.) y cross-shore (Long. Vel.). Paneles inferiores son referencia del perfil batimétrico. Primera columna muestra cambios en tipo de fricción. Segunda columna, cambios en spreading direccional. Tercera columna, cambios en la profundidad mínima.

De la Figura 39, la primera columna compara dos tipos de espectros que el modelo utiliza para transformar las condiciones de frontera del oleaje, no hay diferencias significativas entre ambos espectros en el perfil de H_s o corrientes.

La segunda columna de la Figura 39 muestra el efecto de triadas, las cuales tienen un efecto ligero sobre corrientes, especialmente en corrientes cross-shore.

La tercera columna de la Figura 39 compara los tipos de forzamiento del oleaje 'Dissipation' y 'Radiation Stresses <2013'. La comparación no muestra diferencias en el perfil de H_s , pero sí muestra cambios significativos en los perfiles de corrientes. En el caso de 'Dissipation', el perfil de corrientes muestra ser más realista. En el perfil de 'Radiation Stresses <2013' las magnitudes de corrientes cross-shore muestran ser muy altas a lo largo de todo el perfil en dirección offshore. Este comportamiento no es esperado en el perfil. El trabajo de Trouw et al., (2012) también analiza ambos forzamientos y los aplica exitosamente para simulaciones con estructuras costeras, sin embargo, en su trabajo el comportamiento inusual de 'Radiation Stresses <2013' no se ve reflejado. Aunque algunos trabajos y el manual de Delft3D recomiendan usar este forzamiento para simulaciones 2DH, no hay una discusión detallada en su funcionalidad y comportamiento. Por esta razón el forzamiento de 'Dissipation' fue implementado para este trabajo.

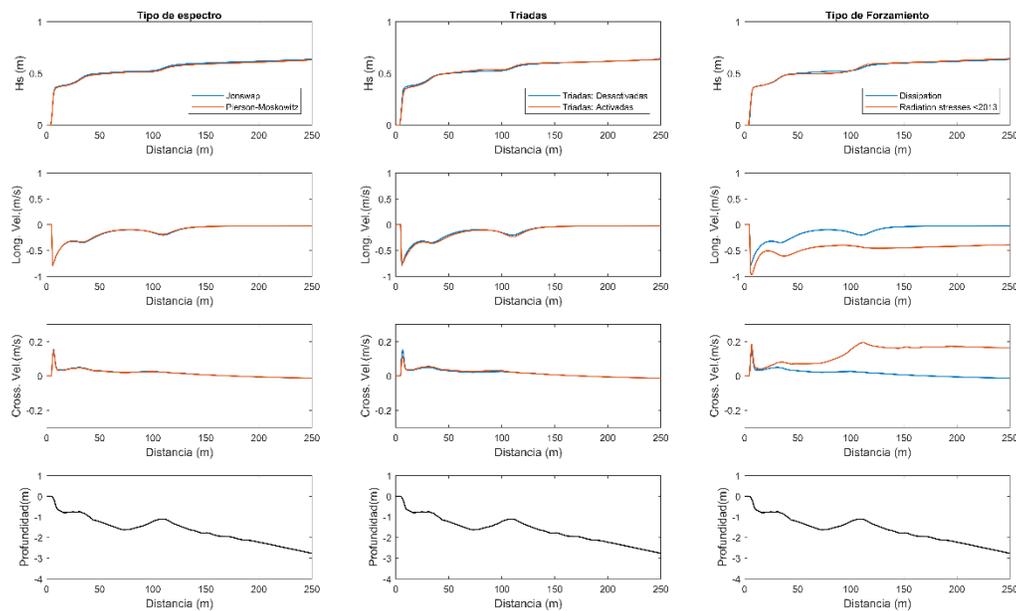


Figura 39. Efectos de parámetros sobre perfil de H_s , velocidad de corriente longitudinal (Long. Vel.) y cross-shore (Long. Vel.). Paneles inferiores son referencia del perfil batimétrico. Primera columna muestra cambios en el tipo de espectro del oleaje. Segunda columna cambios el efecto de triadas. Tercera columna, cambios en tipo de forzamiento de oleaje.

Parámetros del Módulo FLOW

Para el módulo FLOW se evaluaron los tipos de rugosidad, las formulaciones de esfuerzos en el fondo por el forzamiento del oleaje, el parámetro de 'eddy viscosity', el modelo de turbulencia HLES y el parámetro *dryflc*. Al igual que para el módulo WAVE, los parámetros del módulo FLOW tienen un efecto sobre el perfil de H_s , por lo que las Figura 40 y Figura 41 muestran los efectos de los ajustes de los parámetros del módulo FLOW sobre el perfil de corrientes y de H_s . La línea azul contiene la calibración default del módulo WAVE, y del módulo FLOW utiliza los valores *default* de *dryflyc* (con un valor de 0.05), rugosidad tipo Chezy (con un valor de 65) y la fórmula de Fredsoe para calcular esfuerzos del oleaje sobre el fondo. El parámetro de viscosity se redujo a un valor de 0.1, lo cual es recomendado para mallas computacionales finas sobre la costa por el manual (Deltares, 2018a) y trabajos como (Trouw et al., 2012).

De la Figura 40, la primera columna muestra los efectos de las distintas fórmulas de rugosidad, Chézy, Manning y White-Colebrook, en general la forma del perfil de corrientes no cambia, solo varían en cuanto a magnitud sobre la zona de surf/swash, pero esto es relacionado a los valores asignados en cada fórmula. La segunda columna muestra el cambio en el valor de Chézy, se observa como al aumentar Chézy (línea roja) incrementa la velocidad de la corriente debido a la disminución de rugosidad y al reducirlo (línea amarilla) disminuye la velocidad. La tercera columna muestra una comparación entre las diferentes formulaciones para el esfuerzo del oleaje sobre el fondo, de ellas la de Fredsoe y Myrhaug et al. no muestran diferencias, la fórmula de Bijker muestra una disminución de la velocidad longitudinal sobre la primera barra, y la fórmula de Van Rijn(2004) muestra una disminución sobre la zona de swash.

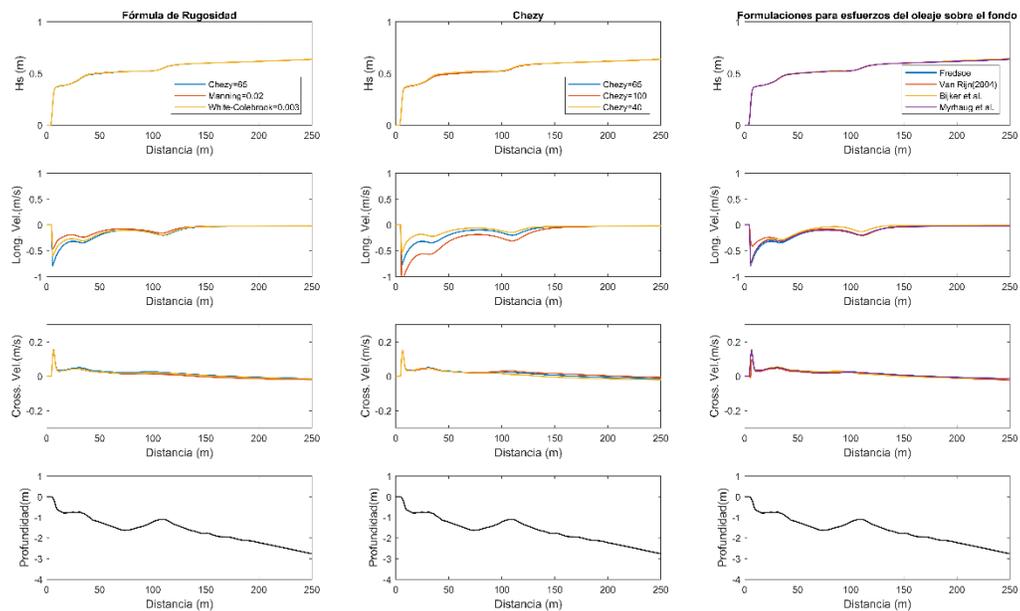


Figura 40. Efectos de parámetros del módulo FLOW sobre perfil de H_s , velocidad de corriente longitudinal (Long. Vel.) y cross-shore (Long. Vel.). Paneles inferiores son referencia del perfil batimétrico. Primera columna muestra tipos de formula de rugosidad. Segunda columna cambios en el valor de rugosidad de Chézy. Tercera columna, tipos de formulaciones para esfuerzos del oleaje sobre el fondo.

En la Figura 41, la primera columna muestra el efecto de los cambios en 'eddy viscosity', al incrementar este valor (línea roja) el perfil de corrientes longitudinales se reduce sobre las zonas de rotura como en las barras de arena y las corrientes cross-shore se reducen. Al reducir el valor (línea amarilla), ocurre el comportamiento inverso, incrementa la velocidad de las corrientes longitudinales y cross-shore sobre las barras, pero a su vez disminuye el área donde ocurren los cambios de velocidad.

La segunda columna de la Figura 41, utiliza el modelo HLES para calcular la turbulencia (línea roja). En teoría, el uso de este modelo provee perfiles más realistas de velocidad de corrientes, sin embargo, esta limitado por su calibración específica al tamaño de malla y paso de tiempo, en este caso una mala calibración genera un perfil de corrientes muy inestable. Algunos trabajos como (Vlijm, 2011; Vuik, 2010) consideran suficiente utilizar una viscosidad constante mediante el valor de eddy viscosity para representar la turbulencia.

La tercera columna de la Figura 41 muestra el comportamiento en el cambio del parámetro *dryflc*. Este parámetro funciona como criterio de inundación que determina el mínimo de profundidad requerida para que el modelo realice cálculos computacionales. Este parámetro es sensible sobre la zona de swash y su calibración para esta zona es compleja, ya que debe considerar los cambios de nivel del mar por efectos de la marea, el límite de profundidad ('*Minimun depth*') utilizado en el módulo WAVE y el límite de cálculos de transporte del módulo SED. En este caso la línea azul contiene el mismo valor que el límite del módulo WAVE, si el valor de *dryflc* se reduce (línea roja) las magnitudes de corriente disminuyen y reduce los picos de velocidad, si el valor esta por encima del límite de profundidad (línea amarilla) las velocidades de corriente también disminuyen, especialmente la velocidad cross-shore. El límite de cálculo de sedimento debe ser igual o mayor que el parámetro *dryflc*.

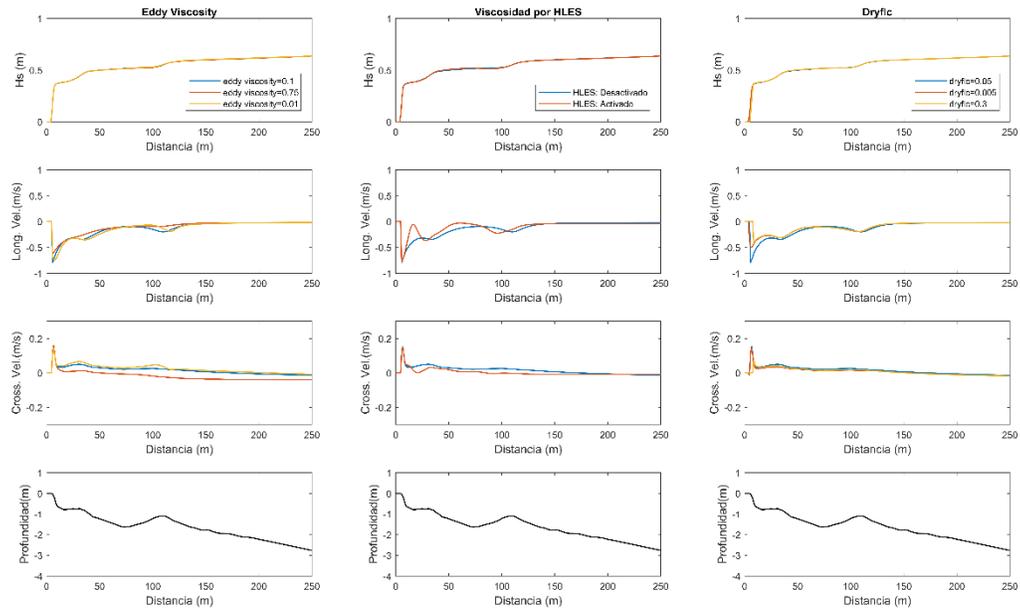


Figura 41. Efectos de parámetros del módulo FLOW sobre perfil de Hs, velocidad de corriente longitudinal (Long. Vel.) y cross-shore (Long. Vel.). Paneles inferiores son referencia del perfil batimétrico. Primera columna cambios en el valor de eddy viscosity. Segunda columna efectos del módulo de turbulencia HLES. Tercera columna, cambios en dryflc.

Parámetros del Módulo SED

En el módulo SED se evaluaron los factores de multiplicación de transporte de sedimento de suspensión (*sus*), de fondo (*bed*) y los relacionados al transporte por oleaje por suspensión (*susw*) y fondo (*bedw*). También se comparó el comportamiento de las fórmulas de transporte de Van Rijn(1993) y Van Rijn(2004), el efecto del tamaño de sedimento, el factor de altura de *ripples* y el coeficiente de *eddy diffusivity*.

La comparación se realizó entre las componentes longitudinales y cross-shore para el transporte en suspensión y de fondo. La Figura 42 y Figura 43 muestran esta comparación, la primera y segunda fila corresponden al transporte longitudinal en suspensión y de fondo, respectivamente. La tercera y cuarta fila corresponden a la componente cross-shore de suspensión y de fondo. La referencia del perfil batimétrico se muestra en la quinta fila. La línea azul corresponde a una calibración base recomendada por (Trouw et al., 2012), con un $sus=1$, $bed=1$, $bedw=0.1$ y $susw=0.1$, un factor de altura de ripples de 2, un valor de $eddy\ diffusivity=0.001$, un $d_{50}=200nm$ y la fórmula de transporte de Van Rijn(1993).

De la Figura 42, a primera columna compara el efecto del incremento de los parámetros *sus* y *bed*, los cuales afectan ambas componentes del transporte en suspensión y de fondo, respectivamente. La influencia de ambos se es mas notorio sobre la barra de arena y en la zona de swash. El transporte en suspensión muestra ser dos órdenes de magnitud mayor que el de fondo.

La segunda columna evalúa el incremento en los parámetros de *susw* y *bedw*, estos parámetros solo actúan sobre el transporte de fondo. El parámetro de *susw* tiene un mayor efecto que *bedw* sobre las componentes de transporte, en la componente cross-shore incrementa significativamente el transporte hacia la costa. Estos parámetros son muy complicados de calibrar y usualmente se utilizan en zonas de agua profunda o para simular el movimiento de barras de arena.

La tercera columna de la Figura 42 evalúa el parámetro de *eddy diffusivity*. Al igual que el valor de *eddy viscosity* tiene una dependencia al tamaño de malla, y es recomendado reducirlo de su valor *default*. Este parámetro solo afecta el transporte en suspensión de la componente cross-shore, un valor alto (línea roja) transporta el sedimento en dirección off-shore, mientras que un valor bajo (línea azul) transporta el sedimento en dirección a la costa. Además, la magnitud del transporte también se ve afectada. Siendo este un parámetro de calibración, este trabajo considera que el transporte en la zona de surf/swash debe ocurrir hacia la costa por lo que se debe seleccionar un valor bajo.

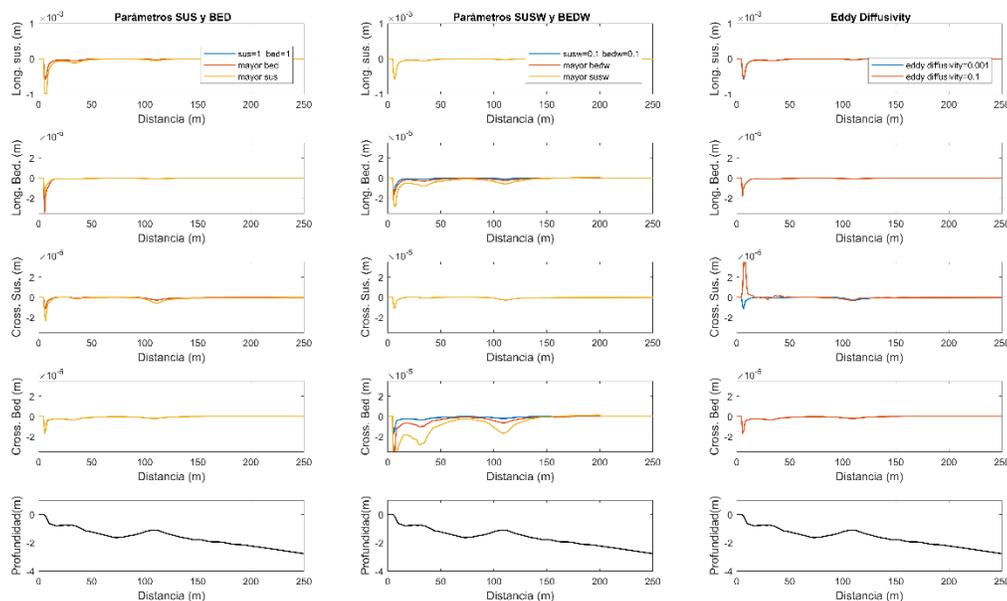


Figura 42. Comparación de los efectos de los parámetros *sus* y *bed* (primera columna), *susw* y *bedw* (segunda columna) y *eddy diffusivity* (tercera columna), sobre las componentes longitudinales del transporte en suspensión y de fondo (primera y segunda fila) y la componente cross-shore (tercera y cuarta fila). Paneles inferiores son referencia del perfil batimétrico.

En la Figura 43, la primera columna compara dos formulaciones de transporte de sedimento, Van Rijn(1993) y Van Rijn (2004). Ambas ecuaciones son comúnmente utilizadas para simular el transporte en las costas. La formula de Van Rijn(2004) genera un mayor transporte de fondo en la componente longitudinal, y transporte de fondo en dirección off-shore, mientras que en la de Van Rijn (1993) ocurre hacia la costa. La segunda columna compara el parámetro de '*ripple height factor*', un incremento en su valor genera mayor transporte en suspensión para ambas componentes. La tercera columna compara tres tamaños distintos de sedimento, a menor tamaño (línea amarilla) el transporte en suspensión incrementa pero disminuye el de fondo. Un mayor tamaño (línea roja) disminuye el de suspensión, pero aumento el de fondo.

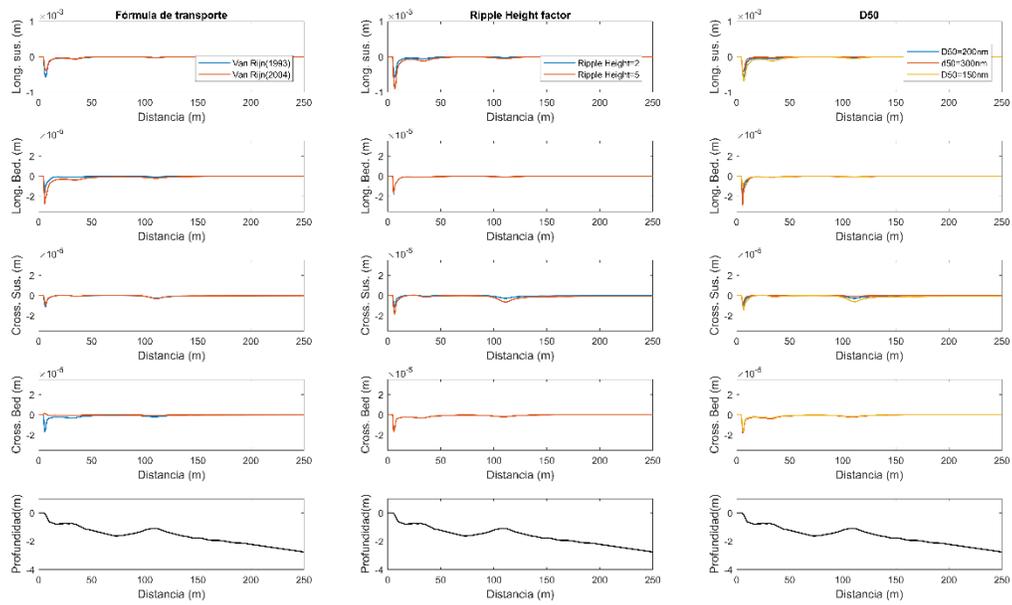


Figura 43. Comparación de las fórmulas de transporte Van Rijn (1993) y Van Rijn(2004) (primera columna), ripple height factor (segunda columna) y D50 (tercera columna), sobre las componentes longitudinales del transporte en suspensión y de fondo

Resolución de malla computacional

Un aspecto importante para la modelación hidrodinámica y morfodinámica es la malla computacional donde se realizan los cálculos. El diseño de la malla utilizada tiene un impacto en la calidad de los resultados del modelo. Una de las características más importantes de su diseño es la resolución, la cual depende de los procesos que requieren estudiarse, la batimetría de la zona y el tamaño del área de estudio. Una alta resolución toma en cuenta todos los detalles batimétricos y los procesos hidrodinámicos pero implica un mayor alto costo computacional y tiempo de simulación.

Durante este trabajo se probaron diversos tamaños de mallas computacionales. Al ser un área de estudio pequeña y considerando los efectos de las estructuras costeras de pequeña escala la selección de la resolución debe ser alta. Sin embargo, se encontró un límite de malla para el módulo WAVE de 2x1m, al querer reducir este tamaño las simulaciones no funcionaban. El módulo FLOW no cuenta con este límite pero requiere de un menor paso de tiempo.

La Figura 44 muestra los efectos de la resolución de la malla computacional. Una menor resolución en la malla (línea roja) muestra una mayor pérdida de energía de oleaje y una disminución de corrientes y transporte sobre la zona de surf/swash en comparación a una malla fina (línea azul). Para estos dos casos se utilizó la misma malla del módulo WAVE en el módulo FLOW. También se realizó un caso donde la malla en FLOW era mucho más fina que en WAVE (línea amarilla), con este diseño las velocidades de corriente y el transporte de sedimento aumentan ligeramente sobre la zona de swash/surf, y en general los cambios en la batimetría tienden a ser más detallados. Pero al ser una malla muy fina el paso de tiempo requerido para satisfacer el número de Courant fue mucho menor y las simulaciones requieren de un mayor tiempo

computacional. Las diferencias encontradas no se consideran significativas como para justificar el uso de mallas mucho menores a 2x1m.

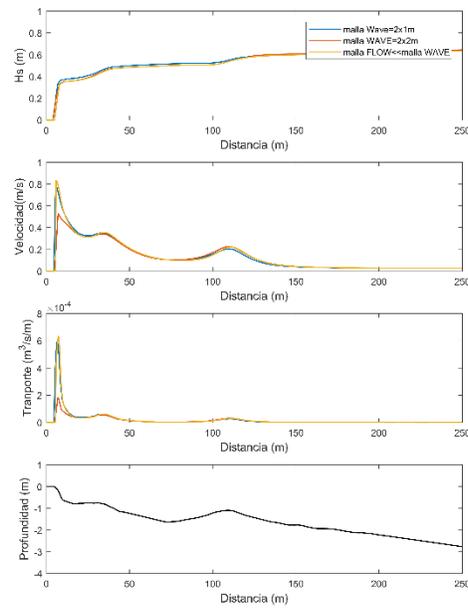


Figura 44. Efectos en el perfil de H_s , corrientes y transporte por la resolución de la malla computacional.

Apéndice II. Análisis de estructuras dentro del modelo

Para simular los efectos de estructuras de protección costera como espigones y rompeolas, es necesario implementarlas apropiadamente dentro de modelo. Algunos estudios previos (M. Mojabi, 2016; Visser, 2002; Vlijm, 2011) realizan algunas recomendaciones para representar numéricamente las estructuras utilizando las herramientas proporcionadas por el modelo. Las estructuras utilizadas en este trabajo son de menor escala en comparación a las estructuras de estudios previos. Por lo que en esta sección se analizan las recomendaciones previas y se investiga la mejor opción para representar espigones y rompeolas sumergidos.

Espigones

Los trabajos de Arab, (2003) y Visser, (2002) contienen un serie de pruebas en el diseño de espigones impermeables para su implementación dentro del modelo Delft3D, de las cuales destacan dos métodos:

1. Estructura como batimetría no erosionable en el módulo WAVE y FLOW.
2. Combinación de obstáculo sin transmisión en el módulo WAVE y 'thin dam' en el módulo FLOW, ambas estructuras manteniendo la misma posición y forma.

El primer método consiste en modificar los mapas de batimetría a través de QUICKIN para implementar el espigón. Las principales ventajas de este método es que el espigón puede ser emergido (como batimetría negativa) o sumergido (batimetría positiva). En el caso del módulo WAVE los efectos sobre el oleaje como, refracción, asomeramiento o rotura ocasionados por el efecto del nuevo fondo son considerados. Su principal desventaja recae en la resolución de la malla, si las dimensiones del espigón son muy pequeñas se requiere una malla suficientemente fina para representar el espigón, lo que implica un mayor tiempo computacional en el módulo FLOW, o en el caso del módulo WAVE una representación burda por los límites de resolución de malla. Para el funcionamiento adecuado de este método, la estructura debe ser 'no erosionable', esto se logra eliminando disponibilidad de sedimento sobre la estructura utilizando archivos '.sdb', mediante QUICKIN.

El segundo método utiliza los obstáculos de ambos módulos. El obstáculo del módulo WAVE detiene el oleaje pero no las corrientes, y el obstáculo en FLOW realiza lo contrario. En el módulo WAVE los obstáculos pueden ser '*sheets*' y '*dams*', el primero es una pared infinita en la vertical en el cual se especifica su coeficiente de transmisión y su reflectividad, en el segundo se especifica la altura de la estructura y dos coeficientes de calibración dependiendo del tipo de estructura. Un mayor de talle de estos obstáculos se describen en el manual (Deltares, 2018b). Para este método se implementa el obstáculo tipo '*sheets*'. En el módulo FLOW se presentan diversos tipos de obstáculos dependiendo el tipo de estructura que se desee modelar o si se utiliza un modelo 2DH o 3D, para el espigón en 2DH comúnmente se utilizan '*rigid sheets*', '*weirs*' y '*thin dams*', la última siendo generalmente utilizada para estructuras de pequeña escala. La principal ventaja de este método esta en que se reducen inestabilidades numéricas que pueda ocasionar una batimetría burda alrededor del espigón y en la calibración del coeficiente de transmisión de la estructura en el módulo WAVE. Al igual que en el método anterior su desventaja recae en resolución de las mallas y en la falta de los efectos de la estructura sobre el oleaje.

La Figura 45 muestra una comparación de ambos métodos en base a sus efectos sobre el campo de oleaje, corrientes y en los cambios morfológicos. Los paneles del lado izquierdo muestran el primer

método y en lo del derecho el segundo método. En el campo de oleaje el espigón como batimetría ocasiona una ligera elevación a la izquierda de la estructura. El campo de corrientes es prácticamente igual, en ambos casos se presenta una aceleración de la corriente en la punta de la estructura. Los cambios en la batimetría son muy similares, con diferencias en términos de magnitud sobre la punta del espigón. Con base en estos resultados el primer método es recomendado para simular el espigón, siendo este el mas sencillo de implementar para pequeñas escalas.

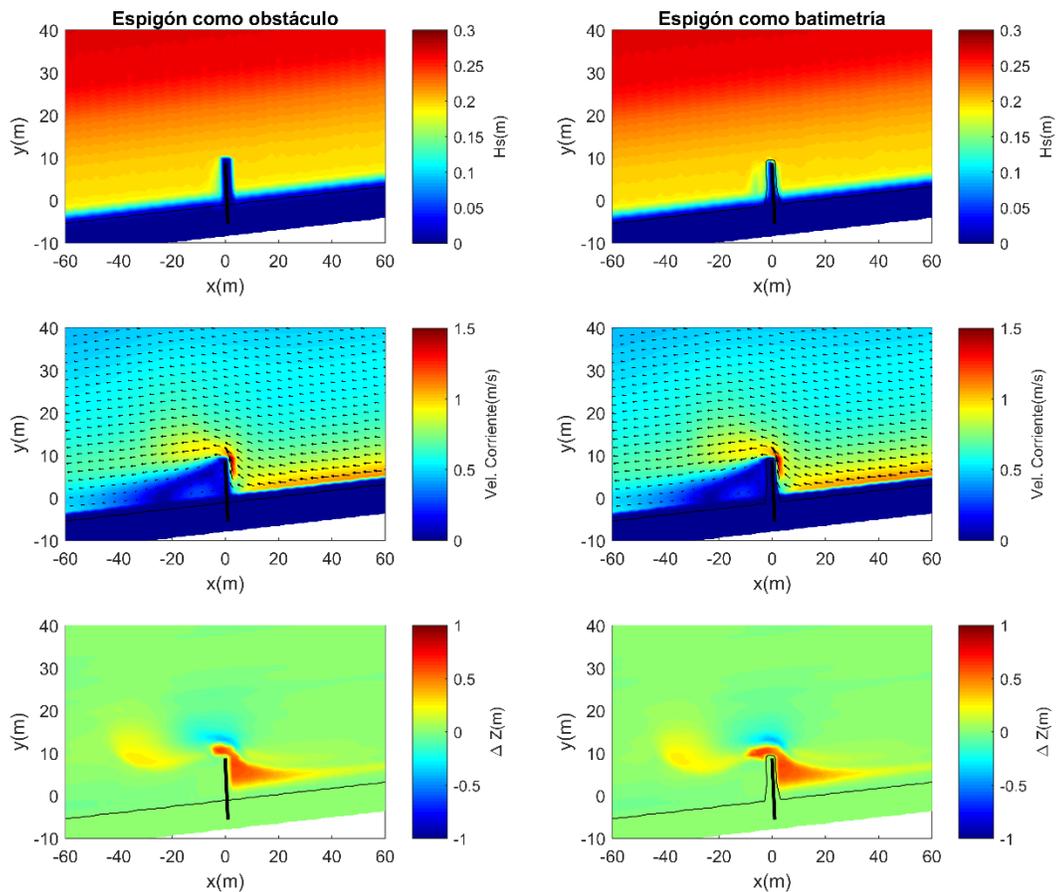


Figura 45. Comparación de métodos de implementación de espigones y sus efectos sobre el campo de oleaje, corrientes y cambios batimétricos. La primera columna implementa el espigón como obstáculo tipo 'sheet' en el módulo WAVE. La segunda columna implementa el espigón como batimetría en el módulo FLOW y WAVE.

Es posible modificar la rugosidad de la estructura con mapas de rugosidad con archivos '.rgh', creados en QUICKIN dependiendo de su material de construcción, lo cual tiene un impacto en las velocidades de corrientes alrededor de la estructura calculadas por el módulo FLOW. Pero este método tiende a ser complicado de ajustar y puede inestabilizar las simulaciones sin mejorar los resultados significativamente, por lo que para estudios de esta escala no se ha implementado.

Rompeolas sumergidos

La modelación en Delft3D de rompeolas sumergidos ha sido ampliamente estudiada por trabajos como (M. Mojabi, 2016; van der Baan, 2013; Vlijm, 2011), en los cuales recomiendan implementar la estructura como batimetría. En este método la transmisión del oleaje se calcula automáticamente, por lo que la calibración de este coeficiente depende de una buena representación batimétrica, rugosidad y tamaño de malla. Al igual que en el caso del espigón, las estructuras comúnmente estudiadas son de mayor dimensión en comparación a las utilizadas en este trabajo. Para estos casos el manual recomienda utilizar los obstáculos del módulo WAVE para simular los efectos de la estructura sobre el oleaje. El uso de obstáculos tipo ‘dams’ es específico para estructuras sumergidas ya que calculan el kt basado en la altura de la estructura y el oleaje incidente, sin embargo requiere de coeficientes de calibración (α y β) los cuales son difícil de obtener por falta de mediciones en campo, aunque al manual de WAVE (Deltares, 2018b) recomienda algunos valores dependiendo de las características de la estructura. El uso de ‘sheets’ permite simular la transmisión del oleaje mediante kt constante a lo largo de la estructura, teniendo una aproximación de este coeficiente esta opción es viable, pero se debe considerar que los procesos de asomeramiento y rotura sobre la estructura sobre el oleaje no son considerados. La Figura 46 realiza una comparación de la implementación de un rompeolas sumergidos como batimetría (primera columna), como obstáculo tipo ‘sheet’ (segunda columna) y como obstáculo tipo ‘dam’ (tercera columna).

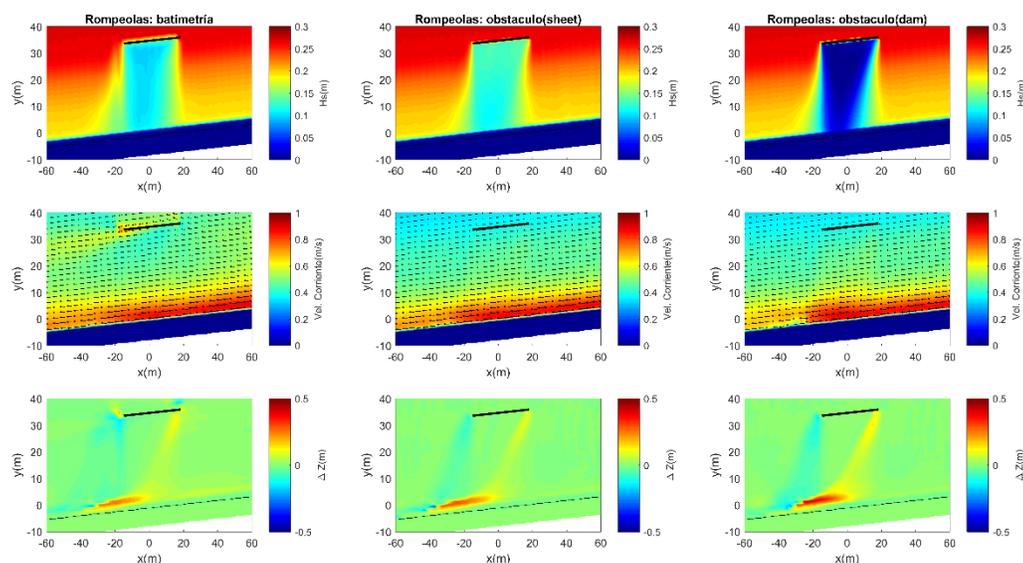


Figura 46. Comparación de métodos de implementación de rompeolas sumergidos y sus efectos sobre el campo de oleaje, corrientes y cambios batimétricos. La primera columna implementa el rompeolas como batimetría en el módulo FLOW y WAVE. La segunda columna como obstáculo tipo ‘sheet’ en el módulo WAVE. La tercera columna como obstáculo tipo ‘dam’ en el módulo WAVE.

De la Figura 46 se observa que la estructura como batimetría y como obstáculo generan campos similares de oleaje y corrientes sobre la zona de surf, y por lo tanto, los cambios batimétricos son similares en cuanto a forma y magnitud. En el caso de la estructura como batimetría el campo de oleaje muestra algunas elevaciones irregulares a la izquierda de la sombra de la estructura lo cual puede estar asociado a inestabilidades numéricas por el ángulo de incidencia del oleaje al llegar a la estructura. Además, el

patrón de corrientes es diferente sobre la estructura debido a los efectos de rotura y asomeramiento ocasionado por el rompeolas lo que genera cambios en la batimetría alrededor de la estructura. La estructura como obstáculo 'dam' (tercera columna) presenta la mayor variación debido al campo de oleaje simulado, donde la altura de ola es prácticamente nula en la sombra de la estructura por los ajustes de calibración de este obstáculo.

Entre los tres casos, el obstáculo de batimetría presenta el mejor comportamiento de corrientes, especialmente sobre la estructura, pero un campo de oleaje que puede presentar inestabilidades utilizando un oleaje variante en el tiempo, además es complicado ajustar un *kt* esperado utilizando este método. En cambio, el campo de oleaje en la estructura como obstáculo 'sheet' no es afectado por la variabilidad del oleaje, el *kt* es controlable y se representa adecuadamente el campo de corrientes en la sombra de la estructura. Esta zona es de mayor interés para este trabajo por lo que se recomienda implementar este método.

Efecto de difracción por las estructuras

La difracción en el módulo WAVE utiliza una aproximación basada en las ecuaciones de pendiente suave para refracción y difracción, omitiendo la información de la fase (Holthuijsen, 2007). Este proceso es sensible al tamaño de malla, para mallas pequeñas como las de este trabajo el valor default que utiliza el modelo para la difracción no funcionaba. Esto se solucionó aumentando el valor de 'smoothing step' en el proceso de difracción. Una vez encontrado un valor que permitiera funcionar al modelo se realizó una comparación de los efectos de difracción generados por espigones y rompeolas sumergidos (Figura 47 y Figura 48). Se utilizaron las recomendaciones de implementación de estructuras discutidas en la sección anterior.

En la Figura 47 se compara el caso de espigón sin difracción (columna izquierda) y con difracción (columna derecha). Se observa que el campo de oleaje presenta variación mínima a la izquierda de la estructura. Las corrientes presentan su mayor variación en la punta de la estructura, ya que disminuyen las velocidades de corrientes en el caso con difracción. En los cambios batimétricos el caso con difracción presenta una menor magnitud en erosión y acreción.

La Figura 48 muestra la comparación para el rompeolas sin difracción (columna izquierda) y con difracción (columna derecha). Los cambios en el campo de oleaje no son significativos, pero se muestra un cambio notable en las velocidades de corrientes y en los cambios en la batimetría.

En ambos casos la difracción es complicada de representar, pero los resultados se asemejan más a la realidad por lo que se debe procurar activarse en ambas estructuras.

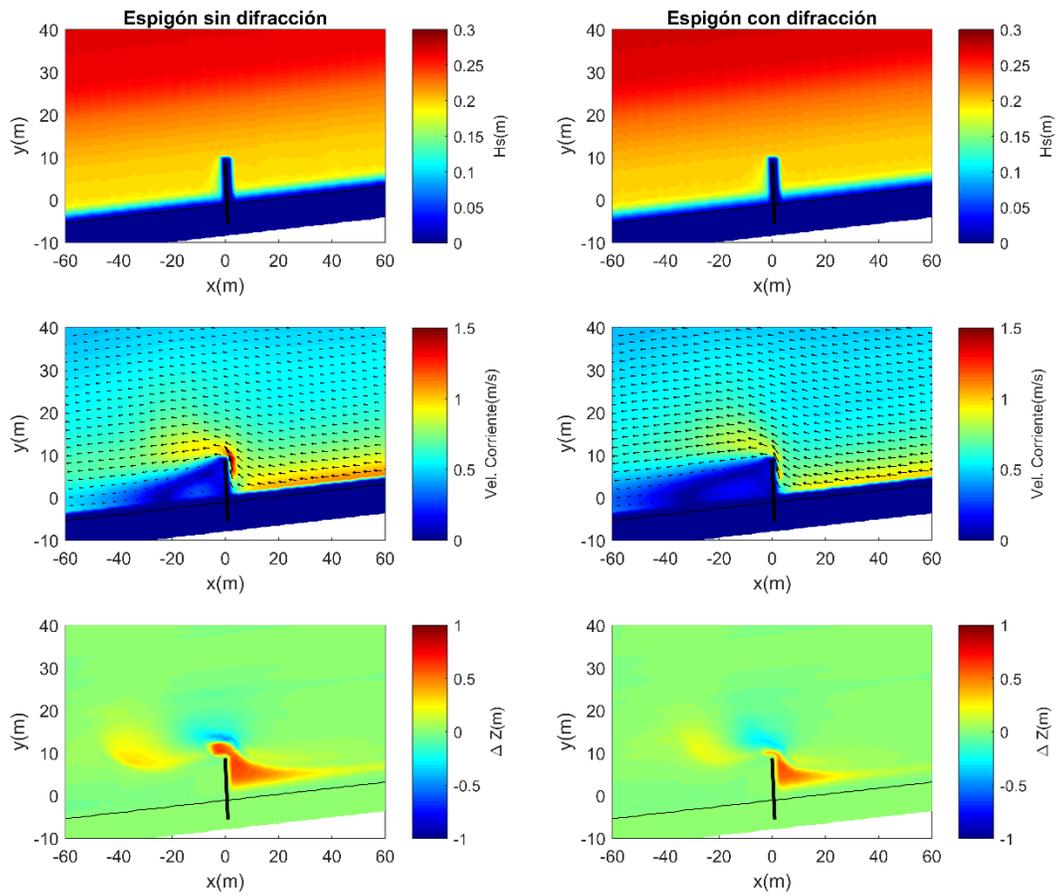


Figura 47. Comparación de los efectos de difracción para la estructura del espigón.

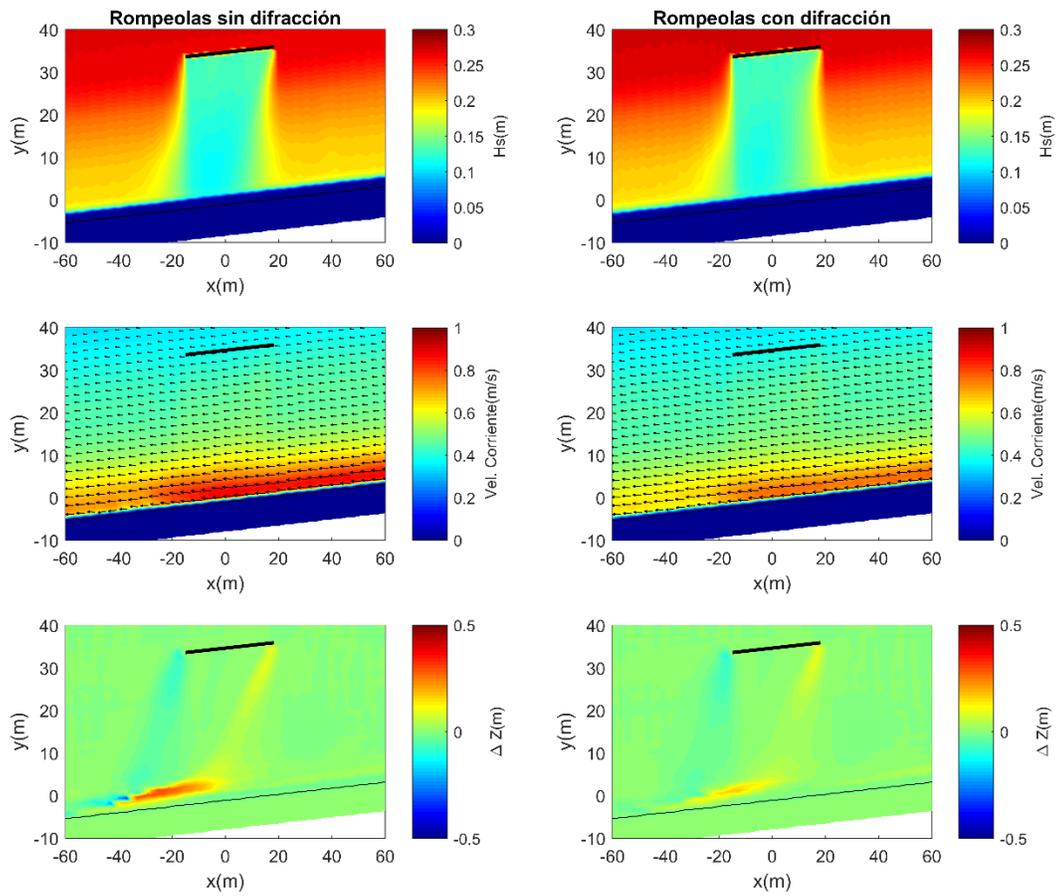


Figura 48. Comparación de los efectos de difracción para la estructura del rompeolas sumergido.

Apéndice III. Procedimiento de calibración

La calidad de los resultados de un modelo dependen de la batimetría implementada, el diseño de la malla computacional, los forzamientos en las fronteras y de una calibración capaz de reproducir el comportamiento en la realidad. Una buena calibración se obtiene a partir del ajuste de los parámetros libres del modelo y posteriormente una comparación de los resultados de la simulación con datos medidos. El proceso de calibración utilizado en este trabajo consistió en tres pasos: 1) aproximación de las alturas oleaje, 2) ajuste de velocidad de corrientes, 3) calibración de transporte de sedimentos. En esta sección se describe cada uno de los pasos.

Aproximación de las alturas de oleaje

Para obtener una primera calibración del oleaje, se implementó SWAN en 1D utilizando el perfil característico de Sisal y forzando el modelo con el oleaje de la serie de tiempo de los 4m de profundidad. El análisis de sensibilidad del Apéndice I, mostro que los parámetros γ , α y fricción tiene un mayor impacto en el control del perfil de H_s . Por lo tanto se automatizo una serie de simulaciones variando estos parámetros, desde γ de 0.4 a 0.75, α 1 a 30 y fricción tipo Jonswap de 0.034 a 0.5. El ensamble y análisis de los resultados se realizó a través de Matlab. La Figura 49 muestra las combinaciones de parámetros simulados con mayor similitud a las mediciones. Es notable que la mayoría utilizan una fricción alta en comparación a los valores recomendados por (Booij et al., 1999), utilizar una fricción alta permite coincidir las condiciones bajas de oleaje con las mediciones. De las combinaciones aquellas con γ de 0.5 a 0.6 muestran una mayor similitud. Para las simulaciones con $\gamma < 0.5$ las condiciones de baja energía tienden a sobrestimarse. Para $\gamma > 0.6$ las condiciones de altar energía son sobre estimadas.

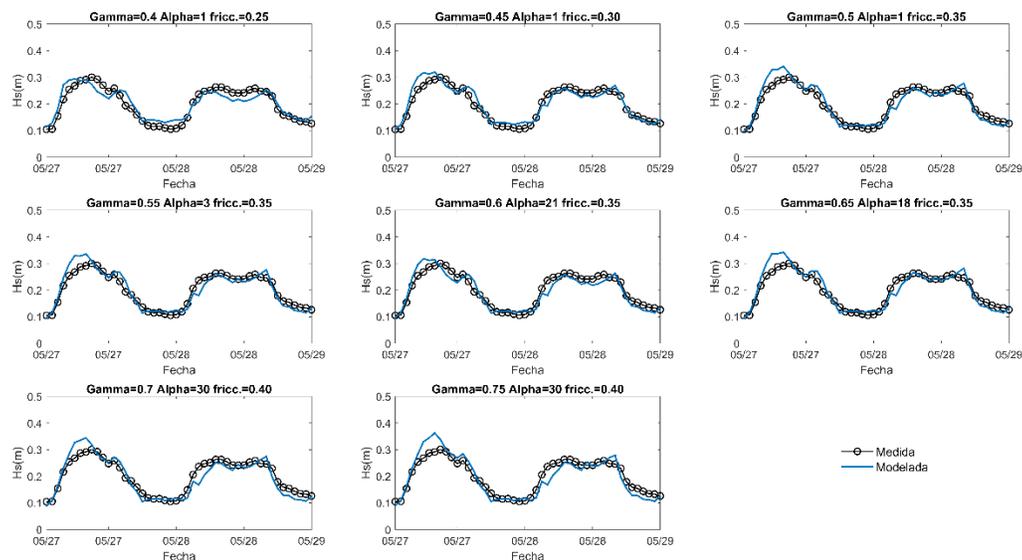


Figura 49. Comparaciones de H_s para diferentes combinaciones de parámetros del módulo WAVE.

Para determinar cuál combinación es mejor se debe tomar en cuenta el efecto sobre el perfil de corrientes. La Figura 50 muestra esta comparación para condiciones de alta energía y de baja energía utilizando las combinaciones de γ 0.5 a 0.6 de la figura anterior. Los cuadros negros indican una referencia medida en el campo para las alturas de oleaje y velocidades de corrientes obtenidas del procesamiento de datos de la campaña de Sisal (Capítulo IV), las líneas punteadas son la posición de los vectores.

Los resultados de la Figura 50 indican que las tres combinaciones muestran un comportamiento del perfil de corrientes esperado en la realidad similar al reportado en el estudio de la hidrodinámica de Sisal por (Torres-Freyermuth, Puleo, DiCosmo, et al., 2017). La combinación con $\gamma=0.6$ presenta mayores velocidades de corriente en la zona de swash, las combinaciones con $\gamma=0.5$ y 0.55 no presentan mayor diferencia. En todas las combinaciones evaluadas las corrientes son subestimadas en comparación a las mediciones de los vectores. Esto puede ajustarse a través de los parámetros libres del módulo de FLOW.

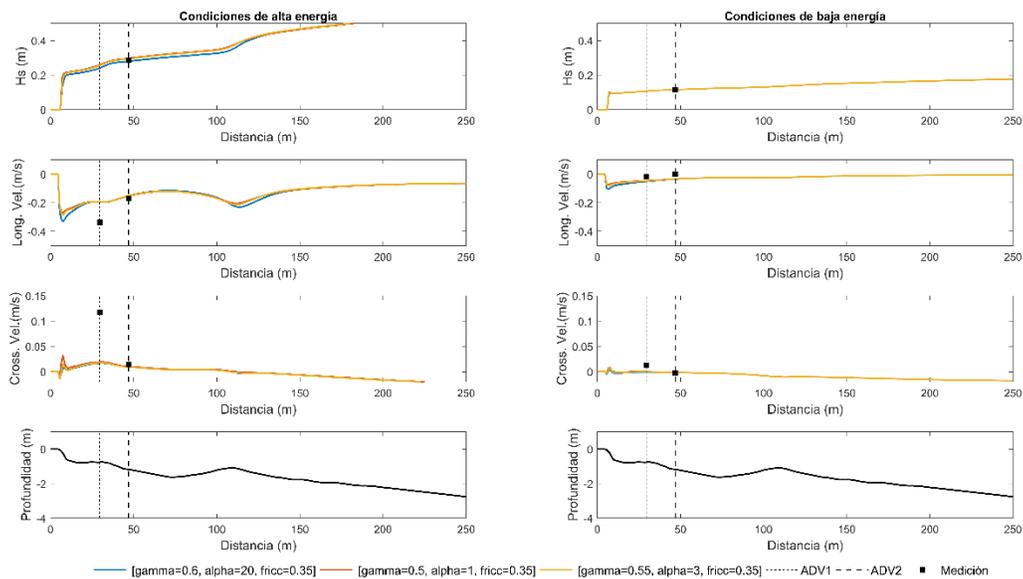


Figura 50. Análisis del comportamiento del perfil de Hs y corrientes para tres diferentes combinaciones de parámetros del módulo WAVE. Referencia de mediciones por ADVs en cuadros negros para condiciones de alta energía (panel izquierdo) y baja energía (panel derecho).

Ajustes de velocidad de corrientes

Para calibrar la velocidad de las corrientes se realizaron ajustes a los parámetros libres del módulo de FLOW. Del Apéndice I se mostró que los parámetros *dryflc*, *eddy viscosity*, *Chézy* del módulo de FLOW y el parámetro de profundidad mínima del módulo WAVE tienen el mayor efecto en el perfil de corrientes. *Chézy* se utiliza para variar la magnitud del perfil de velocidad, *eddy viscosity* para controlar la forma del perfil, y *dryflc* en conjunto con profundidad mínima controlan la forma del perfil sobre la zona de surf/swash.

La Figura 51 muestra el perfil de corrientes con los valores ajustados del módulo FLOW para las combinaciones de $\alpha=1$, $\gamma=0.5$, fricción=0.35, y $\alpha=21$, $\gamma=0.6$ y fricción=0.35. Del módulo FLOW se modificaron los parámetros de Chézy de 65 a 100, *eddy viscosity* de 1 a 0.1, el parámetro de *dryflc* no fue modificado, y del módulo WAVE se modificó la profundidad mínima de 0.05m a 0.2m. Los resultados de las simulaciones se asemejan a las mediciones por los vectores con los ajustes realizados para ambas combinaciones. El perfil de corrientes sobre la zona de swash es cualitativamente estimado debido a la falta de mediciones en esa zona. En el caso de $\gamma=0.6$, las velocidades de corriente longshore sobre la zona de swash son mayores en comparación al caso de $\gamma=0.5$, y las corrientes cross-shore son mayores para el caso de $\gamma=0.5$. Ambos casos sobrestiman la velocidad de corrientes longitudinales para condiciones de baja energía, durante condiciones de alta energía las velocidades en el ADV2 son sobrestimadas. Las mediciones de las velocidades cross-shore se mantienen en pequeñas magnitudes con excepción del ADV1 durante condiciones de alta energía, este comportamiento no fue reproducido por el modelo durante los ajustes de calibración pero puede estar sujeta a fenómenos ocasionados por la presencia de la estructura o de la marea que podrían verse reflejados en una simulación completa.

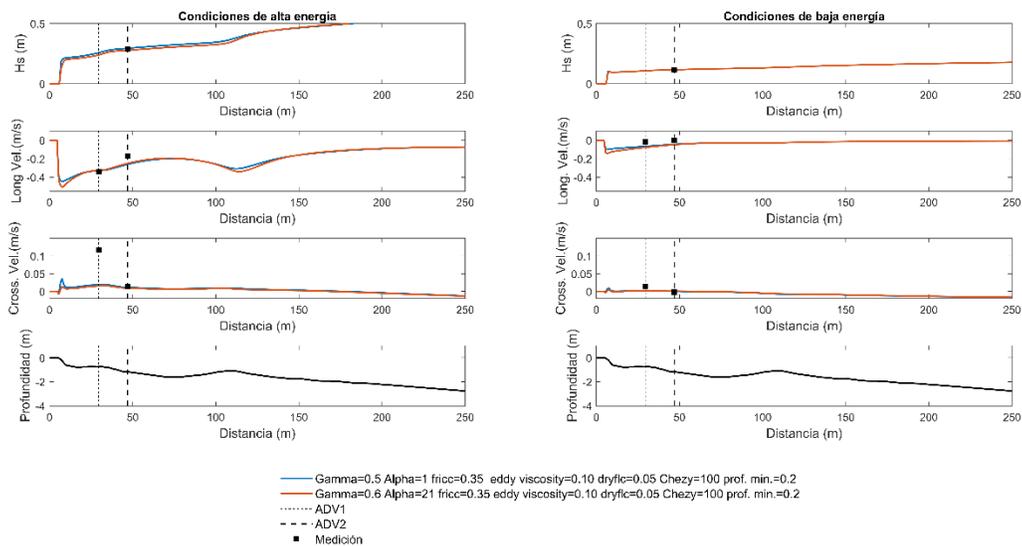


Figura 51. Análisis del comportamiento del perfil de H_s y corrientes para la mejor selección de parámetros del módulo WAVE con ajustes en el módulo FLOW para mejorar perfil de corrientes. Referencia de mediciones por ADVs en cuadros negros para condiciones de alta energía (panel izquierdo) y baja energía (panel derecho). Línea punteada indica posición de ADVs.

Ajustes de transporte de sedimentos

La calibración de los cambios morfológicos requiere correr la simulación completa de la campaña de Sisal y comparar los resultados de la simulación con las mediciones topo-batimétricas. Se utilizaron los parámetros obtenidos en la calibración de corrientes y oleaje par el caso de $\gamma=0.5$ y $\gamma=0.6$. Con base al Apéndice I, se identificó que los parámetros *sus*, *bed*, *susw*, *bedw*, *eddy diffusivity* y la fórmula de transporte de sedimento tienen el mayor impacto sobre el transporte de sedimentos. Se selecciono la formula de Van Rijn (1993), un *eddy diffusivity* de 0.001 y se desactivo el transporte de fondo ($bed=0$) y

el relacionado al oleaje ($susw=0$ $bedw=0$), por lo tanto la calibración morfológica solo dependió del parámetro de suspensión (sus).

En la Figura 52 se muestra la comparación de las mediciones en campo con los resultados de la simulación para ambos casos. En el caso de $gamma=0.5$ se utilizó un valor de $sus=4$, en el caso de $gamma=0.6$ se utilizó un valor de 3. En ambas calibraciones no se reprodujo el patrón de erosión a la izquierda de la estructura y el patrón de acreción es muy similar en términos de forma y magnitud.

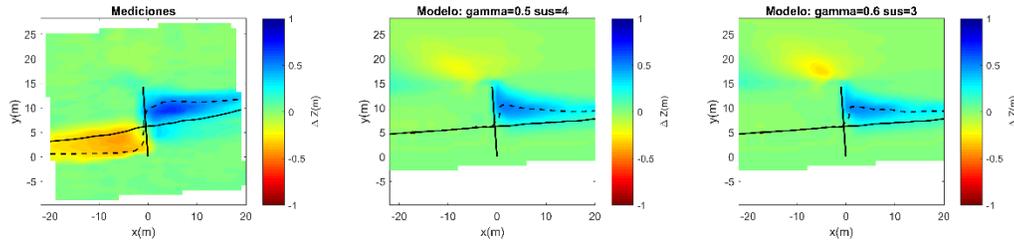


Figura 52. Comparación de la respuesta morfológica para dos combinaciones de parámetros del módulo WAVE, FLOW y SED.

Selección final

Los resultados de las combinaciones de $gamma=0.5$ y $gamma=0.6$ son muy similares para condiciones de oleaje, corrientes y morfología (Figura 53). La selección de la mejor combinación dependerá de algunos criterios cualitativos, por ejemplo, al utilizar $gamma=0.6$ la rotura ocurre mas cercana a la costa en comparación a $gamma=0.5$, por lo tanto, la magnitud del transporte de sedimento será mayor sobre la zona de surf/swash. Este comportamiento es esperado en la costa norte de Yucatán. Partiendo del supuesto que un valor de $sus=1$ representa un transporte natural, a medida que se incrementa el valor, incrementa la incertidumbre. Al no tener mediciones de transporte para la zona profunda para comparar el comportamiento de transporte, se debe seleccionar la combinación que utilice el valor más cercano a 1, en este caso la combinación asociada a $gamma=0.6$.

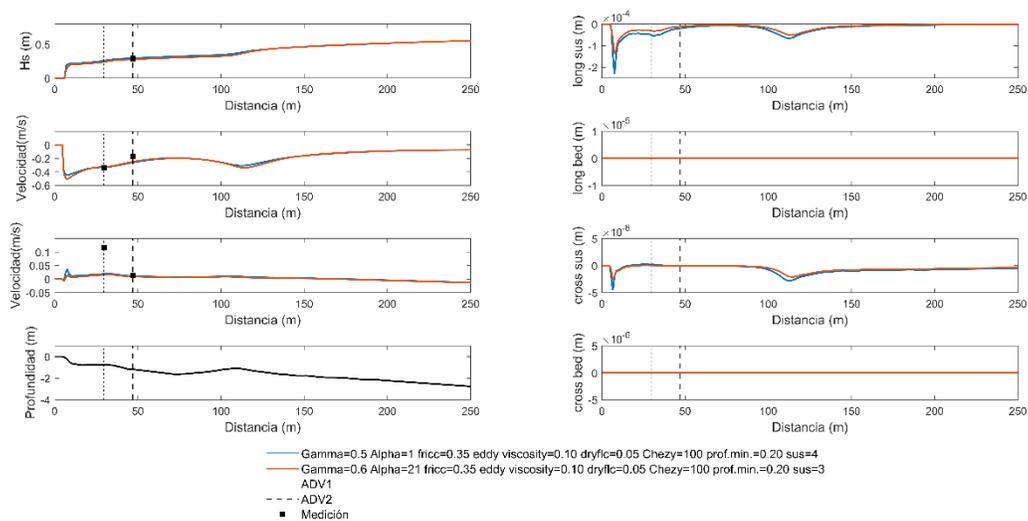


Figura 53. Comparación de las combinaciones $gamma=0.5$ y $gamma=0.6$ para H_s , velocidades de las corrientes y transporte.