

**Determinación de la vida útil de una protección costera
a través de la interacción oleaje-estructura**

**Wave-structure interaction study to assess the service
life of coastal structures**

Leonardo Palemón-Arcos¹

Alec Torres-Freyermuth²

Gabriela Medellín³

Christian M. Appendini⁴

Juan A. Álvarez-Arellano⁵

Yuriko Gutiérrez-Can⁶

Horacio Alvarado-Vigil⁷

Marco A. Hernández-Hernandez⁸

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Carmen, Ciudad del Carmen, Campeche, México, lpalemon@pampano.unacar.mx

² Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Sisal, Hunucmá, Yucatán, México, ATorresF@iingen.unam.mx

³ Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Sisal, Hunucmá, Yucatán, México. Cátedras Conacyt, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Ciudad de México, México. Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera, Laboratorios Nacionales Conacyt, GMedellinM@iingen.unam.mx

⁴ Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Sisal, Hunucmá, Yucatán, México, CAppendiniA@iingen.unam.mx

⁵ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Carmen, Ciudad del Carmen, Campeche, México, jalvarez@delfin.unacar.mx

⁶ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Carmen, Ciudad del Carmen, Campeche, México, ygutierrez@pampano.unacar.mx

⁷ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Carmen, Ciudad del Carmen, Campeche, México, halvarado@delfin.unacar.mx

⁸ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Carmen, Ciudad del Carmen, Campeche, México, mahernandez@pampano.unacar.mx

Autor para correspondencia: Leonardo Palemón-Arcos,
lpalemon@pampano.unacar.mx

Resumen

La vida útil de las estructuras costeras está en función de las fuerzas ejercidas por la acción combinada del oleaje y el nivel medio del mar. Sin embargo, el estudio de la interacción oleaje-estructura requiere conocer el papel de la rotura, el cual es un fenómeno complejo que no se puede estudiar de forma analítica. Por tanto, en el presente trabajo propone extender una metodología existente para determinar la vida útil de los diques verticales, utilizando datos de un retroanálisis de oleaje y modelación numérica. Se empleó un algoritmo de máxima disimilitud para seleccionar 600 casos representativos de las condiciones de oleaje y nivel del mar en la zona de estudio, que fueron utilizados para el forzamiento de un modelo de propagación de oleaje. El modelo de propagación de oleaje se encadenó con un modelo no lineal, basado en las ecuaciones no hidrostáticas de aguas someras para calcular las fuerzas sobre la estructura y el rebase. Las fuerzas calculadas fueron utilizadas por un modelo de análisis estructural para cuantificar los movimientos asociados con la interacción oleaje-estructura. Los resultados de rebase y fuerzas fueron interpolados para las condiciones no modeladas, con el fin de reconstruir la serie temporal de 30 años. Estos resultados permiten caracterizar el fallo asociado con diferentes periodos de retorno. Finalmente, los resultados numéricos fueron utilizados para calibrar modelos semianalíticos y paramétricos para su uso en la zona de estudio.

Palabras clave: diques verticales, vida útil, interacción oleaje-estructura, funcionalidad estructural.

Abstract

The functionality of coastal structures depends on the forces exerted by waves in combination with the mean sea level. Nevertheless, the study of wave structure requires determining the flow during the wave breaking processes, which cannot be solved analytically. Therefore, this work aims to extend an existing methodology to determine the service life of coastal structures using a 30-year wave hindcast and numerical models. For this, we used a maximum dissimilarity algorithm to select 600 representative combinations of waves, and the mean sea level, to simulate the wave-structure interaction using a non-hydrostatic non-linear shallow water

equations model, coupled with a structural model. Subsequently, we quantified the failures due to overtopping and sliding associated to the simulated cases. An interpolation technique allowed us to reconstruct the 30-year time series of wave overtopping and wave-forces. Thus, the approach presented made it possible to characterize the failure of structures based on return periods. Moreover, numerical results were employed to calibrate existing semi-analytical models in order to quickly assess structural failure in the study area.

Keywords: Vertical breakwaters, service life, wave-structure interaction, structure functionality.

Recibido: 14/06/2017

Aceptado: 14/03/2018

Introducción

Debido a la dinámica de los procesos que intervienen en la interacción oleaje-estructura en zonas costeras, el diseño de estructuras costeras es complejo. El diseño estructural está en función de las características del oleaje, asociadas con un periodo de retorno determinado. Sin embargo, el fallo de estructuras depende de la combinación de las condiciones del oleaje y otras variables (p. ej., vientos y marea), que incrementan/disminuyen el riesgo de la estructura. Por lo tanto, para poder estimar la vida útil de estructuras se han propuesto aproximaciones probabilísticas y un análisis multivariado (Cheung & Kyle, 1996; Guanche, Camus, Guanche, Mendez, & Medina, 2013; Camus, Mendez, & Medina, 2011b; Camus, Mendez, Medina, & Cofiño, 2011a). Recientemente, las metodologías han incorporado el rol de la incertidumbre (p. ej., Palemón-Arcos, Torres-Freyermuth, Pedrozo-Acuña, & Salles, 2015) y del cambio climático en su ciclo de vida (Guanche *et al.*, 2013).

El retroanálisis de oleaje es una herramienta que permite obtener información histórica en zonas donde los datos son escasos (Reguero, Menéndez, Mendez, Mínguez, & Losada, 2012; Appendini *et al.*, 2013). Por otro lado, los esfuerzos de los últimos años han estado enfocados al desarrollo de metodologías que permitan el estudio de estabilidad de estructuras costeras por medio del uso de modelos numéricos (Losada, Lara, Guanche, & González-Ondina, 2008; Higuera, Lara, & Losada, 2013; Del Jesus, Lara, & Losada, 2012). Los avances recientes en la capacidad

de cómputo permiten investigar la interacción oleaje-estructura con gran detalle, incluyendo la cuantificación del rebase (Guanche, Losada, & Lara, 2009) y el deslizamiento (Palemón *et al.*, 2015). Sin embargo, no es práctico simular un gran número de casos debido al alto costo computacional que ello representa. Así, los estudios previos se han enfocado a evaluar diferentes algoritmos para la selección de casos representativos (Camus *et al.*, 2011a; Snarey, Terrett, Willet, & Wilton, 1997; Willet, 1996; Polinsky, Feinstein, Shi, & Kuki, 1996), que permitan la reconstrucción de series temporales multianuales de las condiciones del oleaje (Camus, Mendez, Medina, & Cofiño, 2010), la interacción oleaje-estructura (Guanche *et al.*, 2013) o el ascenso en playas (Medellín *et al.*, 2016).

El presente trabajo presenta una metodología que permite evaluar la probabilidad de fallo de estructuras costeras, considerando el efecto combinado del oleaje y el nivel del mar. La sección 2 describe el área de estudio y las características de la estructura utilizada para ilustrar la aplicación de la metodología. La sección 3 expone los modelos numéricos utilizados. Los métodos son descritos en la sección 4 y los resultados se muestran en la sección 5. La sección 6 presenta las discusiones, seguida de las conclusiones en la sección 7.

Área de estudio

El área de estudio está localizada en Ciudad del Carmen, Campeche, México (Figura 1). La batimetría en esta zona se caracteriza por una pendiente suave (1:500). La batimetría empleada en aguas costa afuera corresponde a la ETOPO (Amante, 2009). Por otro lado, se utilizó una batimetría realizada en la zona para profundidades menores a 6 m (Figura 2).

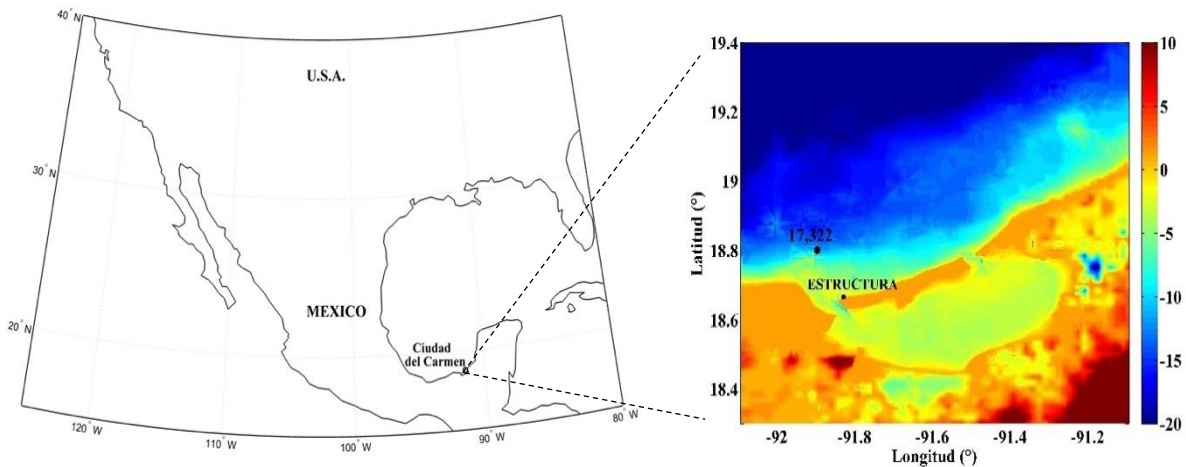


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

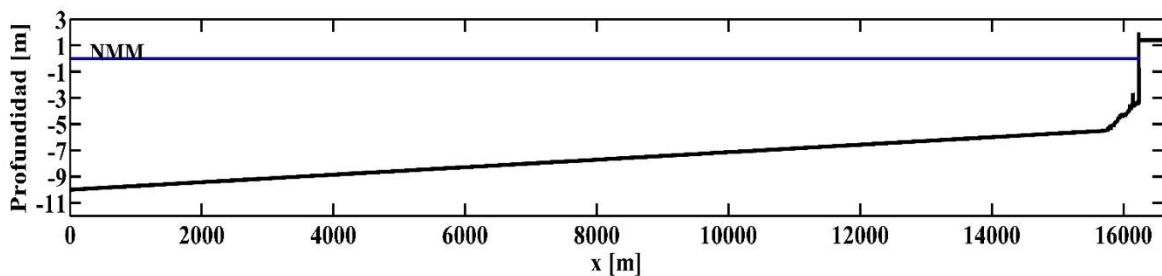


Figura 2. Batimetría de la zona de estudio.

El clima de oleaje en esta zona presenta una alta frecuencia de tormentas durante los meses de invierno, asociadas con el paso de frentes fríos en el Golfo de México (Appendini, Torres-Freyermuth, Salles, López-González, & Mendoza, 2014; Appendini, Hernández-Lasheras, Meza-Padilla, & Kurczyn, 2018). Sin embargo, no existen registros históricos multianuales de libre acceso en el área de estudio. Por lo tanto, para la caracterización del clima marino se utilizó un retroanálisis de oleaje de 30 años, basado en el retroanálisis de vientos NARR (Appendini *et al.*, 2014). La información fue extraída para un punto localizado a una profundidad de 10 m aproximadamente y a 1.5 km costa afuera (18.8° N y -91.90° O, Figura 1). El reanálisis cuenta con 87 664 estados de mar, obtenidos cada tres horas durante un periodo de 30 años (1979-2008). Para cada estado de mar se cuenta con altura de ola significativa (H_s), periodo de pico (T_p), y dirección del oleaje (θ). Por otro lado, la marea astronómica (Z) para el mismo periodo fue obtenida utilizando el modelo *MIKE 21 SW* (Sørensen, Kofoed-Hansen, Rugbjerg, & Sørensen, 2004), considerando las constantes armónicas del modelo de mareas global propuesto por Cheng y Andersen (2010).

Para determinar el nivel medio del mar (NM) es necesario considerar la marea de tormenta (MT), por lo que se estimó de la siguiente manera (Dean & Dalrymple, 1991):

$$MT = \frac{x}{\left[1 - \frac{h+\eta}{h_0}\right] - A \ln \left[\frac{\frac{h+\eta}{h_0} - A}{1-A}\right]} \quad (1)$$

Donde:

$$A = \frac{n \rho_a k u_{10}^2}{\rho_w g h_0^2}$$

(2)

donde h_0 es profundidad en metros; n representa el coeficiente de arrastre igual a 1.3; A es la relación de los esfuerzos de corte con la fuerza hidrostática; ρ_a es la densidad del aire (1.204 kg/m^3); ρ_w es la del agua (1028 kg/m^3); u_{10} es la velocidad del viento obtenida del NARR; g es la aceleración gravitatoria, y k indica el factor de fricción igual a 0.0034. La Figura 3 muestra la serie temporal del oleaje (altura significativa, periodo de pico, y dirección) en el nodo del hindcast seleccionado, así como la marea astronómica (Z) y la marea de tormenta (TM). El nivel del mar (NM) empleado como condición inicial para simular cada estado de mar se obtuvo mediante la suma algebraica de la marea astronómica (Z) y la marea de tormenta (TM).

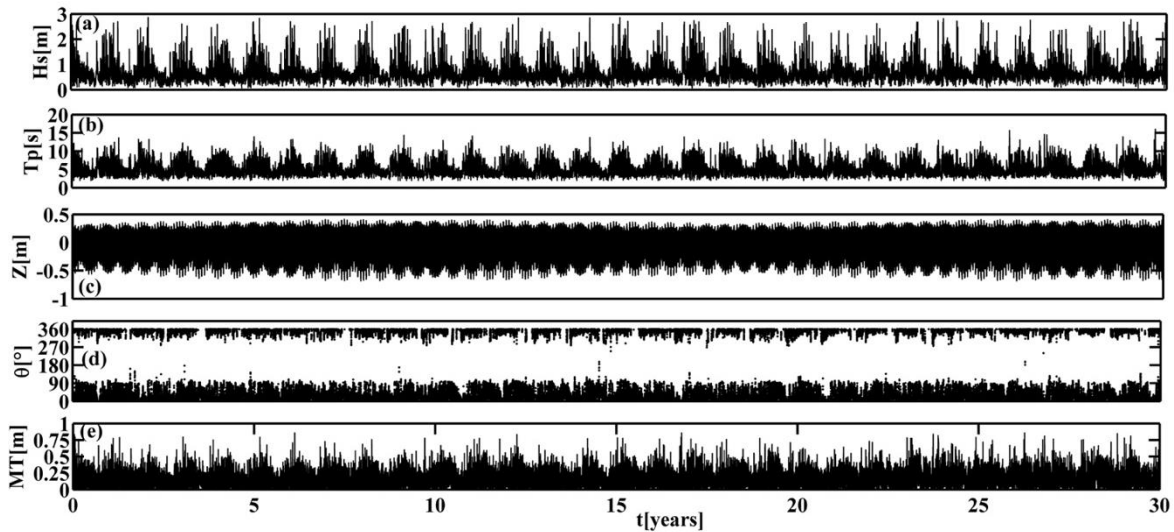


Figura 3. Series temporales sintéticas para el periodo de 1979-2008 de: (a) altura de ola significativa, (b) periodo pico, (c) marea astronómica, (d) dirección del oleaje y (e) marea de tormenta.

Para ilustrar la metodología del presente trabajo se seleccionó una estructura vertical ubicada en el malecón de Ciudad de Carmen, Campeche. La Figura 4 expone la configuración de la estructura empleada para este trabajo. Dicha estructura corresponde a una tablaestaca de concreto reforzado de 13 m de longitud, con un empotramiento de 7.6 m. Al pie de la estructura se tiene un tirante de agua de alrededor de 3.4 m, con un francobordo de 2 m con respecto al nivel medio del mar. El sistema de tablaestacado es con base en tabletas de 25 cm de espesor, con 60 cm de ancho, armado con cinco varillas de una pulgada en cada cara. Las uniones entre tabletas son de candado tipo machihembrado. El concreto simple es resistente a la corrosión; además, se descabezaron las tabletas para unir las con una trabe corrida sobre ellas.

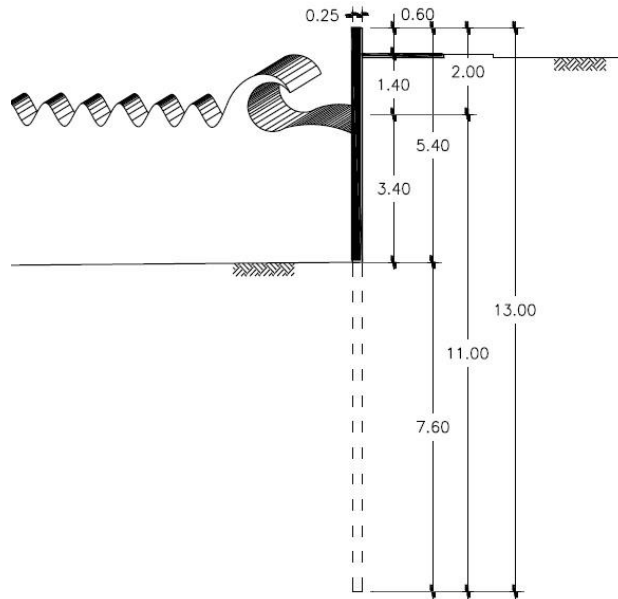


Figura 4. Estructura vertical, acotación, m.

Las tabletas fueron hincadas por un martillo. La longitud de diseño fue empotrado al subsuelo, colando posteriormente la cabecera para unir todas las tabletas que la conforman.

Modelos numéricos

Para el estudio de la interacción flujo-estructura se utilizó el acoplamiento de tres modelos numéricos (Figura 5). El modelo de oleaje *SWAN* (Booij, Ris, & Holthuijsen, 1999) se utilizó para propagar el espectro de oleaje desde aguas afuera hasta zonas cercanas a la costa. El espectro de energía propagado fue utilizado para el forzamiento del modelo *SWASH* (Zijlema, Stelling, & Smit, 2011), que permite modelar la transformación no lineal del oleaje, incluyendo la rotura y su hidrodinámica asociada. El modelo *SWASH* estima el rebase y el campo de presiones alrededor del dique vertical. Esta información es utilizada por un modelo de dinámica estructural para determinar si existe o no un fallo estructural. Los modelos numéricos han sido ampliamente validados y descritos en trabajos previos. Por lo tanto, sólo se presentará una descripción general.

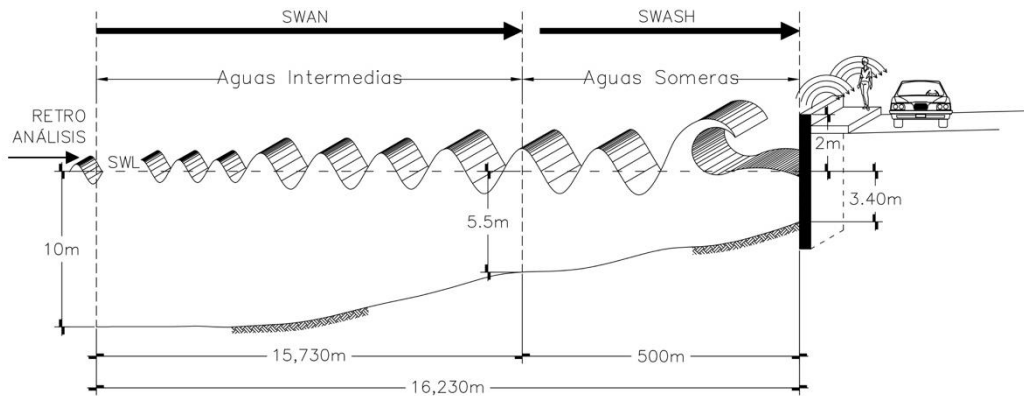


Figura 5. Diagrama conceptual sobre el acoplamiento de modelos de oleaje, hidrodinámico y estructural para el estudio de interacción flujo-estructura.

Modelo de propagación de oleaje

El modelo utilizado para la propagación de oleaje es el *Simulating WAVes Nearshore (SWAN)*, desarrollado por la Delft University of Technology (Booij *et al.*, 1999). Es un modelo de tercera generación de oleaje promediado en la fase, basado en las ecuaciones de balance de acción de la onda dadas por:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (3)$$

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (4)$$

donde la densidad de la acción está dada por $N(\sigma, \theta)$ en función de la frecuencia relativa σ y el ángulo del oleaje θ .

El primer término en la ecuación (3) representa la variación temporal de la densidad de acción local, mientras que el segundo y tercer término se

refiere a la propagación de la densidad de acción lanzada en el espacio (donde C_x y C_y son la celeridad de propagación de la onda en la dirección x e y , respectivamente). El cuarto término representa el cambio en la frecuencia angular debido a la variación en profundidad y corrientes (donde C_r es la celeridad de propagación en el dominio de la frecuencia). El quinto término representa la refracción del oleaje asociada con las corrientes y variaciones de la profundidad, en la que se incluye la celeridad de propagación en el dominio direccional. Los términos del lado derecho representan las fuentes y sumideros de energía espectral debidos al viento, descrestamiento e interacciones no lineales. El modelo numérico permite propagar el oleaje hasta la costa, proporcionando condiciones de contorno para el modelo no lineal *SWASH*.

Modelo hidrodinámico

El modelo *Simulating WAVes till SHore (SWASH)* es un modelo transitorio que simula la hidrodinámica y superficie libre del oleaje en 1 y 2 dimensiones (Zijlema *et al.*, 2011). Resuelve las ecuaciones no hidrostáticas no lineales de aguas someras. Las ecuaciones de gobierno están dadas por la conservación de masa y cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\eta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u\sqrt{(u^2 + v^2)}}{h} = \frac{1}{h} \left[\frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\eta} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v\sqrt{(u^2 + v^2)}}{h} = \frac{1}{h} \left[\frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \right] \quad (7)$$

donde t es el tiempo; x e y , coordenadas transversales y longitudinales; $\eta(x, y, \tau)$, la superficie libre; $d(x, y)$, la profundidad del agua; $h = \eta +$

d , la profundidad total; $u(x, y, \tau)$ y $v(x, y, \tau)$, las velocidades del fluido; $q(x, y, z, \tau)$, la presión hidrostática; g , la aceleración gravitatoria; C_f , el coeficiente de fricción; τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} y τ_{yy} son los esfuerzos turbulentos. Para la modelación de la interacción oleaje-estructura se emplean como condiciones de frontera costa afuera las condiciones de oleaje del modelo SWAN. El modelo numérico da como resultado series temporales de superficie libre, flujo y presiones frente a la estructura.

Modelo de dinámica estructural (*Staad Pro*)

El análisis estructural, que es la antesala al diseño de todo elemento o estructura que todo ingeniero debe realizar, tiene como objetivo fundamental la determinación de fuerzas o esfuerzos, y desplazamientos o deformaciones de una estructura sometida a las solicitaciones diversas. Para el análisis estructural se utiliza el modelo de elemento finito *Staad Pro*. El modelo resuelve la ecuación (Chopra, 2011):

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{p\}$$

(8)

En donde la M representa la matriz de masas, C es la matriz de amortiguamiento, K es la matriz de la rigidez y la p es el forzamiento generado por el modelo hidrodinámico producto del oleaje. Este modelo permitirá cuantificar el tipo de fallo estructural (deslizamiento o volcadura) asociado con condiciones de oleaje determinadas. Las estimaciones de presión en la estructura por parte de SWASH son utilizadas como condiciones de contorno en el modelo.

Métodos

El marco de trabajo empleado en el presente trabajo se ilustra en la Figura 6. Al inicio se seleccionaron 600 casos representativos de la dinámica marina de la zona a partir de datos de un reanálisis de oleaje. Los casos de oleaje seleccionados fueron propagados hasta la estructura. El modelo

hidrodinámico permite estimar la interacción flujo-estructura, incluyendo el volumen de rebase y las fuerzas para cada uno de los casos simulados. Asimismo, se llevó a cabo un análisis estructural basado en el acoplamiento del modelo hidrodinámico y el modelo estructural. Por lo tanto, a partir de los resultados se pueden cuantificar los diferentes tipos de fallas y reconstruirse la serie temporal de rebase y deslizamientos durante el periodo de estudio (1979-2008). Un análisis probabilístico de los resultados permite determinar la vida útil de la estructura. Finalmente, los resultados numéricos fueron utilizados para calibrar modelos semianalíticos para la zona de estudio.

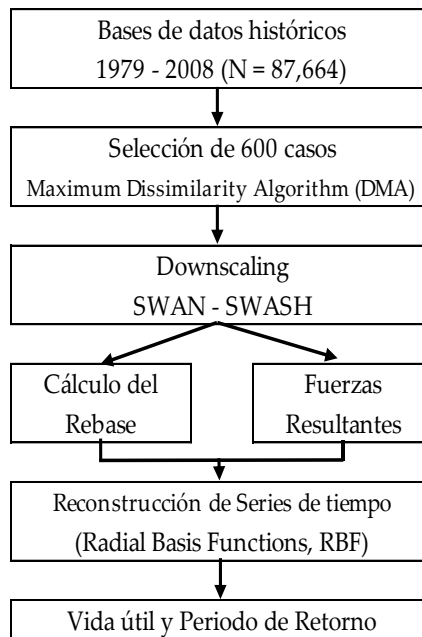


Figura 6. Marco de trabajo utilizado para el estudio probabilístico de fallos de estructuras costeras.

Reducción de escala (*downscaling*)

La base de datos utilizada contempla más de 80 000 combinaciones de parámetros del oleaje, nivel del mar y viento en la zona de estudio. Modelar de manera numérica todos los casos no es viable por computadora. Por lo tanto, se utilizó un algoritmo de máxima disimilitud, siguiendo el trabajo previo de Camus *et al.* (2011) para modelar un subgrupo de casos. La Figura 7 muestra las series temporales disponibles

en la zona y los 600 casos seleccionados para su modelado (círculos azules).

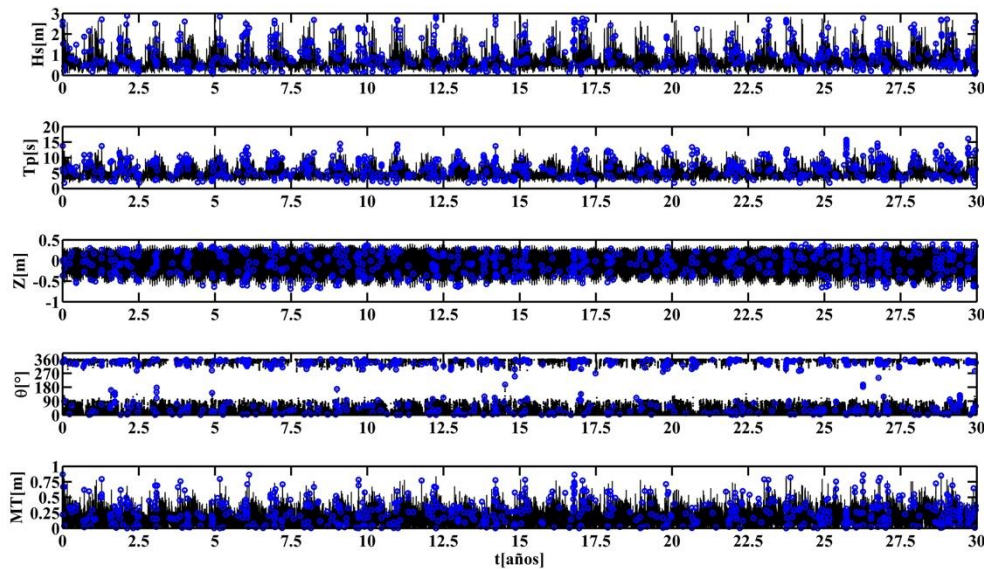


Figura 7. Series temporales de (a) altura de ola significativa, (b) periodo pico del oleaje, (c) marea astronómica, (d) dirección del oleaje, y (e) marea de tormenta. Los círculos azules corresponden a los 600 casos seleccionados con el algoritmo de máxima disimilitud.

Los casos seleccionados se propagaron utilizando el modelo *SWAN* (Booij *et al.*, 1999), asumiendo un espectro tipo Jonswap ($\gamma = 3.3$) extendido a lo largo de la batimetría (Figura 2). La malla computacional en *SWAN* está compuesta de 286 celdas con un tamaño de 55 m. El espectro propagado se utiliza para el forzamiento del modelo *SWASH* en su versión unidimensional. El dominio computacional en *SWASH* es de 2 000 celdas, con una resolución espacial de 0.25 m. La rotura del oleaje es simulada con un criterio de peralte de la ola y, por lo tanto, no se requirió ninguna parametrización adicional.

Análisis de fallo funcional y estructural

El modelo *SWASH* permite la estimación del volumen de rebase para cada caso simulado. Los cálculos de rebase son obtenidos en unidades de descarga por unidad de ancho ($\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$). Además, el modelo permite

obtener la presión dinámica en la estructura. Integrando la envolvente de presiones máximas se obtienen las fuerzas que actúan sobre la estructura. La Figura 8a muestra la serie temporal del rebase para dos casos simulados. La línea azul corresponde a $H_s = 3.3$ m y $T_p = 8.4$ s, y la línea negra a $H_s = 2.6$ m y $T_p = 14$ s. A partir de estos resultados, las tasas de rebase pueden ser estimados para cada uno de los casos. Por otro lado, las fuerzas obtenidas con el modelo *SWASH* son utilizadas para forzar el modelo de dinámica estructural (*Staad Pro*). Este modelo permite realizar un análisis estructural detallado que permite simular la interacción suelo-estructura. La Figura 8b muestra las presiones máximas sobre el muro vertical de la estructura para los dos casos. La línea roja muestra el diagrama de las presiones activas con sus respectivas magnitudes dentro de cada figura triangular y trapecial. Para estos dos casos, las fuerzas inducidas por el oleaje son mayores que la presión activa y por lo tanto existe un fallo estructural. Este análisis se llevó a cabo para cada uno de los 600 casos seleccionados.

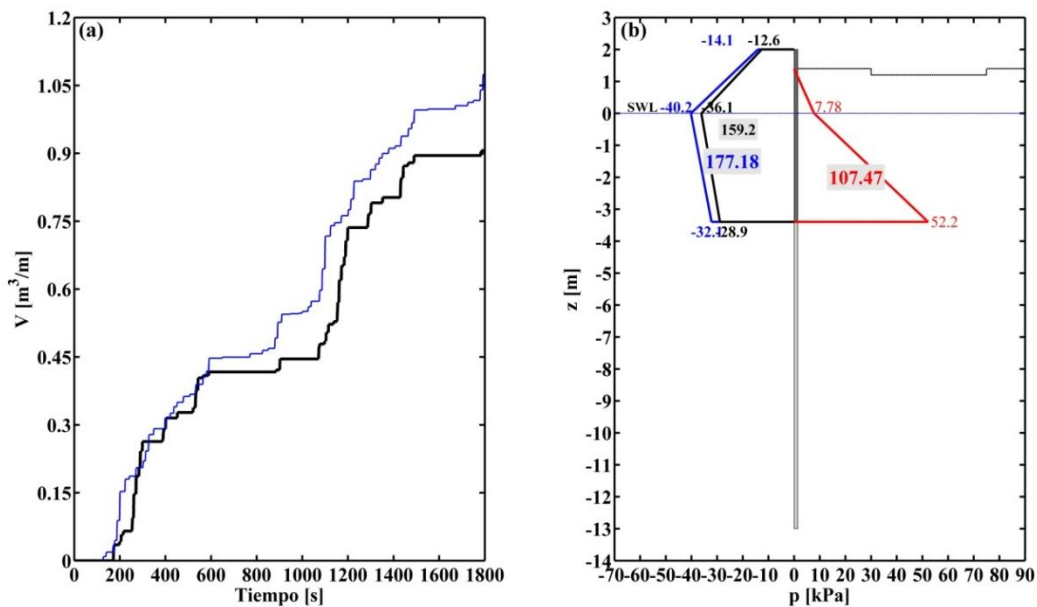


Figura 8. (a) Serie temporal de rebase y (b) presiones dinámicas para dos casos modelados (línea negra sólida: $H_s = 2.6$ y $T_p = 14$ s; línea azul sólida: $H_s = 3.3$ y $T_p = 8$ s).

Análisis probabilístico

Para reconstruir la serie temporal de 30 años de rebase y el cálculo de fuerzas resultantes se empleó una técnica de interpolación multidimensional basada en la función radial basal. Esta técnica es adecuada para información dispersa y multidimensional (Franke, 1982; Hardy, 1990), y ha sido ampliamente utilizada en estudios previos (p. ej., Camus *et al.*, 2011a; Camus *et al.*, 2011b; Guanache, Losada, & Lara, 2013; Medellín *et al.*, 2016). Se utilizó la función Gaussiana, donde el parámetro de la forma se obtiene con el algoritmo propuesto por Rippa (1999). Este método permite interpolar el rebase y las fuerzas para todas las condiciones (H_s , T_p , θ , Z y MT) presentadas a lo largo del periodo de estudio. Después se realizó un análisis extremal que consiste en seleccionar los valores máximos anuales de las fuerzas resultantes de presión y de rebase sobre la estructura a lo largo de los 30 años, utilizando el método de Gumbel. Por último, el periodo de retorno (Tr) se definió como el número de años promedio en que transcurren dos sucesos de cierta magnitud.

Resultados

En esta sección se presentan los resultados del análisis funcional y estructural de la estructura vertical utilizada para este estudio.

Rebase

Los resultados de los 600 casos simulados fueron empleados para interpolar las condiciones relacionadas con la serie de 30 años (Figura 9). En la Figura 9a se muestran los datos seleccionados correspondientes al rebase (círculos negros) y los resultados de la reconstrucción, producto de la interpolación (círculos azules).

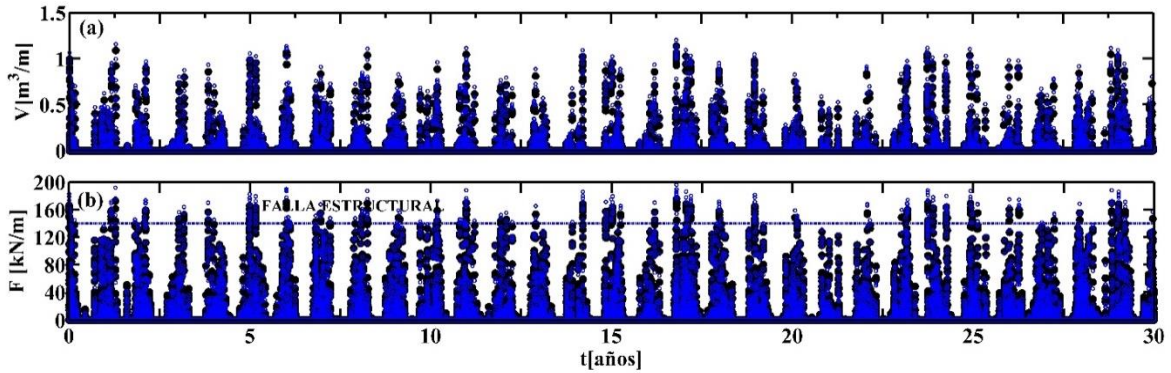


Figura 9. Datos de series reconstruidos (círculos azules) vs. resultados de la propagación (círculos negros) correspondiente al (a) volumen de rebase y (b) fuerzas resultantes.

Al graficar los datos de los 30 años del oleaje es evidente que los eventos que presentan un mayor rebase se asocian con las condiciones con mayor altura significativa, periodo pico y nivel de mar (Figura 9). De esta manera se puede calcular el historial del volumen del rebase sobre la estructura de tablestacado en el periodo de los 30 años. El rebase está dado por metro lineal; en este caso, si se considera un ancho de dos metros, el volumen máximo que se tendrá será de 2.2 m^3 . O bien para poder ubicar la peligrosidad, en este caso se tendrá una tasa de rebase de $6.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s m}$. Es importante establecer periodos de retorno (T_r) no mayores que el triple de la longitud de la información de serie de datos usados, es decir, en este caso, el máximo periodo de retorno confiable será para 90 años. En conclusión, para un volumen de rebase peligroso, la magnitud será de $1.2 \text{ m}^3/\text{m}$ (USACE, 2002), lo cual corresponde a un periodo de retorno de 17.5 años (Figura 10).

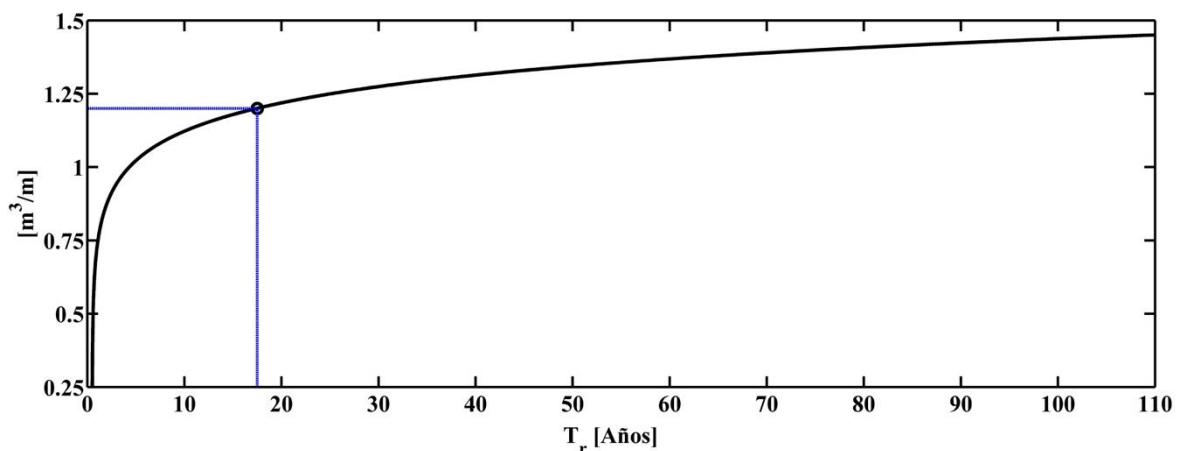


Figura 10. Periodos de retorno para el rebase.

Análisis estructural

Para poder determinar el fallo de la estructura de protección es necesario conocer su capacidad estructural. Por lo tanto, deben considerarse las características de la estructura, las cuales aportan cierta resistencia. Para calcular la resistencia, primero se ingresa el espesor de la estructura, así como el ancho con el cual se realizará la revisión. Se considerarán las especificaciones del concreto con la que fueron hechas, así como el acero de refuerzo empleado. Mediante las ecuaciones de las normas técnicas complementarias para el diseño y la construcción de estructuras de concreto, tales como la cuantía mínima reglamentada, así como la cuantía necesaria por el momento requerido, se obtiene un momento resistente de 22 ton-m, con un área de acero de 38.04 cm² correspondiente a la estructura de protección vertical impermeable. Se considera de forma reglamentaria el acero mínimo representado por la cuantía mínima, así como la máxima, cuyas magnitudes indican los límites del acero que demandará el momento actuante. Por lo tanto, de acuerdo con la revisión estructural, la fuerza resultante que provoca el momento obtenido es de 178.1 Kn/m.

De la misma manera que el procedimiento con el rebase, se pueden obtener los resultados de las fuerzas resultantes actuantes a lo largo del periodo de 30 años. Para determinar cada fuerza actuante se procedió a obtener las fuerzas máximas en cada punto, todo lo largo de la vertical de la estructura, y se procede a calcular el área del diagrama, cuyo resultado será la fuerza resultante. Esta fuerza se ingresa en el modelo estructural para modelar el comportamiento de la tableta de protección, emitiendo su daño o deflexiones horizontales. La fuerza actuante dinámica se contrarresta con la del empuje del suelo, misma que si es rebasada en magnitud, la estructura presentará fallo permanente debido a que la tableta cuenta con un espesor y armado estructural. Para el caso de la fuerza resultante que genera fallo, ésta tendrá una magnitud de 178.1 kN/m, que equivale a un periodo de retorno de tres años (Figura 11).

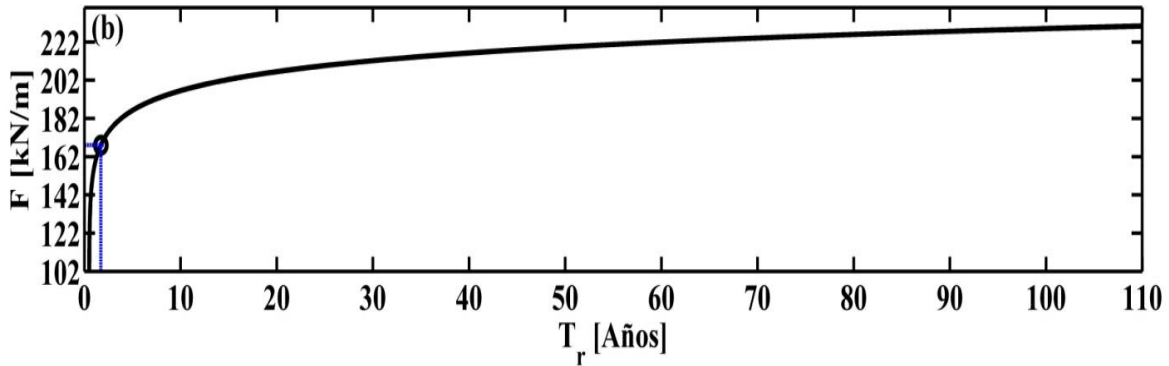


Figura 11. Periodos de retorno para la fuerza resultante.

Discusión: parametrización

La interacción oleaje-estructura genera rebase y fuerzas dinámicas sobre la estructura, que son responsables del fallo funcional y estructural. En este trabajo se utilizaron modelos numéricos para su cuantificación. Sin embargo, es común el uso de expresiones semiempíricas para problemas prácticos. En virtud de lo anterior, se propone emplear los resultados numéricos para desarrollar parametrización *ad hoc* que permita estimar el rebase y las fuerzas de manera ingenieril en la zona de estudio.

La parametrización del rebase V seleccionada se encuentra en función del francobordo de la estructura f_b , el periodo pico, y la altura de ola significativa, y está dada por:

$$V_{600} = 2e^{-50\left[\frac{f_b}{T_p H S^2}\right]} \quad (9)$$

Los puntos negros en la Figura 12 representan las magnitudes del rebase obtenidos de modo numérico. La línea representa la línea de mejor ajuste de los datos dado por la ecuación (9).

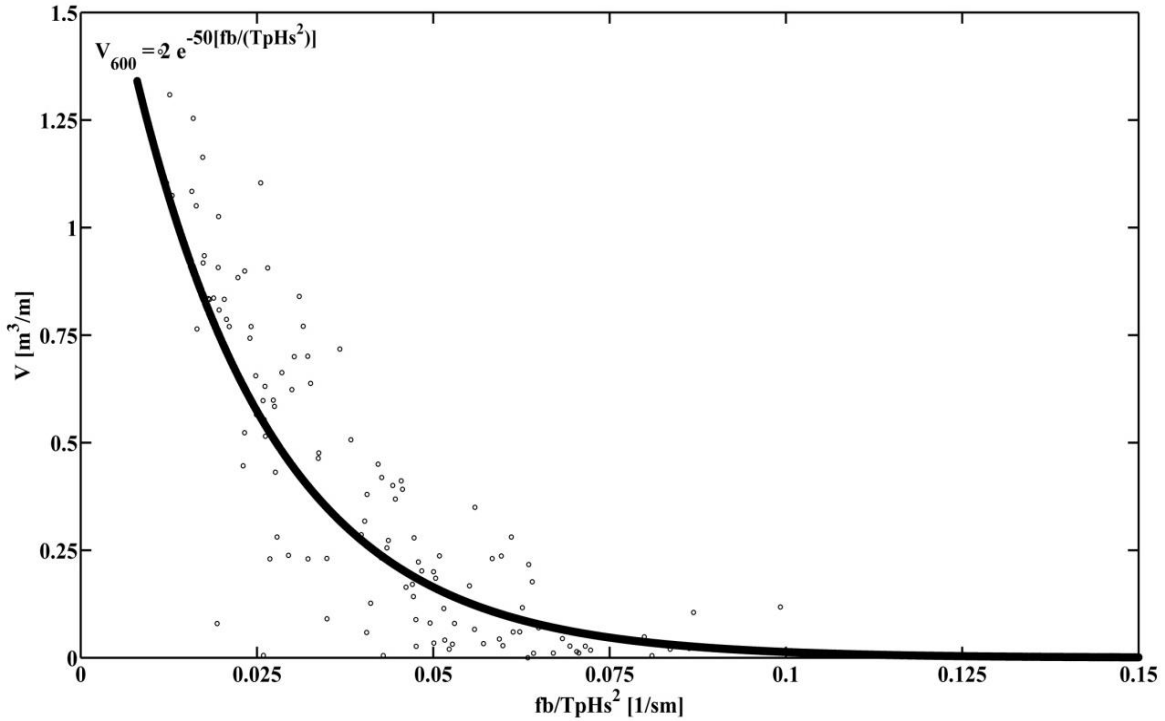


Figura 12. Parametrización del rebase a partir de los 600 casos simulados de forma numérica.

Por otro lado, para el caso de las fuerzas, se utiliza el modelo semianalítico propuesto por Goda (2000); de manera similar se utilizan los resultados del modelo numérico para obtener los parámetros que mejor se ajustan a los resultados numéricos. Los valores de los coeficientes del modelo para la estructura vertical estudiada están dados por:

$$\alpha_1 = 0.15 + 1.8 \left[\frac{7 \pi h/L}{\sinh(7 \pi h/L)} \right] \quad (10)$$

$$\alpha_2 = 0 \quad (11)$$

$$\alpha_3 = 0.9 / (\cosh(\frac{2.1\pi h}{L})) \quad (12)$$

En este caso en particular, la estructura de protección carece de una base de escollera, por tanto, la ecuación (11) tiene un valor nulo, mientras que α_1 y α_3 toman en cuenta la influencia del periodo del oleaje. Los valores de α_1 y α_3 obtenidos del ajuste de los datos se comparan con la formulación de Goda (2000) en la Figura 13a. La principal diferencia radica en el valor de α_1 , la cual permite mejorar la predicción de los valores extremos (Figura 13b) con relación a los resultados numéricos.

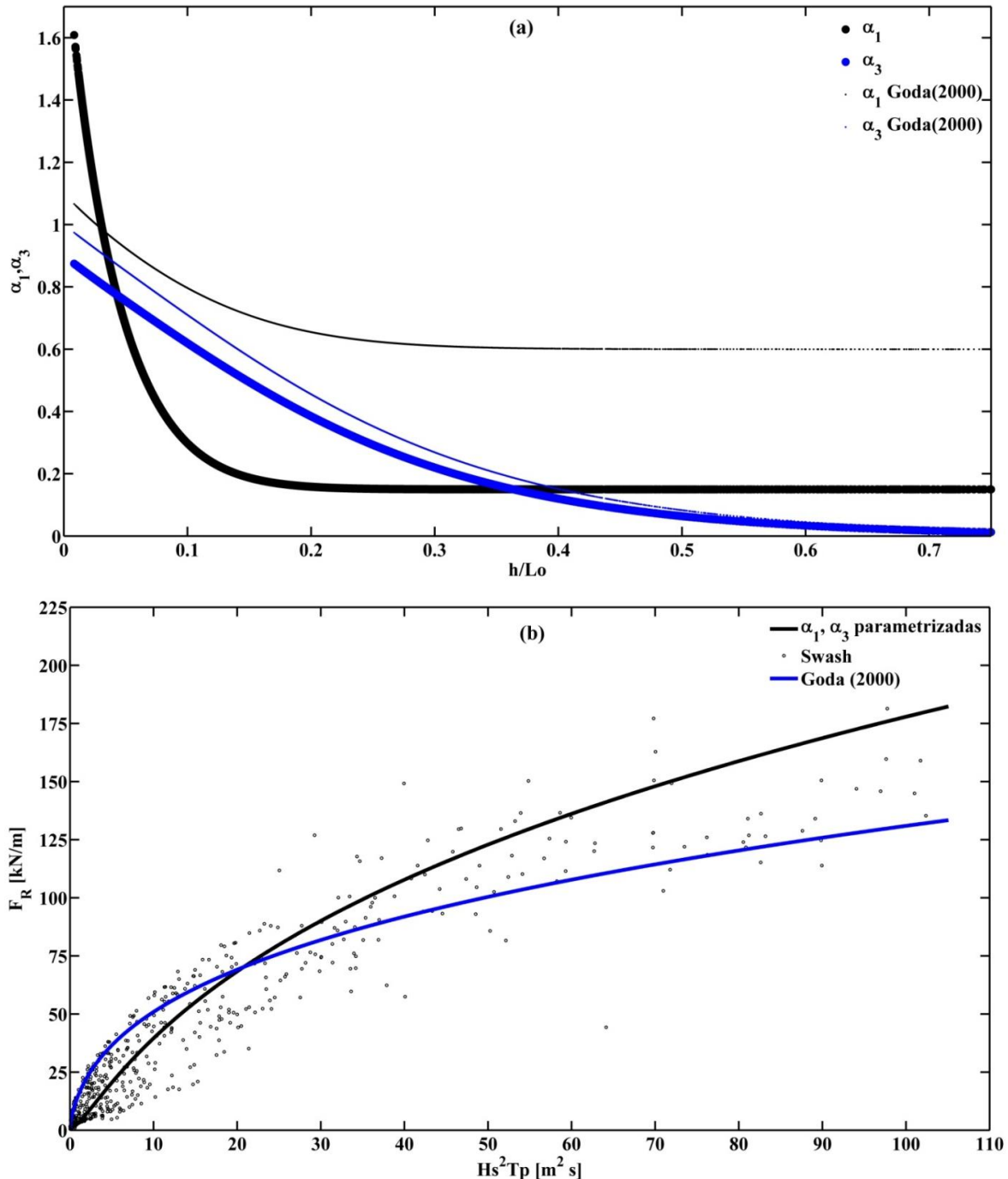


Figura 13. (a) Parametrización de los coeficientes en el método de Goda (2000), y (b) predicción de la fuerza resultante utilizando el método de Goda (2000) y su modificación con respecto a los resultados del modelado numérico (puntos).

Conclusiones

Este trabajo presentó una metodología para determinar la vida útil de una estructura costera, utilizando datos de reanálisis, modelos numéricos y técnicas estadísticas. Esta metodología es particularmente útil en regiones donde no existen registros históricos largos que permitan caracterizar el clima de oleaje. Para ilustrar la metodología se seleccionó una estructura vertical existente localizada en la costa de Campeche. Los resultados sugieren que desde el punto funcional su diseño presenta fallos por rebase para periodos de retorno de 17 años. Por otro lado, desde el punto de vista estructural permite resistir tormentas con periodos de retorno menores a tres años. Los resultados numéricos se usaron para calibrar modelos paramétricos y semianalíticos existentes. Estas expresiones simplificadas permiten estimar las fuerzas y rebase de manera rápida de los efectos combinados del oleaje y nivel del mar en la estructura costera.

Agradecimientos

Leonardo Palemón-Arcos agradece el apoyo del Programa para el Desarrollo Profesional Docente, a través de la Universidad Autónoma del Carmen. Alec Torres-Freyermuth y Gabriela Medellín agradecen el apoyo de Conacyt, a través de los programas Cátedras Conacyt (1146) y Laboratorios Nacionales Conacyt (LN27154). Christian M. Appendini agradece a la DGAPA por el apoyo a través del proyecto PAPIIT IA100418. Se agradece en especial a Gonzalo U. Martín Ruiz y José López González por brindar apoyo técnico para realizar este trabajo.

Referencias

Amante, C. (2009). *ETOPO1 1, Arc-minute global relief model: Procedures, data sources and analysis*. Recovered from <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>

Appendini, C. M., Torres-Freyermuth, A., Oropeza, F., Salles, P., López, J., & Mendoza, E. T. (2013). Wave modeling performance in the Gulf of Mexico and Western Caribbean: Wind reanalyses assessment. *Applied Ocean Research*, 39, 20-30.

Appendini, C. M., Torres-Freyermuth, A., Salles, P., Lopez-Gonzalez, J., & Mendoza, E.T. (2014). Wave climate and trends for the Gulf of Mexico: A 30 year wave hindcast. *Journal of Climate*, 27, 1619-1632. DOI:[dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00206.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00206.1)

Appendini, C. M., Hernández-Lasheras, J., Meza-Padilla, R., & Kurczyn, J. A. (2018). Effect of climate change on wind waves generated by anticyclonic cold front intrusions in the Gulf of Mexico. *Climate Dynamics*. DOI:<https://doi.org/10.1007/s00382-018-4108-4>

Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions. Part I: Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104(C4), 7649-7666.

Camus, P., Mendez, F. J., Medina, R., & Cofiño, A. S. (2010). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*. DOI:[10.1016/j.coastaleng.2011.02.003](https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.02.003)

Camus, P., Mendez, F. J., Medina, R., & Cofiño, A. S. (2011a). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*, 58(6), 453-578. Recovered from <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.02.003>

Camus, P., Mendez, F. J., & Medina, R. (2011b.) A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering*, 58(9), 851-862. Recovered from <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.007>

Cheng, Y., & Andersen, O.B. (2010). *Improvement in global ocean tide model in shallow water regions* (SV.1-68 45). Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark.

Cheung, M. S., & Kyle, B. R. (1996). Service life prediction of concrete structures by reliability analysis. *Construction and Building Materials*, 10(1), 45-55.

Chopra, A. K. (2011). *Dynamic of structures* (4th ed.). New Jersey, USA: Prentice Hall.

Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1991). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, Advanced Series on Ocean Engineering* (Vol. 2.). Singapore, Singapore: World Scientific.

- Del Jesus, M., Lara, J. L., & Losada, I. J. (2012). Three-dimensional interaction of waves and porous coastal structures. Part I: Numerical model formulation. *Coastal Engineering*, 64(0), 57-72. Recovered from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383912000245>
- Franke, R. (1982). Scattered data interpolation: Test of some methods. *Mathematics of Computation*, 38, 181-200.
- Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures. Advanced Series on Ocean Engineering* (2nd ed.). Yokohama, Japan: Yokohama National University, World Scientific.
- Guanche, R., Losada, I. J., & Lara, J. L. (2009). Numerical analysis of wave loads for coastal structure stability. *Coastal Engineering*, 56(5D6), 543-558
Recovered from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383908002159>
- Guanche, Y., Camus, P., Guanache, R., Mendez, F. J., & Medina, R. (2013). A simplified method to downscale wave dynamics on vertical breakwaters. *Coastal Engineering*, 71, 68-77.
- Hardy, R. L. (1990). Theory and applications of the multiquadric-biharmonic method. *Computers and Mathematics with Applications*, 19(8-9), 163-208.
- Higuera, P., Lara, J. L., & Losada, I. J., (2013). Simulating coastal engineering processes with openfoam. *Coastal Engineering*, 71(0), 119-134.
Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383912001093>
- Losada, I. J., Lara, J. L., Guanache, R., & González-Ondina, J. M. (2008). Numerical analysis of wave overtopping of high mound breakwaters. *Coastal Engineering*, 55, 47-62.
- Medellín, G., Brinkkemper, J. A., Torres-Freyermuth, A., Appendini, C. M., Mendoza, E. T., & Salles, P. (2016). Run-up parameterization and beach vulnerability assessment on a barrier island: A downscaling approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(1), 167.
- Palemón-Arcos, L., Torres-Freyermuth, A., Pedrozo-Acuña, A., & Salles, P. (2015). On the role of uncertainty for the study of wave-structure interaction. *Coastal Engineering*, 106, 32-41.
- Polinsky, A., Feinstein, R. D., Shi, S., & Kuki, A. (1996). Librain: Software for automated design of exploratory and targeted combinatorial libraries. In: Chaiken, I. M., & Janda, K. D. (eds.). *Molecular Diversity and Combinatorial Chemistry: Libraries and Drug Discovery* (pp. 219-232). Washington, DC, USA: American Chemical Society.
- Reguero, B. G., Menéndez, M., Méndez, F. J., Mínguez, R., & Losada, I. J. (2012). A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948

onwards. *Coastal Engineering*, 65, 38-55. Recovered from <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.03.003>

Rippa, S. (1999). An algorithm for selecting a good value for the parameter c in radial basis function interpolation. *Advances in Computational Mathematics*, 11, 193-210.

Snarey, M., Terrett, N. K., Willet, P., & Wilton, D. J., (1997). Comparison of algorithms for dissimilarity-based compound selection. *Journal of Molecular Graphics & Modelling*, 15, 372-385.

Sørensen, O. R., Kofoed-Hansen, H., Rugbjerg, M., & Sørensen, L.S., (2004). A third-generation spectral wave model using an unstructured finite volume technique. In: *Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering* (pp. 894-906), ASCE, New York, USA.

US Army Corps of Engineers, USACE. (2002). *Coastal Engineering Manual*. Tech. Rep. Washington, DC, USA: US Army Corps of Engineers.

Willet, P. (1996). Molecular diversity techniques for chemical databases. *Information Research*, 2(3). Recovered from <http://informationr.net/ir/2-3/paper19.html>

Zijlema, R. L., Stelling, G., & Smit, P. (2011). SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters, *Coastal Engineering*, 58(3), 992-1012.