

Repercusión de la degradación arrecifal en la disipación del oleaje

Impact of reef degradation on wave dissipation

CHÁVEZ-CÁRDENAS, Xavier*†, DELGADILLO-CALZADILLA, Miguel Ángel, GALVÁN-CHÁVEZ, Arturo y MORENO-MARTÍNEZ, Jatziri Yunuén

Universidad de Guanajuato Campus Celaya-Salvatierra, Av. Javier Barros Sierra 201 Col. Ejido de Santa María del Refugio C.P. 38140 Celaya, Gto. México

ID 1^{er} Autor: *Xavier, Chávez-Cárdenas* / ORC ID: 0000-0001-6691-4380, Researcher ID Thomson: F-3210-2018, CVU CONACYT ID: 269911

ID 1^{er} Coautor: *Miguel Ángel, Delgadillo-Calzadilla* / ORC ID: 0000-0003-3431-1942, Researcher ID Thomson: S-6919-2018, CVU CONACYT ID: 272236

ID 3^{er} Coautor: *Arturo, Galván-Chávez* / ORC ID: 0000-0002-3374-0481, Researcher ID Thomson: S-8432-2018, CVU CONACYT ID: 237706

ID 4^{to} Coautor: *Jatziri Yunuén, Moreno-Martínez* / ORC ID: 0000-0002-6798-2067, Researcher ID Thomson: S-8441-2018, CVU CONACYT ID: 237707

Recibido: 05 de Marzo, 2018; Aceptado 06 de Mayo, 2018

Resumen

Se evalúa el desempeño del arrecife Limones del Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos como estructura de protección costera ante el oleaje. El análisis se hace con base la comparación entre la amplitud incidente, la reflejada y la transmitida. Para obtener el mapa de amplitudes producto de la interacción oleaje-arrecife se recurrió al modelo numérico WAPO (WAVE Propagation On the coast) el cual es un modelo basado en la ecuación de la pendiente suave, capaz de simular los fenómenos de difracción, reflexión, refracción, someramiento y rotura. En cuanto a la forma del arrecife Limones, este se simuló para la condición actual y para una condición supuesta de degradación con la que su altura actual se reduce 0.50 m. La condición actual se tomó a partir de la batimetría de CONABIO del 2016. El oleaje transmitido bajo la condición actual del arrecife es menor al 50% del oleaje incidente en términos de amplitud, mientras que para la condición degradada el oleaje transmitido es del orden del 70%.

Arrecifes, Oleaje, Protección Costera

Abstract

The performance of the Limones reef of Puerto Morelos Reef National Park is evaluated as a coastal protection structure against the water waves. The analysis is made based on the comparison between the incident, reflected and transmitted amplitude. To obtain the map of amplitudes product of the water wave-reef interaction, the WAPO numerical model (WAVE Propagation On the coast) was used, which is a model based on the equation of the mild slope, capable of simulating the phenomena of diffraction, reflection, refraction, shoaling and breaking wave. Regarding the shape of the Limones reef, this was simulated for the current condition and for a supposed degradation condition with which its current height is reduced 0.50 m. The current condition was taken from the 2016 CONABIO bathymetry. The wave transmitted under the current condition of the reef is less than 50% of the incident wave in terms of amplitude, while for the degraded condition the wave transmitted is of the order of 70%.

Reefs, Water Waves, Shore Protection

Citación: CHÁVEZ-CÁRDENAS, Xavier, DELGADILLO-CALZADILLA, Miguel Ángel, GALVÁN-CHÁVEZ, Arturo y MORENO-MARTÍNEZ, Jatziri Yunuén. Repercusión de la degradación arrecifal en la disipación del oleaje. Revista de Simulación Computacional. 2018. 2-4: 19-26

* Correspondencia al Autor (Correo electrónico: x.chavez@ugto.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

La importancia de preservar los arrecifes tiene un beneficio ecológico que va más allá de la protección de la flora y fauna que se desarrollan en estos. Los arrecifes forman parte y son pieza clave del ecosistema costera y desde el punto de vista de la ingeniería marítima son estructuras de abrigo en términos del oleaje que arriba a la costa. Cualquier afectación negativa en los arrecifes por: contaminación, paso de huracán, cambio de temperatura (cambio climático), etc. se refleja en un deterioro estructural por enfermedad e incluso muerte del organismo (arrecife).

Justificación

Mantener inalterado el ecosistema arrecifal permite conservar el equilibrio dinámico del mismo, lo cual evita la presencia de erosión en las playas. La erosión ha sido tema de interés a nivel mundial y en México no es la excepción, sobre todo en la región turística de la Riviera Maya. En regiones particulares de dicha Riviera los problemas de erosión se complican por la presencia de arrecifes lo que aumenta la complejidad del ecosistema costero y demandan un estudio de la eficiencia de los arrecifes como estructuras de protección costera.

Problema

Como estructura disipativa del oleaje, un arrecife degradado se ve disminuido en dos aspectos principales: la rugosidad y la geometría (ancho y alto) como lo demuestra la Figura 1. El presente trabajo analiza, por medio de la modelación numérica, la eficiencia del arrecife Limones como disipador del oleaje. El arrecife en cuestión se ubica en el mar Caribe.

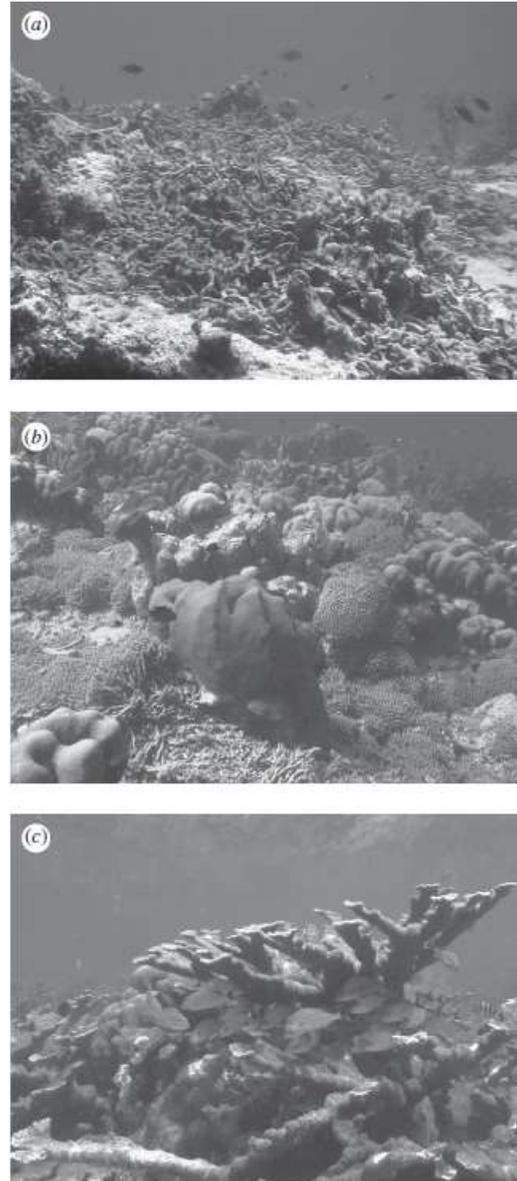


Figura 1 Ejemplo de tres diferentes índices de rugosidad de la complejidad arquitectónica sobre arrecifes del Caribe. Con valores de 1.2 (a), 1.5 (b) y 2.5 (c)
Fuente: (Alvarez-Filip, et al., 2009)

Hipótesis

La simulación numérica de la interacción oleaje-estructura en la vecindad de la costa nos permitirá evaluar la transformación que sufre el oleaje, y estimar la eficiencia de abrigo del arrecife al hacer una comparación directa entre el oleaje que incide en el arrecife y el que se transmite.

A pesar de que Alvarez-Filip, et al., 2009 mencionan que la degradación de los arrecifes coralinos no implica que exista una reducción del área, ya que la estructura y forma del arrecife perdura mucho tiempo después de que el arrecife ha muerto.

En el presente trabajo si se considerara una reducción del área debido a que el Caribe es una zona susceptible al paso de huracanes y la estructura arrecifal puede quebrarse sólo bajo condiciones de oleaje extremo, modificando su complejidad (aplanamiento) y por lo tanto disminuyendo el servicio de protección (Lugo-Fernández, et al., 1998).

Objetivos

Objetivo General

Simular la interacción del arrecife Limones con el oleaje bajo condiciones de clima marino normal.

Objetivos específicos

- Modelar numéricamente con el programa WAPO (WAVE Propagation On the coast) la propagación del oleaje.
- Simular el arrecife Limones en condiciones actuales y condición de degradación. Únicamente considerando la variación geométrica del arrecife.
- Evaluar la repercusión del arrecife Limones en el oleaje, mediante la transmisión permitida.

Marco Teórico

Dentro de los modelos matemáticos de propagación de oleaje más citados en la literatura se encuentran: la ecuación de Navier-Stokes, la ecuación de aguas someras, Espectral de onda, la ecuación de Boussinesq y la ecuación de la pendiente suave. El modelo matemático más preciso es el de la ecuación de Navier-Stokes (Lin, 2008), de gran utilidad en el modelado de la interacción oleaje-estructura, pero con el gran inconveniente de requerir un elevado tiempo de cálculo, condición que restringe su aplicación a dominios grandes con discretizaciones espacio-temporales muy pequeñas; lo que lo hace poco factible para la práctica ingenieril en costa.

Los modelos numéricos basados en las ecuaciones de Boussinesq y la ecuación de la pendiente suave (Mild Slope Equation, MSE) son los más adecuados, desde el punto de vista ingenieril, para la simulación de oleaje en zonas costeras. Ambos modelos están promediados en la vertical.

La MSE considera los efectos de refracción, someramiento, reflexión y difracción combinados. Fue derivada de la teoría de flujo potencial asumiendo oleaje lineal y fondo con pendiente suave, de ahí su nombre.

Desde su derivación (Berkhoff, 1972), la MSE ha demostrado ser un modelo muy flexible y ampliamente aceptado en la ingeniería costera para la simulación de la propagación del oleaje sobre una batimetría arbitraria en dominios costeros complejos. Puede modelar la propagación de un amplio espectro de ondas (cortas y largas). Ha sido exitosamente empleado bajo distintas circunstancias: propagación de onda en puertos, rodeando rompeolas (Pos & Kilner, 1987) y estructuras flotantes (Houston, 1981), en áreas costeras abiertas (Pearce & Panchang, 1985), en regiones con vegetación marítima (Dalrymple et al., 1984), alrededor de islas (Berkhoff, 1976; Houston, 1981; Jonsson et al., 1976; Kirby & Dalrymple, 1986; Tsay & Liu, 1983), (Panchang et al., 1991), etc. De 1991 a la fecha los trabajos se han incrementado significativamente, abordando temas como lo son: interacción de oleaje regular e irregular con rompeolas permeables sumergidos (Losada et al., 1996a,b), ondas inducidas por movimiento de barcos dentro de los puertos (Ohyama & Tsuchida, 1997), transformación de onda por estructuras disipadoras (Silva et al., 2006a,b), efecto del oleaje en convertidores de energía undimotriz (Beels et al., 2010a,b), etc.

WAPO

En forma general el WAPO (Silva et al., 2003 y Silva et al., 2005). es un modelo numérico basado en la ecuación modificada de la pendiente suave (Modified Mild-Slope Equation, MMSE) que a su vez contempla una mejorada relación de la dispersión.

Disipación de energía tanto por rotura como por fricción de fondo y hace uso de la aproximación parabólica de 2.º orden como condición de frontera lateral. Mientras que, en lo numérico, para resolver el problema de valor en la frontera originado por la forma elíptica de la MMSE, el modelo emplea el método de diferencias finitas y resuelve el sistema de ecuaciones mediante un modificado método de la eliminación Gaussiana con pivoteo parcial propuesto por Maa et al. (1997).

La implementación se realiza en lenguaje Fortran, codificando un programa flexible y robusto cuyos únicos requisitos para la ejecución son un sencillo fichero de entrada y la batimetría en formato ascii (grd).

Zona de estudio

El arrecife bajo estudio se localiza en el Caribe e integra, de acuerdo con Jordán-Dahlgren y Rodríguez-Martínez, 2003, una de las 7 áreas marinas protegidas, el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM).

El PNAPM, se ubica en la Costa Caribe del municipio de Benito Juárez, frente al poblado de Puerto Morelos en el estado de Quintana Roo, con una superficie total de 9,066-63-11 hectáreas. Sus coordenadas geográficas extremas son: 21°00'00" y 20°48'33" latitud norte y 86°53'14.40" y 86°46'38.94" longitud oeste (Figura 2).

Respecto al oleaje de la zona, el Programa de Manejo Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, 2000 señala que durante la mayor parte del año los arrecifes del parque nacional están expuestos a olas generadas por los vientos alisios. Durante la época de nortes el conjunto de vientos N-NO y SE genera un oleaje considerable de dirección contrastante.



Figura 2 Ubicación del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos
Fuente: (Programa de Manejo Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, 2000)

El arrecife Limones es la primera unidad arrecifal en un orden norte-sur dentro del PNAPM y se ubica entre las cotas de 5 y 10 metros de profundidad, ver Figura 3.

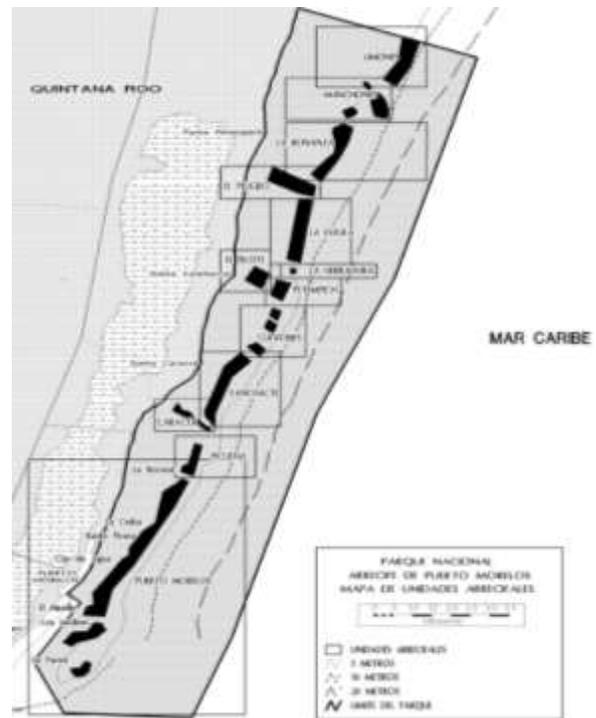


Figura 3 Unidades arrecifales
Fuente: (Programa de Manejo Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, 2000)

El relieve del fondo marino que nos permite ubicar de forma precisa el arrecife Limones y su forma se obtuvo de la base de datos de CONABIO de 2016 (Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad) (Figura 4).

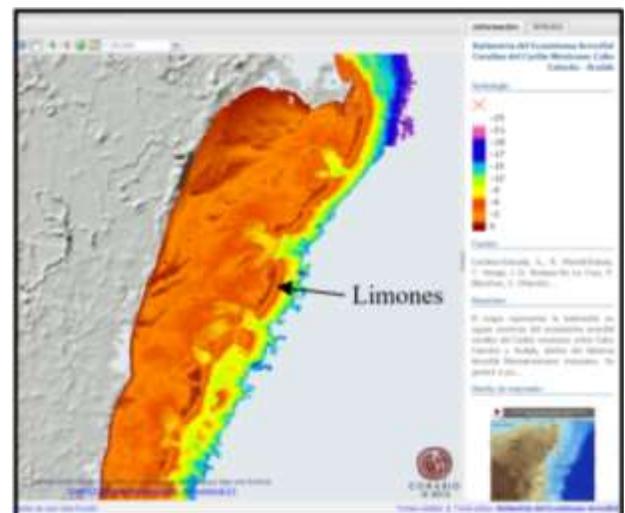


Figura 4 Batimetría del Ecosistema Arrecifal Coralino del Caribe Mexicano

Simulaciones

Las simulaciones de la interacción oleaje-arrecife se ejecutaron con ayuda del modelo numérico WAPO. El dominio se determinó de manera que nos permitió analizar completamente el arrecife y un área de afectación vecina debido a la interacción.

La Figura 5 ejemplifica la localización del dominio que contiene al arrecife Limones en una imagen satelital.



Figura 5 Imagen satelital de Google Earth con el dominio de simulación

Se tomó la forma del arrecife limones que la batimetría de CONABIO arrojó como la condición actual, y se propuso una condición de degradación (aplastamiento) de 50 cm de la cresta arrecifal para simular condición actual y degradada del arrecife, respectivamente.

Condiciones iniciales

Los datos de oleaje y viento han sido proporcionados por el Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Los datos son el resultado de un reanálisis realizado desde 1949 hasta el año 2009. Como resultado del análisis se estimó la condición normal del oleaje en aguas profundas con las siguientes características: Altura de ola (H) de 1.1 m, amplitud (a) de 0.55 m, periodo (T) de 6.6 s y dirección de propagación (θ) de 67.5° NE (convención náutica)

Condiciones de frontera de fondo

La condición de frontera de fondo está indicada por la batimetría del dominio (elevación z). Para el estudio se tiene dos: Condición actual (Figura 6) y condición del arrecife degradado, con la cresta reducida 0.5 m.

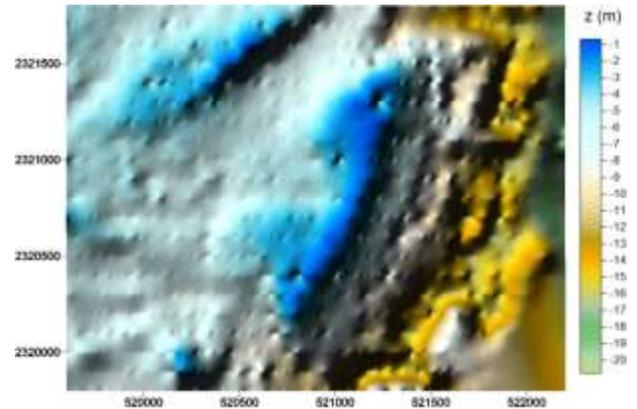


Figura 6 Batimetría del dominio de simulación, condición actual

Para la condición actual la profundidad mínima es de -0.683 m, mientras que para el arrecife degradado la profundidad mínima se estableció en -1.183 m.

Resultados

Para la condición actual la Figura 7 muestra el patrón de superficie libre, el cual nos indica claramente la transformación que el oleaje sufre al incidir con el arrecife, los fenómenos más evidentes son la difracción, reflexión y rotura, debido a este último es que se disipa la mayor cantidad de energía del oleaje reduciéndose la amplitud del oleaje transmitido en comparación con el incidente, como se aprecia en la Figura 8 con el mapa de amplitudes.

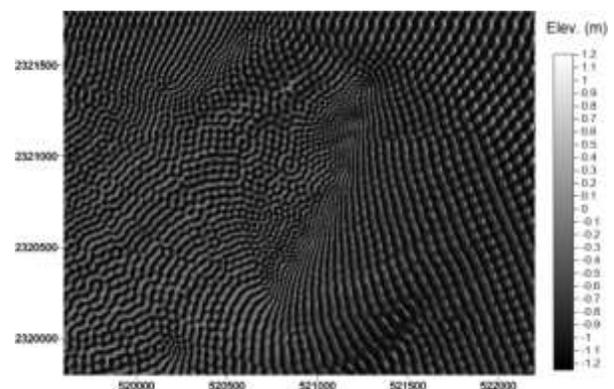


Figura 7 Mapa de superficie libre para la condición actual.

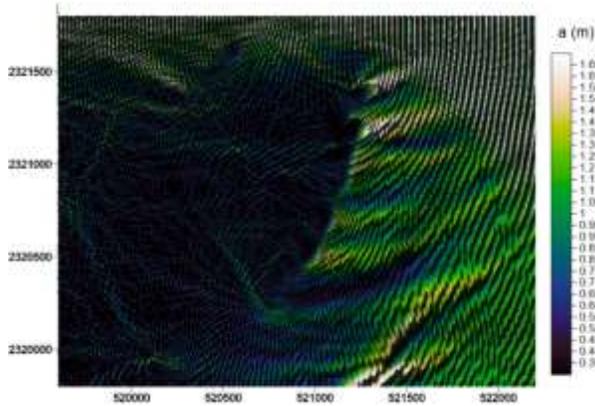


Figura 8 Mapa de amplitudes para la condición actual.

Los resultados análogos a las Figuras 7 y 8 se presentan en las Figuras 9 y 10 para la condición del arrecife degradado, con una altura reducida 0.5 m.

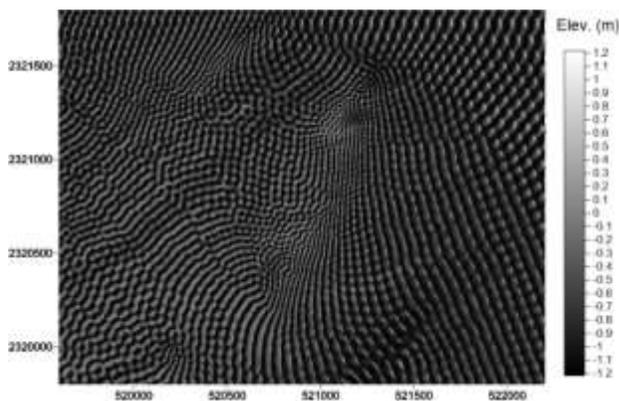


Figura 9 Mapa de superficie libre para la condición de arrecife degradado.

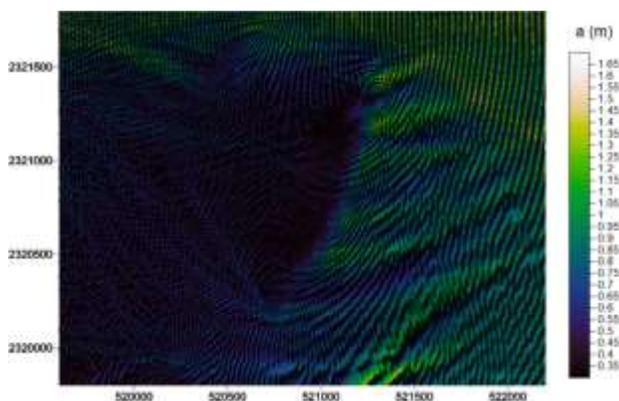


Figura 10 Mapa de amplitudes para la condición de arrecife degradado.

Después de realizar un análisis numérico. La amplitud del oleaje incidente de 0.55 m por efecto de la reflexión llegó a incrementarse hasta un valor máximo de 2.6 m para la condición actual del arrecife, mientras que para la condición del arrecife degradado solo alcanzó 1.7 m.

La comparación entre las Figuras 8 y 10 se aprecia como del lado derecho del arrecife, donde el oleaje incide, el mapa muestra amplitudes mayores para la condición actual. Este comportamiento se esperaba debido a la mayor área de obstáculo que representa el arrecife en condiciones actuales.

Al analizar el área izquierda del arrecife, zona del oleaje transmitido, con base en promedios obtenidos se tiene que para la condición actual la amplitud promedio transmitida es de 0.22 y para la condición degradada es de 0.39, con dichos valores el porcentaje de oleaje transmitido en la condición actual es del 40% $[(0.22/0.55)100]$ y para la condición degradada es del 70.9% $[(0.39/0.55)100]$.

Conclusiones

La importancia de los arrecifes como estructuras de disipación del oleaje queda de manifiesto, por lo que es necesario preservar estos organismos.

El análisis se debe mejorar incluyendo la disipación por fricción y calibrando el modelo para la relación de la rotura de la ola.

Se deben evaluar condiciones extremas que nos generen alturas de ola mayores y ángulos de incidencia distintos.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad de Guanajuato.

Referencias

Alvarez-Filip, L., N. K. Dulvy, J. A. Gill, I. M. Côté y A. R. Watkinson (2009). "Flattening of Caribbean coral reefs: region-wide declines in architectural complexity". *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 276(1669), 3019-3025.

Beels, C., Troch, P., De Backer, G., Vantorre, M. & De Rouck, J., (2010a). "Numerical implementation and sensitivity analysis of a wave energy converter in time-dependent mildslope equation model," *Coast. Eng.* 57(5),471-492.

- Beels, C., Troch, P., De Visch, K., Kofoed, J. P. & De Backer, G., (2010b). "Application of the time-dependent mild-slope equations for the simulation of wake effects in the lee of farm of Wave Dragon wave energy converters," *Renewable Energy* 35(8),1644-1661.
- Berkhoff, J. C. W., (1972). "Computation of combined refraction-diffraction," in Proc. 13th Int. Conf. Coastal Engineering (ASCE, Vancouver, Canada), Chapter 24, 471-490.
- Dalrymple, R. A., Kirby, J. T. & Hwang, P. A., (1984). "Wave diffraction due to areas of high energy dissipation," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 110(1), 67-79.
- Houston, J. R., (1981). "Combined refraction and diffraction of short waves using the finite element method," *Applied Ocean Research* 3(4), 163-170.
- Jonsson, I. G., Skovgaard, O. & Brink-Kjaer, O. (1976). "Diffraction and refraction calculations for waves incident on an island," *J. Marine Research* 34(3), 469-496.
- Jordán-Dahlgren, Eric, y Rodríguez-Martínez, Rosa Elisa, (2003). "The Atlantic Coral Reef of Mexico". *Latin America Coral Reefs*, ISBN:978-0-444-51388-5, 151-158.
- Kirby, J. T. & Dalrymple, R. A., (1986). "Modeling waves in surfzones and around islands," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 112(1), 78-93.
- Lin, P., (2008). *Numerical Modeling of Water Waves*, Taylor Francis Routledge, ISBN 9780415415781.
- Losada, I. J., Silva, R. & Losada, M. A., (1996a). "3-D non-breaking regular wave interaction with submerged breakwaters," *Coast. Eng.* 28(1-4),229-248.
- Losada, I. J., Silva, R. & Losada, M. A., (1996b). "Interaction of non-breaking directional random waves with submerged breakwaters," *Coast. Eng.* 28(1-4),249-268.
- Lugo-Fernández, A., H. H. Roberts y J. N. Suhayda (1998). "Wave transformations across a Caribbean fringing-barrier coral reef." *Continental Shelf Research* 18(10), 1099-1124.
- Ohyama, T. & Tsuchida, M., (1997). "Expanded mild-slope equations for the analysis of wave-induced ship motion in a harbour," *Coast. Eng.* 30(1-2), 77-103.
- Panchang, V. G. A., Pearce, B. R., Wei, G. & Cushman-Roisin, B., (1991). "Solution of the Mild-Slope wave problem by iteration," *Applied Ocean Research* 13(4), 187-199.
- Pearce, B. R. & Panchang, V. G. A., (1985). "A method for the investigation of steady state wave spectra in bays," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 111(4), 629-644.
- Pos, J. D. & Kilner, F. A., (1987). "Breakwater gap wave diffraction: An experimental and numerical study," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 113(1), 1-21.
- Programa de Manejo Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos, (2000). Instituto Nacional de Ecología SEMARNAP. México. 1era Edición.
- Silva, R., Borthwick, A. G. L. & Taylor, R. E., (2005). "Numerical implementation of the harmonic modified mild-slope equation," *Coast. Eng.* 52(5), 391-407.
- Silva, R., Salles, P. & Govaere, G., (2003). "Extended solution for waves travelling over a rapidly changing porous bottom," *Ocean Engineering* 30(4), 437-452.
- Silva, R., Mendoza, E. & Losada, M. A., (2006a). "Modelling linear wave transformation induced by dissipative structures - Regular waves," *Ocean Engineering* 33(16), 2150-2173.
- Silva, R., Losada, M. A. & Salles, P., (2006b). "Modelling linear wave transformation induced by dissipative structures - Random waves," *Ocean Engineering* 33(16), 2174-2194.
- Tsay, T.-K. & Liu, P. L.-F., (1983). "A finite element model for wave refraction and diffraction," *Applied Ocean Research* 5(1), 30-37.