2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

DOI: 10.24850/j-tyca-2019-03-03

Artículos

Aplicabilidad del modelo SWASH para la propagación y el rebase del oleaje en muro vertical

Applicability of SWASH model for wave transformation and wave overtopping on vertical seawall

Luis Córdova[1]

Ronnie Torres[2]

Mariano Buccino[3]

[1]Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría". La Habana, Cuba, cordova@tesla.cujae.edu.cu

[2]Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría". La Habana, Cuba, ronnie@cih.cujae.edu.cu

[3]Universidad de Nápoles "Federico II". Nápoles, Italia, buccino@unina.it

Autor para correspondencia: Luis Córdova, cordova@tesla.cujae.edu.cu

Resumen

En este trabajo se verifica la capacidad del modelo numérico SWASH de reproducir los fenómenos de transformación del oleaje y del rebase del oleaje sobre una estructura vertical. Este es un modelo de tipo oleaje – flujo, de nueva generación, basado en las ecuaciones no lineales de aguas someras y considerando presiones no hidrostáticas. Los resultados alcanzados con las simulaciones numéricas son comparados con una serie de datos obtenidos mediante la modelación física durante estudios previos realizados para la obtención de soluciones de defensa de costa en la zona del malecón de La Habana, Cuba. Se obtuvieron resultados con alta correlación. Para el caso del rebase ambas fuentes fueron comparadas, además, con las fórmulas empíricas para muros verticales. Se constata que el modelo SWASH es capaz de simular confiablemente los fenómenos de propagación y rebase del oleaje.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Palabras clave: propagación del oleaje, rebase, modelación numérica, muro vertical.

Abstract

In this work the capability of numerical model SWASH to reproduce wave transformation and wave overtopping at vertical seawall phenomena is verified. This is a new generation wave-flux model based on the non-linear shallow water equations with non-hydrostatic pressure. The results from numerical simulations are compared with a dataset obtained from physical modeling during previous studies made to obtain coastal defense solutions in the Havana's seawall zone, Cuba. Results with a high correlation was obtain. For wave overtopping case numerical model and physical model was compared with empirical expressions for vertical seawall. The ability to simulated wave propagation and wave overtopping of model SWASH was proving.

Keywords: wave propagation, overtopping, mathematical modeling, Havana's seawall.

Recibido: 16/03/2017

Aceptado: 05/11/2018

Introducción

El incremento potencial del nivel del mar debido a la influencia de ciclones tropicales y el efecto en las costas protegidas por estructuras, son algunos de los principales aspectos a los que se les presta especial interés por parte de investigadores y decisores. En las investigaciones que se llevan a cabo, se aprecia el esfuerzo por obtener una estimación cada vez más precisa de la propagación y el rebase del oleaje, mediante la modelación numérica.

Estudios para la determinación del rebase se han apoyado en modelos que se basaban en las ecuaciones no lineales de aguas someras (NLSW, según sus siglas en inglés), por ejemplo, Tuan y Oumeraci (2010), con condiciones de oleaje limitadas a oleaje

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

monocromático. En estos, aunque los resultados han sido razonables, existen limitaciones debido a la suposición de considerar la presión hidrostática. Por su parte, el modelo SWASH erradica esta dificultad y ofrece resultados muy sólidos. Así lo ha confirmado Suzuki et al (2011) con la comparación con pruebas de modelos físicos.

Teniendo en cuenta que el litoral habanero protege de las inclemencias del mar a un área densamente poblada y con alto valor histórico, mediante un muro vertical costero, se ha convertido en un punto de interés para la investigación científica. Cabe destacar que, desde la construcción de esta obra, a principios del siglo pasado, han ocurrido importantes inundaciones causadas por disimiles eventos meteorológicos que frecuentemente azotan la isla. Además, por su importancia social, se considera como una de las prioridades dentro de los programas nacionales de adaptación al cambio climático.

Considerando que la modelación numérica debe contribuir a la realización de estudios futuros para prevenir inundaciones en este lugar, este trabajo tiene como objetivo explorar la aplicabilidad del modelo SWASH, teniendo en cuenta que, a partir de sus potencialidades matemáticas, este puede reproducir y predecir los fenómenos de propagación y de rebase del oleaje y, por tanto, resulta de gran utilidad para estudios de ingeniería. La validación del mismo se efectúa mediante la comparación con resultados previos de laboratorio obtenidos mediante la modelación física.

Modelo numérico

El modelo SWASH es un modelo de dominio en el tiempo para simular flujo en forma no hidrostática, con superficie libre y rotacional, Zijlema et al (2011). Las ecuaciones gobernantes son las conocidas como de aguas poco profundas incluyendo un término de presión no hidrostática. Estas, en una dimensión y promediadas en la profundidad en forma no conservativa se expresan de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + g\frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{2}\frac{\partial q_b}{\partial x} + \frac{1}{2}\frac{q_b}{h}\frac{\partial(\zeta - d)}{\partial x} + c_f\frac{u|u|}{h} = \frac{1}{h}\frac{\partial\left(h\nu_t\frac{\partial u}{\partial x}\right)}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial w_s}{\partial t} = \frac{2q_b}{h} - \frac{\partial w_b}{\partial t} \quad (3)$$

$$w_s = -u\frac{\partial d}{\partial x} \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{w_s - w_b}{h} = 0 \quad (5)$$

Donde t es el tiempo, x la coordenada horizontal, u la velocidad promediada en la profundidad en la dirección x, ws y wb las velocidades en la dirección z en la superficie y el fondo, respectivamente, ζ es la elevación de la superficie libre desde el nivel de aguas tranquilas, d es la profundidad de aguas tranquilas y h la profundidad total. qb es la presión no hidrostática en el fondo, g es la aceleración de la gravedad, cf el coeficiente adimensional de fricción de fondo y vt la viscosidad de remolino.

Una descripción completa sobre el modelo numérico, las condiciones de contorno y esquemas numéricos se puede encontrar en Zijlema et al (2011).

Establecimiento del modelo físico

Se toma un perfil característico de la zona de estudio del malecón de La Habana donde se realizaron estudios sobre la efectividad de diversas tipologías de obras costeras, Córdova et al (2016).

Fase experimental de la modelación física

Tecnología y ciencias del agua, 10 (3), 47-69. DOI: 10.24850/j-tyca-2019-03-03

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Para el desarrollo de la modelación física de las diferentes tipologías de protección costera propuesta para dar solución al problema de las inundaciones en el malecón de La Habana se realizaron unas series de ensayos en dos instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Costera de la Universidad "Federico II" de Nápoles, en Italia, Córdova et al (2016). De los mismos, se seleccionaron dos para llevar a cabo este estudio.

La primera es un canal de oleaje, en donde se desarrolló un modelo a escala 1:66 (ver Ilustración 1 izquierda) para poder observar el comportamiento del oleaje irregular en su propagación hacia la costa. La otra fue el tanque de oleaje irregular de Departamento de Ingeniería Civil, Arquitectura y Medio ambiente, DICEA, para el estudio del rebase sobre un muro vertical, que se realizó a escala 1:30 (ver Ilustración 1 derecha).

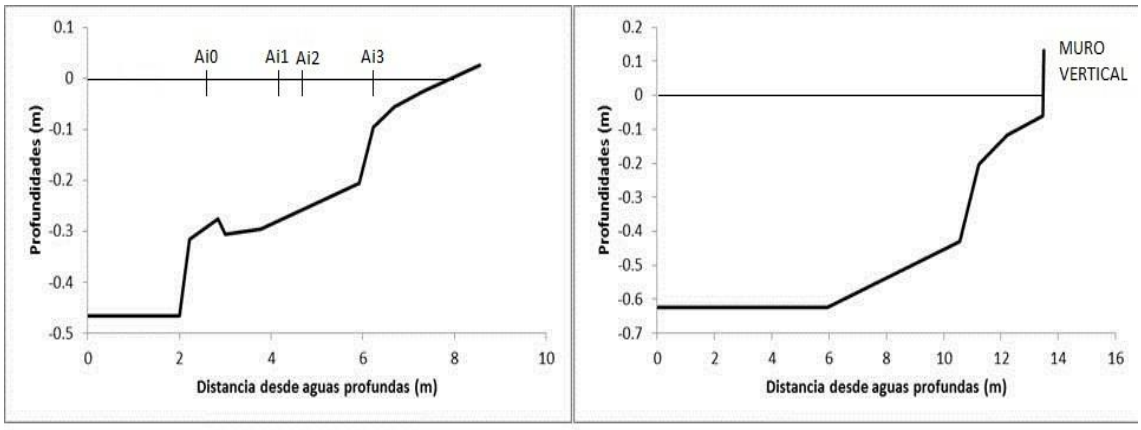

Figura 1. Perfiles empleados en la modelación física. A la izquierda en escala 1:66. A la derecha en escala 1:30.

El canal tiene 23 m de largo, 0.5 m de ancho y 0.75 m de profundidad, está dotado de un generador de pistón capaz de reproducir ondas solitarias, regulares e irregulares. Fueron colocados varios sensores a lo largo del perfil para establecer el comportamiento de la ola, ver Ilustración 1 izquierda.

El tanque del DICEA presenta 32 m de largo, 18 m de ancho y 1.2 m de profundidad, y está dotado de un generador de olas de múltiples elementos que incluyen 16 pistones eléctricos con un máximo de desplazamiento de 0.30 m de olas con un frente total de 12 m. Dentro de este se construyó un canal de 1.56 m de ancho por 18.37 m de largo, en donde se efectuaron las modelaciones con vista a

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

determinar el rebase. En esta ocasión se ubicaron sensores solo en la posición correspondiente al muro.

Se llevaron a cabo 8 pruebas en el canal y 16 pruebas en el tanque de oleaje. Para las primeras se definieron cuatro valores de altura significativas de ola (4, 6, 8 y 10 m), dos periodos picos de la ola (12 y 10 s) como valores representativos de los eventos que han acontecido en la zona de estudio y se consideró una elevación del nivel del mar de 2.28 m, que corresponden a los máximos valores de surgencia que se reportan por el Instituto de Meteorología de Cuba, Pérez et al. (2015). Las pruebas realizadas en el tanque de oleaje consideran, además de todo lo anterior, una elevación del nivel del mar de 1.73 m.

Modelo físico a escala 1:66

Los sensores colocados en diferentes posiciones a lo largo del perfil característico indicaron las características del oleaje y cuando este es afectado por los fenómenos de asomeramiento, fricción de fondo y rotura de la ola. El perfil que se reprodujo en el canal se extiende desde una profundidad de -30.00 m en prototipo por debajo del nivel medio del mar hasta una profundidad de -1.70 m al pie del muro.

Las mediciones se realizaron utilizando 4 sensores de nivel. El análisis se realiza para la banda de frecuencias incluida entre la mitad y el doble de la frecuencia pico. Estos se denominaron Ai0, Ai1, Ai2 y Ai3 y fueron distribuidos a lo largo del perfil para monitorear la propagación del oleaje, a 2.55 m; 3.99 m; 4.49 m y 6.09 m; respectivamente, a partir del origen del modelo, ver ilustración 1.

Para desarrollar los ensayos se tomó como oleaje de referencia valores obtenidos con el modelo de propagación de oleaje SWAN a profundidades de -30.00 m, -20.00 m y -10.00 m, una vez realizado la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta dichas profundidades, Córdova et al. (2013).

Los parámetros del oleaje seleccionados para establecer los valores en el generador de olas en la condición de frontera mar afuera, corresponden a la profundidad de -30.00 m en prototipo respecto al nivel medio del mar, ver Tabla 1. En este, Ho representa la altura de ola en aguas profundas, H30 es la altura de la ola a 30 m de

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

profundidad, Tp es el periodo pico en aguas profundas y Tp30 es el periodo de la ola para la profundidad de 30 m.

Tabla 1. Características del oleaje a 30 m de profundidad

Núm. prueba	Ho(m)	Tp(s)	H30(m)	Tp30(s)
1	4.00	12	3.135	11.88
2	6.00	12	4.679	11.88
3	8.00	12	6.171	11.88
4	10.00	12	7.56	11.88
5	4.00	10	3.168	9.75
6	6.00	10	4.639	9.75
7	8.00	10	5.907	9.75
8	10.00	10	6.976	9.75

Una vez establecidas las condiciones para operar el modelo se realizaron las pruebas de propagación del oleaje. El comportamiento de este para las pruebas de la 1 a la 4 se muestran en el Tabla 2, así como de las pruebas de la 5 a la 8 en la 3.

Tabla 2. Altura de ola significativa y período pico medidos en los sensores para Tp = 12s y nivel del agua 2.28m. Datos en prototipo.

Ref (m)	Ai0		Ai1		Ai2		Ai3	
	Hs(m)	Tp (s)	Hs(m)	Tp (s)	Hs(m)	Tp (s)	Hs(m)	Tp (s)
4	2.80	11.62	2.66	11.62	2.86	11.62	2.53	11.62
6	4.93	12.20	5.20	12.20	5.24	12.20	5.23	12.20
8	5.74	12.20	5.39	11.62	5.72	11.62	5.06	11.62
10	7.06	12.52	6.51	11.63	6.84	11.63	6.06	12.52

Tabla 3. Altura de ola significativa y período pico medidos en los sensores para Tp = 10s y nivel del agua 2.28m. Datos en prototipo.

Ref (m)	Ai0		Ai1		Ai2		Ai3	
	Hs(m)	Tp (s)	Hs(m)	Tp (s)	Hs(m)	Tp (s)	Hs(m)	Tp (s)
4	2.80	9.76	2.72	10.17	2.90	10.17	2.72	9.42
6	4.07	9.76	3.91	10.17	4.14	10.17	3.80	9.76
8	5.14	10.16	4.91	10.16	5.21	10.16	4.70	10.16
10	6.74	10.17	6.29	10.17	6.67	10.17	5.97	9.76

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Existe una reducción de la altura de ola, que se manifiesta en el sensor Ai0, debido a la reflexión que se produce en la barra. En el sensor Ai1 se observan valores menores que el sensor Ai0 esto es posible debido al asomeramiento, y también a la reflexión en sentido inverso debido a que en el perfil hay un aumento abrupto de profundidad después de la barra. En el sensor Ai2 la ola incrementa su altura ligeramente debido al asomeramiento. En el sensor Ai3 la altura de ola se reduce. En el laboratorio se observó que las olas rompieron después del último sensor, más cercano al punto donde se ubica el muro del malecón, 7.32 m del origen en el modelo.

Modelo físico a escala 1:30

Después de haber conducido los ensayos a escala 1:66 en el canal, para definir la condición de frontera en el mar, que permitiría realizar los ensayos a la escala 1:30, se desarrolló el proceso de construcción del modelo y la calibración del oleaje. En esta ocasión, además de las pruebas ya mencionadas, se agregaron ocho mas, donde se varía la sobreelevación del mar de 2.28 a 1.73 m. En el tanque de oleaje aleatorio *RAndom wave TAnk* (RATA) del laboratorio antes mencionado se construyó un canal de 1.56 m de ancho por 18.37 m de largo.

Para medir la descarga media del rebase se colocó un depósito con capacidad de 1 m^3 justo detrás del muro. El agua que sobrepasa la estructura fue colectada en este depósito y devuelta hacia la zona del tanque de olas no ocupada por el canal mediante dos bombas sumergibles de 800 l/min. El agua bombeada pasa a través de un fluxómetro electromagnético (ilustración 2), donde el volumen de fluido fue progresivamente calculado, Córdova et al (2015).

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

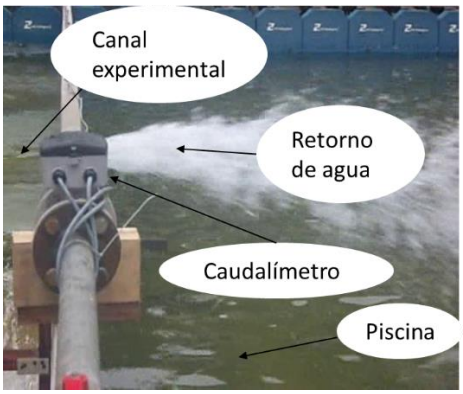

Figura 2. Vista del fluxómetro electromagnético.

El volumen de agua en el depósito al inicio (Vi) y al final (Vf) de cada prueba fue controlado por un sensor de oleaje suplementario localizado en el tanque colector y muestreada a 25 Hz. Por eso, la tasa de rebase se obtiene finalmente como:

$$q = \frac{V_{bombeado} + V_F - V_I}{D_t} \quad (6)$$

Posteriormente, fueron determinadas las condiciones de oleaje a la profundidad de 18.72 m en prototipo, la cual corresponde con la máxima profundidad para esta fase del estudio, que es equivalente a la posición de las paletas generadoras de oleaje en el modelo físico. En este, las condiciones de oleaje surgen de combinar las cuatro nuevas alturas de ola (2.7, 4.0, 5.4 y 6.5 m), los dos periodos (12 y 10 s) y los dos niveles del mar (2.28 y 1.73). Los valores para las profundidades de agua (h) referidas al comienzo de la batimetría incorporan la elevación del nivel del mar según el caso, por ejemplo, 21 m se obtiene de sumar 18.72 m + 2.28 m, y 20.45 m de 18.72 m + 1.73 m.

Después de realizar el proceso de calibración se llevó a cabo la medición de la altura de ola al pie de la posición que ocuparía el muro, sin la presencia de la estructura para evitar los efectos del fenómeno de reflexión. El objetivo de esta medición es disponer de información para correlacionar el rebase con la altura de ola frente a la estructura. En la Tabla 4 se presenta los resultados. En este Hm0 es la altura significativa de la ola en la posición del muro y Tp el periodo pico.

Tabla 4. Características del oleaje al pie de la posición de la estructura.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Pruebas	Hm0 (m)	Tp (s)
1	2.51	12.16
2	2.99	12.16
3	3.24	11.50
4	3.55	12.16
5	2.44	10.46
6	2.75	10.46
7	3.04	10.46
8	3.26	10.46
9	1.82	11.50
10	2.09	12.16
11	2.32	12.87
12	2.63	12.87
13	1.65	9.97
14	1.80	10.46
15	2.11	10.46
16	2.28	10.46

Establecimiento del modelo SWASH

Para el análisis en 1D de la altura de la ola, la malla de cómputo relacionada con el perfil característico (ilustración 1 izquierda) es de una longitud de 8.55 m. La misma fue dividida en 855 segmentos, dígase con una discretización de 1cm. Esta precisión fue establecida para reproducir los cambios de pendientes presentes en el modelo físico. Llevando estos a prototipo serían 564.3 m y los segmentos tendrían 0.66 m de longitud. Para el caso del rebase, la malla de cómputo tuvo una longitud de 17.69 m (ilustración 1 derecha), dividida en 1768 segmentos, cada uno de 1 cm de longitud. En prototipo estas longitudes equivalen a 530.7 m y 0.30 m, respectivamente.

Para ambos casos se estableció una capa vertical, la fricción de fondo se tuvo en cuenta mediante la expresión de Manning con un coeficiente de fricción de 0.02; como recomienda el manual según Zijlema et al 2011; los parámetros asociados a la rotura del oleaje se

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

mantuvieron inalterables, y las presiones fueron calculadas de forma no hidrostática. El paso de tiempo empleado fue de 0.01 s, con lo cual se garantiza estabilidad numérica.

Debido a que tanto la propagación del oleaje como el rebase se realizaron en modelos físicos diferentes, los valores utilizados en cada caso de entrada en la paleta son distintos. Para el primero se dispuso de una altura significativa y un periodo pico, que describen un espectro de oleaje tipo JONSWAP con factor de apuntamiento espectral 3.3 en la paleta, y para el segundo se dispuso de una señal de entrada con duración de 5.5 min, tal y como se realizó en los experimentos del modelo físico, ver ilustración 3.

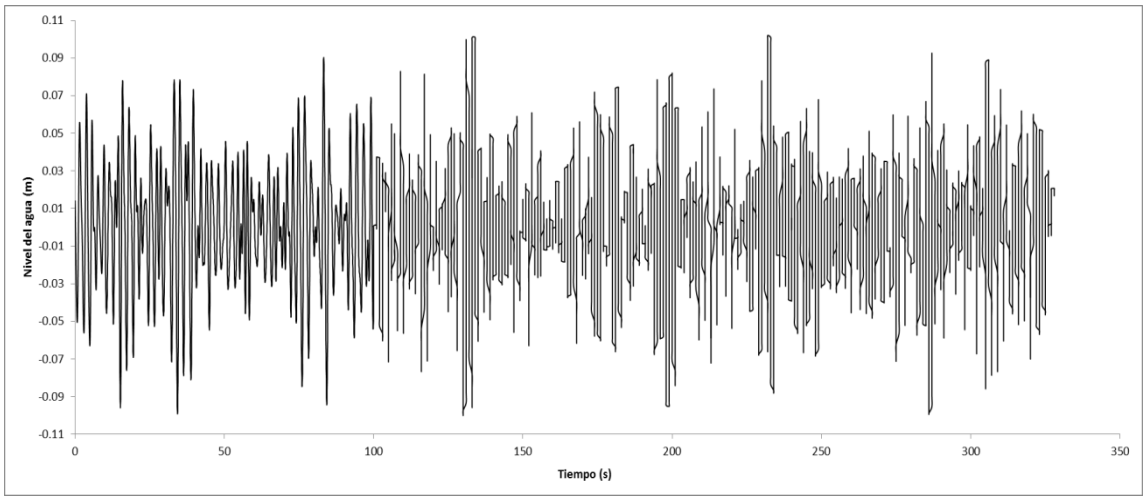

Figura 3. Señal de entrada para la prueba 10.

Se aplicó un contorno débil en el contorno del oleaje y la condición de radiación de Sommerfeld al final del dominio numérico para minimizar los efectos de la reflexión según Zijlema et al 2011.

Validación del modelo SWASH

La utilización de parámetros estadísticos para la evaluación de las modelaciones realizadas da como medida el por ciento de acierto del modelo matemático con respecto a las mediciones realizadas. Se toma como valores observados los calculados por el modelo, y como valores medidos las mediciones tomadas por los sensores reales.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Los parámetros estadísticos seleccionados fueron R^2, BIAS y Error medio cuadrático. El R^2, ecuación 7, proporciona el cuadrado del coeficiente de correlación, los valores posibles que puede alcanzar oscilan entre 0 y 1, representando 0 ninguna correlación y 1 excelente correlación. El sesgo BIAS, ecuación 8 proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable, por lo que cuantifica el error sistemático del modelo. Mientras más este parámetro esté próximo a cero mejor habrá sido la tendencia del modelo. Con el error medio cuadrático, ecuación 9, se obtiene el margen de error existente entre múltiples muestras, por lo que brinda la medida de las diferencias en promedio entre valores pronosticados y los observados. Al igual que en el caso anterior, mientras más este parámetro este próximo a cero mejor habrá sido la tendencia del modelo.

$$R^2 = \frac{\left(\sum(\emptyset i - \overline{\emptyset \imath})(\emptyset iobs - \overline{\emptyset \imath obs})\right)^2}{\sum(\emptyset i - \overline{\emptyset \imath})^2 \sum(\emptyset iobs - \overline{\emptyset \imath obs})^2} \quad (7)$$

$$BIAS = \sum_{i=1}^{N} \frac{(\emptyset_i - \emptyset_{iobs})}{N} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \frac{(\emptyset_i - \emptyset_{iobs})^2}{N}} \quad (9)$$

Dónde $Ø_i$ es la representación de los valores medidos, $\overline{\emptyset \imath}$ es la media de los valores medidos, $Ø_{iobs}$ es la representación de los valores calculados por el modelo SWASH, $\overline{\emptyset \imath obs}$ es la media de los valores calculados por el modelo.

Propagación del oleaje

La Tabla 5 muestra las alturas de ola significativas y el periodo pico correspondientes a los cuatro sensores para las pruebas 1 a 4, correspondientes al modelo físico y a la modelación numérica. En esta tabla todos los valores se encuentran a escala de modelo. En la columna 1 Ho_mod representa la altura de ola en aguas profundas a

Tecnología y ciencias del agua, 10 (3), 47-69. DOI: 10.24850/j-tyca-2019-03-03

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

escala 1:66, en la columna 2 se muestra el valor de altura de ola transformada, correspondiente a la posición de las paletas (X=0), con una profundidad de 0.45 m; en la columna 3 se especifica el modelo: físico o numérico (SWASH), en las columnas 4, 5, 6 y 7 se muestran los valores de altura de ola correspondientes a cada sensor según los modelos.

Tabla 5. Comportamiento de las alturas de ola en metros. Córdova *et al*. (2016).

Ho_mod (m)	$H_{X=0}$ (m)	Modelo	Ai0	Ai1	Ai2	Ai3
0.061	0.0480	Físico	0.0420	0.0410	0.0440	0.0410
		SWASH	0.0435	0.0403	0.0401	0.0413
0.091	0.0703	Físico	0.0620	0.0590	0.0630	0.0580
		SWASH	0.0632	0.0590	0.0589	0.0601
0.121	0.0895	Físico	0.0780	0.0740	0.0790	0.0710
		SWASH	0.0809	0.0763	0.0758	0.0769
0.152	0.1058	Físico	0.1020	0.0950	0.1010	0.0900
		SWASH	0.0994	0.0953	0.0950	0.0972

Los resultados del modelo SWASH se encuentran muy cercanos a los medidos. Un análisis más profundo se muestra en la Tabla 6, en donde se exponen el parámetro Bias, el Error medio cuadrático (RMSE) y el promedio del error absoluto. Se puede observar que tanto para el Bias como para el RMSE se obtienen valores muy próximos a 0, lo cual es un indicativo de que el modelo matemático ha simulado adecuadamente las condiciones impuestas. El parámetro R^2 no se tuvo en cuenta por no contar con un número de muestras suficientemente grande.

Tabla 6. Resultados de los parámetros estadísticos para las pruebas 1 a 4.

Ho (m)	Bias (m)	RMSE (m)
0.061	-0.0006	0.0019
0.091	-0.0002	0.0021
0.121	-0.0017	0.0040
0.152	-0.0002	0.0044

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

En la Figura 4 se muestra la evolución del oleaje para el caso en el que la altura de ola en aguas profundas es de 0.091 m (6 m en prototipo). Las cruces rojas representan los valores registrados por los sensores.

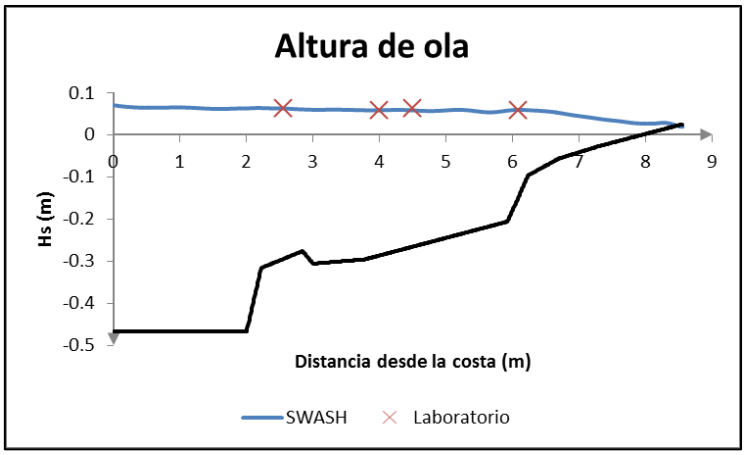

Figura 4. Propagación del oleaje para Ho = 0.091 m (6.0 m en prototipo).

Los valores de altura de ola de la Tabla 5 se obtuvieron a partir de procesar digitalmente la señal obtenida en la localización de cada sensor para cada prueba. Este registro se ordenó para formar un espectro de energía en función de la frecuencia. Conociendo el área bajo la curva de este espectro (A) se determinó la altura significativa (Hs) mediante la expresión matemática siguiente.

$$Hs = 4 \cdot \sqrt{A} \quad (10)$$

En la Figura 5 se muestra la variación del espectro de energía para las cuatro posiciones de los sensores, y agregando un quinto, denominado Ai4 que se encuentra en la ubicación de la estructura a 7.31 m del origen.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

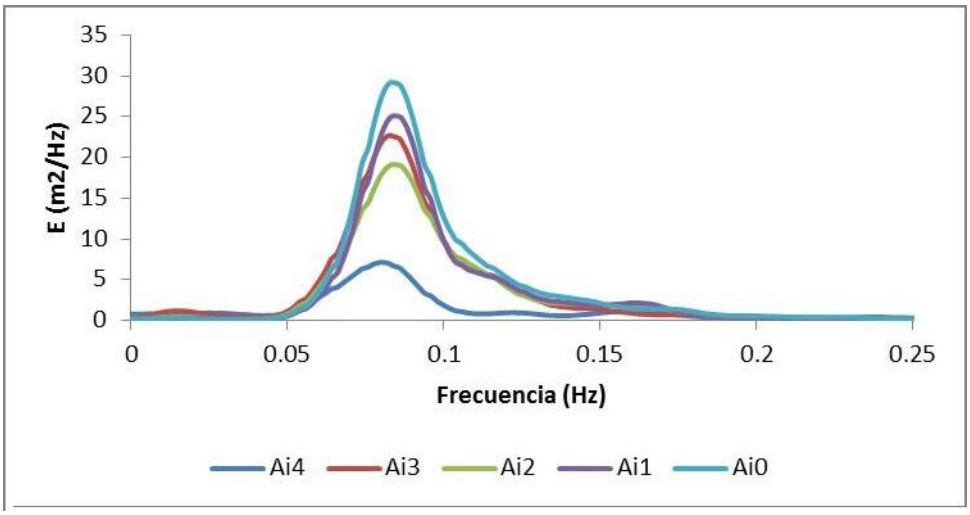

Figura 5. Espectros de potencia para Ho = 0.091 m (6.0 m en prototipo), Tp = 1.20 s (10 s en prototipo) y S = 0.035 m (2.28 m en prototipo).

Es fácilmente observable como a medida que la onda se aproxima a la costa (desde Ai0 hasta Ai4) el área bajo la curva va disminuyendo, lo que representa una pérdida de energía debido a los distintos fenómenos que la afectan, como el asomeramiento, la fricción con el fondo y rotura de la ola. Véase también como hubo un incremento desde el punto Ai2 al Ai3 debido a que el fondo empinó la ola y luego se experimenta un fuerte decaimiento de esta, pero sin llegar a romper, como sucedió en el modelo físico.

Determinación del rebase promedio

Los resultados del modelo 1:30 permiten establecer los valores de referencia para comparar, ver Tabla 7. Esta comparación tendrá lugar procesando los resultados arrojados con el modelo SWASH, pero también a partir de las expresiones empíricas planteadas en el manual EurOtop, EurOtop (2007).

Tabla 7. Tasas de rebase medidas en modelo físico 1:30.

No. prueba	1	2	3	4	5	6	7	8

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Q(m2/s)	0.0023	0.0036	0.0053	0.0069	0.0021	0.0032	0.0045	0.0060
No. prueba	9	10	11	12	13	14	15	16
Q(m2/s)	0.0011	0.0021	0.0034	0.0049	0.0011	0.0018	0.0028	0.0041

Modelo Swash vs Modelo Físico

El rebase instantáneo producido por el oleaje, q(t), fue obtenido con el modelo SWASH al final del muro. A partir de este valor, se puede determinar la descarga media del rebase, q, mediante la ecuación 11. Donde ts y te son el tiempo de comienzo y fin de la medición de la descarga del rebase, respectivamente.

$$q = \int_{ts}^{te} q(t) \cdot dt/(te - ts) \quad (11)$$

Los resultados de aplicar esta expresión se muestran en la Tabla 8, en donde se incorporar los de la Tabla 7 denotado por la variable q_MF. La Figura 6 muestra en comportamiento del caudal instantáneo de la prueba 10.

Tabla 8. Tasas de rebase promedio obtenidas con el SWASH.

pruebas	q_MF (m2/s)	q_SWASH (m2/s)	Error Absoluto (m2/s)
1	0.0023	0.0013	0.0010
2	0.0036	0.0033	0.0004
3	0.0053	0.0048	0.0006
4	0.0069	0.0086	-0.0017
5	0.0021	0.0010	0.0011
6	0.0032	0.0018	0.0015
7	0.0045	0.0049	-0.0004
8	0.0060	0.0073	-0.0013
9	0.0011	0.0006	0.0005
10	0.0021	0.0021	-0.0001

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

11	0.0034	0.0033	0.0001
12	0.0049	0.0069	-0.0021
13	0.0011	0.0006	0.0005
14	0.0018	0.0007	0.0010
15	0.0028	0.0028	0.0001
16	0.0041	0.0050	-0.0009

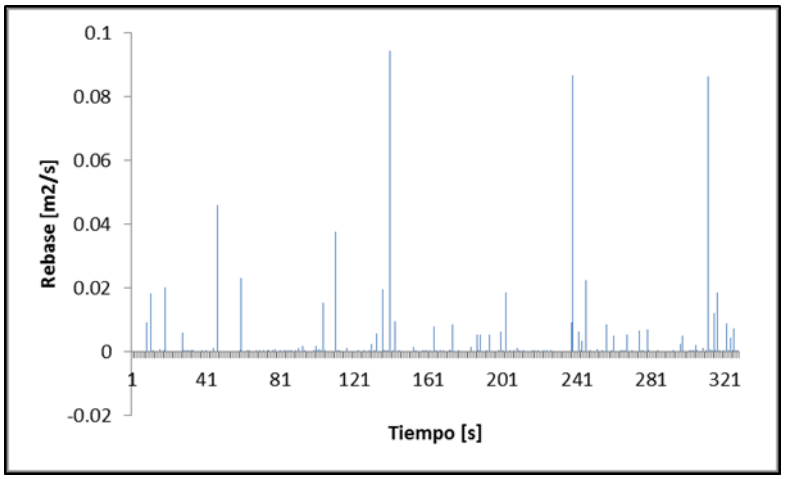

Figura 6. Comportamiento instantáneo del rebase para la prueba 10.

En la Figura 7 se expone la correlación entre los valores de las columnas 2 y 3 de la Tabla 8.

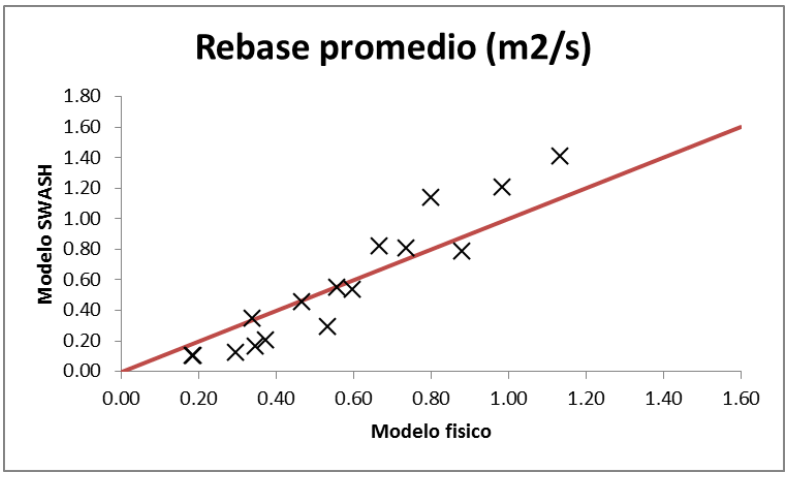

Figura 7. Correlación entre valores medidos y modelados.

En esta última, la línea roja indica la recta y = x, véase que tres pruebas se encuentran sobre esta, y del resto la mayoría se

Tecnología y ciencias del agua, 10 (3), 47-69. DOI: 10.24850/j-tyca-2019-03-03

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

encuentra en la vecindad. Lo cual es prueba de la capacidad del modelo de reproducir adecuadamente el fenómeno de rebase. Además, cuando se determinaron los parámetros estadísticos descritos anteriormente se obtuvo un R^2 = 0.92; Bias = -0.00002 m^2/s y RMSE = 0.0010 m^2/s.

Se señala que el modelo SWASH subestima los valores de rebase promedio para los caudales de más bajos, y sobreestima los valores para los caudales más altos, esto implica una diferencia con los señalado por Suzuki et al (2011), donde en todas las pruebas realizadas por este investigador siempre el modelo SWASH subestimo los rebases al ser comparados con los medidos en el modelo físico.

Esto puede estar motivado ya que el modelo no reproduce adecuadamente debido a inestabilidad que se genera por ser un modelo integrado en la profundidad, y no representa con exactitud la propagación del oleaje en el frente de la ola que sobrepasa la estructura y, puede sobreestimar los resultados debido a que el valor del coeficiente de Manning seleccionado para la modelación numérica no reproduzca de forma real el proceso de pérdida de energía del oleaje con el fondo y con el muro, y la energía del oleaje sean mayor, trayendo consigo valores mayores de rebases para las alturas de ola significativas mayores. Esto implica la necesidad de continuar investigando para una mejor calibración del modelo, no obstante, los resultados obtenidos en esta investigación son muy buenos.

Modelo Swash *vs*. ecuaciones del manual Eurotop

Consultando el manual para el rebase antes mencionado, el cual ha sido elaborado a partir de la experiencia de instituciones e investigadores de varias naciones, se compara el resultado del modelo numérico con la expresión que aparece en dicho material para el caso de un muro vertical no protegido.

El valor esperado de tasa de rebase promedio puede ser estimado distinguiendo entre dos condiciones hidrodinámicas conocidas como pulsante e impulsiva. La primera ocurre cuando el oleaje es de pequeña esbeltez y relativamente pequeño en comparación con la profundidad local. El último tiene lugar cuando el oleaje es largo en relación con la profundidad local para romper violentamente contra el muro. Para proseguir con la determinación del rebase del oleaje es

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

necesario determinar primeramente el régimen dominante para una estructura y un estado del mar dados. El parámetro de impulsividad ha sido definido como:

$$h_* = 1.35 \cdot \frac{h_s}{H_{m0}} \cdot \frac{2\pi \cdot h_s}{gT_{-10}^2} \quad (12)$$

Donde hs es la profundidad media al pie del muro y T-10 es el periodo medio espectral basado en el momento de orden -1 y 0 del espectro de potencia incidente. Las condiciones de no impulsividad prevalecen cuando h*>0,3, y las condiciones de impulsividad son observadas cuando h*<2. Para las condiciones de impulsividad, que es la situación que se aborda, las ecuaciones de predicción son:

$$\frac{q}{h_*^2\sqrt{gh_s^3}} = 1.5 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{h_* R_C}{H_{m0}}\right)^{-3.1}, \text{ Si } 0.03 < h_* Rc/H_{m0} < 1 \quad (13)$$

$$\frac{q}{h_*^2\sqrt{gh_s^3}} = 2.7 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{h_* R_C}{H_{m0}}\right)^{-2.7}, \text{ Si } h_* Rc/H_{m0} < 0.02 \quad (14)$$

Para los valores intermedios del parámetro h*Rc/Hm0, debe usarse el máximo de las dos fórmulas anteriores. Estableciendo una comparación similar a la mostrada en la Figura 7, se presenta la Figura 8, en donde se correlacionan los valores del modelo físico con los obtenidos con estas fórmulas. En la Tabla 9 aparecen estos valores. Respecto los parámetros estadísticos se puede comentar que se obtuvo un R^2 = 0.79; Bias = -0.00068 m^2/s y RMSE = 0.0024 m^2/s, que comparándolos con los del SWASH representan un resultado más alejado de las mediciones.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

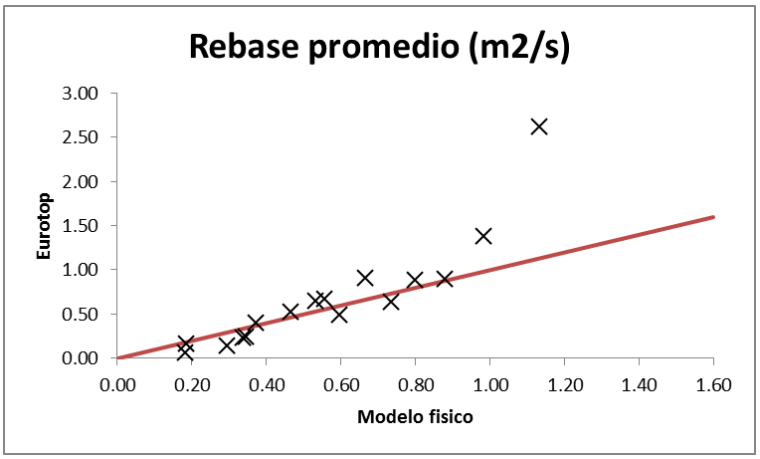

Figura 8. Correlación entre valores medidos y calculados.

Tabla 9. Tasas de rebase promedio obtenidas con el manual Eurotop.

pruebas	q_MF (m2/s)	q_Eurotop (m2/s)	Error Absoluto (m2/s)
1	0.0023	0.0024	-0.0001
2	0.0036	0.0030	0.0006
3	0.0053	0.0054	-0.0001
4	0.0069	0.0159	-0.0091
5	0.0021	0.0014	0.0007
6	0.0032	0.0039	-0.0007
7	0.0045	0.0038	0.0006
8	0.0060	0.0084	-0.0024
9	0.0011	0.0010	0.0001
10	0.0021	0.0014	0.0007
11	0.0034	0.0040	-0.0006
12	0.0049	0.0054	-0.0005
13	0.0011	0.0003	0.0008
14	0.0018	0.0008	0.0010
15	0.0028	0.0032	-0.0004
16	0.0041	0.0055	-0.0015

En cuanto a la diferencia entre los valores obtenidos con las ecuaciones empíricas y con el modelo SWASH, esta no es considerable, ver Tabla 10. Aplicando los parámetros estadísticos se obtiene un R^2 = 0.77; Bias = -0.00069 m^2/s y RMSE = 0.0021 m^2/s.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Tabla 10. Comparación entre los valores obtenidos por el modelo SWASH y el manual Eurotop.

Pruebas	q_Eurotop(m2/s)	q_SWASH(m2/s)	Error Absoluto (m^2/s)
1	0.0024	0.0013	0.0012
2	0.0030	0.0033	-0.0003
3	0.0054	0.0048	0.0007
4	0.0159	0.0086	0.0074
5	0.0014	0.0010	0.0005
6	0.0039	0.0018	0.0021
7	0.0038	0.0049	-0.0011
8	0.0084	0.0073	0.0011
9	0.0010	0.0006	0.0004
10	0.0014	0.0021	-0.0007
11	0.0040	0.0033	0.0007
12	0.0054	0.0069	-0.0016
13	0.0003	0.0006	-0.0003
14	0.0008	0.0007	0.0001
15	0.0032	0.0028	0.0005
16	0.0055	0.0050	0.0005

Comparando las tres fuentes de resultados (modelación física, modelación numérica y ecuación empírica), según se muestra en la ilustración 9, se puede apreciar que tanto el modelo SWASH como las ecuaciones empíricas del EurOtop, en la mayoría de los casos, se reproducen las condiciones de laboratorio adecuadamente, en caso del modelo SWASH presenta mejores resultados, lo que permite corroborar, para el caso estudio, la aplicabilidad del modelo objeto de investigación, y sus potencialidades en futuras trabajos relacionados con la propagación del oleaje y el rebase del oleaje en obras de protección costeras. En esta ilustración el rebase adimensional se obtiene de la siguiente expresión:

$$\mathrm{q\ adim} = \frac{\mathrm{q}}{\mathrm{h}_*^2\sqrt{\mathrm{gh}_\mathrm{s}^3}} \quad (15)$$

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

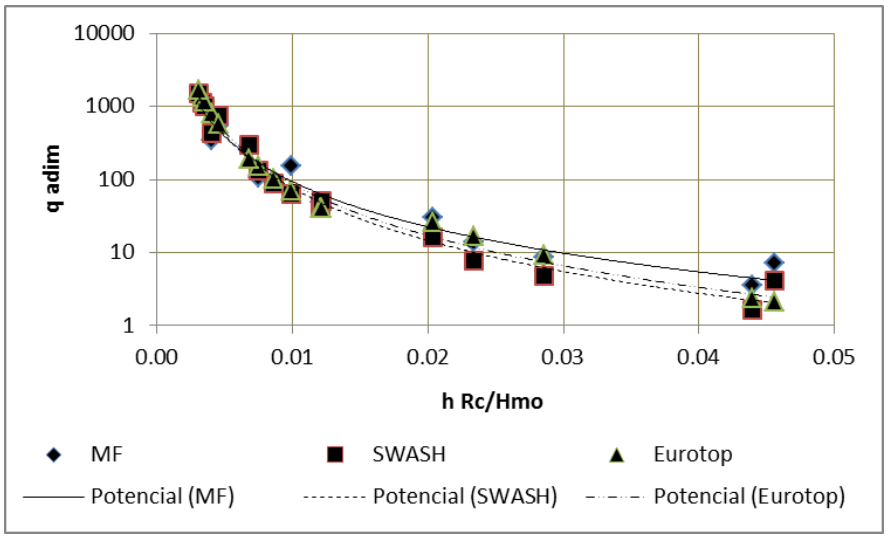

Figura 9. Comparación del rebase promedio por diferentes vías.

Conclusiones

Se implementó el modelo SWASH en 1D para el estudio de la propagación del oleaje y el rebase en muros costeros de sección transversal vertical. La aplicabilidad de este quedó demostrada mediante la comparación con las mediciones realizadas en dos modelos físicos, uno en escala 1:66 y el otro en escala 1:30, condicionados para la propagación del oleaje y el rebase, respectivamente.

Se alcanzó alta correlación en la simulación de la propagación del oleaje (RMSE <0.0044 m), así como en la del rebase (R^2=0.92). Además, se emplearon expresiones empíricas para estimar este último fenómeno, y también se pudo constatar una buena correlación entre el modelo SWASH y estas (R^2=0.77). Estos resultados se deben a que en el modelo SWASH se considera la presión de forma no hidrostática. Aunque en el caso del rebase, para bajos y altos caudales, hay alguna discrepancia entre el modelo SWASH y los experimentos físicos, debido a que es un modelo numérico integrado en la profundidad lo que afecta en la fricción de fondo.

Las fórmulas empíricas para el rebase fueron comparadas con la medición de laboratorio, y se comprobó que estas reproducen con buena correlación (R^2=0.79) el rebase de la ola.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Referencias

Córdova, L., Lamazares, R. y Salgueiro, G. (2013). *Propuestas de obras de defensa de costas para dar solución a las penetraciones del mar en la zona del Malecón Tradicional de la Ciudad de La Habana*. La Habana, Cuba.

Córdova, L., Salerno, D., Dentale, F., Capobiando, A. y Buccino, M. (2015) *Experimental campaign on the overtopping of the seawall Malecòn Tradicional*. Recuperado de http://www.researchgate.net/publication/281584353

Córdova, L., Torres, R. y Ponce, M. (2016) *Simulación de los fenómenos hidrodinámicos en la zona del Malecón Tradicional. Modelación de la marea meteorológica durante la ocurrencia de un evento extremo*. La Habana, Cuba.

Pérez, P. J., Pérez, R. y Casals, R. (2015). "Estudio de las probabilidades de ocurrencia de los incrementos del nivel del mar en la zona del Malecón tradicional, debidos a eventos meteorológicos peligrosos". La Habana, Cuba.

Pullen, T., Allsop, W., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H. & van der Meer, J. (2007) Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment manual. *Die Küste*, 73 (EurOtop), pp. 1-178. Recuperado de http://www.overtopping-manual.com/assets/downloads/EAK-K073_EurOtop_2007.pdf

Suzuki, T., Verwaet, T., Hassan, W., Velae, W., Reyns, J., Trou, K., Troch, P. y Zijlema, M. (Noviembre, 2011). *The applicability of SWASH model for wave transformation and wave overtopping: A case study for the Flemish coast*. ACOMEN, 5th International Conference on Advanced Computacional Methods in Engineering. Belgium: Universidad de Liege.

Tuan, T., & Oumeraci, H. (2010). A numerical model of wave overtopping on seadikes. *Coastal Engineering*, 57 (8), 757-772. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2010.04.007

Zijlema, M., Stelling, G.S. & Smit P. (2011). SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*, 58 (10), 992-1012. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2011.05.015