

Alternativas contra inundaciones costeras en el malecón tradicional de La Habana, Cuba

Dr. Ing. Luis Fermín Córdova López e-mail: cordova@tesla.cujae.edu.cu
Centro de Investigaciones Hidráulicas
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Marianao, La Habana.

Ing. Yailin Fernández González e-mail: yailinfg@hotmail.es
Centro de Investigaciones Hidráulicas
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Marianao, La Habana.

RESUMEN

Se evalúa la eficacia en la reducción del rebase del oleaje de siete alternativas de obras de defensa costera, para controlar las inundaciones en la zona de La Habana conocida como malecón tradicional, a partir de un conjunto de tipologías previamente estudiadas en el Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) de la Universidad Tecnológica de La Habana. Se emplean resultados de estudios preliminares de modelaciones numéricas y físicas. Se presenta una comparación de las diferentes alternativas en función de la reducción de la tasa de rebase. Se toma caso de estudio el huracán Wilma 2005, se determina el comportamiento de las variables: tasa promedio de rebase, los niveles de peligrosidad que se generan en la zona de estudio y porcentajes de reducción. Se definen los tramos de mayor rebase y peligrosidad.

Palabras clave: modelación física, modelos matemáticos determinísticos, niveles de peligrosidad, obras de defensa costera, sobrepaso del oleaje.

Alternatives against coastal floodings on the tradicional malecon in Havana, Cuba

ABSTRACT

The effectiveness in the reduction of the wave overflow of seven alternatives of coastal defense works is evaluated, to control the floods in the area of Havana known as traditional boardwalk, from a set of typologies previously studied in the Hydraulic Research Center (CIH) of the Technological University of Havana. Results of preliminary studies of numerical and physical modeling are used. A comparison of the different alternatives is presented based on the reduction of the average wave overtopping rate. Hurricane Wilma 2005 is studied, the behavior of the variables is determined: average wave overtopping rate, the levels of danger generated in the study area and reduction percentages. The sections of greater overflow and danger are defined.

Keywords: physical modeling, deterministic mathematical models, levels of danger, coastal protection works, surpassing waves.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático global incrementa la frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos severos en la zona del Caribe. Un aumento del número de ciclones tropicales en los últimos años es una prueba de ello. Desafortunadamente estos eventos extremos intensos, incrementan la vulnerabilidad y los niveles de riesgo de pérdidas de vidas humanas y objetivos económicos-sociales en la cuenca del Caribe y en particular en la isla de Cuba, donde su capital, La Habana es uno de los lugares más afectados.

En este artículo se presentan siete alternativas a evaluar de defensa costera contra inundaciones en el malecón de La Habana, las mismas se han concebido incrementando de forma progresiva el nivel de defensa, tomando como caso de estudio el huracán Wilma, que azotó el Caribe en el 2005. Se realiza un análisis del sobrepaso del oleaje de cada alternativa durante 37 horas del fenómeno, en los quince tramos en que se divide la zona de estudio. Se destaca la aplicación de la modelación híbrida, combinando los resultados de la modelación física que permite obtener modelos paramétricos para el cálculo del rebase promedio del oleaje expresados en formulaciones esta zona, la y modelación numérica que simula los campos de oleajes asociados al huracán Wima 2005 y posteriormente la simulación de la inundación en la zona detrás del muro de protección, y de las diferentes variantes estudiadas. El tren de modelos numéricos acoplados permite obtener las características del oleaje y el comportamiento de la inundación en la zona protegida.

ESTUDIOS PRELIMINARES

Objeto de estudio: zona de estudio y evento meteorológico escogido como caso de análisis

Los municipios Centro Habana y Habana Vieja pertenecen a la provincia de La Habana, se destacan por su desarrollo portuario, centro económico-cultural y polo turístico. Las costas ocupan todo el límite norte a escasos metros sobre el nivel del mar. La topografía de la zona es relativamente llana con tendencia a aumentar su nivel hacia el sur y dos subzonas bien delimitadas con un nivel bajo respecto al resto del terreno. Cuando el oleaje de tormenta sobrepasa o rebasa la cota de corona del muro del malecón ocurren inundaciones. El sistema de alcantarillado colapsa y los colectores de drenaje pluvial trabajan como surtidores, sobrecargados, lo que demora considerablemente la evacuación de las aguas, según Gutierrez (2012).

Debido a la vulnerabilidad ante eventos meteorológicos extremos, por su situación geográfica e importancia histórica, arquitectónica, turística, económica y social, la zona de estudio se encuentra en los municipios antes mencionados. Se analiza desde la calle Aramburo hasta la avenida Prado, teniendo como límite norte el muro del malecón y por el sur la calle Concordia. Representada por el área que forman las coordenadas de los puntos: P₁ (Latitud: 3° 20' 4,3014" N y Longitud: 82° 16' 5,3444" W), P₂ (Latitud: 3° 20' 19,4901" N y Longitud: 82° 15' 7,6638" W), P₃ (3° 19' 47,8040" N y Longitud: 82° 16' 4,3374" W) y P₄ (3° 19' 47,8085" N y Longitud: 82° 15' 12,2421" W), como se muestra en la figura 1. Como caso de análisis se toma el huracán Wilma 2005 que afectó gravemente el territorio nacional y sobre todo el litoral norte de La Habana, zona donde se ubica el conocido malecón habanero.



Figura 1. Límites del área de estudio

Tipologías de obras de defensa de costas a estudiar

Entre octubre del 2013 y marzo del 2015 se realiza una amplia campaña de pruebas mediante la modelación física de un conjunto de tipologías de obras de defensa de costas para la zona del malecón tradicional de La Habana, a partir de un diseño a nivel de gabinete realizado por el Grupo Investigativo de Ingeniería Costera y Marítima del Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) de la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, según Córdova et al. (2016).

A continuación, se presentan las tipologías de mejor resultados obtenidas en la modelación física que se encuentran en Córdova (2010).

- Muro costero de sección transversal vertical (situación actual), como se muestra en la figura 2.
- Muro costero de simple curvatura, según Córdova (2010).
- Berma a + 3,28 m de cota de la cresta, y ancho de berma 5 m.
- Rompeolas emergidos con cota de coronación a + 3,28 m y ancho de la corona de 12,00 m de corona.

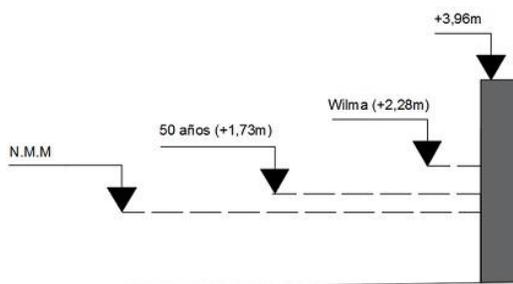


Figura 2. Corte transversal del muro costero de sección transversal vertical, situación actual

De la modelación física se seleccionan las siguientes variantes para desarrollar los modelos matemáticos determinísticos. Destacar que las mismas fueron seleccionadas de acuerdo con los resultados de los estudios a escala.

1. Muro de sección vertical (situación actual) con cota a + 3,96 m.
2. Muro de sección curva con cota a + 3,96 m.

3. Muro de sección curva con cota a + 4,46 m y berma (berma al pie del muro con cota a + 3,28 m, y ancho de cresta de 5,00 m), como se observa en la figura 3.
4. Muro de sección vertical con dos niveles de cota (+ 3,96 m y + 4,46 m) y rompeolas emergido (a la cota + 3,28 m y ancho de la corona 12,00 m).
5. Muro de sección curva con cota a + 4,46 m y rompeolas emergido (a la cota + 3,28 m y ancho de la corona 12,00 m), como se observa en la figura 4.

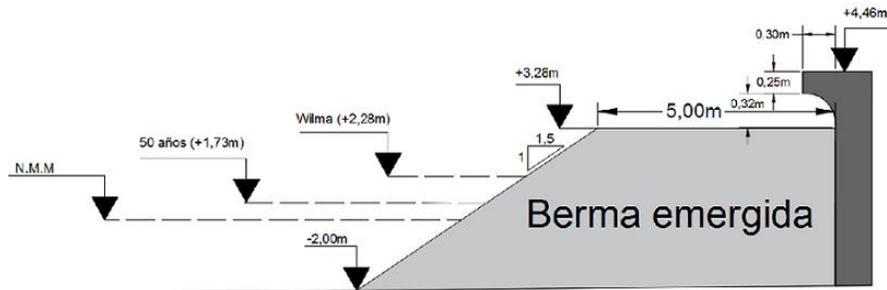


Figura 3. Corte transversal del muro de sección curva con cota a + 4,46 m y berma

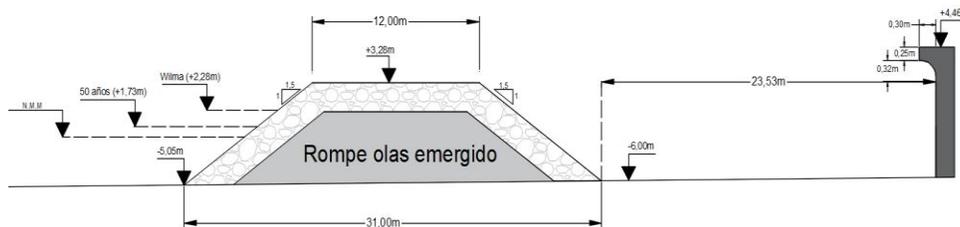


Figura 4. Corte transversal del muro de sección curva con cota a + 4,46 m y rompeolas emergido

Desarrollo de los modelos matemáticos determinísticos de las variantes 1, 2 y 3, según Córdova y Torres (2017)

Para determinar los modelos matemáticos determinísticos que mejor representan los resultados de los estudios de modelación física realizados, se emplea la siguiente expresión:

$$Q_0 = \frac{q_{promedio}}{(h^*)^2 \sqrt{g * h_s^3}} \quad (1)$$

Donde:

Q_0 : factor de descarga (adimensional).

$q_{promedio}$: tasa promedio de rebase (m^3/sm).

g : aceleración de la gravedad (m/s^2).

h^* : parámetro de impulsividad (adimensional)

h_s : es la profundidad al pie de la estructura (m).

Con la ayuda de los aforos volumétricos realizados durante la modelación física en el laboratorio se obtienen los valores de rebase promedio del oleaje para cada obra de defensa estudiada.

Para determinar el parámetro de impulsividad se aplica la siguiente fórmula:

$$h^* = 1,35 * \frac{h_s}{H_{mo}} * \frac{2 * \pi * h_s}{g * T^2} \quad (2)$$

Donde:

h^* : parámetro de impulsividad (adimensional).

h_s : profundidad al pie de la estructura (m).

H_{mo} : altura de la ola (m).

g : aceleración de la gravedad (m/s²).

T : período de la ola (s).

Calculado el factor de descarga (Q_0), cada valor obtenido fue representado en un Gráfico de $h^* * R_c/H_{mo}$ (altura de corona relativa) por el eje de las abscisas, y Q_0 por el eje de las ordenadas, como se muestra en la figura 5, 6, 7. El modelo determinístico se establece a partir de la ecuación de mejor ajuste según la tipología, a partir del coeficiente de correlación (R^2) donde se obtiene el mayor valor cuando se combina las alturas de olas significativas para toda la frecuencia, con el periodo medio al pie de la estructura y la sobreelevación por rotura de la ola.

El modelo potencial $Y^* \equiv a * X^b$ fue el más adecuado en todos los casos y adopta la siguiente forma:

$$Q_0 = a * (h^* * \frac{R_c}{H_{mo}})^b \quad (3)$$

Donde,

Q_0 : factor de descarga (adimensional).

h^* : parámetro de impulsividad (adimensional).

R_c : bordo libre (m).

H_{mo} : altura de la ola (m).

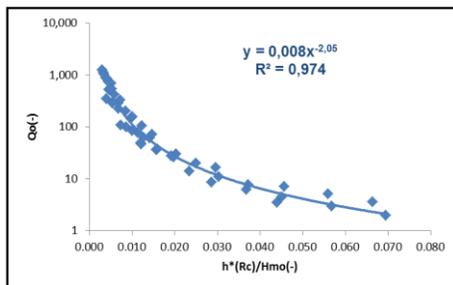


Figura 5. Representación gráfica para muro curvo

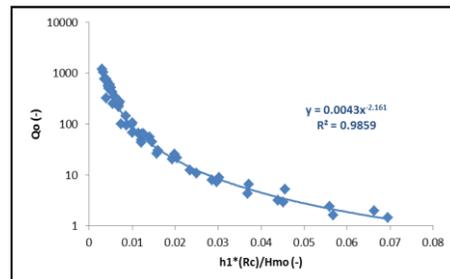


Figura 6. Representación gráfica para muro vertical

La curva que se observa en las figuras 5, 6, 7 es la línea de tendencia de mejor ajuste a las mediciones hechas. A continuación, en la tabla 1, se muestran los coeficientes del modelo matemático que mejor representan las pruebas de modelación física de las variantes 1, 2 y 3.

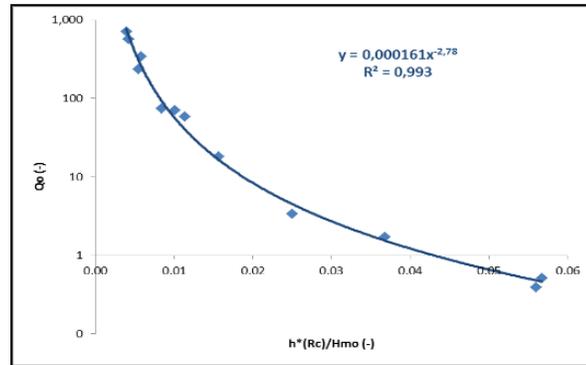


Figura 7. Representación gráfica para muro curvo más berma

Tabla 1. Modelos determinísticos que mejor representan las pruebas de modelación física de las variantes 1, 2 y 3

Variante		Combinación	a	b	R ²
1	Muro vertical (MV)	Todas las frecuencias + Tm + Con sobreelevación por rotura de la ola	0,008	-2,05	0,974
2	Muro curvo (MC)	Todas las frecuencias + Tm + Con sobreelevación por rotura de la ola	0,004	-2,16	0,985
3	Muro curvo con Berma (MC + B)	Todas las frecuencias + Tm + Con sobreelevación por rotura de la ola	0,000161	-2,78	0,993

Desarrollo de los modelos matemáticos determinísticos de las variantes 4 y 5

Las figuras 8, 9, 10 muestran los resultados de las 16 pruebas realizadas en el modelo físico, según Córdova (2016).

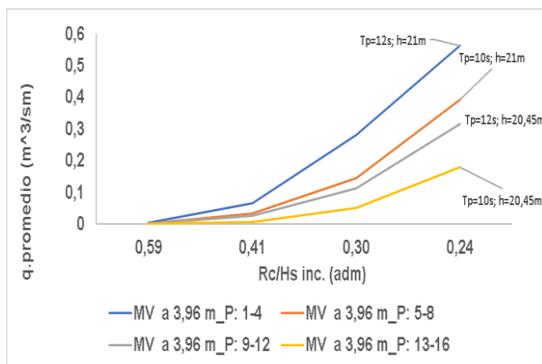


Figura 8. Variante de muro vertical a la cota + 3,36 m, por periodo pico y nivel estático

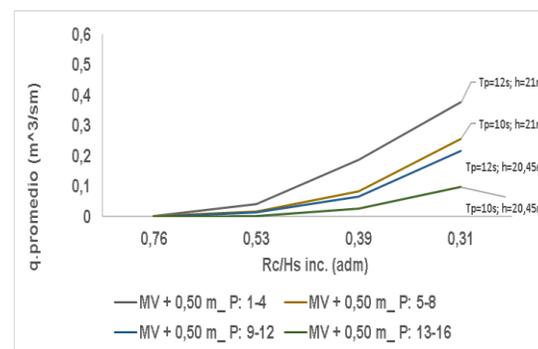


Figura 9. Variante de muro vertical a la cota + 4,46 m, por periodo pico y nivel estático

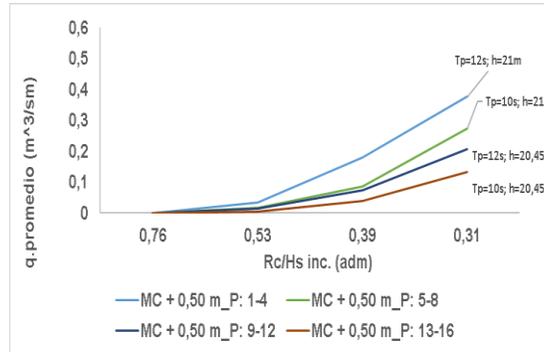


Figura 10. Variante de muro curvo a la cota + 4,46 m, por periodo pico y nivel estático

De las figuras 8, 9, 10 se escoge la curva formada por las pruebas 13, 14, 15 y 16 de cada variante para la representación del modelo matemático determinístico, por ser su sobreelevación ($S = 1,73$ m) y período pico ($T_p = 10$ s) semejantes al rango de valores que se tiene de sobreelevación del mar, alturas de olas significativas y períodos picos del oleaje obtenidos mediante la simulación numérica del huracán Wilma 2005.

La figura 11 y figura 12, muestran la curva de mejor ajuste de las pruebas seleccionadas de la cual se obtiene el modelo potencial $Y = a * X^b$ y adopta la siguiente forma:

$$Q_0 = a * (h^* * \frac{R_c}{H_{mo}})^b \quad (3)$$

Donde:

- Q_0 : factor de descarga (adimensional).
- h^* : parámetro de impulsividad (adimensional).
- R_c : bordo libre (m).
- H_{mo} : altura de la ola (m).

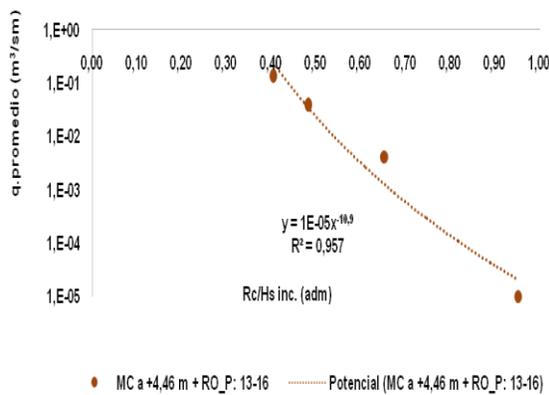


Figura 11. Representación gráfica para muro curvo con rompeolas

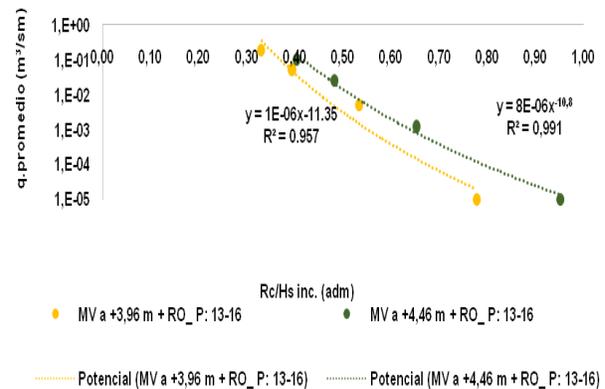


Figura 12. Representación gráfica para muro vertical con rompeolas

A continuación, en la tabla 2 se muestran los coeficientes del modelo matemático determinístico que mejor representan las pruebas de modelación física de las variantes 4 y 5.

Tabla 2. Modelos determinísticos que mejor representan las pruebas de modelación física de las variantes 4 y 5

Combinación	a	b	R ²
Muro vertical a + 4,46 m + Rompeolas (MV + RO)	0,000008	-10,82	0,9912
Muro vertical a + 3,96 m + Rompeolas (MV + RO)	0,000001	-11,35	0,957
Muro curvo a + 4,46 m + Rompeolas (MC + RO)	0,000010	-10,98	0,9572

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Alternativas a evaluar

Teniendo en cuenta las características del muro del malecón habanero y las restricciones que existen desde el punto de vista urbanístico, se decide estudiar siete alternativas de solución.

- Alternativa 1: Muro de sección transversal vertical a la cota actual.
- Alternativa 2: Muro de sección transversal curva a la cota del muro actual.
- Alternativa 3: Muro de sección transversal curva a la cota + 4,46 m.
- Alternativa 4: Muro de sección transversal curva a la cota actual más berma.
- Alternativa 5: Muro de sección transversal curva a la cota +4,46 m más berma.
- Alternativa 6: Muro de sección transversal vertical a la cota actual más rompeolas.
- Alternativa 7: Muro de sección transversal curva a la cota +4,46 m más berma más rompeolas.

Determinación del sobrepaso del oleaje para las diferentes alternativas

Para determinar el rebase del oleaje se establecen zonas, según las tipologías a utilizar y las premisas consideradas por Córdova L., y Torres R. (2017).

- Cota de corona del muro actual.
- Incidencia del oleaje.
- Colocar berma artificial donde no haya berma natural.
- Proteger el hospital Hermanos Amejeiras.
- Evitar zonas de estancamiento del agua próximas al muro.

En este sentido la zona de estudio del malecón se divide en quince tramos que corresponden a lo que sucede delante de cada rompeolas y de las bermas (artificiales o naturales), como se muestra en la figura 13.

Para la determinar las características del oleaje, los niveles del mar y calcular las tasas de rebase por tramo de las alternativas a comparar, se aplican los modelos matemáticos determinísticos anteriormente hallados y la modelación numérica. Se emplea el Sistema de Ingeniería Costera y Marítima (SICOM) desarrollado en el CIH, según Córdova y Torres (2017), González P y Córdova L (2019), en la determinación de la efectividad de las alternativas antes expuestas con el fin de reducir el rebase del oleaje.

Mediante la aplicación homogénea de dos de los modelos que componen el SICOM: el modelo hidrodinámico Advance Circulation Model (ADCIRC), según Hagen et al. (1994) y el modelo de oleaje Simulation Waves Nearshore (SWAN), según Holthuijsen et al. (2004), sobre una misma malla de cómputo no estructurada, se obtiene el comportamiento de la altura de ola

significativa, el fenómeno de sobre elevación por rotura de la ola y la surgencia asociada a la ocurrencia de huracanes en la costa norte de Cuba, a partir de quince boyas virtuales ubicadas en la línea de costa del malecón. Sin embargo, solo se consideran para el cálculo de rebase las doce más cercanas a la costa que son las que se ubican detrás de los rompeolas y delante de las bermas o del muro, como se muestra en la figura 13.

Según se reporta en distintos medios, las inundaciones en este tramo del malecón producidas por el huracán Wilma 2005 comenzaron a las 09:00 horas (UTC) del 23 de octubre de 2005 y duraron hasta las 22:00 horas (UTC) del 24 de octubre de 2005, esto contabiliza 37 horas. En este tiempo se determina la tasa de rebase del oleaje de las siete alternativas de solución propuestas.

En la tabla 3, se muestra la longitud de los quince tramos, la boya asociada, así como el modelo matemático determinístico que se emplea, según la tipología de obra de defensa correspondiente para determinar el rebase. En la tabla 3 se señala el modelo paramétrico aplicado según la denominación expresada en las tablas 1 y 2.



Figura 13. Segmentación de la zona de estudio

Tabla 3. Fórmulas para el cálculo del rebase por tramo

Alternativa		Boya	1	2	3	4	5	6	7
Tramo	L (m)		1	2	3	4	5	6	7
1	130	4	MV	MC	MC	MC + B "	MC + B	MV	MC + B
2	220	9	MV	MC	MC	MC + B "	MC + B	MV + RO	MC + RO
3	275	5	MV	MC	MC	MC + B "	MC + B	MV	MC + B
4	113	10	MV	MC	MC	MC	MC	MV + RO	MC + RO
5	78	6	MV	MC	MC	MC + B "	MC + B	MV	MC + B
6	120	11	MV	MC	MC	MC	MC	MV + RO	MC + RO
7	106	7	MV	MC	MC	MC + B "	MC + B	MV	MC + B
8	110	12	MV	MC	MC	MC	MC	MV + RO	MC + RO
9	65	-	MV*	MC*	MC*	MC*	MC*	MV*	MC*
10	100	13	MV*	MC*	MC*	MC*	MC*	MV + RO *	MC + RO *
11	70	-	MV*	MC*	MC*	MC*	MC*	MV*	MC*

12	120	14	MV*	MC*	MC*	MC*	MC*	MV + RO *	MC + RO *
13	80	-	MV*	MC*	MC*	MC*	MC*	MV*	MC*
14	100	15	MV*	MC*	MC*	MC*	MC*	MV + RO *	MC + RO *
15	118	8	MV	MC	MC	MC + B "	MC + B	MV	MC + B

*: La expresión está afectada por el coeficiente 0,88 que tiene en cuenta la berma natural.
 ": La expresión está afectada por un coeficiente de corrección (relación que existe entre el factor de descarga para el muro a la cota actual (+ 3,96 m), y el factor de descarga para el muro a la cota (+ 4,46 m).
 -: No hay boya representada, se tomaron los valores promedios de las boyas laterales.
 MV: Fórmula para muro vertical; MC: Fórmula muro curvo ; MV+Berma: Fórmula muro vertical más berma; MC+Berma: Fórmula muro curvo más berma; MV+RO: Fórmula muro vertical más rompeolas; MC+RO: Fórmula muro curvo más rompeolas.

Análisis de los resultados del sobrepaso del oleaje para las diferentes alternativas

Del cálculo del rebase promedio, se obtienen los hidrogramas para cada tramo, según la alternativa.

A continuación, se muestra en las figuras 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 los hidrogramas del rebase que genera el huracán Wilma 2005, en los quince tramos que se divide la zona de estudio para cada alternativa durante las 37 horas escogidas.

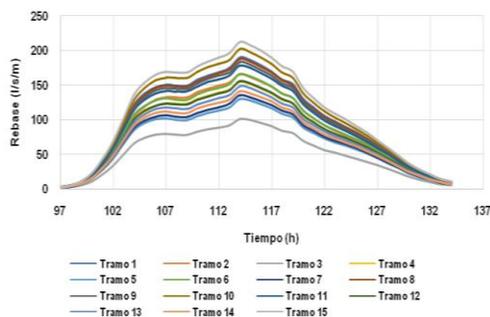


Figura 14. Hidrogramas de los quince tramos de la alternativa 1

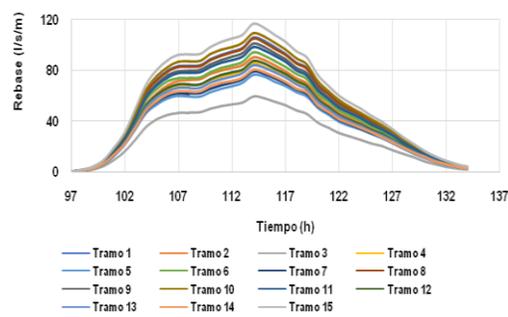


Figura 15. Hidrogramas de los quince tramos de la alternativa 2

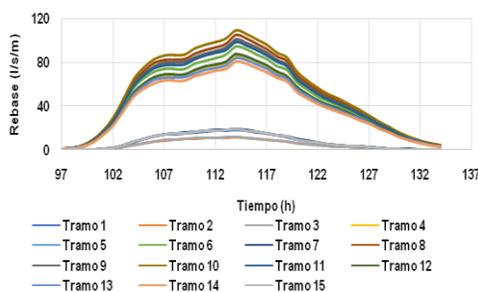


Figura 16. Hidrogramas de los quince tramos de la alternativa 3

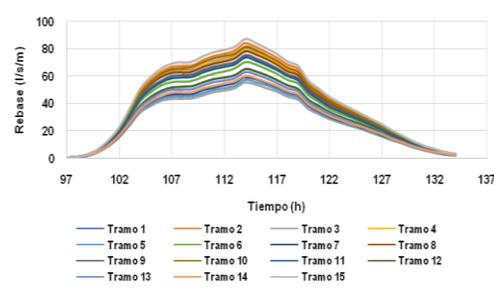


Figura 17. Hidrogramas de los quince tramos de la alternativa 4

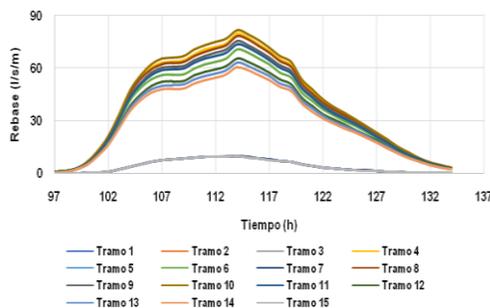


Figura 18. Hidrogramas de los quince tramos de la alternativa 5

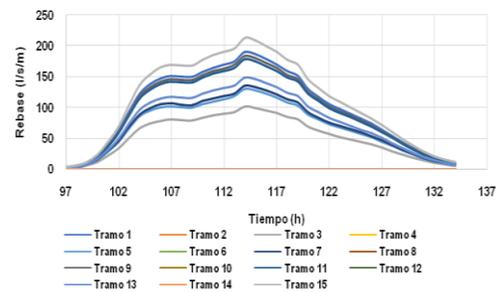


Figura 19. Hidrogramas de los quince tramos de la alternativa 6

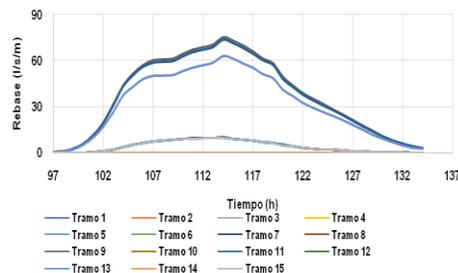


Figura 20. Hidrogramas de los quince tramos de la alternativa 7

Se observa como las curvas en las figuras 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20 forman una campana, es decir, para las primeras horas aumentan sus niveles, hasta llegar a un pico, siempre en la hora 114 que representa las 02:00 horas (UTC) del 24 de octubre de 2005 y luego disminuyen. Esto da una medida del comportamiento del rebase promedio por tramo, según la alternativa.

Análisis del tipo de daño según el caudal de sobrepaso

Basado en los resultados de las modelaciones físicas realizadas por Franco et al. (1994) que presentan tasas admisibles de rebase, así como el nivel de daño asociado, se realiza un análisis de los máximos rebases por unidad de longitud obtenidos en el estudio de cada tramo según la alternativa para dar a conocer los tramos más críticos, el nivel de daño y el porcentaje de reducción que se obtiene con cada obra de defensa costera empleada, respecto a la Alternativa 1: Muro de sección transversal vertical a la cota actual.

Tasas admisibles de rebase y niveles de daño según Franco et al (1994)

1. Para descargas menores de 1 l/sm el acceso al lugar no es peligroso, pero se debe tener cuidado (NP).
2. Para descargas mayores de 1,00 l/sm el acceso al lugar es peligroso (P).
3. Para descargas mayores de 10,00 l/sm el acceso a la zona es imposible (AI).
4. Para descargas mayores de 50,00 l/sm comienzan a ocurrir daños en la cresta del muro, aunque este haya sido protegido (DCM).
5. Para descargas mayores a 200,00 l/sm existirán daños en el pavimento (DP).

En la alternativa 1, los tramos más críticos son el 15 (Tacón) con 212,58 l/sm y el 10 (Crespo) con 201,89 l/sm, donde acurren DP. En el resto de los tramos solo ocurren DCM, siendo los menos afectados el 5 (Perseverancia) con 129, 8 l/sm y el 3 (Gervasio) con 101,32 l/sm.

En todos los tramos de las alternativas 2 y 3 se reduce el nivel de daño respecto a la alternativa 1, manifestándose DCM. Se mantienen como más críticos, según el rebase máximo, los tramos 15 (Tacón) y 10 (Crespo). Es necesario señalar que el sobrepaso del oleaje de la alternativa 2 es mayor que el de la alternativa 3. El porcentaje de reducción que se alcanza con la alternativa 2, oscila entre 45,83 % y 40,92 %. Al emplear la alternativa 3 asciende a 59,50 % y 45,28. %

Del análisis de los resultados de la alternativa 4, el tramo 10 (Crespo) con 109,36 l/sm donde la tipología de defensa costera es la elevación del muro curvo a la cota + 4,46 m más berma natural y el 8 (Blanco) con 104,82 l/sm, defendido por el muro curvo a la cota + 4,46 m, son los más críticos y junto con otros 7 con iguales defensas a las antes mencionada, sufren DCM. En los 6 restantes tramos, donde se incorporó berma artificial, disminuye el sobrepaso del oleaje, deja de afectarse la estructura y el acceso a la zona es imposible. Los gastos mínimos se observan en el tramo 3 (Gervasio) con 11,61 l/sm y 2 (Parque Maceo) con 11,37 l/sm. Se logra una reducción del rebase entre 93,13 % y 42,8 %. Para disminuir las inundaciones costeras en los tramos más críticos, se recomienda colocar berma artificial.

En la alternativa 5, los tramos 4 (Lealtad), 6 (Manrique), 8 (Blanco), 9 (Águila), 10 (Crespo), 11 (Industria), 12 (Consulado) y 13 (Genios), que están protegidos por el muro curvo a la cota + 4,46 m y en algunos por una berma artificial sufren DCM. En los tramos 10 (Crespo) con tipología: muro curvo a la cota + 4,46 m más berma natural y el 4 (Lealtad) con muro curvo a la + 4,46 m se obtienen los máximos caudales de sobrepaso: 81,76 l/sm y 79,40 l/sm respectivamente. Los tramos 15 (Tacón) con 9,63 l/sm, 2 (Parque Maceo) con 9,62 l/sm, defendidos por el muro curvo a la cota + 4,46 m más berma artificial, son señalados como los menos críticos, y en 4 restantes, el acceso al lugar es P. El porcentaje de reducción alcanzado oscila entre 95,47 % y 48,70 %. Es recomendable para la propuesta de nuevas alternativas ubicar berma artificial.

Antes de analizar los resultados de la alternativa 6, señalar que tiene rompeolas como obra de defensa costera en los tramos pares, en estos se evidencia mayor sobrepaso del oleaje. Se destacan con mayores gastos los tramos 15 (Tacón) con 212,58 l/sm donde ocurren DP como en la alternativa 1, le sigue el tramo 1 (Hospital) con 189,88 l/sm más otros 6 que se ven afectados con DCM. Los tramos 14 (Prado), 12 (Consulado), 10 (Crespo), 8 (Blanco) y 6 (Manrique), todos con 0,02 l/sm y los tramos 4 (Lealtad), 2 (Parque Maceo) con 0,04 l/sm ambos, se destacan por ser los menos críticos. Esto se debe efecto de los rompeolas empleados. El porcentaje de reducción asciende de 99,99 % y 99,98 % respectivamente en los tramos pares. Se recomienda la simulación numérica en dos dimensiones colocando las estructuras, de esa forma evaluar su compartamiento, y posteriormente avalar los resultados mediante modelación física, debido a la complejidad de los fenómenos que se manifiestan, dígame refracción, difracción y reflexión del oleaje.

La alternativa 7 se destaca como la más eficiente desde el punto de vista funcional por estar combinada estructuralmente con todas las tipologías de obras de defensa costeras evaluadas en la modelación física. Como tramos más críticos se destacan el 9 (Águila) con 75,32 l/sm, 11 (Industria) con 73,57 l/sm y el 13 (Genios) con 62,960 l/sm, todos con bermas naturales delante del muro. Como los gastos se encuentran entre 200,00 l/sm y 50,00 l/sm, la estructura sufre DCM. Los porcentajes de reducción para los mismos son 58,9 %, 58,73 % y 57,56 % respectivamente. Los tramos 3 (Gervasio), 5 (Perseverancia), 7 (Galiano), 1 (Hospital) y 15 (Tacón) están protegidos por el muro curvo a la cota + 4,46 m y una berma artificial. Los gastos

oscilan entre 9,85 l/sm y 9,82 l/sm por lo que el acceso al lugar es P. Los porcentos de reducción van de 95,47 % y 90,28 %. Entre los tramos menos críticos están los protegidos por el muro curvo a la cota + 4,46 m más rompeolas, dichos tramos son los pares, todos con 0,04 l/sm y para acceder al lugar debe ser con cuidado (NP). Los porcentos de reducción que se alcanzan en los mismos varían entre 99,97 % y 99,98 %. Para reducir los valores de rebases en los tramos más críticos se recomienda la colocación de bermas artificial, o estudiar la colocación de segmentos de rompeolas sumergidos entre los rompeolas de baja cresta colocados.

Análisis del volumen del sobrepaso por tramo

Partiendo de la figura 21 se realiza un análisis del volumen de sobrepaso obtenido en el estudio de cada tramo durante 37 horas según la alternativa, considerando la longitud de cada tramo para dar a conocer los tramos más críticos, el nivel de daño y el porcentaje de reducción que se obtiene con cada obra de defensa costera empleada, respecto a la Alternativa 1: Muro de sección transversal vertical a la cota actual.

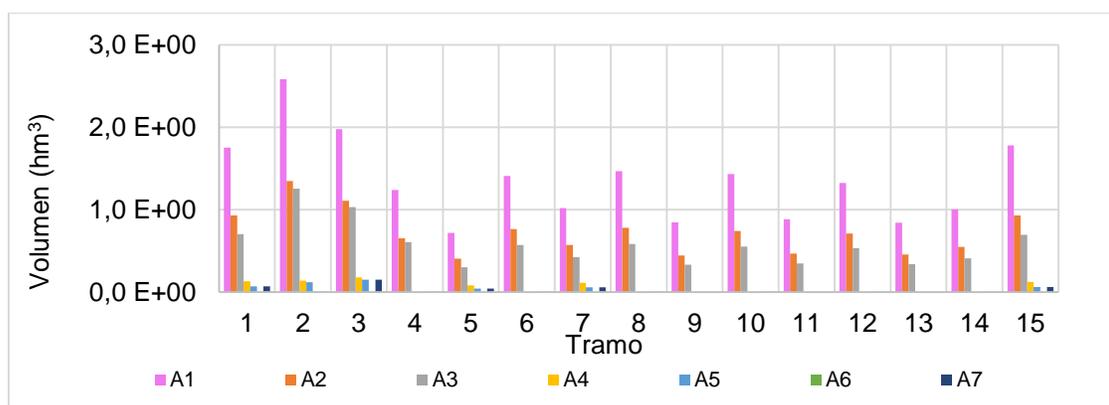


Figura 21. Volumen de sobrepaso de cada tramo según la alternativa

Comparando los volúmenes de sobrepaso, los 5 tramos más críticos en orden decentes son: el 2 (Parque Maceo) con 2,58 hm³, el 3 (Gervasio) con 1,98 hm³, el 15 (Tacón) 1,78 hm³, el 1 (Hospital) 1,75 h m³, el 8 (Blanco) con 1,43 hm³.

Se puede destacar que los tramos más críticos y comunes entre los dos análisis realizados hasta ahora «Análisis del tipo de daño según el caudal de sobrepaso» y «Análisis del volumen del sobrepaso por tramo», son el 15 (Tacón), 1 (Hospital) y 8 (Blanco). La particularidad de que el tramo 2 no coincida, y sea el de mayor volumen de sobrepaso, se debe a que el volumen se define como el gasto específico unitario por la longitud, y este tramo, de los tres tiene mayor longitud: 220 m.

A continuación, se muestra la figura 22 que representa en azul el volumen de sobrepaso total (hm³) de cada alternativa, mientras que en rojo el porcentaje de reducción alcanzado para cada escalón de defensa respecto a la situación actual.

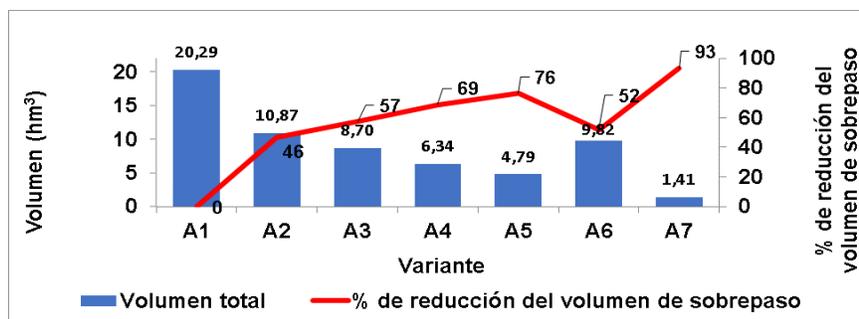


Figura 22. Volúmenes de sobrepaso y porcentaje de reducción para toda la zona

Se observa en la figura 22 como la solución escalonada que se propone produce una reducción en los volúmenes de sobrepaso. La alternativa 6 es una particularidad porque rompe la tendencia decreciente de los escalones en lo referido a el valor de sobrepaso promedio, en este análisis se ratifica la eficiencia de los rompeolas empleados en los tramos pares y la necesidad del empleo de una tipología de defensa en los impares. Si comparamos esta alternativa con la alternativa 3, se puede decir, que el sobrepaso que permite es mayor en 1,12 hm³. Con la alternativa 7, se obtiene un porcentaje de reducción del 93 % respecto a la alternativa 1 lo que demuestra que es la más efectividad de las tipologías empleadas en cuanto a la disminución de la tasa del rebase.

Estos resultados son similares a los conseguidos en la modelación física. Para la alternativa de muro curvo se obtuvo una reducción del 45 % y en este análisis un 46 %. Al incorporar la berma artificial se logró un porcentaje de reducción que oscila entre el 60 % y el 90 % y ahora un 76 %. Para la solución final se alcanzó un 94 % y en esta investigación un 93 %.

CONCLUSIONES

- Se obtienen seis modelos matemáticos determinísticos para el cálculo de la tasa de rebase promedio para diferentes tipologías de obras de defensa de costa en el malecón de La Habana a partir del análisis de las pruebas de modelación física.
- Del cálculo del sobrepaso se definen como los tramos más críticos, coincidiendo en las alternativas 1, 6, 2 y 3 el tramo 15 (Tacón), con 212,58 l/sm, 212,58 l/sm, 116,50 l/sm, 87,09 l/sm respectivamente, por lo que ocurren daños en el pavimento en los dos primeros casos y en los dos últimos comienzan a ocurrir daños en la cresta del muro. En las alternativas 4, 5 se encuentra el tramo 10 (Crespo) con 109,36 l/sm y 81,76 l/sm respectivamente, por lo que ocurren daños en la cresta del muro. En la variante 7 se encuentra el tramo 9 (Águila) con 75,32 l/sm.
- Del análisis del volumen de sobrepaso total:
- Se determinó que las alternativas 2, 3, 4, 5, 6, y 7 alcanzan un porcentaje de reducción de 46 %, 57 %, 69 %, 76 %, 52 % y 93 % respectivamente, en comparación con la alternativa 1.
- Se recomienda:
 - Incorporar bermas artificiales en los tramos que se haya considerado berma natural.
 - Estudiar la colocación de segmentos de rompeolas sumergidos entre los rompeolas de baja cresta colocados.
 - Realizar una simulación numérica en dos dimensiones colocando las estructuras, de esa forma evaluar su compartamiento, y posteriormente avalar los resultados mediante modelación física, debido a la complejidad de los fenómenos que se manifiestan, dígase refracción, difracción y reflexión del oleaje.

REFERENCIAS

- Córdova L.** (2010). “Estimación de la tasa de sobrepaso promedio de oleaje para muros costeros de sección transversal curva”, *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 31, no. 3, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.
- Córdova L., Buccino M., Salerno D., Pugliese E., Torres R., Capobianco A., Ponce M.** (2016). Reporte Técnico. “Análisis de los resultados de los estudios mediante modelación física del rebase del oleaje, presiones sobre los muros costeros y estabilidad de los elementos que componen las bermas y rompeolas. Propuesta de Solución”, Centro de Investigaciones Hidráulicas de la Universidad Tecnológica de La Habana, La Habana, Cuba.
- Córdova L., y Torres R.** (2017). Reporte Técnico. “Modelación matemática en 2D en la zona del “Malecón Tradicional” para la determinación de la efectividad de las soluciones de las estructuras costeras con el fin de reducir el rebase del oleaje”. Centro de Investigaciones Hidráulicas de la Universidad Tecnológica de La Habana, La Habana, Cuba
- Franco L., de Gerloni M. and Van der Meer J. W.** (1994). “Wave overtopping on vertical and composite breakwaters”. *Proc. 24th Int. Conf. on Coastal Eng. Kobe. Japan.* Pp 1030-1044.
- González P. V. y Córdova L.** (2019). “Aplicación del sistema computacional SICOM en la costa norte de Cuba”, *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 40, no. 2, ISSN 1680-0338, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.
- Gutierrez A. M.** (2012). “Simulación de las inundaciones costeras en la zona del Malecón tradicional. Propuesta de Solución”, Trabajo de Diploma (en opción al título de Ing. Hidráulico), Fac. de Ing. Civil, Inst. Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba.
- Hagen S., Westerink J. J., Kolar R. L. and Horstmann O.** (2001). “Two-dimensional, unstructured mesh generation for tidal models”, *Internacional Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 35, no. 6, pp. 669-686, ISSN 0271-2091, John Wiley & Sons, Ltd., U.S.A.
- Holthuijsen L. H., Booji N., Haagsma J. G., Kieftenburg A. T. M. M, Ris R. C, Van Der Westhuysen A. J. and Zijlema M.** (2004). “SWAN Cycle III version 40.41 user’s manual”, Delft University of Technology Press, Delft, The Netherlands.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Luis Fermín Córdova López <https://orcid.org/0000-0001-8175-6819>

Realizó contribuciones en la interpretación de los datos. Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del informe final.

Yailin Fernández González <https://orcid.org/0000-0001-7263-7412>

Trabajó en el procesamiento de los datos haciendo contribuciones en su análisis e interpretación. Participó en la búsqueda de información y en la redacción final.