

Modelación numérica de la propagación del oleaje en el Malecón Tradicional de La Habana mediante el modelo numérico SWAN

Kevin Cruz BatistaE-MAIL: cruzbatistakevin@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE). La Habana, Cuba.

Emilio Escartín Sauleda

E-MAIL:

Departamento de Geociencias. Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE). La Habana, Cuba.

Patricia Ruth de Horta Brito

E-MAIL:

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE). La Habana, Cuba.

Luis F. Córdova LópezE-MAIL: cordova@tesla.cuaje.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE). La Habana, Cuba.

RESUMEN

Se presenta una investigación integral centrada en la modelación numérica de la propagación del oleaje hacia el Malecón Tradicional de La Habana. El estudio define las condiciones de frontera mediante la caracterización del clima marítimo y los niveles del mar, para luego establecer el modelo SWAN sobre mallas de cómputo anidadas. Los resultados analizan el comportamiento de la altura de ola significativa bajo diferentes escenarios meteorológicos y direcciones de ataque, determinando las profundidades límites y los tramos más vulnerables de la estructura. Este trabajo establece las bases hidrodinámicas necesarias para la futura modelación física en 3D de alternativas de protección costera.

PALABRAS CLAVE: *SWAN, Malecón de La Habana, clima marítimo, modelación numérica, propagación de oleaje*

Numerical wave propagation modeling at the Traditional Havana Malecón using the SWAN model

ABSTRACT

Comprehensive research focused on the numerical modeling of wave propagation towards the Traditional Havana Malecón is presented. The study defines the boundary conditions through the characterization of the maritime climate and sea levels, to then establish the SWAN model on nested computational grids. The results analyze the behavior of the significant wave height under different meteorological scenarios and attack directions, determining the limit depths and the most vulnerable sections of the structure. This work establishes the necessary hydrodynamic bases for future 3D physical modeling of coastal protection alternatives.

KEYWORDS: *SWAN, Havana Malecón, maritime climate, numerical modeling, wave propagation*

01 INTRODUCCIÓN

El litoral norte de la Ciudad de La Habana, y específicamente el sector del Malecón Tradicional, constituye una zona de valor estratégico, socioeconómico y cultural incalculable para Cuba. Sin embargo, su configuración geográfica lo hace altamente vulnerable a eventos hidrometeorológicos extremos como frentes fríos, bajas extrat-

ropicales y huracanes de gran intensidad. Estos fenómenos generan inundaciones costeras severas por rebase del oleaje, las cuales se ven acentuadas por la estrechez de la plataforma insular y los efectos del cambio climático, manifestados en el ascenso acelerado del nivel medio del mar.

Esta investigación integral se ha estructurado en fases fundamentales que combinan la modelación numérica avanzada con la modelación física a escala.

En el presente trabajo, el objetivo central es establecer la plataforma técnica, las condiciones de frontera y la propagación de oleaje hacia aguas someras mediante la configuración del modelo numérico SWAN (Simulating Waves Nearshore). Se aborda de manera profunda la caracterización del clima marítimo en aguas profundas y la determinación de los niveles del mar bajo diferentes periodos de retorno. Asimismo, se detalla la construcción de las mallas de cómputo anidadas y el análisis de resultados, definiendo los escenarios de diseño que permitirán, en última instancia, proponer soluciones de ingeniería robustas para la protección de la capital.

02 MÉTODOS

2.1. Breve caracterización de la zona de estudio

El Malecón de La Habana constituye un sistema de defensa costera de 7,23 km de longitud, extendiéndose desde el Castillo de la Chorrera hasta la entrada de la Bahía. Su construcción, ejecutada entre 1901 y 1959 ganando terreno al mar sobre accidentes geográficos como la antigua Caleta de San Lázaro, presenta una estructura heterogénea con una altura media de coronación de 3,9 m sobre el nivel del mar. La zona se asienta sobre una plataforma insular extremadamente estrecha, lo que maximiza el impacto del oleaje y favorece rebases severos, agravados por un estado técnico que muestra socavaciones en el muro y el vial debido a décadas de explotación y exposición constante. Hidráulicamente, el área es altamente vulnerable debido a la presencia de 33 drenes pluviales (17 de ellos de gran sección) que en la actualidad operan mayoritariamente semisumergidos por el ascenso del nivel medio del mar inducido por el cambio climático. Ante la alta densidad de infraestructura hotelera, turística y residencial de alto valor patrimonial, y considerando el registro histórico de 1271 frentes fríos en las últimas 60 temporadas (de los cuales 85 han sido clasificados como fuertes), la investigación mantiene la subdivisión técnica en seis tramos críticos establecida en 1993 por el Grupo de Expertos de la capital (Fig. 2.1), basándose en criterios de exposición al oleaje, altura del muro y la influencia de las desembocaduras del río Almendares y la entrada de la Bahía (Córdova López, 2017; León Arias, 2023).

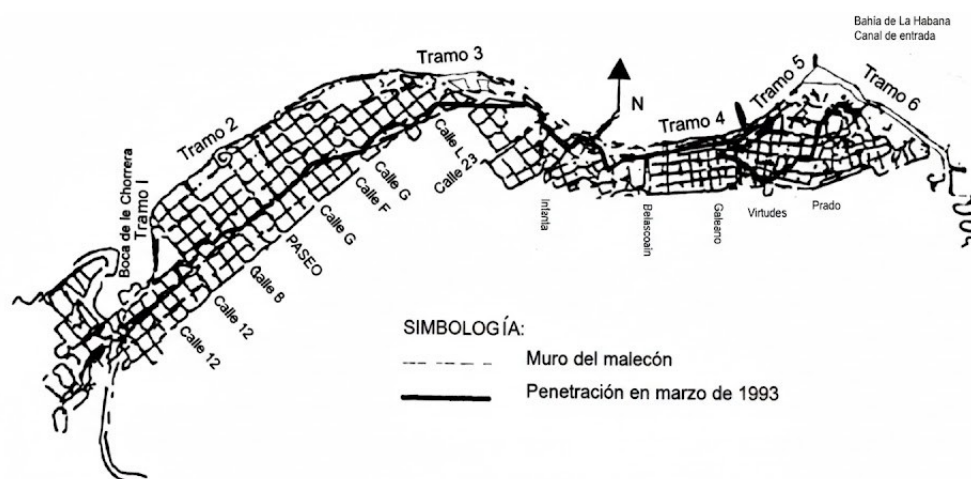


Figure 2.1. Vista en planta del malecón de La Habana y su división por subtramos.

2.2. Definición del clima marítimo y niveles del mar

En este apartado se analiza la información de clima marítimo para determinar los niveles del mar según diferentes periodos de retorno y el comportamiento del oleaje en aguas profundas basándose en fuentes como INSMET

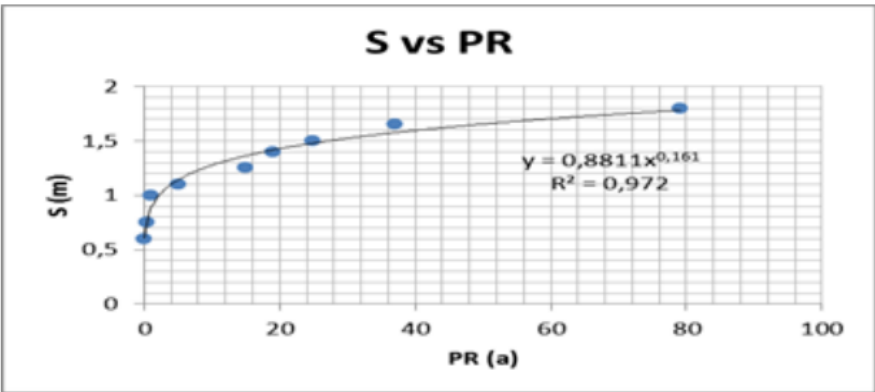
(2011, 2015), Geocuba (2011) y Global Wave Statistics (Hogben et al., 1985; Mitrani & Pérez, 1994; Morales et al., 1995).

Niveles del mar

Se considera la surgencia y la marea astronómica para relacionar la sobreelevación del mar con el período de retorno (Córdova López, 2017) (ver Fig. 2.2).

Table 2.1. Sobreelevación del mar según el periodo de retorno.

PR (años)	5	10	25	50	75	100
S (m)	1,15	1,29	1,49	1,68	1,79	1,88



PR (años)	5	10	25	50	75	100
S (m)	1,15	1,29	1,49	1,68	1,79	1,88

Figure 2.2. Sobreelevación del mar (m) vs periodo de retorno (PR) en años. Fuente: Pérez et al. (2015) (Pérez et al., 2015).

Marea y cambio climático

Se define el valor de la pleamar máxima (HHW) en 0,40 m respecto al nivel medio del mar (MSL) para la temporada de huracanes. La Tabla 2.2 muestra el comportamiento detallado de la marea astronómica (Pérez et al., 2015).

Table 2.2. Marea astronómica anual y en época de huracanes en la zona de estudio.

Referente a:	Año		Temporada de huracanes	
	MLLW (m)	MSL (m)	MLLW (m)	MSL (m)
Máximo HHW	0,58	0,40	0,58	0,40
Máximo LLW	-0,15	-0,33	-0,12	-0,30

Fuente: Adaptado de INSMET (Pérez et al., 2015).

De acuerdo con el macroproyecto nacional, se estima una sobreelevación por cambio climático de +0,29 m para 2050 y +0,95 m para 2100 (AMA, 2005).

2.3. Análisis del oleaje en aguas profundas

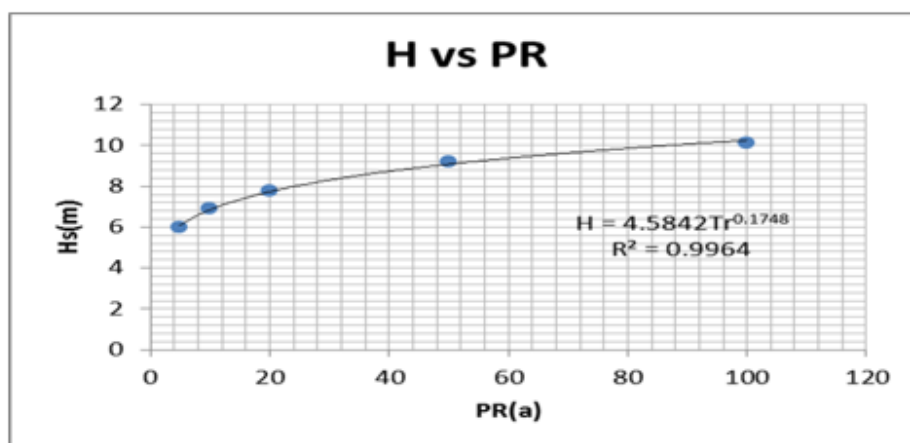
Para desarrollar el estudio de propagación del oleaje, se realizó una comparación entre las fuentes INSMET (2011, 2015), Geocuba (2011) y Global Wave Statistics, las cuales describen el comportamiento del oleaje en aguas profundas.

Comparativa de fuentes nacionales (INSMET y Geocuba)

En la Tabla 2.3 se comparan los parámetros de ambas instituciones.

Table 2.3. Comparativa de condiciones de oleaje según INSMET (2011) y Geocuba (2011).

PR (años)	INSMET (2011)		Geocuba (2011)	
	H_s (m)	T_p (s)	H_s (m)	T_p (s)
10	7,75	10,57	3,64	6,9
20	9,06	10,98	4,08	7,3
50	10,34	11,04	4,68	7,7
100	11,93	11,55	5,16	8,0



PR (años)	5	10	20	50	100
H_s (m)	6,0	6,9	7,8	9,2	10,1

Figure 2.3. Altura de ola significativa (m) en aguas profundas vs periodo de retorno (INSMET 2015).

Global Wave Statistics y ajuste probabilístico

Los datos se presentan en histogramas estacionales (Fig. 2.4). Para procesar estos datos, se utilizó el enfoque de distribución inicial mediante una distribución log-normal, obteniendo coeficientes $R^2 > 0,995$. La probabilidad de excedencia se expresa mediante la ecuación (2.1):

$$P(H_s > h) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln h - \mu}{\sigma}\right) \quad (2.1)$$

donde Φ es la función de distribución acumulada normal estándar, μ y σ son la media y la desviación estándar del logaritmo de la altura de ola, respectivamente.

Al contrastar todas las fuentes (Fig. 2.6), se evidencia que los datos de Geocuba (2011) subestiman la energía del oleaje. Los registros del INSMET muestran mayor coherencia con la fuente internacional. Por ello, se

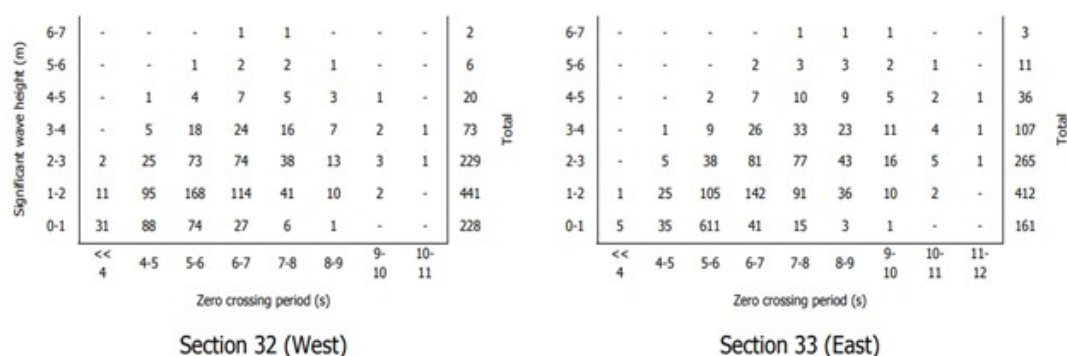


Figure 2.4. Histogramas de olas (Global Wave Statistics).

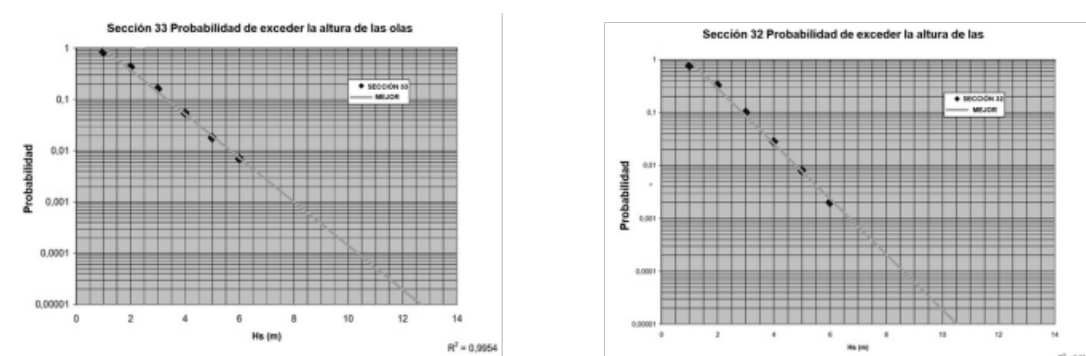


Figure 2.5. Probabilidades de excedencia de la altura de las olas (ajuste Log-normal).

seleccionan los datos del INSMET (2015).

2.4. Materiales y métodos

Los materiales empleados fueron suministrados por el Grupo de Ingeniería Costera y Marítima del CIH, CUJAE, en colaboración con el INRH (Pérez et al., 2015).

Características batimétricas y línea de costa

Se utilizaron 16 planos batimétricos elaborados por Geocuba Estudios Marinos (escalas 1:5000 y 1:500). El fondo predominante se compone de fango y conchuela. La zona de estudio se enmarca entre las calles Marina y Prado (Fig. 2.7).

2.5. Descripción del modelo numérico SWAN

Para la simulación de la propagación del oleaje en la zona de estudio, se utilizó el modelo numérico SWAN (Simulating Waves Nearshore). Este es un modelo espectral de tercera generación diseñado para la obtención de parámetros del oleaje en áreas costeras, lagos y estuarios a partir de vientos, batimetría y corrientes.

Ecuación fundamental de balance de acción

A diferencia de los modelos de fase resuelta, SWAN se basa en la ecuación de balance de la acción de la ola. La densidad de acción se define como $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$, donde σ representa la frecuencia relativa y θ la dirección de la ola. Se utiliza la acción en lugar de la energía debido a que, en presencia de corrientes, la densidad de acción se conserva mientras que la energía no (Holthuijsen, 2005).

La ecuación cinemática de balance de acción en coordenadas cartesianas se expresa como:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(c_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta N) = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (2.2)$$

Donde los términos del miembro izquierdo representan: $\partial N/\partial t$, la tasa de cambio local de la densidad de

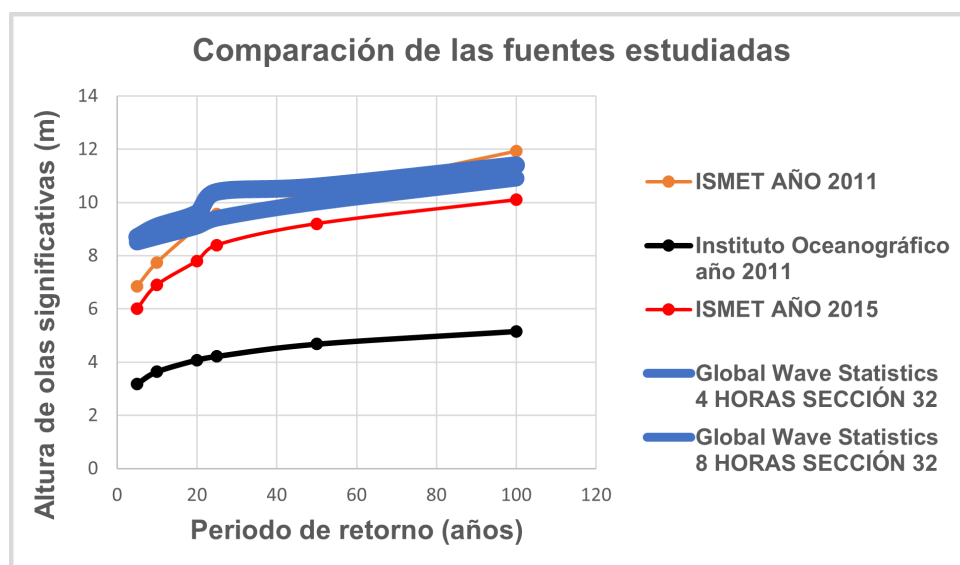


Figure 2.6. Comparación de alturas significativas entre las fuentes estudiadas.



Figure 2.7. Zonas de levantamiento batimétrico: General (1:5000) y Malecón Tradicional (1:500) (Hernández, 2019; Pérez et al., 2015).

acción en el tiempo; los términos en x e y , la propagación espacial de la acción en el espacio geográfico (con velocidades de grupo c_x y c_y); el término en σ , el desplazamiento de la frecuencia relativa debido a variaciones en la profundidad y corrientes; y el término en θ , la refracción inducida por la profundidad y las corrientes.

Procesos físicos

El miembro derecho de la ecuación, S_{tot} , constituye el balance de los términos fuente que representan los procesos físicos de generación, disipación y transferencia de energía:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (2.3)$$

donde: S_{in} es la generación por viento; S_{nl3} y S_{nl4} son las interacciones no lineales entre ondas (tríadas y cuádrupletes); $S_{ds,w}$ es la disipación por *whitcapping*; $S_{ds,b}$ es la disipación por fricción con el fondo marino; y $S_{ds,br}$ es la disipación por rotura inducida por la profundidad.

Fenómenos que simula y limitaciones

El modelo simula procesos de refracción, asomeramiento (*shoaling*), y disipación por fricción y rotura. Sin embargo, presenta limitaciones: al ser un modelo de fase promediada, no simula olas individuales, sino la evolución del espectro estadístico; y la difracción se incluye mediante una aproximación y no es exacta en estructuras extremadamente complejas.

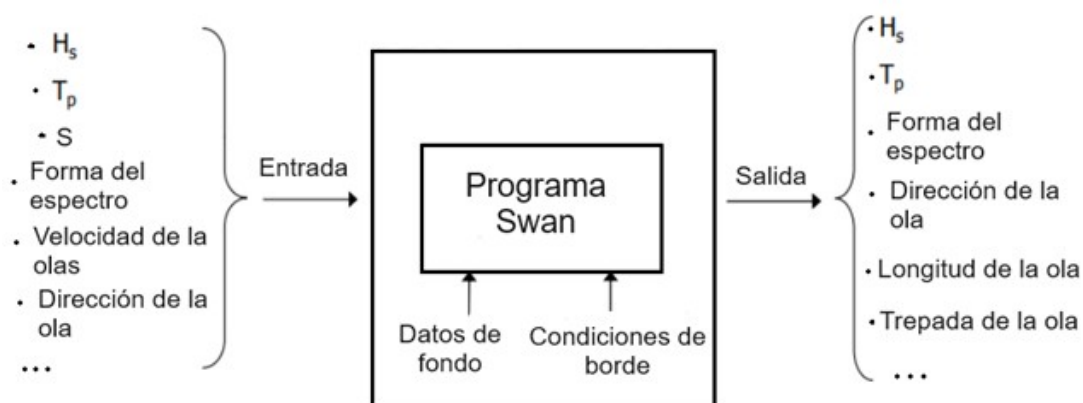


Figure 2.8. Vista esquemática de la aplicación del programa SWAN.

2.6. Establecimiento del modelo numérico

Utilizar el modelo numérico SWAN para una situación específica significa haber ajustado el modelo a las condiciones ambientales y la geografía locales, y puede implicar el empleo de múltiples cuadrículas anidadas. Por lo tanto, al proporcionar datos de entrada, SWAN puede generar resultados que sean específicamente válidos para el caso considerado. Para el caso de este informe, las partes más importantes del modelo SWAN son los conjuntos de datos de fondo para ambas cuadrículas, y los parámetros de entrada más importantes son la altura significativa de las olas, nivel del mar, el período de las olas y la dirección de estas. También se deben tomar decisiones sobre las velocidades y direcciones del viento. La mayoría de los parámetros de cálculo del programa se pueden dejar en sus valores predeterminados (Baart, van Kruchten, et al., 2006).

Mallas de cómputo

Se definieron dos mallas de cómputo regulares. La primera es una **mallla gruesa** para la propagación en gran parte del litoral (Marina Hemingway hasta Rincón de Guanabo), con extensión de 25 075 m y resolución de 85 m (Fig. 2.9). La segunda es una **mallla fina** de detalle para el Malecón Tradicional (6000 m x 4000 m), con resolución de 15 m en X y 10 m en Y.

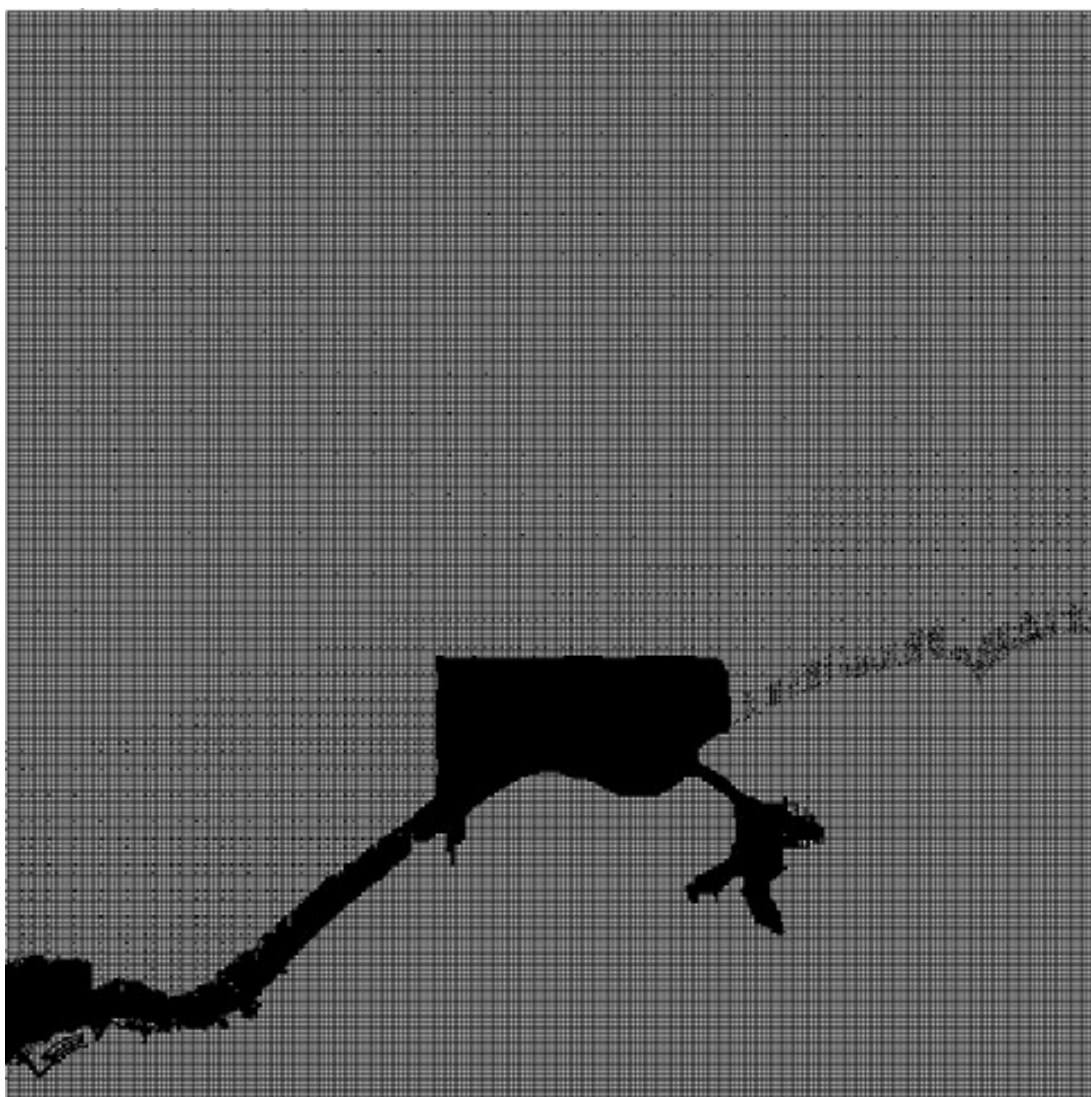


Figure 2.9. Malla de cómputo gruesa utilizada en la investigación.

Batimetría del modelo

La información batimétrica fue interpolada en ambas mallas de cómputo para representar las variaciones de profundidad del dominio (Fig. 2.10).

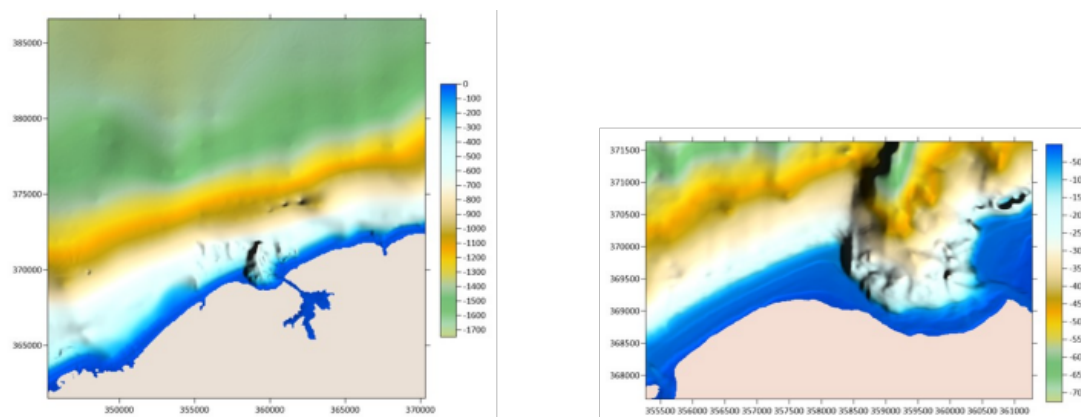


Figure 2.10. Batimetría interpolada para la malla gruesa (izq.) y malla fina (der.).

2.7. Definición del oleaje y niveles del mar

A partir de haber definido la caracterización del clima marítimo en aguas profundas y niveles del mar, se toman como fuente los datos del INSMET en el año 2015 y con ellos se crean los escenarios a simular.

A continuación, se muestran las alturas de olas significativas y niveles del mar con los que se estará llevando a cabo la simulación numérica, siendo 5 alturas de olas significativas y 3 niveles del mar, para los cuales se simulará en tres direcciones de oleaje N (norte), NE (noreste) y NW (noroeste), teniendo en cuenta que son las tres direcciones que influyen directamente en la zona de estudio, dando como resultado un total de 45 escenarios de propagación del oleaje hasta aguas someras (ver Tabla 2.4 y Tabla 2.5).

Table 2.4. Niveles del mar escogidos para la simulación numérica.

Periodo de retorno (años)	Nivel del Mar (m)
menor que 5 años	1
50 años más SEM 2050	1,97
WILMA más SEM 2050	2,3

Table 2.5. Alturas de olas significativas escogidas para la simulación numérica.

Periodo de retorno (años)	H_s (m) Aguas Profundas
menor que 5 años	4
5	6
25	8
50	9,2
100	10

03 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Selección de la profundidad límite para el modelo físico 3D

El análisis del comportamiento de la altura de ola significativa a lo largo de las isobatas de -50,0 m, -40,0 m, -30,0 m, -20,0 m y -10,0 m evidenció que, para alturas de ola en aguas profundas de 6,0 m y 10,0 m (dirección

Norte y nivel del mar de 1,0 m), no existen cambios disipativos notables hasta la isobata de -20,0 m (ver Fig. 3.1). Es a partir de la isobata de -10,0 m donde la altura de ola comienza a ser afectada significativamente por la fricción de fondo. Por consiguiente, se determinó que las profundidades de -20,0 m a -50,0 m son idóneas como límite de comienzo para la batimetría a reproducir en la futura modelación física en 3D.

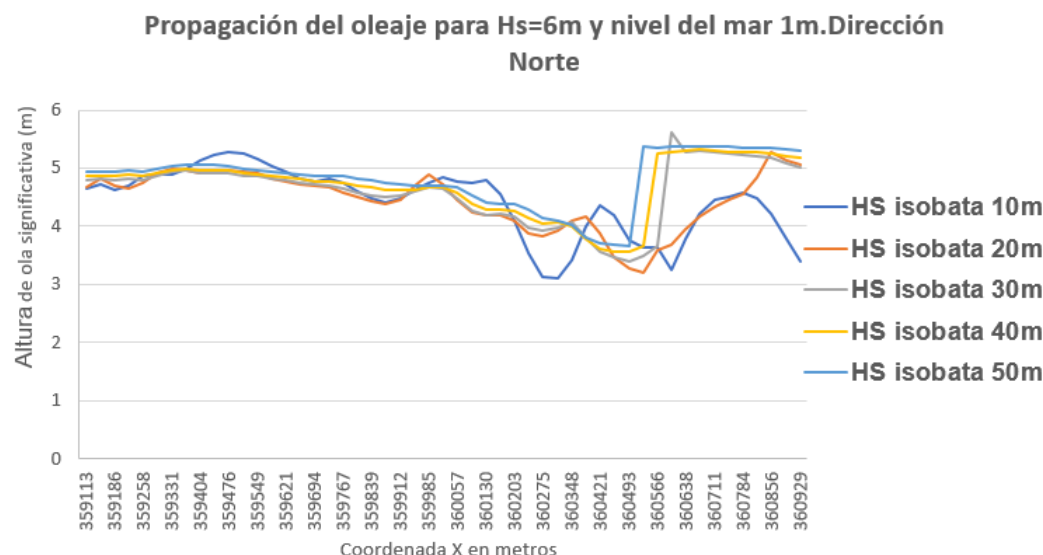


Figure 3.1. Comportamiento de la altura de ola significativa para diferentes profundidades.

3.2. Efecto de la dirección del oleaje y análisis por subtramos

Para definir el comportamiento del oleaje frente a la estructura, se modelaron las tres direcciones de ataque principales (Norte, Noroeste y Noreste) evaluadas en las isobatas críticas, bajo escenarios de periodo de retorno de 50 años. Los resultados de la modelación demostraron que las direcciones más desfavorables, generadoras de las mayores alturas de ola y potencial rebase, son la Norte y la Noroeste. De acuerdo con la respuesta hidrodinámica a lo largo de la costa, la zona de estudio se dividió en tres subtramos fundamentales (Fig. 3.2):

- Subtramo 1 (Calle Marina a Perseverancia): ante oleaje del Noreste, este tramo presentó alturas de ola significativas moderadas. Sin embargo, para la dirección Noroeste, los valores se incrementaron notablemente, oscilando entre 4,82 m y 6,07 m.
- Subtramo 2 (Calle Perseverancia a Blanco): resultó ser el más crítico bajo la dirección principal Norte. En este sector, para un periodo de retorno de 50 años, la altura de ola significativa alcanzó máximos de hasta 6,11 m en la profundidad de -4,0 m, concentrando la mayor energía de impacto contra el muro.
- Subtramo 3 (Calle Blanco a Prado): mostró una alta exposición ante oleajes de dirección Noroeste, registrando valores de altura de ola entre 4,77 m y 5,99 m.

Se constató además que, en aguas someras, la altura de ola es altamente sensible al incremento del nivel medio del mar; a mayor sobreelevación, menor disipación por rotura anticipada y mayor altura de ola incidente sobre el muro del Malecón (ver Fig. 3.3 y Fig. 3.4).

04 CONCLUSIONES

- El análisis comparativo del clima marítimo determinó que los registros analizados ofrecen la mayor representatividad estadística para la zona, definiendo un escenario crítico de altura de ola de 9,2 m para un periodo de retorno de 50 años.
- El establecimiento del modelo SWAN sobre mallas anidadas demostró que las direcciones de oleaje Norte y Noroeste son las más desfavorables para la infraestructura del Malecón Tradicional.
- El análisis espacial permitió subdividir la costa en tres tramos de comportamiento hidrodinámico difer-



Figure 3.2. Subtramos en que se divide la zona de estudio de acuerdo con el comportamiento de la altura de ola significativa frente a la estructura.

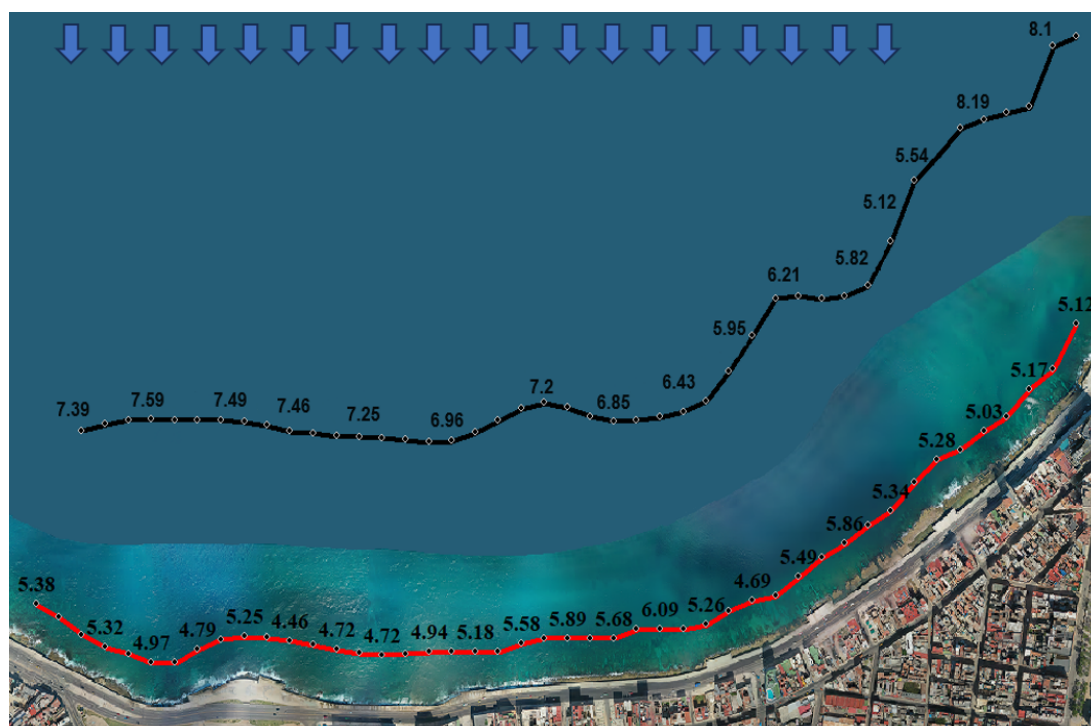


Figure 3.3. Efecto de la dirección norte en el oleaje para 50 años de periodo de retorno.

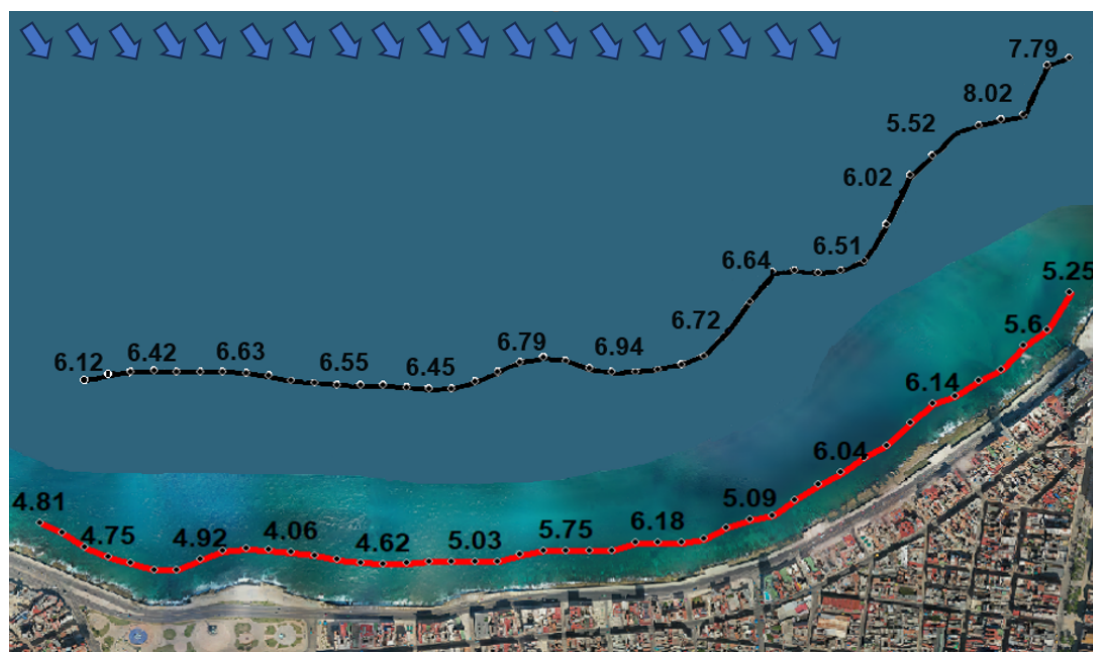


Figure 3.4. Efecto de la dirección noroeste en el oleaje para 50 años de periodo de retorno.

enciado, identificando al Tramo 2 (Perseverancia a Blanco) como el de mayor impacto bajo oleaje de componente Norte (máximo de 6,11 m).

- Se determinó que la batimetría a reproducir para los futuros modelos físicos en 3D debe iniciar en el rango de profundidades entre -20,0 m y -50,0 m, donde el oleaje aún no sufre alteraciones significativas por el fondo.

05 REFERENCIAS

- AMA. (2005). *Evaluación rápida de los efectos ambientales de las inundaciones costeras*. Agencia de Medio Ambiente. Cuba.
- Baart, S. A., van Kruchten, Y. J. G., et al. (2006). *Coastal defense for centro habana. integral coastal defense for section 4 of the malecón*.
- Córdova López, L. (2013). *Propuestas de obras de defensa de costas para el malecón tradicional* (Informe Técnico). Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Cujae. La Habana, Cuba.
- Córdova López, L. (2017). *Evaluación de diferentes alternativas de protección contra inundaciones costeras en el malecón tradicional de la habana* (Informe Técnico). Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Cujae. La Habana, Cuba.
- Córdova López, L., Buccino, M., Torres Hugues, R., Salerno, D., et al. (2016). Análisis de los resultados del estudio mediante modelación física del rebase del oleaje. propuesta de solución.
- Hernández, V. K. (2019). *Determinación de parámetros de diseño funcional en rompeolas sumergidos* [Tesis Doctoral]. CUJAE.
- Hogben, N., Dacunha, N. M. C., & Olliver, G. F. (1985). *Global wave statistics*. British Maritime Technology Limited.
- Holthuijsen, L. H. (2005). Wind waves, lecture notes ct5316.
- León Arias, D. (2023). *Determinación del rebase del oleaje aplicando el modelo xbeach, no hidrostático. caso de estudio malecón de la habana* [Tesis de Maestría]. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”.
- Mitrani, I., & Pérez, R. (1994). *Informe del instituto de meteorología sobre las características hidrometeorológicas del litoral*. Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba.

- Montero, D. A.** (2016). *Determinación del rebase del oleaje en el malecón tradicional habanero, mediante la aplicación del modelo matemático swash* [Trabajo de Diploma]. CUJAE.
- Morales, A., et al.** (1995). *Informe científico técnico especialidad de oceanografía, proyecto: Malecón habanero*. Instituto de Meteorología. La Habana, Cuba.
- Pérez, R., et al.** (2015). Niveles del mar y clima marítimo para el litoral habanero.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

ORCID de los autores

Kevin Cruz Batista	https://orcid.org/0009-0006-6386-7957
Emilio Escartín Saulea	https://orcid.org/0000-0001-6858-2877
Patricia Ruth de Horta Brito	https://orcid.org/0000-0001-6502-8205
Luis F. Córdova López	https://orcid.org/0000-0001-8175-6819