

Un tren de modelos matemáticos para la generación y propagación del oleaje

Dr. Ing. Luis Córdova López

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH).

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae).

email: cordova@tesla.cujae.edu.cu

RESUMEN

El trabajo presenta la implementación y evaluación de un tren de modelos matemáticos de amplio uso aplicado a la región occidental de la isla de Cuba. Para el forzamiento de los mismos se establecen tres fuentes de campos de vientos, los resultados de la simulación con el modelo meso-escala atmosférico MM5, los campos de vientos obtenidos del modelo global GFS brindados por la NOAA y los obtenidos del campo paramétrico de viento calibrado por el autor. Los modelos acoplados mediante la técnica de anidación son WW3 v3.14 de Tolman y el modelo SWAN v40.81 de Booij. Se toman como caso de estudio seis trayectorias de huracanes.

Palabras clave: costas, modelos matemáticos, olas.

A train of mathematical models for wave generation and wave propagation

ABSTRACT

The work presents the implementation and evaluation of a package of free mathematical models proving effectiveness for the western region of the Cuban island. For the driving of the models three sources of winds fields are settled down together with the results of the simulation with the atmospheric mesoscale model MM5, the wind fields obtained from GFS model toasted by the NOAA and those obtained from the parametric wind field calibrated by the author. The models being coupled by means of the nesting technique are WW3 v3.14 by Tolman and SWAN v40.81 by Booij. As a case study six trajectories of selected hurricanes are taken.

Keywords: coasts, mathematical models, waves.

INTRODUCCIÓN

El acoplamiento de modelos matemáticos con el objetivo de simular fenómenos complejos de la naturaleza, y en particular en el medio oceánico y costero incluyendo la fuente o los denominados forzadores que dan origen a la ocurrencia del fenómeno en sí, es una práctica actual por la comunidad científica mundial. El objetivo fundamental de esta práctica es dotar a las instituciones dedicadas al manejo de situaciones ambientales, tanto en condiciones normales como extremas, de una herramienta capaz de modelar de forma eficaz el fenómeno desde sus orígenes y evaluar sus efectos sobre un área en particular. Las denominadas Plataformas de Ingeniería Costera y Marítima son un ejemplo de ellos. El siguiente trabajo tiene como objetivo mostrar el desarrollo de una Plataforma o Sistema de Ingeniería costera y marítima.

MATERIALES Y MÉTODOS

Etapa I: Calibración del parámetro B del modelo de viento propuesto por Holland

Poder contar con un modelo paramétrico de viento es un elemento importante y necesario para la simulación de eventos a partir de la información mínima brindada por las estaciones meteorológicas. Su aplicación posibilita además la simulación de huracanes sintéticos, lo cual es de mucha ayuda para la toma de decisiones ingenieras y de otro tipo. A continuación se presenta una breve descripción del modelo de Holland (1980), así como la introducción de otros factores para hacer más real el modelo.

Este modelo plantea que la velocidad del viento con distribución radial se puede determinar a través de la ecuación (1).

$$V_c(r) = V_{m\acute{a}x} \sqrt{\left(\frac{R_{mw}}{r}\right)^B \exp\left[1 - \left(\frac{R_{mw}}{r}\right)^B\right]} \quad (1)$$

donde: $V_c(r)$: velocidad del viento con distribución radial (m/s), $V_{m\acute{a}x}$: velocidad máxima del viento (m/s), R_{mw} : Radio de máximos vientos (m), B : coeficiente de Holland (adimensional), r : radio respecto al centro del huracán (m).

Se selecciona para la determinación del radio de máximos vientos el método propuesto por Willoughby y Rahn (2004), ecuaciones (2), (3) y (4).

$$R_{mw} = 51,6 \cdot \exp^{(-0,0223 \cdot V_{max} + 0,0281 \cdot \varphi)} \quad (2)$$

$$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{\frac{B \cdot (pn - pc)}{\rho_e}} \quad (3)$$

$$V_{10} = k_m \cdot V \quad (4)$$

donde: pn : presión atmosférica (milibar), pc : presión en el centro de huracán (milibar), ρ_e : densidad del aire (kg/m^3), φ : latitud (grados), V_{10} : velocidad a 10 m sobre el nivel medio del mar (m/s), k_m : factor de corrección (adimensional).

Harper y Holland (1999) sugieren un valor de $k_m = 0,7$ para su modelo, mientras que Powell (1987) recomienda valores entre 0,75 y 0,80. Vickery et al. (2009) han demostrado que el valor del coeficiente k_m varía, disminuyendo su valor a medida que se aleja de la pared del ojo del huracán. En este trabajo se establece un valor de $k_m = 0,7$ para un radio menor que el radio de máximos vientos y $k_m = 0,6$ para distancias mayores.

Ángulo de entrada de flujo

Los modelos de vientos paramétricos asumen un patrón de flujo de viento circular. Una aproximación para el ángulo tangencial al flujo en función del radio fue determinado por Phadker et al. (2003), ecuaciones (5), (6), (7) y (8).

$$\beta = 10^\circ \left(1 + \frac{r}{R_{mw}}\right) \quad \text{para } 0 \leq r \leq R_{mw} \quad (5)$$

$$\beta = 20^\circ + 25^\circ \left(\frac{r}{R_{mw}} - 1\right) \quad \text{para } R_{mw} \leq r \leq 1.2 R_{mw} \quad (6)$$

$$\beta = 25^\circ \quad (7)$$

donde: β es el ángulo en grados que forma la velocidad con la tangente a la línea isobárica.

Efecto de la velocidad de traslación del huracán.

$$U(r) = \frac{R_{mw} r}{R_{mw}^2 + r^2} V_F \quad (8)$$

donde: $U(r)$ es la velocidad de traslación ajustada al radio, y V_F es la velocidad de traslación del huracán ambas en m/s.

Harper y Holland (1999) recomiendan la ecuación (9) que se muestra a continuación para el cálculo del parámetro B , según Willoughby y Rahn (2004) los valores de B más comunes están en el rango de 0,75 y 1,5 como se puede observar en la figura 1.

$$B = 2 - \frac{p_c - 900}{160} \quad \text{para } 1.0 < B < 2,5 \quad (9)$$

Proceso de calibración

El proceso de calibración consiste en alimentar el modelo WW3 v3.14 de Tolman (2009) con campos de viento generados por el campo paramétrico de viento para valores de $B=1,0$; $B=1,25$ y $B=1,5$. Luego realizar la simulación, seleccionando como variables para realizar el estudio la altura de ola significativa, el período pico y la velocidad del viento en tres posiciones, las cuales coinciden con las coordenadas de tres boyas de la NOAA, las estaciones 42001, 42002 y 42003, ubicadas en la parte central, oeste y este del golfo de México respectivamente, para posteriormente comparar los resultados obtenidos con las mediciones realizadas por estos instrumentos. La tabla 1 presenta información de la posición de las boyas seleccionadas.

Como condiciones iniciales para la simulación se definen los huracanes para realizar la modelación (seis en total), tomando como premisa fundamental que la trayectoria de los mismos sea cercana a las posiciones de las boyas de la NOAA, los cuales se presentan en la tabla 2.

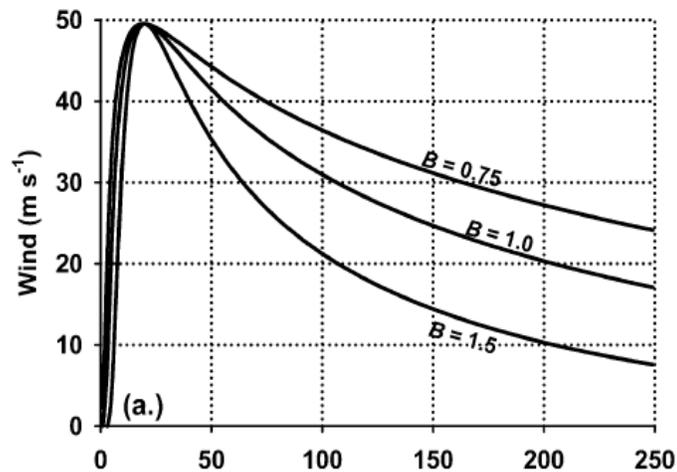


Figura 1. Comportamiento de la velocidad del viento vs distancia y valores del coeficiente B de Holland

Tabla 1. NDBC Buoy, World Meteorological Organization (WMO) código, localización, posición geográfica, y profundidad en el agua (m)

WMO	Localización	Latitud	Longitud	Profundidad (m)
42001	Centro del Golfo de México	25,92	89,68	3246
42002	Hacia el oeste del Golfo de México	25,17	94,42	3200
42003	Hacia el este del Golfo de México	25,88	85,95	3164

Tabla 2. Intervalos de simulación de los seis huracanes

Nombre del huracán	Fecha comienzo/Hora	Fecha final /Hora
Iván	12/09/04 1800UTC	16/09/04 600 UTC
Wilma	21/10/05 000 UTC	25/10/05 000 UTC
Rita	19/09/05 1200UTC	24/09/05 1200UTC
Gustav	30/08/08 000 UTC	31/08/08 1400UTC
Katrina	26/08/05 000 U TC	29/08/05 1200UTC
Lili	01/10/02 000 UTC	04/10/02 000 UTC

Para la generación del oleaje, usando WW3 como plataforma principal, se generan los campos de vientos utilizando el modelo descrito anteriormente. Los datos que alimentan el modelo son obtenidos del sitio web de la NOAA. Los campos de vientos son generados mediante un código en Matlab, el cual crea las mallas para ser utilizadas por el modelo WW3. El dominio de simulación está definido desde los 98 hasta los 72 grados de longitud Oeste y desde los 16 hasta los 31 grados de latitud Norte con una resolución de 0,25 grados. Se presenta el dominio en la figura 2.

Simulación y evaluación de resultados de la Etapa I

La simulación utilizando WW3 tiene como objetivo principal obtener los datos de altura de ola significativa, período pico del espectro y velocidad del viento en las posiciones de las boyas

42001,42002 y 42003 de la NOAA, para realizar un estudio comparativo a partir de variables estadísticas y poder definir el valor de B que mejor representa las mediciones. Las variables estadísticas seleccionadas para el estudio son según Lamazares et al. (2014): BIAS, que permitirá definir el nivel absoluto de estimación de las variables estudiadas, y el coeficiente de determinación (R^2), que permitirá conocer el nivel de ajuste entre el resultado de la simulación (variable simulada) y las mediciones de las boyas (variable medida), mostrando la calidad de la modelación. Vale destacar que si el valor del BIAS es cero, entonces la modelación será perfecta y también lo será si R^2 es 1.

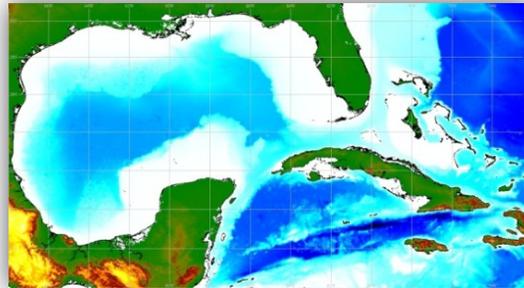


Figura 2. Dominio de simulación (fuente: base de datos GEBCO)

Estudio estadístico

En las tablas que se muestran a continuación se ofrece el resumen de los valores de las variables estadísticas H_s : altura de ola significativa (m), V_v : velocidad del viento (m/s), y T_p : Período pico de la ola (s) seleccionadas para cada huracán, atendiendo a la comparación realizada con cada una de las boyas.

Huracán Iván (tabla 3)

Tabla 3. Resultados Estadísticos

	V. Estad.	B=1				B=1,25				B=1,50			
		BOYA				BOYA				BOYA			
		42001	42002	42003	Prom.	42001	42002	42003	Prom.	42001	42002	42003	Prom.
H_s	BIAS (m)	-0,73	-0,004	0,01	-0,24	-2,27	-1,24	-1,65	1,72	-3,02	-1,72	-2,63	-2,45
	R^2	0,742	0,703	0,873	0,73	0,661	0,694	0,913	0,75	0,495	0,448	0,899	0,61
V_v	BIAS (m/s)	1,402	5,589	2,344	3,11	-2,57	2,04	-1,5	-0,67	-5,315	-0,210	-4,352	-3,29
	R^2	0,654	0,206	0,869	0,57	0,620	0,232	0,846	0,56	0,593	0,247	0,811	0,55
T_p	BIAS (s)	0,500	-1,538	0,038	-0,33	-1,03	-2,88	-1,39	-1,76	-1,401	-1,291	-2,446	-1,71
	R^2	0,865	0,862	0,831	0,85	0,844	0,708	0,925	0,82	0,617	0,557	0,920	0,69

Para la realización del análisis se utiliza el valor promedio de las variables estadísticas tomando los resultados de las tres boyas seleccionadas. Para destacar los mejores resultados se sombrea la celda en la tabla. Este procedimiento de análisis es extensivo a todos los huracanes estudiados.

Como se puede observar los mejores resultados se obtienen para la simulaciones con el valor de $B=1$, el modelo muestra valores promedios mínimos del BIAS para las tres variables estudiadas en las tres boyas de la NOAA, en el caso del coeficiente de determinación los resultados están en el intervalo de 0,57 para el caso de la velocidad del viento simulada. Para la Altura de ola significativa y Período pico los valores de R^2 son 0,73 y 0,85 respectivamente, considerando una buen ajuste entre valores medidos y calculados.

En este caso los mejores valores corresponden al valor de $B=1,25$. Con valores mínimos del BIAS para la altura de ola significativa de 0,17 metros y R^2 de 0,82.

Huracán Gustav (tabla 4)

Tabla 4. Resultados estadísticos

	V. Estad.	B=1				B=1,25				B=1,50			
		BOYA				BOYA				BOYA			
		42001	42002	42003	Prom.	42001	42002	42003	Prom.	42001	42002	42003	Prom.
Hs	BIAS (m)	0,457	0,18	0,91	0,51	-0,6	1,49	-0,37	0,17	-1,21	-1,13	-1,03	-1,12
	R^2	0,865	0,748	0,884	0,83	0,890	0,583	0,9724	0,82	0,826	0,2926	0,984	0,70
Vv	BIAS (m/s)	1,559	1,655	3,29	2,17	-1,13	-0,897	0,17	-0,62	-3,15	-2,67	-2,13	-2,65
	R^2	0,789	0,584	0,594	0,65	0,828	0,5439	0,6914	0,69	0,8242	0,4458	0,638	0,64
Tp	BIAS (s)	-2,034	-0,163	0,33	-0,62	-3,19	5,492	-1	0,43	-3,88	-1,52	-1,97	-2,46
	R^2	0,879	0,757	0,914	0,85	0,864	0,598	0,972	0,81	0,733	0,526	0,969	0,74

Huracán Rita (tabla 5)

Tabla 5. Resultados estadísticos

	V. Estad.	B=1				B=1,25				B=1,50		
		BOYA				BOYA				BOYA		
		42001	42002	42003	Prom.	42001	42002	Prom.	42001	42002	Prom.	
Hs	BIAS (m)	0,06	0,14	-	0,006	-1,29	-0,99	-0,76	-2,16	-1,6	-1,6	
	R^2	0,94	0,83	-	0,60	0,92	0,92	0,61	0,836	0,92	0,92	
Vv	BIAS (m/s)	0,19	2,15	-	0,78	-3,12	-1,17	-1,43	-5,65	-3,52	-3,06	
	R^2	0,62	0,75	-	0,46	0,725	0,80	0,51	0,72	0,82	0,54	
Tp	BIAS (s)	0,28	-0,05	-	0,08	-0,82	-1,05	0,62	-1,98	-1,96	-1,31	
	R^2	0,84	0,84	-	0,56	0,83	0,87	0,57	0,80	0,82	0,54	

En este caso la boya 42003 no realizó mediciones en esta fecha, por lo que solo se hizo la comparación con las dos restantes, obteniéndose mejores resultados para $B=1$.

Huracán Lili (tabla 6)

Tabla 6. Resultados estadísticos

	V. Estad.	B=1				B=1,25				B=1,50			
		BOYA				BOYA				BOYA			
		42001	42002	42003	Prom.	42001	42002	42003	Prom.	42001	42002	42003	Prom.
Hs	BIAS (m)	no data	0,57	1,09	0,55	no data	-0,39	-0,23	-0,20	no data	-0,96	-1,03	-0,66
	R^2	no data	0,822	0,740	0,52	no data	0,863	0,826	0,56	no data	0,827	0,827	0,55
Vv	BIAS (m/s)	no data	4,824	3,83	2,88	no data	1,84	0,68	0,84	no data	-0,29	-1,73	-0,67
	R^2	no data	0,398	0,777	0,39	no data	0,003	0,786	0,26	no data	0,001	0,770	0,28
Tp	BIAS (s)	no data	0,436	0,67	0,08	no data	-1,48	-0,41	-0,63	no data	-2,37	-1,15	-1,17
	R^2	no data	0,864	0,507	0,46	no data	0,899	0,514	0,47	no data	0,834	0,424	0,42

En el caso del huracán Lili no se obtuvieron datos de la boya 42001, por lo que se hace un estudio entre las dos restantes, obteniéndose buenos resultados de simulación para $B=1,25$. El valor del BIAS promediado entre las tres boyas en el caso de la altura de ola es -0,20 metros, para la velocidad de los vientos es 0,84 m/s y para el período pico es de -0,63 segundos, los

cuales son valores bajos y satisfactorios en términos de predicción, no obstante los valores de R^2 no son elevados.

Huracán Katrina (tabla 7)

Tabla 7. Resultados estadísticos

	V. Estad.	B=1				B=1,25				B=1,50			
		BOYA				BOYA				BOYA			
		42001	42002	42003	Prom.	42001	42002	42003	Prom.	42001	42002	42003	Prom.
Hs	BIAS (m)	0,71	1,01	0,68	0,8	-0,68	-0,05	-0,44	-0,39	-1,5	-0,55	-1,23	-1,09
	R ²	0,971	0,875	0,913	0,62	0,973	0,943	0,910	0,64	0,9514	0,892	0,8893	0,61
Vv	BIAS (m/s)	3,38	4,42	4,48	2,6	-0,31	1,09	2,01	0,26	-3,14	-1,16	-0,14	-1,43
	R ²	0,927	0,647	0,962	0,52	0,920	0,650	0,955	0,52	0,9118	0,644	0,9293	0,52
Tp	BIAS (s)	1,12	1,19	0,62	0,77	0,09	0,34	-0,16	0,14	-0,41	0,46	-0,75	0,016
	R ²	0,914	0,684	0,899	0,53	0,869	0,804	0,870	0,56	0,7546	0,641	0,9518	0,46

En este caso se obtienen buenos resultados de simulación con un valor de $B=1,25$. Los resultados del coeficiente de correlación son bajos, se encuentran en el intervalo de 0,52 - 0,64 para todas las variables.

En el caso del huracán Wilma la comparación revela errores elevados, valores del coeficiente de determinación extremadamente bajos que demuestran una muy mala correlación entre los datos medidos y los valores de la simulación, sin embargo entre los tres valores de B el que mejor se ajusta es $B=1$.

Del análisis individual de cada caso, se puede apreciar que los pronósticos de trayectorias de huracanes, usando el modelo paramétrico de vientos propuestos, dan resultados satisfactorios para los valores de $B=1$ y $B=1,25$. De los seis huracanes estudiados, tres presentan mejores resultados para $B=1$ y tres para $B=1,25$. Se evidencia además, la complejidad de la representación mediante un modelo paramétrico del régimen de circulación temporal y espacial del fenómeno, sin embargo, la literatura internacional plantea la aplicación de modelos paramétricos de vientos para simular los campos de vientos como una práctica razonable.

Huracán Wilma (tabla 8)

Tabla 8. Resultados estadísticos

	V. Estad.	B=1				B=1,25				B=1,50			
		BOYA				BOYA				BOYA			
		42001	42002	42003	Prom.	42001	42002	42003	Prom.	42001	42002	42003	Prom.
Hs	BIAS (m)	-0,59	-0,25	-0,95	-0,60	-1,8	-1,34	-2,2	-1,78	-2,37	-1,76	-2,93	-2,53
	R ²	0,083	0,250	0,008	0,11	0,290	0,447	0,001	0,25	0,308	0,490	0,002	0,27
Vv	BIAS (m/s)	-0,099	0,421	2,049	0,11	-3,414	-2,590	-1,452	-2,0	-5,66	-4,526	-4,023	-3,40
	R ²	0,048	0,331	0,087	0,13	0,047	0,136	0,145	0,06	0,1869	0,0189	0,163	0,07
Tp	BIAS (s)	-0,366	-0,502	-1,201	-0,28	-1,247	-1,250	-2,082	-0,83	-0,941	0,2221	-2,166	-0,24
	R ²	0,019	0,0001	0,203	0,006	0,074	0,073	0,215	0,05	0,150	0,0705	0,132	0,073

Referente a la prueba estadística del coeficiente de determinación R^2 se puede concluir que de los 6 huracanes estudiados, los resultados para los huracanes Ivan, Gustav, Rita y Katrina son los mejores con valores que oscilan para Hs (0,6 – 0,8), Vv (0,5-0,6) y Tp (0,6-0,8). En el caso de los huracanes Lili y Wilma los resultados son menores, lo cual puede estar influenciado por la relativa lejanía de la trayectoria de los eventos referente a las boyas de la NOAA comparado con los 4 primeros huracanes objetos de estudio, esto confirma lo planteado antes sobre la eficacia del modelo, la cual disminuye a medida que se aleja el centro del huracán del punto de análisis.

Etapa II: Sistema de Ingeniería Costera y Marítima en desarrollo

El sistema consiste en el acoplamiento y anidado de varios modelos, entre ellos uno atmosférico y otros de generación y propagación de oleaje. A continuación se presenta una breve descripción de los modelos matemáticos que conforman el sistema.

Modelo Matemático MM5

MM5 (Fifth-Generation Mesoscale Modeling System) es un modelo mesoescala de quinta generación creado por especialistas de Pennsylvania State University/National Center for Atmospheric Research (Penn State/NCAR model) en la década de los 70. El MM5v3 es su tercera versión. Este modelo está preparado para ser usado en el pronóstico numérico del tiempo, ser aplicado en una amplia gama de estudios teóricos y en tiempo real. Mitrani (2004), Salgueiro et al. (2014).

Modelo de Generación de Oleaje WW3

WW3 (Wave Watch III) ha sido creado por especialistas del Environmental Modeling Center/Marine Modeling and Analysis Branch at the National Centers of Environmental Prediction/National Ocean and Atmospheric Administration (NOAA/NCEP). Se inspira en el modelo WAM. de Tolman (2009).

Modelo Matemático SWAN

SWAN (Simulating Wave Nearshore) es un modelo de olas de tercera generación, elaborado por especialistas de la Universidad Tecnológica de Delft. Se usa para obtener estimados reales de parámetros de olas en áreas costeras, lagos y estuarios, a partir de vientos, fondos y condiciones de corriente. El modelo está basado en la ecuación de balance de la acción de la ola, Lamazares (2009).

Los modelos son aplicados sin ninguna variación en los códigos fuentes, y las variables físicas son las recomendadas por los autores (Tolman 2009), (Booij 2009). En el caso del modelo MM5 se ha utilizado el “*configure user*” propuesto por Mitrani (2004) para las condiciones de Cuba.

Variantes del Sistema de Ingeniería Costera y Marítima en proceso de estudio

El sistema estará constituido por 4 dominios, el primero de ellos asociado con el modelo MM5 y los resultados del modelo GFS tomados de la NOAA, ya que estos serán los encargados de generar los campos de viento para posteriormente interpolarlos e introducirlos en los modelos de propagación y generación de oleaje WW3 y SWAN. Este primer dominio abarca desde los 99,01 hasta los 64,99 grados de longitud Oeste y desde los 10 hasta los 44 grados de latitud Norte, con una resolución en el caso de MM5 de 27 km. En el caso de GFS, los datos se obtendrán con una resolución de 10 minutos, y en ambos casos se interpolarán mediante códigos en Matlab desarrollados por el autor.

Después de haber obtenido los datos de viento de MM5 o GFS en el primer dominio, según la variante que se utilice, se crearon tres dominios fijos y uno que varía según la zona específica del caso de estudio que se quiera analizar. El primero (I) de estos dominios incluye los mares interamericanos y toda la parte Este del Océano Atlántico, el dominio que le sigue (II), abarca los mares cercanos a la Isla de Cuba, mientras que el tercer dominio (III) se establece para la región Occidental de Cuba. En la figura 3 (a) se muestra el dominio seleccionado para los modelos MM5 y GFS, mientras que en la figura 3 (b) se presentan los dominios para anidar los modelos de generación y propagación de oleaje así como las boyas de la NOAA seleccionadas y la colocación de una boya virtual para estudiar el comportamiento del proceso de anidado.

Se estudian dos alternativas de sistema de acuerdo a los modelos utilizados, una primera variante consiste en el anidado del modelo WW3 en los dominios I, II y III respectivamente y para el dominio IV el modelo SWAN. La segunda variante consiste en el anidado del modelo SWAN en todos los dominios. El objetivo de esta etapa es comparar la calidad de la simulación de ambas variantes. En la figura 4 se muestra el diagrama de bloque de ambas variantes.

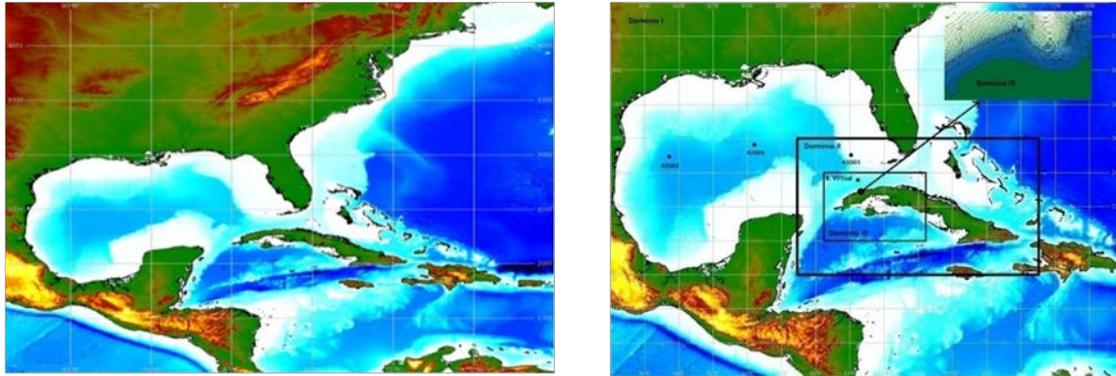


Figura 3. (a) Dominio MM5 y GFS (b) Dominios I-IV WW3 y SWAN

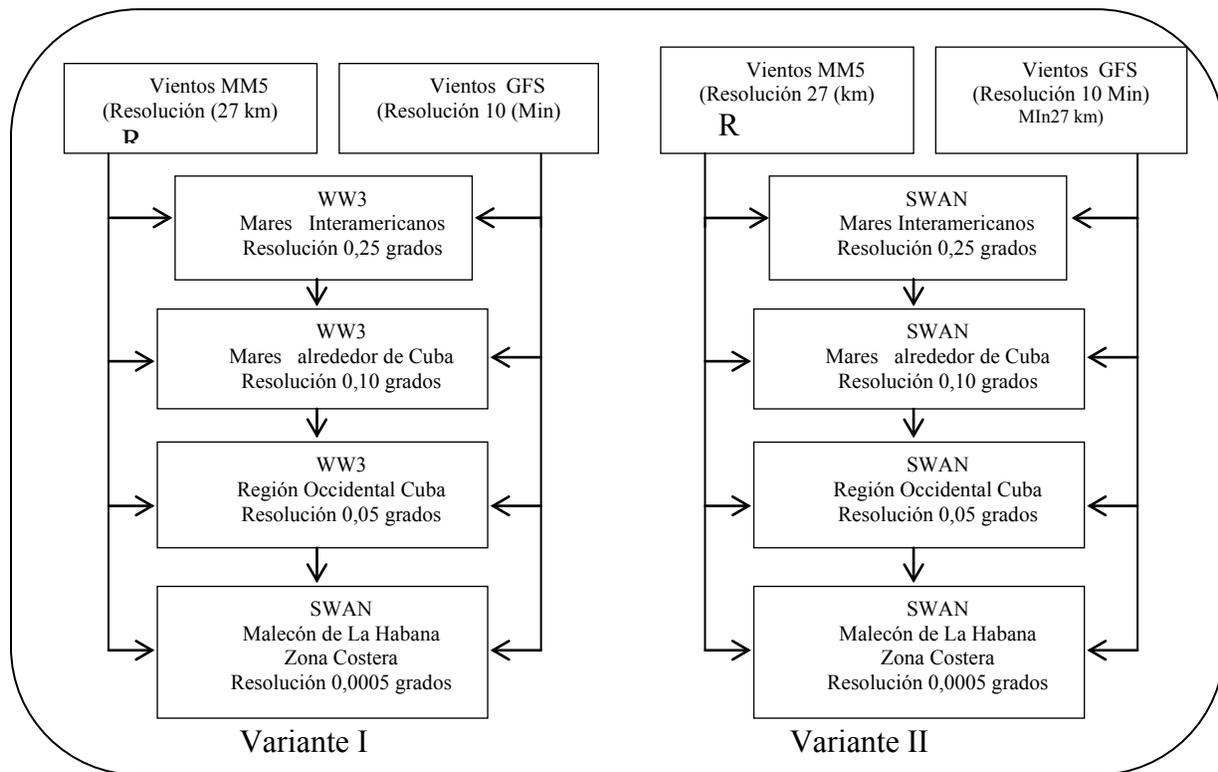


Figura 4. Variantes de sistemas de ingeniería de costas en estudio

Uno de los aspectos estudiados en esta investigación son los campos de vientos que sirven para forzar los modelos matemáticos. En este caso se han seleccionado dos, el primero los generados por el modelo atmosférico MM5y el otro los brindados por el sitio web de la NOAA, asociado con los datos ofrecidos por el GFS. Para realizar las simulaciones fueron seleccionados dos huracanes, Wilma y Katrina.

El huracán Wilma fue simulado desde el día 22 de octubre a las 12:00 horas UTC hasta el día 25 de octubre a las 12:00 UTC, y en el caso del Katrina desde el día 26 de agosto a las 18:00 horas UTC hasta el 29 de agosto a las 18:00 horas UTC. En la figura 5 se puede observar la trayectoria de los huracanes y la posición de las boyas de la NOAA seleccionadas y la boya virtual.

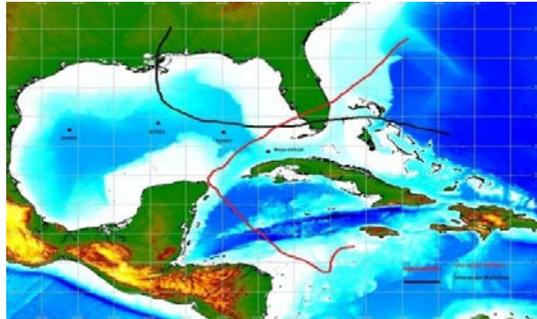


Figura 5. Trayectorias de los huracanes Wilma (2005) y Katrina (2005). Posiciones de las boyas de la NOAA y boya virtual seleccionada

Se utilizan las variables estadísticas BIAS y el coeficiente de determinación R^2 para conocer el comportamiento de la variable viento. En las tablas que se presentan a continuación se pueden observar los valores de las variables estadísticas para cada huracán y boya seleccionada, así como el valor promedio de las variables estadísticas.

Huracán Katrina (tabla 9)

Tabla 9. Resultados estadísticos

Boya	Resultados MM5				Resultados GFS			
	42001	42002	42003	promedio	42001	42002	42003	promedio
Bias (m/s)	1,02	1,93	-0,90	0,68	-1,64	1,10	-3,89	- 1,48
R^2	0,85	0,88	0,56	0,76	0,87	0,72	0,77	0,78

Huracán Wilma (tabla 10)

Tabla 10. Resultados estadísticos

Boya	Resultados MM5				Resultados GFS			
	42001	42002	42003	promedio	42001	42002	42003	promedio
Bias (m/s)	0,51	-0,45	-1,39	-0,44	1,13	-0,48	-2,03	-0,46
R^2	0,57	0,21	0,28	0,355	0,79	0,56	0,46	0,60

Los resultados muestran valores aceptables del BIAS para todas las boyas, el valor máximo es de -3,89 m/s que se obtiene en la boya 42003 para el caso del huracán Katrina utilizando la fuente de oleaje obtenida del GFS, mientras que para la misma boya utilizando los resultados de la simulación con MM5 el valor del BIAS es de -0,90 m/s, el cual es el menor valor de esta variable. En el caso del huracán Wilma los valores de R^2 son bajos, 0,35 para MM5 y 0,60 para GFS, los valores del BIAS están en el mismo orden de magnitud para cada fuente de viento.

Comparando ambas fuentes para los dos casos de estudio, la fuente del GFS presenta mejores resultados, pero la diferencia no es notable, por lo que se considera que ambas pueden ser

utilizadas tanto para estudios de evaluación de eventos ya ocurridos, como para el proceso de pronóstico, aunque se recomienda ampliar las pruebas.

En la segunda fase de esta etapa se realiza el estudio comparativo de los resultados del proceso de generación y propagación, basándose en las variables que caracterizan el oleaje como son altura de ola significativa y período pico. Se han realizado las simulaciones para todas las variantes expuestas anteriormente, utilizando los datos de viento obtenidos de los modelos MM5 y GFS como elemento forzador del oleaje. Los resultados obtenidos de estas simulaciones se compararán con las mediciones de las boyas de la NOAA en el dominio (I) y los datos obtenidos de la boya virtual se utilizarán para comprobar la calidad de la simulación en el proceso de anidado. Las variables estadísticas que se utilizan para la valoración son BIAS, R^2 y Skill, de las cuales las dos primeras han sido explicadas anteriormente en esta etapa, mientras que el Skill, expresa la “habilidad” que tiene el modelo de reproducir la realidad. Vale aclarar que si el resultado del Skill es uno, entonces la modelación será perfecta. En el caso del período pico se observa que las mejores variantes son la de WW3-MM5 y WW3-GFS, destacándose más esta última ya que se alcanzan mejores valores en las variables estadísticas presentadas.

Huracán Katrina (tabla 11)

Tabla 11. Resultados estadísticos

Boya 42001	Hs			Tp		
	BIAS (m)	R ²	SKILL	BIAS (m)	R ²	SKILL
ww3_MM5	0,81	0,86	0,93	-0,50	0,84	0,97
ww3_GFS	-0,03	0,93	0,98	-0,79	0,84	0,97
swan_MM5	-0,05	0,89	0,97	-3,26	0,75	0,62
swan_GFS	-1,08	0,91	0,73	-3,22	0,70	0,62
Boya 42002	Hs			Tp		
	BIAS (m)	R ²	SKILL	BIAS (m)	R ²	SKILL
ww3_MM5	0,40	0,84	0,89	-1,35	0,57	0,46
ww3_GFS	0,05	0,78	0,90	-1,48	0,75	0,71
swan_MM5	-0,03	0,86	0,93	-4,49	0,61	-0,50
swan_GFS	-0,32	0,85	0,81	-3,69	0,72	-0,17
Boya 42003	Hs			Tp		
	BIAS (m)	R ²	SKILL	BIAS (seg.)	R ²	SKILL
ww3_MM5	1,52	0,95	0,92	0,81	0,85	0,98
ww3_GFS	0,27	0,90	0,98	0,17	0,96	0,99
swan_MM5	0,53	0,95	0,98	-1,03	0,85	0,97
swan_GFS	-0,42	0,87	0,95	-1,51	0,92	0,93

En el caso de estudio huracán Wilma (tabla 12) para la boya 42001 los resultados para la altura de ola significativa reflejan valores de BIAS mínimos para las alternativas WW3-MM5 y SWAN-MM5 con valores de 0,06 metros y -0,07 metros respectivamente, los cuales son valores muy pequeños, reflejándose en los resultados del Skill de 0,97 y 0,95 respectivamente. La boya 42002 refleja un resultado de BIAS de -0,07 metros, con un Skill de 0,95, sin embargo el valor del R^2 es de 0,64 lo que significa la presencia de valores durante la simulación que se desvían en magnitud considerable de las mediciones. En el caso de la boya 42003, la alternativa WW3-GFS presenta el menor valor del BIAS con 0,20 metros y valores de R^2 y Skill de 0,68 y 0,96 respectivamente.

Huracán Wilma (tabla 12)**Tabla 12. Resultados estadísticos**

Boya 42001	Hs			Tp		
	BIAS (m)	R ²	SKILL	BIAS (m)	R ²	SKILL
ww3_MM5	0,06	0,53	0,97	-0,20	0,31	0,97
ww3_GFS	0,79	0,48	0,92	0,36	0,23	0,97
swan_MM5	-0,07	0,71	0,95	-1,11	0,59	0,93
swan_GFS	0,39	0,60	0,93	-0,48	0,58	0,95
Boya 42002	Hs			Tp		
	BIAS (m)	R ²	SKILL	BIAS (m)	R ²	SKILL
ww3_MM5	-0,07	0,64	0,95	-0,13	0,11	0,95
ww3_GFS	0,52	0,62	0,94	0,48	0,06	0,96
swan_MM5	0,12	0,60	0,92	-1,08	0,07	0,82
swan_GFS	0,33	0,49	0,92	-0,40	0,06	0,87
Boya 42003	Hs			Tp		
	BIAS (m)	R ²	SKILL	BIAS (m)	R ²	SKILL
ww3_MM5	-0,43	0,68	0,94	-0,99	0,04	0,91
ww3_GFS	0,20	0,68	0,96	-0,56	0,08	0,92
swan_MM5	-1,44	0,72	0,75	-3,70	0,04	0,55
swan_GFS	-1,33	0,55	0,73	-4,79	0,02	0,29

La variable Período pico en sentido general presenta resultados muy bajos del coeficiente de determinación R^2 . Para las tres boyas las alternativas aplicando el modelo WW3 ya sea con los campos de vientos obtenidos de la simulación con MM5 o extraídos del GFS presenta los mejores resultados, lo que se puede constatar en los valores del BIAS, los cuales oscilan entre -0,20 segundos y -0,56 segundos, mostrando que los resultados de la simulación están por encima de las mediciones realizadas por los instrumentos.

Al igual que el caso del huracán Katrina (tabla 11), la alternativa WW3 con los vientos del GFS y MM5 presenta mejores resultados, destacar que tanto WW3 y SWAN referente a la altura de ola significativa presenta buenos resultados, pero la simulación del período pico es mejor por parte del modelo WW3.

Etapa III. Análisis del proceso de anidado

El estudio comparativo entre las variantes se realiza gráficamente. El mejor anidado será aquel que presente en sus gráficos mejor similitud. Como se observa en la figura 6, para la simulación con el modelo WW3 existe una muy buena coincidencia entre los resultados obtenidos para los tres dominios, sin embargo, en la figura 7, donde se muestran los resultados de la simulación con el modelo SWAN, en el caso de la Altura de ola significativa se observa una importante desviación entre los resultados del dominio I y los resultados en el dominio II y III, fundamentalmente en las últimas 23 horas de simulación. En la figura 8 se realiza la comparación del Período pico del espectro, mostrándose de igual forma períodos con una valor de 25 segundos, valor éste que no representa la realidad. Se reafirma la necesidad de la realización de pruebas con el modelo SWAN para estudiar los efectos del rango de frecuencia en los resultados de las simulaciones, ya que podría mejorar la calidad de la misma.

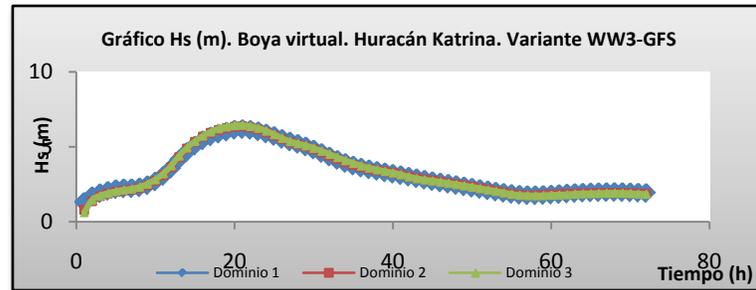


Figura 6. Valores de Hs(m) para los tres dominios

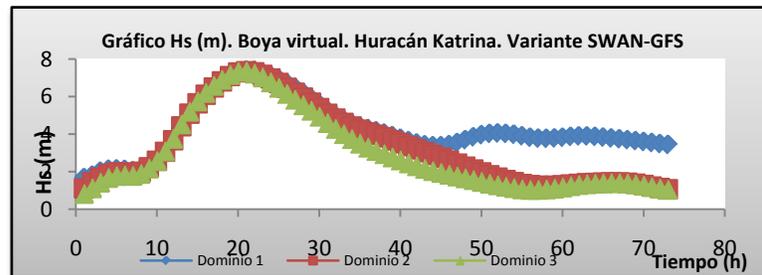


Figura 7. Valores de Hs(m) para los tres dominios

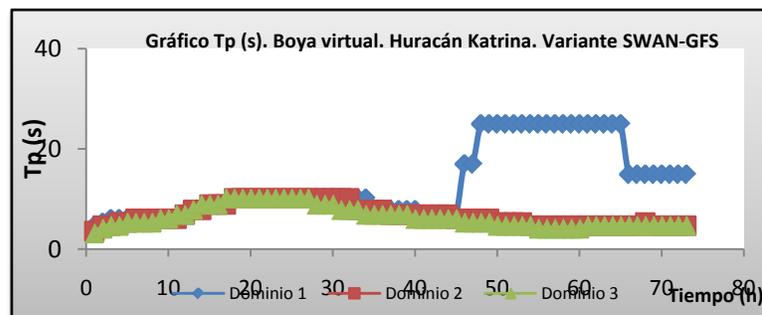


Figura 8. Valores de Tp (s) para los tres dominios

CONCLUSIONES

- Se presentaron los resultados de tres etapas de investigación, la presentación del modelo paramétrico de Holland (1980), y la propuesta de una serie de ecuaciones que conforman el modelo paramétrico de viento, la calibración del parámetro B, resultando como mejores valores $B=1,0$ y $B=1,25$.
- Se evaluaron dos fuentes o forzadores para alimentar la propuesta de alternativas del Sistema de Ingeniería Costera y Marítima para la región occidental del país mediante el acoplamiento de diferentes modelos matemáticos de código libre.
- De este estudio se concluye que la fuente GFS es más precisa, pero los campos de vientos generados con el modelo MM5 no difieren mucho en sus resultados con respecto a los obtenidos o tomados del sitio web de la NOAA a partir del GFS.

- Por último, se estudiaron las alternativas del Sistema de Ingeniería propuesto, y como resultado de los estudios la aplicación de la alternativa WW3 v3.14 forzado con vientos del GFS y MM5 refleja mejores resultados.
- El modelo SWAN con ambas fuentes, presenta resultados satisfactorios en lo referido a altura de ola significativa, sin embargo las simulaciones del período pico no son adecuadas y se deben continuar investigando los efectos de la frecuencia mínima y máxima establecida en el modelo SWAN.

REFERENCIAS

- Booij N.** (2009). “SWAN Cycle III version 4.0.81 user manual”. Delft Institute of Technology, The Netherlands.
- Holland G. J.**(1980). “An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes”. *Monthly Weather Review*, vol. 108, pp. 1212-1218. USA.
- Harper B. A y Holland G. J.** (1999). “An updated parametric model of the tropical cyclone. In: *Proceedings of the 23rd Conference of Hurricane and Tropical Meteorology*, Dallas, Texas, pp. 893–896.
- Lamazares R. G.** (2009) “Determinación de las características del oleaje asociado a dos tipologías de eventos meteorológicos extremos en la zona del Malecón utilizando el modelo matemático SWAN”. Trabajo de Diploma. CIH. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae). La Habana, Cuba.
- Lamazares R., Salgueiro G., y Córdova .** (2014). “Acoplamiento óptimo entre modelos matemáticos de generación y propagación de oleaje”. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 35, no. 3, pp. 17-31, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.
- Mitrani I. A.** (2004). “Utilización del modelo numérico de área limitada MM5V3 para la predicción del tiempo sobre Cuba”. Curso de Postgrado, Instituto de Meteorología. Habana, Cuba.
- Phadker A., Martino C., Cheung K. and Houston S.** (2003). “Modeling of tropical cyclone winds and wave for emergency management”. *Ocean Engineering*, vol. 30, pp. 553–578. USA.
- Powell, M.D.,**(1987). “An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes”. *Monthly Weather Review*, vol. 115, pp. 75–89. USA.
- Salgueiro M., Córdova L. y Lamazares R.** (2014). “Aplicación del modelo atmosférico MM5 para la simulación de vientos asociados a huracanes”. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 35, no. 1, pp. 3-16, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.
- Vickery P., Masters F., Powell M. and Wadhera D.** (2009). “Hurricane hazard modeling: The past, present, and future. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*. doi:10.1016/j.jweia.2009.05.005.
- Willoughby E. and Rahn E.** (2004). “Parametric Representation of the Primary Hurricane Vortex. Part I: Observations and Evaluation of the Holland (1980) Model”. *American Meteorological Society*, vol. 132, pp. 3033- 3048. USA.
- Tolman H. L.** (2009). “User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14”. Environmental Modeling Center. Marine Modeling and Analysis Branch. USA.