

Simulación de surgencia y oleaje para huracanes en la región oriental de Cuba

Ing. Danay Almarales Díaz e-mail: danay1401@nauta.cu
Empresa de Aprovechamiento Hidráulico. Mayabeque, Cuba.

Ing. Marisleydis Martín Fleitas e-mail: mmartin@nauta.cu
Empresa de Aprovechamiento Hidráulico. Mayabeque, Cuba.

Dr. Ing. Luis F. Córdova López e-mail: cordova@tesla.cujae.edu.cu
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.

RESUMEN

Cuba se ve anualmente sometida a los efectos de huracanes y por los daños que ocasionan es necesario el estudio de estos eventos meteorológicos, empleándose modelos matemáticos especializados en la modelación de surgencia y oleaje, tales como los modelos ADCIRC (modelo avanzado de circulación para océanos, costas y estuarios) y SWAN (modelo de simulación de olas en aguas poco profundas) acoplados. Se establecen diferentes escenarios donde se obtienen valores de marea, surgencia, altura de ola significativa, período pico y sobreelevación por rotura del oleaje asociados con los huracanes Hanna e Ike del 2008 que por su intensidad fueron de gran importancia. Para la validación de los resultados se usan las predicciones del programa WXTide y los datos aportados por las boyas de la NOAA, realizándose un análisis estadístico.

Palabras clave: huracanes, modelación, oleaje, surgencia.

Storm surge and wave field simulation for hurricanes in the Eastern region of Cuba

ABSTRACT

Cuba is annually subjected to the effects of hurricanes and due to the damages they cause it is necessary the study of these meteorological events. The mathematical models specialized in the surge and wave simulation used, such as model ADCIRC (advanced model of circulation for oceans, costs and estuaries) and SWAN (Simulating WAVes Nearshore) are coupled. Different scenarios are set where tide values are obtained, surge, height of significant wave, peak period and wave set up for breaking wave associated to hurricanes Hanna and Ike in 2008 that were of great importance for their intensity. For the validation of the results, the predictions of the program WXTide and the data contributed by the buoys of NOAA are used, where a statistical analysis is performed.

Keywords: hurricanes, modeling, wave, storm surge

INTRODUCCIÓN

El incremento de la temperatura y del nivel del mar, así como huracanes de mayor intensidad son amenazas a la vida, las propiedades y los medios de subsistencia de los habitantes a lo largo y ancho del Caribe. Cuba tiene la costa más larga entre las islas del Caribe, y una masa terrestre lo suficientemente grande para ser azotada por huracanes que recorren diferentes trayectorias (Bueno et al. 2008), lo cual es una gran amenaza, teniendo en cuenta que trae consigo altas penetraciones del mar y fuertes vientos, por lo que es necesario el estudio de los campos de oleaje y la surgencia generado por huracanes mediante modelos numéricos (Córdova y Lamazares 2012) para obtener una mejor predicción de las variables de clima marítimo (oleaje, corriente y surgencia) asociadas con estos eventos. Para ello se aplica el modelo ADCIRC (modelo avanzado de circulación para océanos, costas y estuarios), que se ha convertido en una de las más importantes herramientas para la modelación y predicción de marea y surgencia por las ventajas que presenta y, además, se usa el modelo matemático SWAN (modelo de simulación de olas en aguas poco profundas) que es reconocido mundialmente, empleado para caracterizar el oleaje en las zonas costeras del mundo durante la ocurrencia de eventos extremos, como por ejemplo huracanes (Dietrich et al. 2011). En esta investigación es necesario reflejar mediante la modelación matemática el acoplamiento de los modelos ADCIRC y SWAN en una primera aproximación, donde ADCIRC proporciona información a SWAN sobre campos de corriente y la elevación del nivel medio del mar, y luego son entregados a ADCIRC las tensiones de radiación asociadas con el oleaje obtenidas por el modelo SWAN (Almarales 2017). En este trabajo se escoge como área de estudio toda la costa norte, sur, este y oeste de la región oriental de Cuba la cual está constituida por las provincias de Las Tunas, Holguín, Guantánamo, Santiago de Cuba y Granma.

DESCRIPCIÓN DE LOS HURACANES DE ESTUDIO

Huracán Hanna

El huracán Hanna fue el octavo ciclón tropical y cuarto huracán de la temporada de huracanes en el Atlántico de 2008. Se formó al este-noreste de las Islas de Sotavento el 28 de agosto. Los modelos predecían que la tormenta se debilitaría al moverse al suroeste debido al flujo de salida asociado con el huracán Gustav, pero a pesar de todo esto, la tormenta entró en un ambiente más favorable lo que provocó que se intensificara. A las 1:30 p.m. hora local del 1 de septiembre, Hanna se intensificó a huracán según la información del avión de reconocimiento con vientos de hasta 65 nudos. Las prolongadas lluvias y vientos fuertes fueron reportados en las Bahamas e Islas Turcas y Caicos a consecuencia de Hanna. Ningún daño de consideración o víctimas fueron reportados en dichas áreas. Mientras tanto, olas de gran altura y corrientes turbulentas fueron producidos por Hanna de la costa sureste de Estados Unidos de América. (Rubiera y Ballester 2008)

Huracán Ike

El huracán Ike fue el quinto huracán y la novena tormenta tropical de la temporada de huracanes 2008. En Baracoa, 200 casas se reportaron destruidas y olas de hasta 7 m de altura. A las 9:45 p.m. hora local (01:45 UTC) del 7 de septiembre los pronósticos dijeron que la tormenta duraría dos días en Cuba, debilitándose a categoría 1, pero ganando fuerza a categoría 3 al entrar en la costa del Golfo. El huracán tocó tierra el lunes al norte del oriente de Cuba en el cabo de

Punta de Lucrecia en la provincia de Holguín cerca del puerto de Samá, con vientos sostenidos de alrededor de 160 km/h (100 mph); Ike dejó un saldo de siete fallecidos, además de causar inundaciones en diferentes partes de Cuba. Luego se degradó a categoría uno cuando cruzó la isla. Ike cruzó el extremo oeste de la isla en la provincia de Pinar del Río, cerca del mismo rumbo que tomó el huracán Gustav diez días antes (Rubiera y Ballester 2008). En la tabla 1 se definen los períodos de simulación para los huracanes objeto de estudio.

Tabla 1. Definición de los períodos de simulación

Huracanes	Fecha de inicio	Fecha final	Cantidad de horas
Hanna	30/08/2008	6/09/2008	168
Ike	6/09/2008	13/09/2008	168

Definición del dominio

Para la definición del dominio de cómputo se realiza un análisis de sensibilidad con el objetivo de buscar el dominio más pequeño pero capaz de reflejar de manera adecuada el comportamiento de la marea, y ser lo suficientemente grande para capturar las características reales de la resonancia en el área de estudio. Los casos estudio se presentan en la figura 1; el primero es desde los 40° de latitud Norte en Nueva Jersey, Estados Unidos hasta la isla de Corocora en Venezuela en el meridiano de 60° de longitud Oeste. El segundo caso va desde los 35° de latitud Norte en Carolina del Norte, Estados Unidos hasta llegar a los 60° al igual que el primer caso de estudio, y por último, el tercer caso parte de los 30° de latitud Norte en Jacksonville, Estados Unidos pasando entre Puerto Rico y las Antillas hasta llegar a los 69° de longitud Oeste en el Estado Falcón, Venezuela.



Figura 1. a) Dominio1 (40°N- 60°O), b) Dominio2 (35°N- 60°O), c) Dominio3 (30°N- 69°O)

Para llevar a cabo la selección del dominio se realizaron tres corridas con ADCIRC forzado con marea, utilizando la base de datos de LeProvost et al. (1998) (2N2, K1, K2, L2, M2, MU2, N2, NU2, O1, P1, Q1, S2, T2) con un tiempo de 25 días que va desde el día 25 de agosto del 2008 hasta el 19 de septiembre del 2008 en el cual se encuentra comprendido el período de transcurso de los dos huracanes de estudio.

En la tabla 2 se presenta el análisis estadístico utilizando el coeficiente de correlación R^2 donde se comparan los resultados obtenidos mediante el predictor WXTide y los simulados por ADCIRC. A partir de los resultados se escoge el segundo dominio siendo el de los mejores coeficientes de correlación.

Línea de costa

La línea de costa se encuentra en coordenadas planas UTM y referencia WGS-84 espaciando cada 50 m el área de estudio, de 100 m a 3000 m de forma ascendente en el resto del país y los cayos a 1000 m. Las islas (Jamaica, República Dominicana, Puerto Rico y demás islas) tienen un espaciamiento de 10 000 m, el golfo de México 15 000 m, el Atlántico y el mar Caribe de 20 000 m. (figura 2).

Tabla 2. Coeficientes de correlación obtenidos para cada boya

Boyas	Coeficientes de correlación				
	D1-D2	D1-D3	D1-WXTIDE	D2-WXTIDE	D3-WXTIDE
Gibara	0,997	0,983	0,806	0,792	0,777
Nipe	0,997	0,980	0,420	0,900	0,380
Santiago de Cuba	0,960	0,001	0,006	0,193	0,715
Baracoa	0,997	0,972	0,853	0,857	0,872
Punta de Maisí	0,997	0,939	0,828	0,847	0,888
Guantánamo	0,970	0,058	0,118	0,175	0,760
Pilón	0,955	0,020	0,004	0,122	0,629
Sagua de Tánamo	0,997	0,982	0,812	0,800	0,789
Manzanillo	0,948	0,046	0,062	0,128	0,432

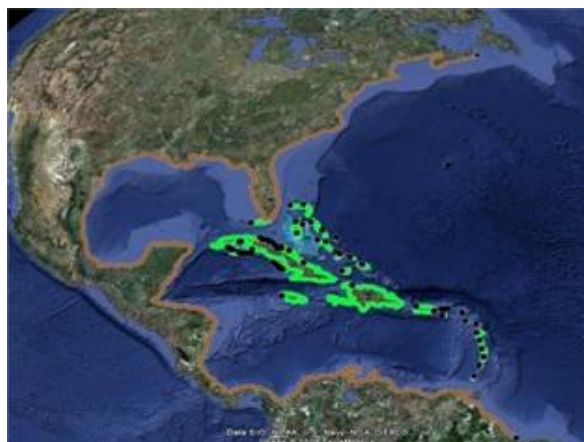


Figura 2. Línea de costa

Batimetría

La batimetría para este estudio se confecciona a partir de información brindada por diferentes fuentes nacionales e internacionales en coordenadas geográficas, y referencia WGS84 (figura 3).

Obtención de la malla

Para la definición de la malla de cómputo se siguieron las siguientes premisas:

- Que se respete en la línea de costa un espaciado de 50 m en la zona de estudio (región oriental de Cuba), 3000 m en el resto del país, 25 000 m para la línea en el océano que define el dominio, en las islas como Haití, República Dominicana, el arco de las Antillas y otras un espaciado de 10 000 m, en el Golfo 15 000 m y en el resto 20 000 m.
- Espaciado de los elementos en dirección al mar de 100 m aproximadamente.

Se realizan varias mallas donde se varían diferentes parámetros tales como son la transición y la cantidad de nodos con un truncamiento de los elementos de 50 m como mínimo y 40 000 m como máximo.

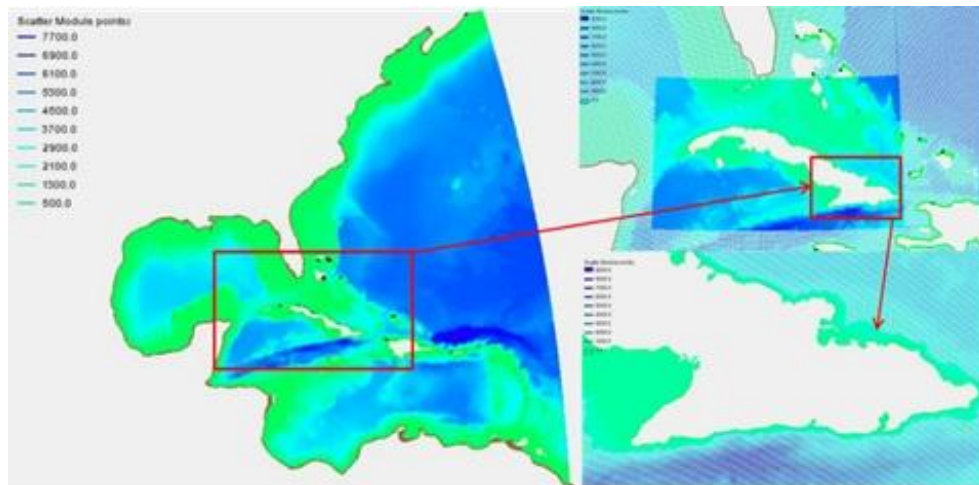


Figura 3. Batimetría

La malla seleccionada que cumple con todas las premisas mencionadas queda de la siguiente manera: con una transición de 0,5 entre elementos, una longitud mínima aproximada de 100 m, y máxima de 40 000 m, con 237 878 elementos y 130 014 nodos. En la línea de costa de la zona de estudio se puede observar cómo la malla es más densa o sea con mayor resolución y cómo van abriéndose los triángulos a medida que se avanza mar adentro (figura 4).

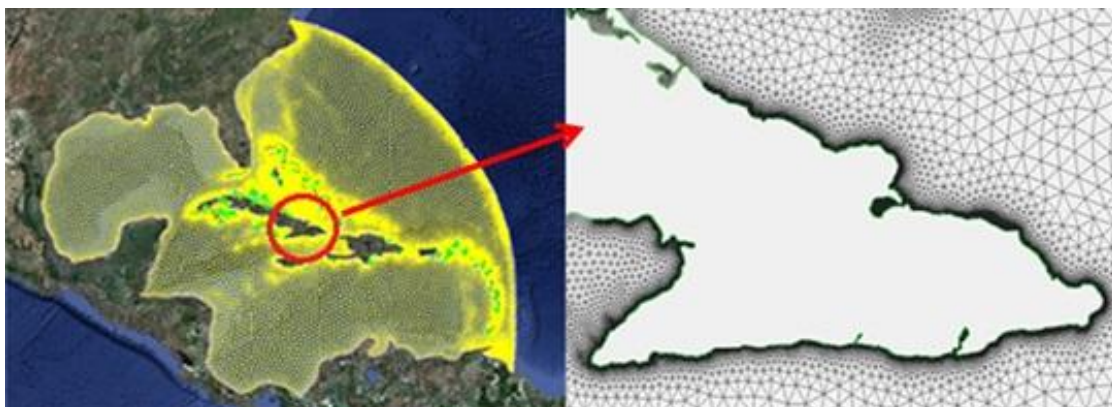


Figura 4. Detalle de la malla en la zona de estudio (región oriental de Cuba)

Modelo avanzado de circulación para océanos, costas y estuarios (ADCIRC)

ADCIRC es un modelo numérico altamente desarrollado para solucionar las ecuaciones de la hidrodinámica terrestre. Sus ecuaciones han sido formuladas usando las aproximaciones de presión hidrostática tradicional de Boussinesq, las cuales fueron discretizadas en el espacio usando el método de elementos finitos y en el tiempo usando el método de diferencias finitas. En coordenadas esféricas, las ecuaciones que gobiernan son las de continuidad y las ecuaciones primarias de momento (Westerink et al. 1994).

Modelo de simulación de olas en aguas poco profundas (SWAN)

SWAN es un modelo de oleaje de tercera generación, desarrollado por la Universidad Tecnológica de Delft (Países Bajos) para obtener estimaciones realistas de los parámetros de oleaje en áreas costeras, lagos y estuarios a partir de los datos de viento, batimetría y corrientes marinas. SWAN se puede usar en cualquier escala relevante para las ondas de gravedad superficial generada por el viento. El modelo está basado en la ecuación de balance de la acción de la ola (Lamazares 2009). El objetivo principal del modelo es resolver la ecuación espectral de balance de acción sin restricción alguna en la evolución del crecimiento de la ola. Esta ecuación representa los efectos de la propagación espacial, refracción, entre otros (Zijlema 2009).

Comparación de la base de dato CFS y las boyas de la NOAA

Para la validación de la base de datos CFS se realiza una comparación entre los datos observados por dicha base de datos y los medidos por las boyas de la NOAA obtenidos del Centro Nacional de Información de las Boyas (NDBC por sus siglas en inglés).

La información de la base de datos CFS es procesada por un script de MATLAB elaborado por el Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) de la Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría, el cual genera ficheros de vientos hora por hora.

Los resultados de la evaluación de la base de dato CFS y las boyas de la NOAA se presentan en la tabla 3 mostrando los valores de los coeficientes de correlación, los cuales están próximos a uno, corroborando la calidad y precisión del modelo utilizado, exceptuando la boya 41043 para el huracán Ike y la boya 41046 para el huracán Hanna, con valores lejos de la unidad. El error medio cuadrático (RMSE) y el absoluto medio (MAE) muestran valores bastante aceptables.

Tabla 3. Errores estadísticos obtenidos de la comparación entre el modelo CFS y las boyas seleccionadas

Huracán	Boyas	Coef. Correlación	RMSE (m/s)	MAE (m/s)
Ike	42001	0,894	2,396	1,463
	42056	0,816	1,295	1,055
	41043	0,311	1,570	1,126
Hanna	41010	0,696	2,231	1,176
	41046	0,331	3,783	3,209
	41004	0,869	1,484	0,917

El comportamiento de los valores obtenidos por la base de dato CFS es en algunos casos similar a los medidos por las boyas de la NOAA, lo cual puede ser observado en las siguientes figuras (figura 5 y figura 6).

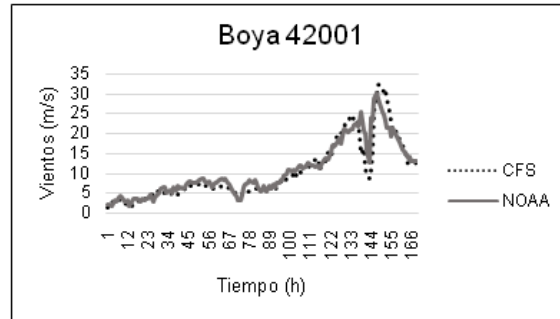


Figura 5. Comparación entre los valores de la base de datos CFS del huracán Ike en la boya 42001 de la NOAA

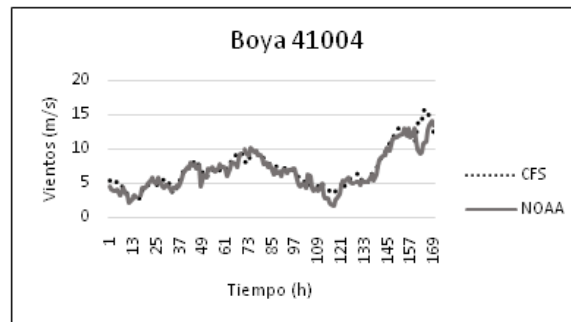


Figura 6. Comparación entre los valores de la base de datos CFS del huracán Hanna en la boya 41004 de la NOAA

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo de esta investigación se colocaron 9 boyas virtuales a lo largo de toda la costa de la zona de estudio para así conocer el comportamiento de los parámetros hidrodinámicos en diferentes lugares de la región oriental de Cuba. Se seleccionaron en función de su importancia e interés para las autoridades encargadas de tomar decisiones (tabla 4).

Tabla 4. Posicionamiento de las boyas virtuales

Boyas #	Ubicación		Profundidad (m)	Lugar
	Longitud	Latitud		
1	-76,113	21,115	66,747	Gibara, Holguín Norte
2	-75,658	20,768	1,445	Bahía de Nipe, Holguín Norte
3	-75,872	19,982	1,382	Puerto de Stgo. de Cuba, Stgo. de Cuba Sur
4	-74,502	20,357	3,565	Baracoa, Guantánamo Norte
5	-74,143	20,245	0,763	Maisí, Guantánamo Este
6	-75,192	19,908	1,063	Bahía de Guantánamo Sur
7	-77,323	19,897	0,765	Pilón, Granma Sur
8	-75,316	20,720	1,692	Sagua de Tánamo, Holguín Norte
9	-77,144	20,339	1,132	Manzanillo, Granma Oeste

Escenario 1

En este escenario intervienen solamente las componentes de marea seleccionadas de la base de datos (LeProvost et al. 1998), con el objetivo de comparar los resultados del modelo ADCIRC con los niveles del mar extraídos del programa predictor WXTide.

Comparación de los resultados del pronóstico del programa WXTide con los obtenidos de la modelación con ADCIRC

Como se muestra en los gráficos de la figura 7, el comportamiento de las mareas obtenidas por el modelo es bastante similar a las obtenidas por el Wxtide. La comparación de los resultados obtenidos de la modelación con ADCIRC y el programa WXTide se presentan en la tabla 5 mostrando los valores de los coeficientes de correlación, los cuales están próximos a uno, corroborando la calidad y precisión del modelo establecido, con la excepción de algunos casos, cuyos valores están alejados de uno. El error medio cuadrático RMSE y el error absoluto medio MAE son aceptables.

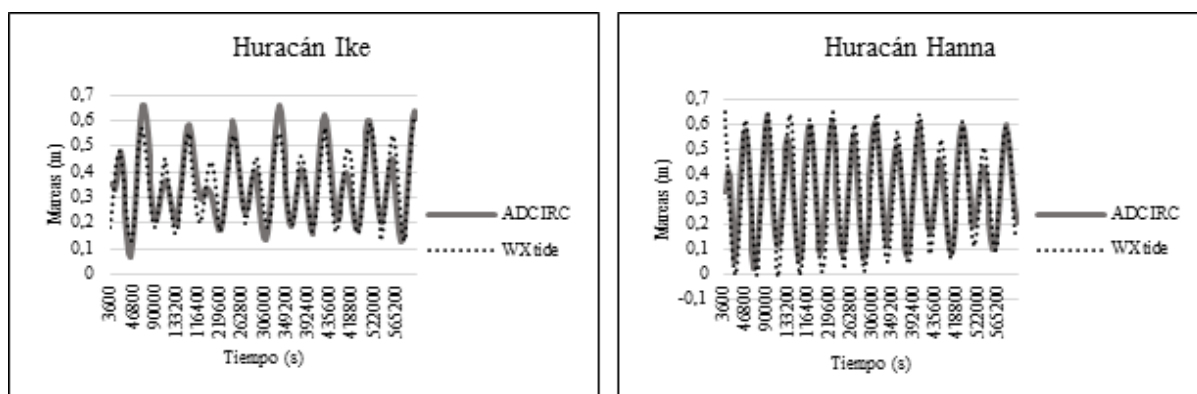


Figura 7. Comparación en la boya de Baracoa entre el modelo ADCIRC y el WXTide para los casos del huracán Ike y el Hanna respectivamente

Tabla 5. Coeficientes y errores estadísticos obtenidos de la comparación entre lo modelado en ADCIRC y lo obtenido por el programa WXTide

Boyas	Ike			Hanna		
	Coef. Correlación	RMSE (m/s)	MAE (m/s)	Coef. Correlación	RMSE (m/s)	MAE (m/s)
1	0,802	0,084	0,066	0,793	0,108	0,087
2	0,468	0,149	0,117	0,387	0,212	0,172
3	0,168	0,147	0,119	0,143	0,174	0,149
4	0,801	0,065	0,053	0,874	0,076	0,062
5	0,722	0,143	0,119	0,884	0,161	0,131
6	0,244	0,137	0,112	0,002	0,154	0,130
7	0,099	0,179	0,148	0,264	0,193	0,156
8	0,798	0,084	0,066	0,808	0,104	0,084
9	0,029	0,224	0,176	0,441	0,292	0,257

Escenario 2

En este escenario se realiza un análisis de la surgencia y es necesaria la ejecución del modelo ADCIRC el cual tiene como forzadores a la marea con sus 13 componentes de la base de datos (LeProvost et al. 1998) más los vientos a 10 m de la superficie del mar y presiones sobre la superficie. Para determinar la surgencia se toman los resultados del escenario 2 y se le restan los resultados del escenario 1 (figura 8).

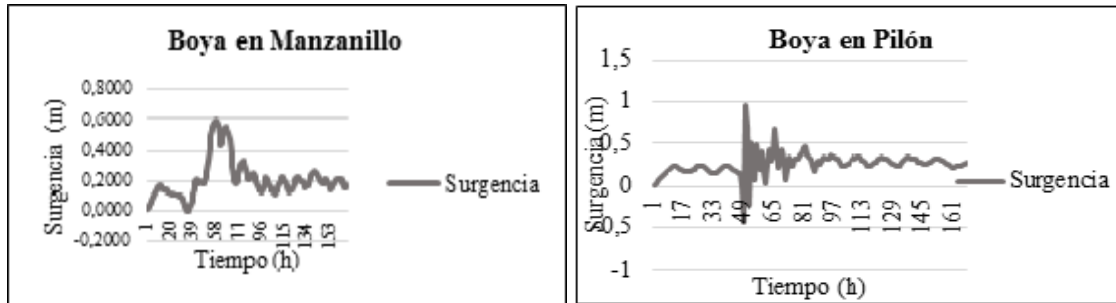


Figura 8. Surgencia producida por el huracán Ike y el Hanna respectivamente

Como se observa en el gráfico anterior el mayor valor de surgencia para el caso del huracán Ike ocurre el 8/9/2008 con una altura de 0,551 m debido a la velocidad del viento. Mientras que para el caso del huracán Hanna el mayor valor de surgencia de 0,95 m ocurre en la boya ubicada en la costa de Pilon aproximadamente el 1/9/2008.

Escenario 3

En este escenario se lleva a cabo la aplicación del modelo SWAN con el objetivo de realizar un análisis de las características del oleaje y determinar las tensiones de radiación producidas por el paso de los huracanes en estudio. El modelo se establece de la siguiente manera: modo de trabajo no estacionario en dos dimensiones, valor de coeficiente de arrastre debido al viento de $C_{dcap}=0.02$, como parámetros físicos, se seleccionan el modelo de tercera generación Komen - Agrow, donde se tiene en cuenta la interacción entre tres y hasta cuatro olas, la refracción, la difracción y el rompiente de las olas, se implementa el modelo de fricción de fondo de Jonswap utilizando un valor de coeficiente de fricción de 0,019. Se definen las ubicaciones exactas de las boyas de la NOAA y las de las zonas de principal interés (boyas virtuales), para así poder validar el modelo y obtener el comportamiento del fenómeno del oleaje en la zona de interés (figura 9).

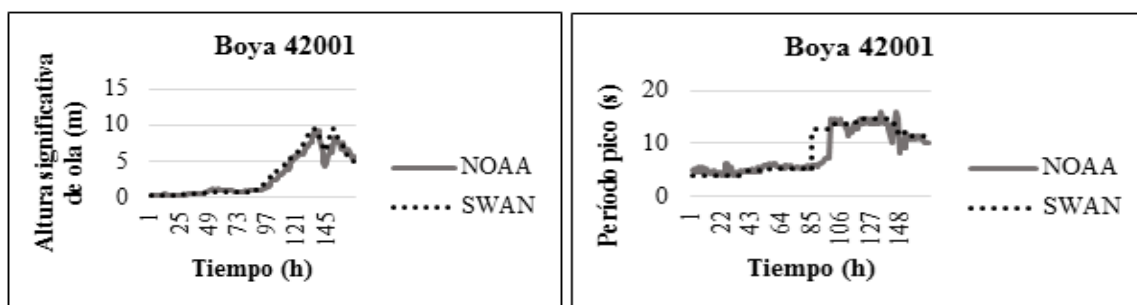


Figura 9. Comparación entre los valores medidos y los simulados de altura significativa de ola y período pico respectivamente en la boya 42001

Después de terminadas las corridas de los dos huracanes en estudio se realiza una validación de los valores de altura significativa y período de la ola obtenidos por el modelo con los medidos por las boyas de la NOAA para saber cuán confiable es el modelo (figura 9).

A continuación se muestran las tablas 6 y 7 con el análisis estadístico de alturas de olas y de períodos picos para el huracán Ike.

Tabla 6. Análisis de los parámetros estadísticos de altura de ola para el huracán Ike

Altura de ola significativa para el huracán Ike			
Boyas	Coefficiente de Correlación	RMSE (m)	MAE (m)
41043	0,671	0,538	0,481
42001	0,963	0,786	0,521
42056	0,948	0,296	0,245

Haciendo un análisis de los resultados de las tablas de los parámetros estadísticos de altura de ola significativa se puede observar que los mejores coeficientes de correlación los tienen las boyas 42001 y 4256, ya que los coeficientes de estas boyas son cercanos a uno (0,963 y 0,948) o sea que los resultados son de buena calidad.

Tabla 7. Análisis de los parámetros estadísticos del período pico para el huracán Ike

Período pico para el huracán Ike			
Boyas	Coefficiente de Correlación	RMSE (s)	MAE (s)
41043	0,138	1,929	1,549
42001	0,797	2,045	1,137
42056	0,405	2,578	1,854

Al realizar el análisis de los resultados de las tablas de los parámetros estadísticos de período pico se puede observar que el mejor coeficiente de correlación lo tiene la boya 42001 ya que es el valor más cercano a uno (0,797).

En los gráficos que se muestran a continuación (figura 10) se realiza la comparación de los valores medidos de altura de ola significativa y los períodos picos por las boyas de la NOAA respecto a los simulados por el modelo SWAN para el huracán Hanna.

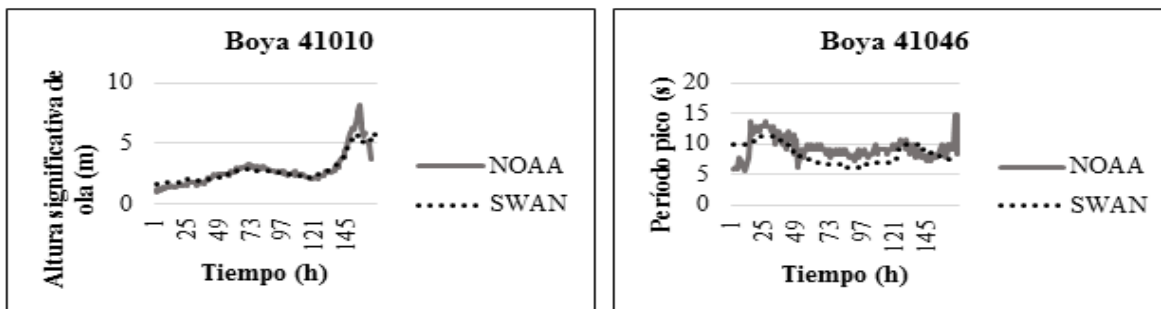


Figura 10. Comparación entre valores medidos y simulados de altura de ola significativa en la boya 41010 y 41046 respectivamente

A continuación, se muestran las tablas 8 y 9 con el análisis estadístico de alturas de olas y de períodos picos para el huracán Hanna.

Tabla 8. Análisis de los parámetros estadísticos de altura de ola para el huracán Hanna

Altura de ola significativa para el huracán Hanna			
Boyas	Coefficiente de Correlación	RMSE (m)	MAE (m)
41046	0,042	1,616	1,604
41004	0,026	10,537	1,397
41010	0,924	1,149	0,488

Haciendo un análisis de los resultados de las tablas de los parámetros estadísticos de altura de ola significativa se puede observar que el mejor coeficiente de correlación lo tiene la boya 41 010, ya que tiene un valor cercano a 1 (0.924) o sea que el resultado es de buena calidad, mientras que para las boyas 41 046 y 41 004 la calidad de los resultados es deficiente.

Tabla 9. Análisis de los parámetros estadísticos del período pico para el huracán Hanna

Período pico para el huracán Hanna			
Boyas	Coefficiente de Correlación	RMSE (s)	MAE (s)
41046	0,170	2,340	1,851
41004	0,157	3,065	1,828
41010	0,096	7,373	2,663

Al realizar el análisis de los resultados de la tabla 9 de los parámetros estadísticos de período pico se puede observar que los valores de los coeficientes de correlación son bajos, con errores absolutos en el orden de los 2 segundos.

Análisis combinado de la surgencia y la altura de ola significativa

Para validar los resultados de SWAN se realiza una comparación entre la surgencia del escenario 2 y la altura de ola significativa obtenida en este escenario que se puede ver en el gráfico de la figura 11.

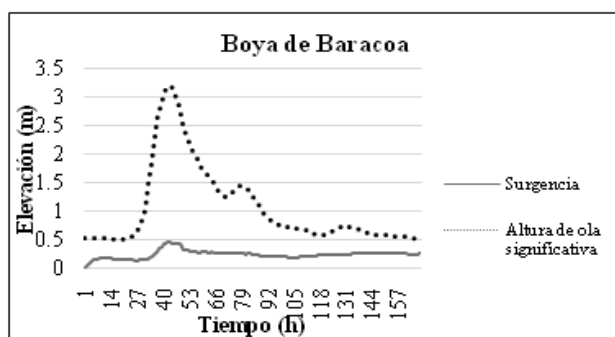


Figura 11. Comparación entre la surgencia y la altura de ola significativa producida por el huracán Ike en la boya de Baracoa

En el gráfico se muestra que donde la altura de ola significativa alcanza su máximo valor de 3 m, la surgencia tiene un comportamiento similar alcanzando también su mayor valor de 0,47

m, demostrándose la influencia que tiene la surgencia en la altura de ola, cuando se incrementa la profundidad llegan a la costa olas de mayor altura.

Escenario 4

En este escenario el modelo ADCIRC tiene como objetivo obtener los niveles del mar asociados a la marea meteorológica y la sobreelevación por rotura del oleaje, producidas por el paso de los huracanes estudiados.

Para llevar a cabo la ejecución de este escenario se fuerza el modelo con las componentes de la base de datos de LeProvost et al. (1998), los vientos y las presiones, y las tensiones de radiación obtenidas del escenario anterior (modelación con SWAN), siendo este el último paso del acoplamiento de estos dos modelos.

Para determinar la sobreelevación por rotura de oleaje se toman los resultados del escenario 4 y se le restan los resultados del escenario 2. La representación gráfica de estos dos escenarios se muestra en los gráficos de la figura 12.

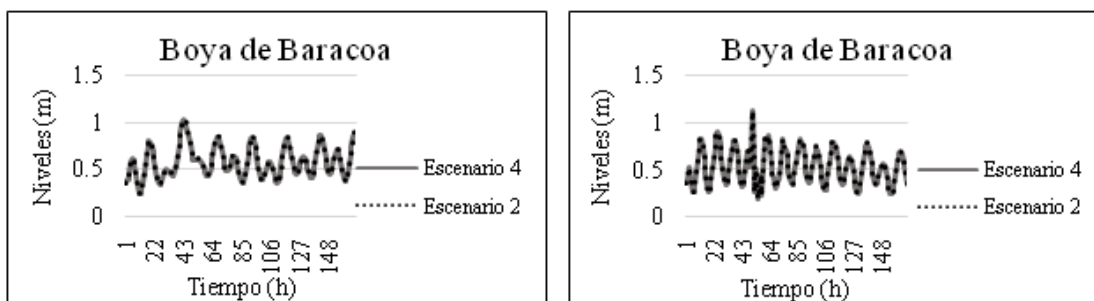


Figura 12. Representación de los escenarios 2 y 4 para los casos del huracán Ike y Hanna respectivamente en la boya de Baracoa

En el siguiente gráfico de la figura 13 se muestra la sobreelevación por rotura del oleaje producida tras el paso del huracán Ike en el punto ubicado en Sagua de Tánamo.

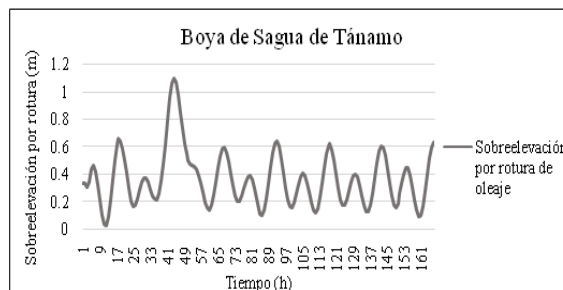


Figura 13. Sobreelevación por rotura del oleaje producida por el huracán Ike en la boya de Sagua de Tánamo

Como se puede ver en esta boya la sobreelevación por rotura de oleaje alcanza los 1,10 m, lo que se debe a que se encuentra afectada por el fondo ya que este punto está cercano a la costa con una profundidad de 1,69 m.

En el gráfico de la figura 14 se muestra la sobreelevación por rotura del oleaje producida tras el paso del huracán Hanna en un punto ubicado en la Punta de Maisí.

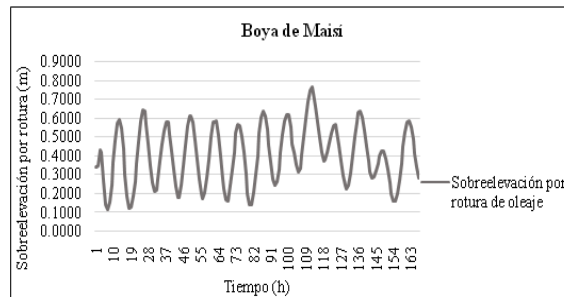


Figura 14. Sobreelevación por rotura del oleaje producida por el huracán Hanna en la boya de Maisí

Como se puede ver en esta boya la sobreelevación por rotura del oleaje alcanza los 0,76 m aproximadamente el 3 de septiembre del 2008 a las 4:00 pm. Para ver el comportamiento de la sobreelevación por rotura del oleaje con respecto a la surgencia se realizan los siguientes gráficos comparativos para los dos huracanes de estudio (figura 15).

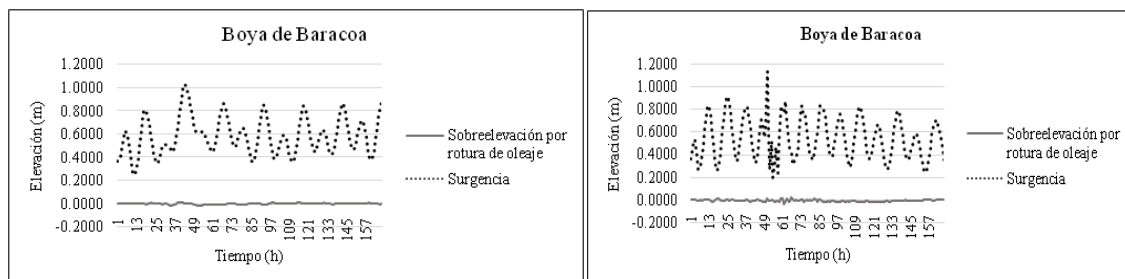


Figura 15. Comparación entre la sobreelevación por rotura del oleaje y la surgencia producidas por el huracán Ike y el Hanna respectivamente en la boya de Baracoa

En la figura 15 anterior para el caso del huracán Ike la surgencia tiene valores por debajo de 1 m hasta las 11:00 am hora local del día 7 de septiembre que aumenta hasta 1,02 m mientras que para la sobreelevación mantiene un patrón constante con valores que no sobrepasan los 0,10 m.

Para el caso del huracán Hanna se observa que la sobreelevación presenta un comportamiento constante con valores menores que la surgencia con excepción del rango de las 2:00 am hora local hasta las 10:00 am hora local del día 1 de septiembre.

En la siguiente tabla 10 se muestran los valores de los parámetros más importantes de cada uno de los huracanes en el momento más crítico de cada uno de ellos.

Tabla 10. Principales características de los huracanes en su momento más crítico

Huracán Ike		Huracán Hanna	
Boya en Sagua de Tánamo		Boya de la Punta de Maisí	
Marea (m)	0,715	Marea (m)	0,599
Surgencia (m)	0,459	Surgencia (m)	0,555
Altura máxima de ola (m)	1,939	Altura máxima de ola (m)	0,707
Marea de tormenta (m)	1,430	Marea de tormenta (m)	1,135
Sobreelevación por rotura de oleaje máxima (m)	0,523	Sobreelevación por rotura de oleaje máxima (m)	0,224

CONCLUSIONES

- Se escoge como dominio de trabajo la región geográfica que parte desde los 35° de latitud Norte en Carolina de Norte, Estados Unidos, hasta las inmediaciones de la isla de Corocora en Venezuela oriental a lo largo del meridiano de 60° Oeste y que comprende los mares interamericanos, Golfo de México y la zona Norte del Océano Atlántico.
- En la validación de los vientos la base de datos CFS presenta un comportamiento similar a los obtenidos por las boyas de la NOAA con coeficientes de correlación aceptables donde cuyos valores se encuentran en un rango de entre 0,3113 y 0,8943.
- Se construyó una malla no estructurada adecuada a las condiciones de la zona de estudio que tiene un total de 237878 elementos y 130014 nodos con una transición entre elementos de 0,5 y un tamaño mínimo y máximo de los elementos de 50 m y 40 000 m respectivamente.
- Tras la simulación de la surgencia generada por vientos y presiones se obtienen valores de 0,949 m en Pilón en el caso del huracán Hanna y de 0,551 m en Manzanillo para el caso del huracán Ike.
- La mayor sobreelevación por rotura de oleaje se encuentra en la boya ubicada en Sagua de Tánamo con 0,523 m provocada por el huracán Ike el 7 de septiembre y la mayor sobreelevación por rotura de ola del huracán Hanna es de 0,224 m en la Punta de Maisí el 3 de septiembre del 2008.
- El acoplamiento de los modelos ADCIRC Y SWAN permite mayor precisión en la obtención de los resultados.

REFERENCIAS

- Almarales D.** (2017). “Simulación de la surgencia y campos de oleaje asociados de los huracanes Hanna 2008 e Ike 2008 en la región oriental de Cuba”, Tesis de Diploma, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana.
- Bueno R., Herzfeld C., and Ackerman F.** (2008). “El Caribe y el cambio climático: Los costos de la inacción”, p. 2, Stockholm Environment Institute - US Center Global Development and Environment Institute, Tufts University, Massachusetts, USA.
- Córdova L. y Lamazares R.** (2012). “Simulación de los campos de viento y oleaje asociados a huracanes”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, vol. 33, no. 2, pp. 50-65, ISSN: 1815-591X, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.
- Dietrich J., Tanaka S., Westerink J., Dawson C., Luettich R., Zijlema M., Holthuijsen L., Smith J., Westerink L. and Westerink H.** (2011) “Performance of the unstructured-mesh, SWAN+ADCIRC model in computing hurricane waves and surge.” Journal of Scientific Computing, vol. 52, pp. 468-497, ISSN: 1573-7691, Springer International, Publishing AG, USA.
- Lamazares R.** (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.
- LeProvost C., Lyard F., Molines J. M., Genco M. L., and Rabilloud F.,** (1998). “A hydrodynamic ocean tide model improved by assimilating a satellite altimeter-derived data set”, Journal of Geophysical Research, vol.103, no.C3, pages 5513-5529, ISSN 2169-9291, American Geophysical Union, USA.
- Rubiera J. y M. Ballester,** (2008). “Resumen de Temporada”, Instituto de Meteorología, CITMA, La Habana, Cuba. Extraído de: <http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTI LLAS&TB1=Temporadas/temporada2008.htm> en abril de 2017
- Westerink J.J., Blain C. A., Luettich, R. A. Jr., Scheffner N. W.,** (1994), “ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries”. Report 2. user's manual for ADCIRC-2DDI, Technical Rep. No. DRP-92-6. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, USA.
- Zijlema M.** (2009). “Application of UnSWAN for wave hindcasting in the Dutch Wadden Sea”, 11th Int. Workshop on Wave Hindcasting & Forecasting, Halifax, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.