

Modelación hidrodinámica y de oleaje de los huracanes Wilma 2005 y Gustav 2008

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

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

Debido a los efectos negativos que tienen los huracanes en la Isla de Cuba como son: penetraciones del mar, inundaciones costeras, erosión de las playas y las afectaciones que sufren las viviendas y edificaciones se hace necesario la implementación de modelos numéricos con el objetivo de establecer mapas de riesgo ante inundaciones y evaluar los efectos producidos por estos. En este trabajo se realizan simulaciones con los modelos ADCIRC y SWAN, acoplados en una primera aproximación, de los huracanes Wilma 2005 y Gustav 2008 en su paso por el occidente del país, obteniendo valores de surgencia y de sobreelevación por rotura de la ola. Se realiza la validación de los datos de vientos utilizados y del oleaje simulados comparando con datos medidos por las boyas de la NOAA.

Palabras clave: marea, modelación numérica, oleaje, sobreelevación por rotura de la ola, surgencia.

Hydrodynamic and wave modeling of hurricanes Wilma 2005 and Gustav 2008

ABSTRACT

Due to the negative effects of hurricanes on the Isle of Cuba such as: sea penetration, coastal flooding, beach erosion and damages suffered by homes and buildings it is necessary to implement numerical models with the objective of establishing flood risk maps and evaluate the effects produced by them. In this work, simulations are carried out with the ADCIRC and SWAN models, coupled in a first approximation, of the hurricanes Wilma 2005 and Gustav 2008 in their passage through the western part of the country, obtaining upwelling and wave values due to the breaking wave. The validation of the data of winds used and of simulated waves is made by comparing with data measured by the NOAA buoys.

Keywords: tide, numerical model, wave, wave set up, storm surge.

INTRODUCCIÓN

Producto del cambio climático las aguas de los océanos se calientan y se expanden al subir la temperatura, los glaciares y las capas de hielo se derriten y los niveles del mar suben. Las aguas más calientes estimulan huracanes de mayor fuerza, gran causa de preocupación en la región, ya que estos generan daños físicos y económicos extensos (Bueno et al. 2008). Es por eso que resulta necesaria la predicción y el estudio del comportamiento de la surgencia y de los campos de oleaje ocasionados por eventos meteorológicos extremos mediante el acoplamiento de los modelos SWAN y ADCIRC. En una primera aproximación teniendo en cuenta que según Jacobsen and Rouge (2013) en el mundo se ha desarrollado el acoplamiento de modelos hidrodinámicos con modelos de oleaje, con el objetivo de lograr una mayor precisión en las investigaciones. En Cuba, estos fenómenos solo se habían estudiado de manera independiente por distintos autores como Córdova y González (2014).

Para este estudio se analizan los huracanes Wilma en 2005 y Gustav en 2008, en su paso por la región occidental de la isla de Cuba específicamente las provincias Pinar del Río, Artemisa, La Habana y Mayabeque.

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Descripción de los Huracanes

Huracán Wilma:

En la mañana del día 18 de octubre de 2005 la tormenta tropical Wilma se transformó en huracán y en la noche del 19 ya tenía categoría 4. Wilma ocasionó inundaciones en zonas bajas tanto del litoral sur como del norte, principalmente en la región occidental, donde llegaron a clasificarse de fuertes.

En la costa sur de la provincia de Mayabeque, el pueblo de Surgidero de Batabanó quedó cubierto hasta la distancia de 3000 m con una altura de 1,5 m. En playa Mayabeque el agua penetró hasta los 2000 m y en Playa Rosario hasta 1300 m, alcanzando la altura de 1,2 m. La marejada derribó secciones del muro del Malecón habanero en Lealtad, Escobar y Belascoaín. (Rubiera y Ballester 2005)

Huracán Gustav:

La tormenta tropical Gustav en la noche del 25 de agosto de 2008 alcanzó la fuerza de huracán y al mediodía del día 30 era un huracán de categoría 4.

En el sur de La Habana las penetraciones del mar ocasionaron inundaciones hasta 3 km en Playa Majana, hasta un km en Playa del Cajío y 500 m en Playa Guanímar. En el litoral sur de Pinar del Río las inundaciones llegaron hasta cuatro y cinco km de la costa en los municipios Candelaria y San Cristóbal respectivamente (Rubiera y Ballester 2008).

Definición de los períodos de simulación

Se basa en la selección de la cantidad de días, dentro de la duración del huracán, que serán utilizados para aplicar la simulación. El período de simulación que se aplica al huracán Wilma comienza el 20/10/2005 a las 00 horas UTC (tiempo universal coordinado) y finaliza el 25/10/2005 a las 00 horas UTC, para una cantidad de horas de simulación de 121 horas. En el caso del huracán Gustav se comienza la simulación el 27/8/2008 a las 00 horas UTC y finaliza el 2/9/2008 a las 00 horas UTC, para una cantidad de horas de simulación de 145 horas.

Definición del dominio de cómputo

Para la definición del dominio de cómputo se realiza un estudio de sensibilidad de dominio para lograr una reducción del mismo de forma tal que donde se coloque la frontera estén bien definidas las amplitudes y fases de las componentes de marea utilizadas las cuales son K1, K2, M2, N2, O1, Q1, S2, P1, Mf, Mm, M4, Ms4, y Mn4 de la base de datos (LeProvost et al. 1998) y también para capturar las características reales de la resonancia en el recinto. Para este estudio se crean tres dominios de trabajo que abarcan el océano Atlántico Norte occidental, el mar Caribe, y el Golfo de México.

Se realizan corridas con el modelo ADCIRC forzado con mareas, y se realiza una comparación con las mareas predichas por el predictor de mareas WXTide32 y se determina el coeficiente de correlación, para los dos dominios a analizar (ver tabla 1).

Tabla 1. Coeficiente de correlación correspondiente a cada boya

Huracán	Boyas	Coeficiente de correlación	
		40°_35°	40°_30°
Wilma	Bahía Honda	0,99	0,82
	Cabo de San Antonio	0,98	0,07
	Carapachibey	0,96	0,04
	La Habana	0,99	0,83
Gustav	Bahía Honda	0,99	0,86
	Cabo de San Antonio	0,98	0,16
	Carapachibey	0,95	0,0004
	La Habana	0,99	0,86

Se selecciona el dominio 40°_35° de cómputo debido a que este es el de mejores coeficientes de correlación, el cual parte desde los 35° N de latitud en Carolina del Norte, Estados Unidos hasta las inmediaciones de isla de Corocora en Venezuela oriental a lo largo del meridiano de 60° W (ver figura 1).

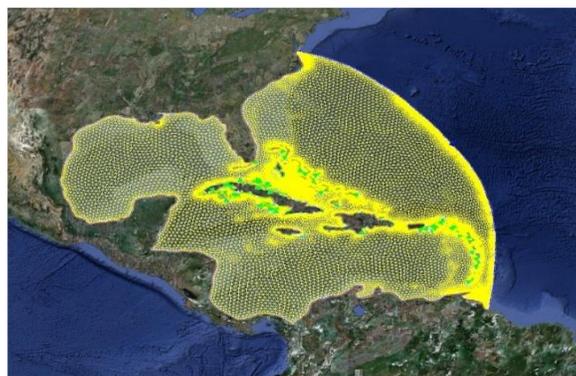


Figura 1. Dominio seleccionado

Línea de costa

La información de línea de costa fue entregada por la empresa GEOCUBA y comprobada con una foto satelital de la isla de Cuba proporcionada por el Departamento de Geociencias de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio

Echeverría por el Grupo de Ingeniería Costera y Marítima de esta universidad. Estos datos fueron acoplados con los de la base de datos GEBCO, resultando una línea de costas general espaciada a 100 m en el área de estudio, de 100 a 3000 m de forma ascendente en el resto del país y el cayero insular a 1000 m. Las islas del Caribe y del océano Pacífico tienen un espaciamiento de 7000 m, el Golfo de México 15 000 m y el resto de 20 000 m (ver figura 2).



Figura 2. Línea de costa

Batimetría

La batimetría fue proporcionada por diferentes instituciones y se conformó uniendo diferentes datos, o sea, para la zona referida entre Mariel y Santa Cruz del Norte se utilizan datos proporcionados por GEOCUBA con una resolución de 30 s. Para el resto de la costa de Cuba se utiliza un modelo digital del terreno al cual se le eliminaron los datos de topografía y los que tienen valores mayores que 1000 m, con una resolución de 200 m; estos datos los proporcionó el INSMET. Además se utiliza una malla regular de 1 min de resolución que va desde los $-86^{\circ}; 25^{\circ}$ NW hasta los $-86^{\circ}; 19^{\circ}$ SW y desde los $74^{\circ}; 25^{\circ}$ NW hasta los $74^{\circ}; 19^{\circ}$ SW. Estos datos fueron acoplados con los obtenidos de la base de datos GEBCO en forma de malla regular con una resolución de 5 min (ver figura 3).

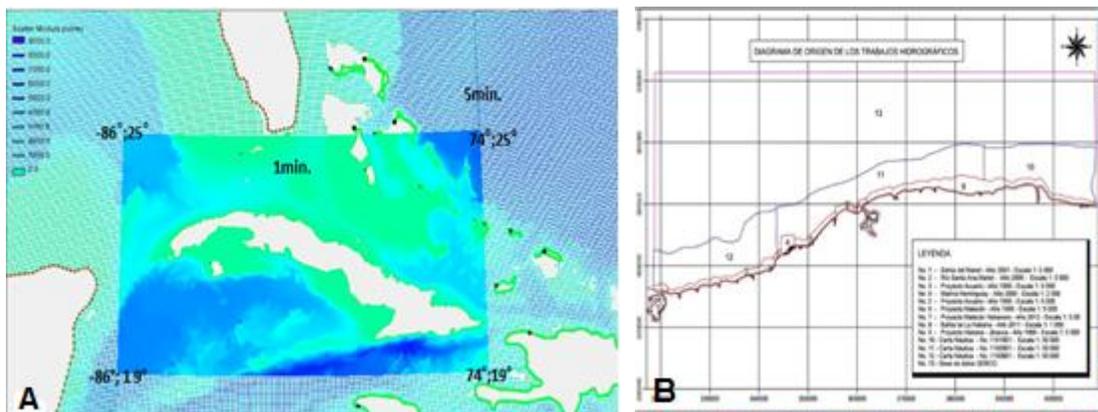


Figura 3. A) Batimetría total y B) Diagrama de origen de los trabajos hidrográficos

Definición de la malla de cómputo

Se elaboran múltiples mallas variando diferentes parámetros hasta lograr la malla más adecuada. La malla seleccionada tiene un total de 238 045 elementos y 129 885 nodos con una

transición entre elementos de 0,5 y un tamaño mínimo y máximo de los elementos de 50 y 40 000 m respectivamente (ver figura 4).

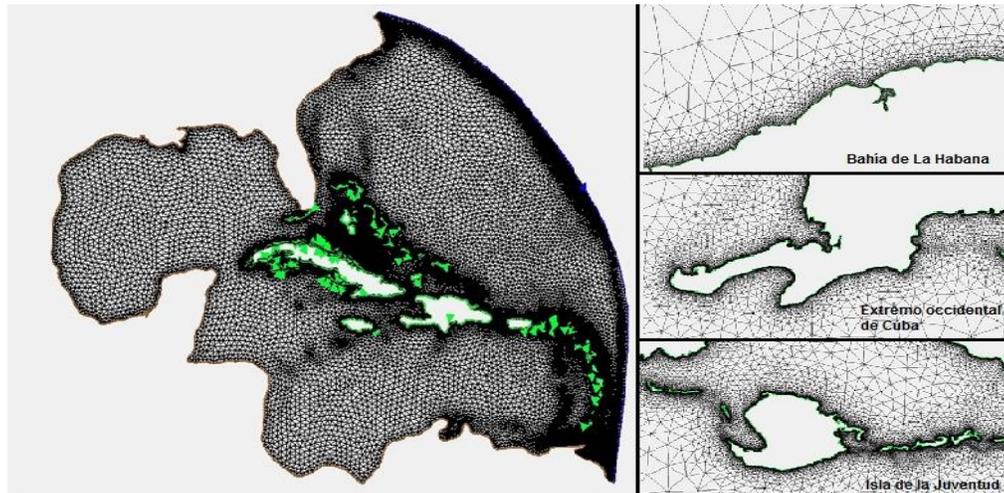


Figura 4. Malla de cómputo

Modelo matemático ADCIRC (modelo de circulación avanzada para océanos, costas y estuarios)

ADCIRC, es un programa de computación 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 (FE) y en el tiempo usando el método de diferencia finita (FD).

ADCIRC puede trabajarse utilizando sistemas de coordenadas tanto esféricas como cartesianas y puede ejecutarse como modelo de profundidad en dos (2DDI) o tres (3D) dimensiones. (Westerink et al. 1994)

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

SWAN es un modelo de oleaje de tercera generación para obtener estimaciones realistas de parámetros de la ola en las áreas costeras, lagos y estuarios a partir de condiciones dadas de viento, fondo y corriente. El modelo se basa en la ecuación del equilibrio de la acción de las olas con fuentes y sumideros. SWAN utiliza mallas no estructuradas las cuales facilitan el proceso para la discretización espacial y temporalmente un modelo de altas presiones, como es el caso de los ciclones y huracanes. (Holthuijsen et al. 2004)

Establecimiento de los modelos

Se utiliza el modelo ADCIRC 2DDI formulado por la ecuación de Onda-Continuidad en coordenadas esféricas, el cual es forzado con la marea en condiciones normales; la presión y los vientos en condiciones normales y extremos de determinado fenómeno meteorológico.

El modelo SWAN se utiliza en modo de trabajo no estacionario en dos dimensiones; el coeficiente de arrastre que se utiliza es $C_{dcap}=0,02$. Se utilizan coordenadas esféricas y el modelo de tercera generación Komen-Agrow. Se implementa el modelo de fricción de fondo de Jonswap utilizando un valor de coeficiente de fricción de 0,019 y para el modelo de whitecapping el modelo de Komen.

Validación de los modelos: comparación entre la base de datos CFS y las boyas de la NOAA

El grupo de trabajo fundador de la base de datos Climate Forecasting System (CFS) tiene como objetivo el reanálisis de ciclones tropicales, con el propósito de representar el estado del arte global atmosférico por años. Estas bases de datos constan con reanálisis desde 1948 hasta la fecha. Se hacen actualizaciones diarias y mensuales de los estados atmosféricos, generado por un modelo de asimilación constante de datos (Saha 2010).

Los datos de vientos y de presiones son extraídos de la base de datos CFS, y debido a que son utilizados por los modelos se hace necesario saber cuán confiable es esta información, por lo que se realiza una validación con las mediciones de las velocidades del viento de las boyas de la NOAA usando los siguientes métodos estadísticos: error absoluto cuadrático medio (RMSE), error absoluto medio (MAE) y el coeficiente de correlación.

Estos indicadores caracterizan los resultados cuantitativamente.

Según Price and Vojinovic (2011):

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\varphi_i - \varphi_{obs})^2}{N}} \quad (1)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|\varphi_i - \varphi_{obs}|}{N} \quad (2)$$

donde: φ_i son los valores calculados, φ_{obs} son los valores observados y N es el total de valores.

En estadística, la correlación indica la fuerza y dirección de la relación lineal, y la proporcionalidad entre dos variables estadísticas. La relación entre dos variables cuantitativas queda representada mediante la “línea de mejor ajuste”, trazada a partir de una serie de puntos.

Este coeficiente mide la relación entre dos variables determinadas, y expresa que:

Mientras más cerca de uno esté el valor del coeficiente de correlación, mayor y de mejor calidad será la relación de las variables seleccionadas, es decir que el rango del indicador es de $0 < \text{índice de correlación (R}^2) < 1$. (Price and Vojinovic 2011)

Se establece por los autores la siguiente calificación para el coeficiente de correlación: bueno (1-0,7); regular (0,7-0,4) y malo ($< 0,4$).

Los resultados que se obtienen son los siguientes para cada una de las boyas seleccionadas durante el huracán Wilma (ver tabla 2).

Tabla 2. Parámetros estadísticos obtenidos de la comparación entre el modelo CFS y las boyas de la NOAA durante el huracán Wilma

Boya	Coficiente de Correlación	RMSE(m/s)	MAE(m/s)
41010	0,76	2,58	1,58
42039	0,97	1,18	0,93
41002	0,21	2,96	2,24
42056	0,90	1,61	1,23
42057	0,86	1,04	0,80

Se puede apreciar en el siguiente gráfico la similitud entre los valores obtenidos por las boyas de la NOAA y los obtenidos de la base de datos CFS para el huracán Wilma, donde los coeficientes de correlación se califican de buenos debido a su proximidad a 1 excepto en la boya 41002 cuyo valor es de 0,21. Además los errores absolutos y medios cuadráticos son aceptables (ver figura 5).



Figura 5. Comparación entre el modelo CFS y las boyas de la NOAA durante el huracán Wilma en la boya 42056

En el caso del huracán Gustav se obtienen los siguientes resultados para cada una de las boyas seleccionadas (ver tabla 3).

Tabla 3. Parámetros estadísticos obtenidos de la comparación entre el modelo CFS y las boyas de la NOAA durante el huracán Wilma

Boya	Coefficiente de Correlación	RMSE(m/s)	MAE(m/s)
42001	0,93	1,17	0,8
42003	0,96	1,18	0,86
42058	0,70	1,61	1,32
42059	0,56	1,11	0,91
42040	0,95	2,63	1,64

Según los valores de los parámetros estadísticos mostrados en la tabla 3, donde los coeficientes de correlación se califican de buenos dada su proximidad a la unidad, excepto en la boya 42059 que tiene un valor de 0,56, y los errores absolutos y medios cuadráticos son aceptables. Se aprecia la confiabilidad de la base de datos CFS en el caso del huracán Gustav, lo que se evidencia además en los siguientes gráficos que muestran la similitud entre los valores obtenidos por las boyas de la NOAA y los obtenidos de dicha base de datos (ver figura 6).

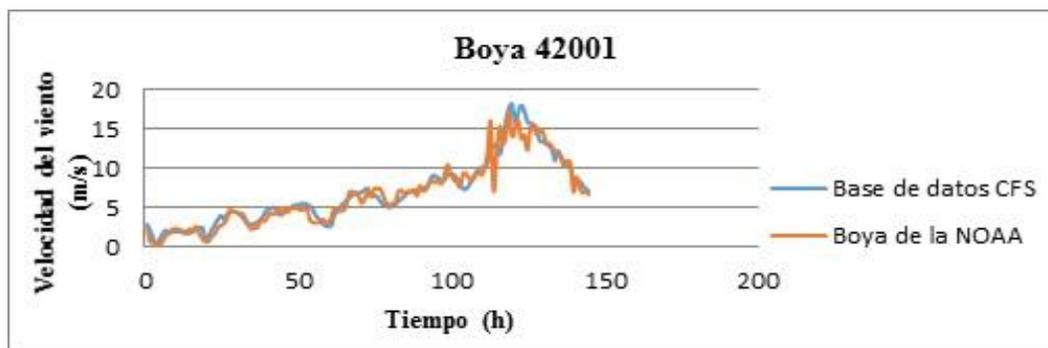


Figura 6. Comparación entre el modelo CFS y las boyas de la NOAA durante el huracán Gustav en la boya 42001

Diseño de la investigación

Es necesario definir escenarios para observar la capacidad de los modelos de reproducir los fenómenos y lograr en cada uno de ellos los análisis que se plantean en la siguiente tabla 4.

Tabla 4. Diseño de la investigación.

Escenario	Modelo	Forzadores	Análisis
1	ADCIRC	Componentes de marea	Niveles del mar
2	ADCIRC	Mareas, vientos y presiones	Surgencia
3	SWAN	Vientos, niveles y corrientes	Características del oleaje
			Determinar tensión de radiación
4	ADCIRC	Componentes de mareas, viento, presiones y tensiones de radiación	Niveles máximos
			Sobreelevación por rotura de la ola.

Definición de las boyas virtuales

La ubicación de las boyas virtuales se realizó a partir del conocimiento por los autores de la importancia e interés mostrado en informes, y otros documentos por instituciones como: el Ministerio del Medio Ambiente, el Instituto de Meteorología, y la Defensa Civil. En la tabla 5 se describe como quedaron posicionadas las boyas.

Tabla 5. Localización de las boyas virtuales

Boya	Ubicación		Profundidad	Lugar
	#	Longitud	Latitud	
1	82,5300784486	22,5828888737	2,60	Sur de Batabanó
2	82,9242907982	21,4485388031	10,71	Carapachibey
3	83,5787305592	22,2271997420	0,54	La Coloma
4	84,9168085344	21,9165499234	1,09	Cabo de San Antonio
5	83,1862447076	22,9396386373	3,38	Bahía Honda
6	82,9744841925	22,9972783232	5,63	Cabañas
7	82,7572910514	23,0248432066	7,00	Mariel
8	82,5048516698	23,0846856549	5,02	Marina Heminway
9	82,4716889966	23,0931882382	3,25	Siboney
10	82,3710954301	23,1418818216	2,84	Malecón Ameijeiras
11	82,3625146707	23,1432887374	2,31	Malecón intermedio
12	82,3585910525	23,1462350514	2,60	Malecón punta
13	82,3580462013	23,1487203670	16,76	Bahía de la Habana
14	82,3544100076	23,1482021782	3,45	Habana Norte
15	82,2129094707	23,1790690134	2,07	Tará
16	81,9425311198	23,1588767225	1,27	Santa Cruz del Norte

RESULTADOS OBTENIDOS

Escenario 1

Al terminar la corrida con ADCIRC la información obtenida es comparada con los datos de mareas predichos por el programa WXTide32, y una vez más se valida el modelo hallando los parámetros estadísticos (ver tabla 6).

Tabla 6. Parámetros estadísticos obtenidos de la comparación entre los valores predichos por Xtide y los obtenidos de la simulación con ADCIRC para el huracán Wilma

Boyas	Coefficiente de Correlación	RMSE(m)	MAE(m)
Bahía Honda	0,56	0,21	0,17
Cabo San Antonio	0,62	0,23	0,18
Carapachibey	0,49	0,17	0,15
La Habana	0,64	0,19	0,16

Para el caso del huracán Wilma se obtienen valores del coeficiente de correlación regulares mientras que los errores medio cuadrático y absoluto tienen buenos resultados. Se puede observar lo antes planteado mediante el siguiente gráfico (ver figura 7).

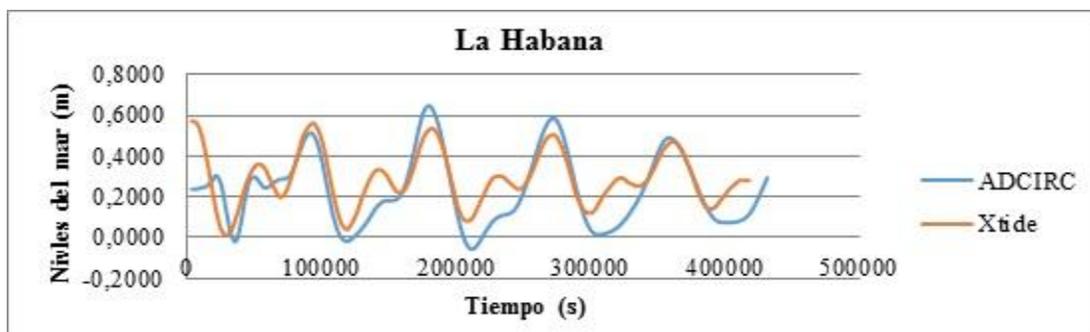


Figura 7. Comparación de los niveles del mar producidos por la marea simulados por ADCIRC con los predichos por Xtide para el huracán Wilma en la boya de La Habana

Para el caso del huracán Gustav ver la siguiente tabla 7.

Tabla 7. Parámetros estadísticos obtenidos de la comparación entre los valores predichos por Xtide y los obtenidos de la simulación con ADCIRC para el huracán Gustav

Boyas	Coefficiente de Correlación	RMSE(m)	MAE(m)
Bahía Honda	0,53	0,15	0,13
Cabo San Antonio	0,16	0,17	0,13
Carapachibey	0,19	0,15	0,13
La Habana	0,67	0,20	0,16

Para el caso del huracán Gustav se obtienen valores del coeficiente de correlación regulares en las boyas de Bahía Honda y La Habana, pero no así en las del Cabo de San Antonio y Carapachibey cuyos valores son de solo 0,16 y 1,19 respectivamente; mientras que los valores de

los errores medio cuadrático y absoluto sí tienen buenos resultados. A continuación, se puede observar lo antes planteado mediante el siguiente gráfico (ver figura 8).

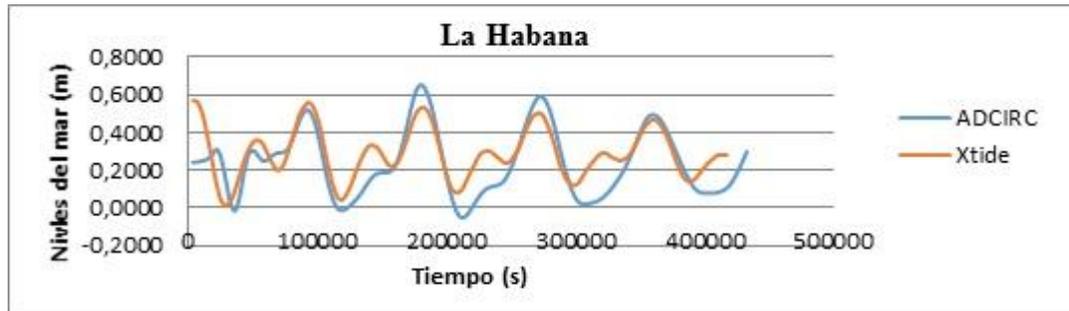


Figura 8. Comparación de los niveles del mar producidos por la marea simulados por ADCIRC con los predichos por Xtide para el huracán Gustav en la boya de La Habana

Escenario 2

En este escenario se simula la surgencia producida por los huracanes y el valor de esta se obtiene mediante la resta de los niveles del mar obtenidos en el escenario 2 y los obtenidos en el escenario 1 (ver figura 9).

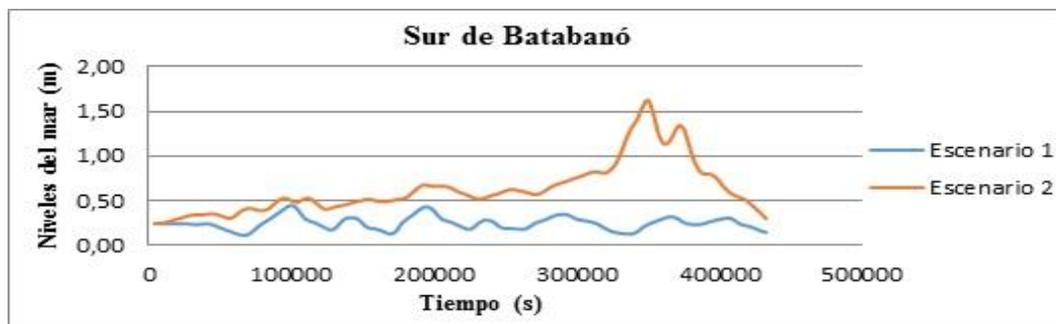


Figura 9. Representación de los escenarios 1 y 2 en el Sur de Batabanó durante el huracán Wilma

A continuación, se muestra el gráfico de la boya que refleja el máximo nivel de surgencia para cada uno de los huracanes. Para el análisis de la surgencia no existen valores de referencia, pero se puede observar bien el fenómeno (ver figura 10).

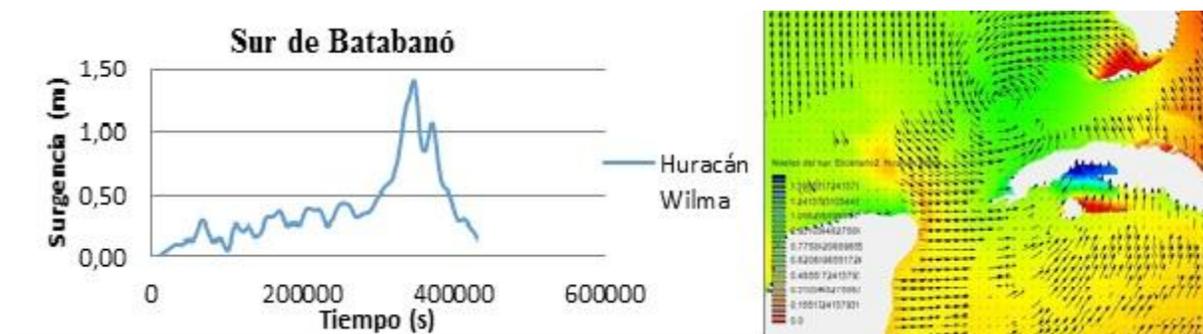


Figura 10. A la izquierda surgencia y a la derecha niveles del mar y comportamiento de los vientos producidos por el huracán Wilma en el Sur de Batabanó

Durante el huracán Wilma los valores máximos de surgencia son localizados en la región sur de la isla de Cuba específicamente en la región comprendida entre el golfo de Batabanó y la Coloma donde se alcanzan valores de 1,40 m a las 0:00 h UTC del 24 de octubre y 0,95 m a las 19:00h UTC del 23 de octubre respectivamente porque en esta área los vientos vienen desde el mar hasta la tierra como se muestra en la figura anterior donde se aprecia además en color azul oscuro el nivel máximo de surgencia.

El huracán Gustav atravesó la región occidental de la isla de Cuba provocando niveles de surgencia en el cabo de San Antonio de aproximadamente 0,40 m de altura a las 2:00 h UTC del 31 de agosto de 2008 debido a la dirección de los vientos y en el Golfo de Batabanó se alcanzaron surgencias de casi un metro de altura a las 3:00 h UTC del 30 de agosto de 2008 ya que en esta área se encuentra la plataforma insular y los vientos vienen desde el mar hasta la tierra como se muestra en la figura 11 donde aparece además en color azul oscuro el nivel máximo de surgencia en este punto (ver figura 11).

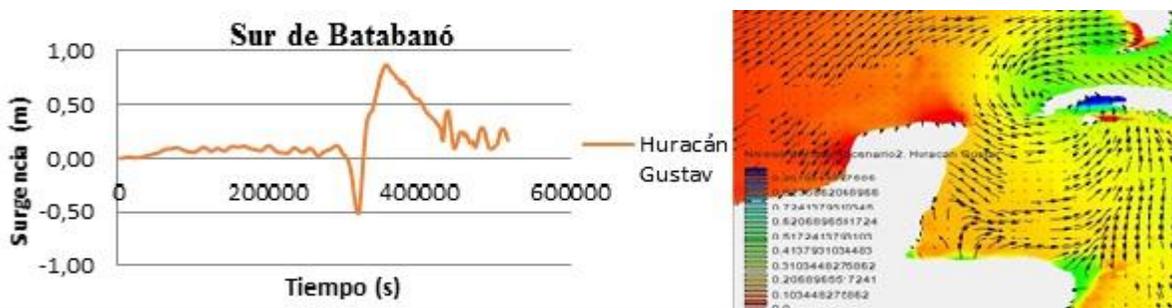


Figura 11. A la izquierda surgencia y a la derecha niveles del mar y comportamiento de los vientos producidos por el huracán Gustav en el Sur de Batabanó

Escenario 3

Con el modelo SWAN se obtienen las tensiones de radiación que se necesitan para la corrida del último escenario y las características del oleaje como altura significativa y período pico del espectro, ocurriendo el acoplamiento entre los modelos ADCIRC y SWAN. Para saber cuán confiable es el modelo se realiza una validación de los valores de altura significativa obtenidos por el modelo con los medidos por las boyas de la NOAA para cada uno de los huracanes que se estudian. En el caso del huracán Wilma se obtienen los siguientes resultados (ver tabla 8).

Tabla 8. Parámetros estadísticos obtenidos de la comparación entre el modelo SWAN y las boyas de la NOAA durante el huracán Wilma

Boya	Coefficiente de Correlación	RMSE (m)	MAE (m)
41010	0,87	0,57	0,23
42039	0,58	1,43	0,98
41002	0,54	0,36	0,24
42056	0,94	1,64	0,78
42057	0,84	0,68	0,52

Como se observa en la tabla 8 los coeficientes de correlación están cercanos a uno por lo que se consideran que son buenos excepto en las boyas 42039 y 41002 que son regulares con valores de 0,58 y 0,54 respectivamente. Por otro lado, los valores de los errores medios cuadráticos y absolutos son buenos demostrando así la validez del modelo. En las siguientes gráficas se

evidencia lo antes mencionado (ver figura 12). Los resultados obtenidos para el huracán Gustav en la tabla 9.



Figura 12. Comparación entre el modelo SWAN y las boyas de la NOAA durante el huracán Wilma en la boya 41010

Tabla 9. Parámetros estadísticos obtenidos de la comparación entre el modelo SWAN y las boyas de la NOAA durante el huracán Gustav

Boya	Coefficiente de Correlación	RMSE (m)	MAE (m)
42001	0,98	0,56	0,32
42003	0,98	0,26	0,14
42058	0,61	0,25	0,19
42059	0,42	0,22	0,16
42040	0,98	1,13	0,41

En la tabla 9 se puede apreciar como los coeficientes de correlación están muy cercanos a uno por lo que se consideran que son muy buenos excepto en la boya 42059 con valor de 0,42. Por otro lado los valores de los errores medios cuadráticos y absolutos son muy buenos demostrando así la validez del modelo. En las siguientes gráficas se evidencia lo antes mencionado (ver figura 13).

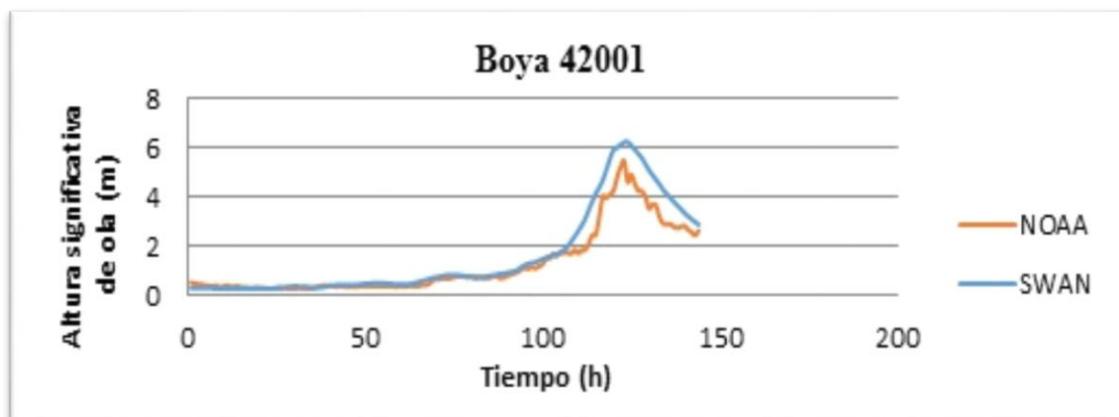


Figura 13. Comparación entre el modelo SWAN y las boyas de la NOAA durante el huracán Gustav en la boya 42001

Análisis de la altura significativa de la ola y la surgencia

Se realiza el análisis de las alturas significativas de las olas obtenidas en la simulación y la surgencia calculada en el escenario 2, reflejando así los momentos de mayor altura significativa y surgencia provocados por Wilma y Gustav. En la figura 14 la surgencia es prácticamente

constante con valores por debajo de 0,50 m y la altura significativa de ola tiene un comportamiento similar hasta las 15:00 h UTC del 24 de octubre de 2005 que comienza a aumentar alcanzando los 5,55 m de altura. En la figura 15 la marea se mantiene constante y con valores muy bajos hasta las 22:00 h UTC del 31 de agosto de 2008 en que se eleva de forma que alcanza los 1,43 m de altura y luego baja y se mantiene de forma irregular por debajo de los 0,60 m; por otro lado la altura de ola significativa alcanza su máximo a las 22:00 h UTC del 30 de agosto de 2008, con alturas de 1,40 m, momento en el que la surgencia alcanza aproximadamente los 0,27 m, luego vuelve a elevarse coincidiendo con el momento máximo de surgencia alcanzando alturas significativas de olas en el orden de los 1,35 m. (ver figura 15).

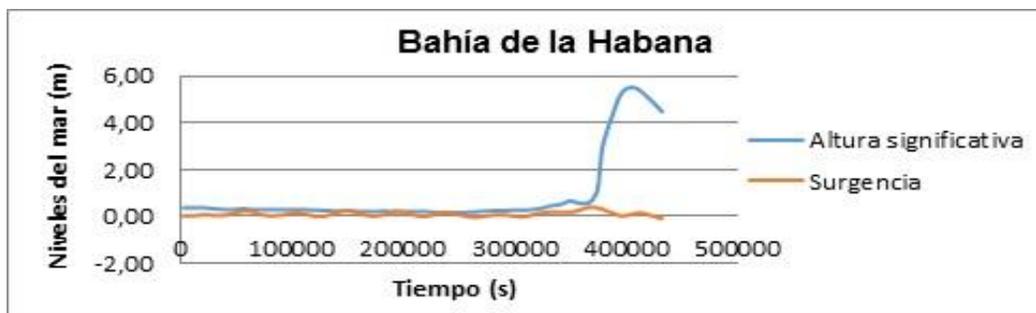


Figura 14. Altura significativa de ola y surgencia producidas por el huracán Wilma en la Bahía de La Habana

La altura significativa de la ola es mayor que la surgencia porque en el Malecón Habanero y en la bahía de la Habana el perfil de suelo es más profundo. A medida que se incrementa la altura significativa de la ola se incrementa la energía con la que esta llega a la costa.

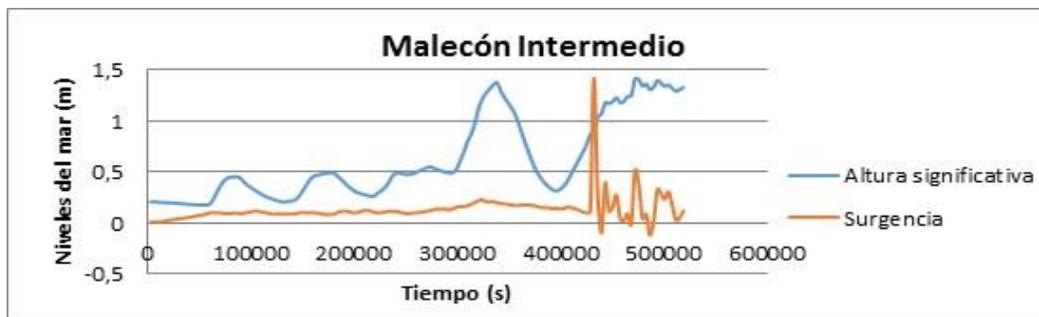


Figura 15. Altura significativa de ola y surgencia producidas por el huracán Gustav en el Malecón habanero

Escenario 4

Este es el último escenario de la investigación, donde se calcula la sobreelevación por rotura de la ola producida por los huracanes como la resta de los niveles del mar obtenidos en el escenario 4 menos la surgencia obtenida en el escenario 2. En este escenario SWAN proporciona al modelo ADCIRC las tensiones de radiación y se simula el huracán en su totalidad. La zona de mayor sobreelevación por rotura de la ola durante el huracán Wilma fue en La Coloma, Pinar del Río, donde se alcanzan los 0,29 m a las 20:00h UTC del 22 de octubre de 2005 (ver figura 16).

Durante el huracán Gustav a las 4:00 h UTC del 29 de agosto de 2008, se alcanzan valores de 0,16 m en el sur de Batabanó (figura 17). En las figuras 16 y 17 se evidencia cómo la sobreelevación por rotura de ola, en el sur de Batabanó, es muy pequeña en comparación con la surgencia, porque en esta área se localiza la plataforma insular y por tanto hay menores

profundidades y se producen los efectos antes mencionados. En la 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.

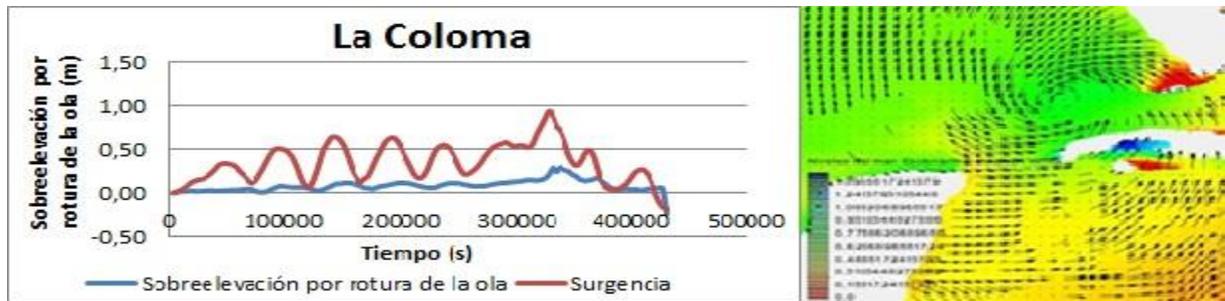


Figura 16. A la izquierda sobre elevación por rotura de la ola y surgencia y a la derecha niveles del mar y comportamiento de los vientos durante el huracán Wilma en La Coloma, Pinar del Río



Figura 17. A la izquierda sobre elevación por rotura de la ola y surgencia y a la derecha niveles del mar y comportamiento de los vientos durante el huracán Gustav en el Sur de Batabanó

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

Sur de Batabanó				
Huracán	Wilma	%	Gustav	%
Marea (m)	0,233	13,83	0,259	23,94
Marea + viento y presiones(m)	1,630	96,74	1,105	102,13
Surgencia (m)	1,397	82,91	0,846	78,19
Altura máxima de ola(m)	1,062	0	0,685	0
Sobre elevación por rotura de oleaje máxima(m)	0,055	3,26	-0,023	2,13
Marea de tormenta(m)	1,685	100	1,082	100

CONCLUSIONES

- El dominio de trabajo seleccionado parte desde los 35° N de latitud en Carolina del Norte, Estados Unidos hasta las inmediaciones de isla de Corocora en Venezuela oriental a lo largo del meridiano de 60° W.
- La malla seleccionada tiene un total de 238 045 elementos y 129 885 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.

- Se validan los modelos ADCIRC y SWAN comparando los valores obtenidos en las simulaciones con los medidos por las boyas de la NOAA arrojando muy buenos resultados de valores del coeficiente de correlación y de los errores medio cuadrático y absoluto.
- Se simula la surgencia producida por vientos y presiones, obteniendo significativos valores de esta: 1,40 durante el huracán Wilma en 2005 en el sur de Batabanó y 0,98 m en La Coloma, Pinar del Río durante el huracán Gustav en 2008.
- Mediante el acoplado del modelo en un primer paso se obtienen valores máximos de altura significativa de la ola de 1,40 m en el Malecón Habanero durante el huracán Gustav y de 5,55 m en la bahía de la Habana durante el huracán Wilma.
- En un segundo paso del acoplado de los modelos se simula la sobre elevación por rotura de la ola obteniendo máximos valores de 0,29 m en La Coloma, Pinar del Río durante el huracán Wilma y de 0,16 m en el Sur de Batabanó durante el huracán Gustav. El acoplado de modelos permite reflejar de manera más real el fenómeno y obtener resultados de mejor calidad.

REFERENCIAS

- Bueno R., Herzfeld C., and Ackerman F.** (2008), “El Caribe y el cambio climático: Los costos de la inacción”, p. 8;18-19, Stockholm Environment Institute - US Center Global Development and Environment Institute, Tufts University, Massachusetts, USA.
- Córdova L. y González Y.** (2014). “Campo de oleaje en la bahía de La Habana para diferentes escenarios climáticos”, Ing. Hidráulica y Ambiental, Vol. XXXV, No.2, p. 3-17, ISSN 1815–591X, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.
- Holthuijsen L. H., Booij N., Haagsma J. G., Kieftenburg A. T. 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.
- Jacobsen B. and Rouge B.** (2013), “Hurricane surge hazard analysis: the state of the practice and recent application for southeast Louisiana”, p. 42-58, Task Order 02-03-003, The Southeast Louisiana Flood Protection Authority-East, Louisiana, USA.
- 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.
- Price R. K. and Vojnovic Z.** (2011). “Data, models and decision support for integrated urban water management”, Vol. I., IWA Publishing, ISBN 978-178-040-136-2, London, UK.
- Rubiera J. y Ballester M.** (2005). “Resumen de Temporada”, Instituto de Meteorología, CITMA, La Habana, Cuba. Extraído de: <http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=Temporadas/temporada2005.htm> en abril de 2017.
- Rubiera J. y Ballester M.** (2008). “Resumen de Temporada”, Instituto de Meteorología, CITMA, La Habana, Cuba. Extraído de: <http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=Temporadas/temporada2008.htm> en abril de 2017.
- Saha S.** (2010) “Climate Forecast System”, National Center Environmental Prediction, NOAA, USA. Extraído de: www.cfs.ncep.noaa.gov/climate-forecast-system 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.