

Acoplamiento óptimo entre modelos matemáticos de generación y propagación de oleaje

Ing. Roberto Lamazares González
email: rlamazares@cih.cujae.edu.cu

Dr. Ing. Luis F. Córdova López
email: cordova@tesla.cujae.edu.cu

Ing. Grethel Salgueiro Melis
email: gsalgueiro@cih.cujae.edu.cu

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH),
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae).

RESUMEN

Para simular procesos costeros, debido a su complejidad, a la precisión que se requiera y a los resultados que se deseen obtener, se hace necesaria la utilización de varios modelos matemáticos acoplados entre sí. En el trabajo que a continuación se presenta, se intenta obtener el acoplamiento óptimo entre dos modelos de generación y propagación de oleaje (WW3 v3.14 y SWAN v40.85), estableciéndose para ello dos fases de trabajo. La primera fase tiene como objetivo fundamental determinar la mejor relación entre precisión y tiempo de cómputo, mientras que la segunda está dirigida a obtener la mejor variante de anidado entre los modelos. El caso de estudio para realizar la investigación fue el huracán Wilma. La variable estadística utilizada para determinar los mejores resultados fue el coeficiente de determinación R^2 .

Palabras clave: acoplamiento de modelos, costas, modelos matemáticos, olas.

Optimum coupling between wave generation and wave propagation mathematical models

ABSTRACT

To simulate coastal process, due to their complexity, the required precision and the desired results, it becomes necessary the use of several mathematical models coupled to each other. In this work an attempt is made for an optimum coupling of two wave generation and wave propagation models (WW3 v3.14 and SWAN v40.85), for which two work phases are established. The first phase has as its fundamental objective to determine the best relationship between precision and computational time, while the second is mainly directed to obtain the best nesting alternative between the models. The case study to carry out the investigation was the Wilma hurricane. The statistical variable to determine the best results was the coefficient of determination R^2 .

Keywords: model coupling, coasts, mathematical models, waves.

INTRODUCCIÓN

Cuba, por su posición geográfica, es atacada cada año por diferentes fenómenos meteorológicos, los cuales causan grandes daños a la economía y a la sociedad en general. Dentro de estos fenómenos se encuentran los huracanes. Producto de los efectos devastadores que ocurren con el paso de estos fenómenos meteorológicos, han aumentado los niveles de riesgo de pérdidas de vidas humanas, objetivos económicos y sociales. Para la disminución de daños es de gran importancia la calidad y anticipación de los pronósticos del tiempo, jugando un papel fundamental los modelos matemáticos y sus procesos de establecimiento y calibración. Los resultados de estos sistemas brindan la información necesaria para ser utilizada por las autoridades pertinentes a la hora de enfrentar un fenómeno meteorológico extremo.

Actualmente, como parte de las investigaciones realizadas por el Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), está en desarrollo un sistema de ingeniería costera y marítima para, a partir de realizar simulaciones de eventos meteorológicos severos, obtener en tiempo y espacio las características del oleaje en zonas costeras (Córdova y Lamazares 2012). Este sistema está compuesto en su mayoría por modelos acoplados entre sí y de amplio uso por la comunidad internacional, dentro de los que se encuentran los que en este trabajo se han mencionado. Estos modelos forman parte del módulo 2 del sistema de ingeniería antes mencionado, correspondiente a la parte de generación y propagación de oleaje. Debido a la gran variedad de datos que se intercambian entre los modelos matemáticos que componen los sistemas de ingeniería, se hace necesario establecer entre ellos un acoplamiento óptimo, para obtener los resultados más precisos con el menor tiempo de cómputo posible.

DESARROLLO

Descripción de los modelos matemáticos a utilizar durante la investigación

WAVEWATCH III (Tolman 2009) es un modelo de generación y propagación de oleaje de tercera generación desarrollado en la NOAA / NCEP sobre la base del modelo WAM (WAMDI group 1988, Komen et al. 1994). Es la fusión entre WAVEWATCH desarrollado en la Universidad Tecnológica de Delft y WAVEWATCH II, desarrollado en la NASA. En la figura 1 se muestra su secuencia de trabajo.

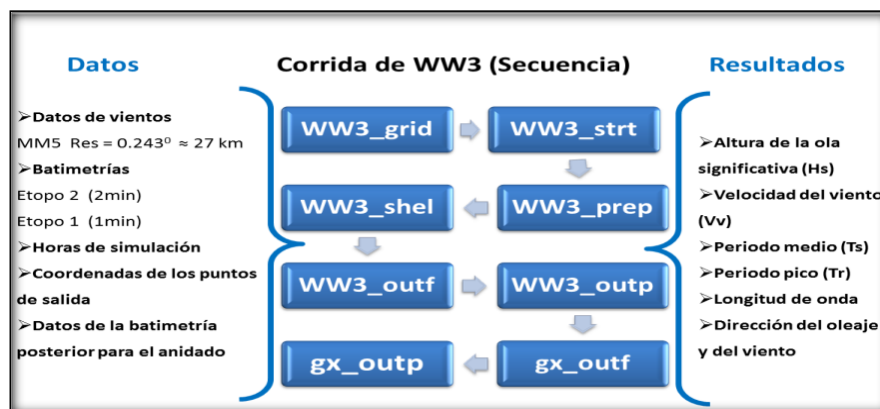


Figura1. Secuencia ilustrativa del WW3

Permite realizar simulaciones para varias mallas simultáneamente, lo cual es vital cuando se requiere obtener una mayor resolución en una zona determinada. Sus principales salidas son la

altura de ola y la velocidad del viento en los puntos que se deseen dentro de la malla de cómputo, así como la salida espectral utilizada principalmente para acoplar con SWAN.

SWAN (Simulating Waves Nearshore) (Booij et al. 2004) es un modelo de oleaje de tercera generación utilizado para la propagación del oleaje preferiblemente en aguas poco profundas, debido a las formulaciones que utiliza, las cuales surten mejor efecto en lugares como lagos, estuarios, bahías, etc. Tiene en cuenta la propagación del oleaje en tiempo y espacio, así como la refracción debido a las corrientes y a la profundidad. También realiza la interacción entre tres y hasta cuatro olas con diferentes características, así como la disipación del oleaje debido a la vegetación. Sus principales salidas son la altura de ola, período pico, período medio, longitud de onda, velocidad de viento y la profundidad en todos los puntos de la malla, en puntos aleatorios que sean requeridos, así como a lo largo de una isobata o en una curva (rectas perpendiculares a la línea de costa). En la figura 2 se muestra la secuencia de trabajo del modelo SWAN.

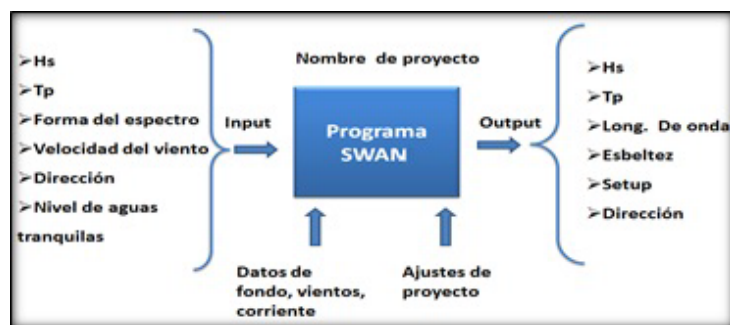


Figura 2. Secuencia ilustrativa de SWAN

Caso de estudio: huracán Wilma

Wilma fue el cuarto huracán de categoría 5 de la temporada 2005 que batió el récord de las temporadas pasadas de 1960 y 1961 (figura 3).

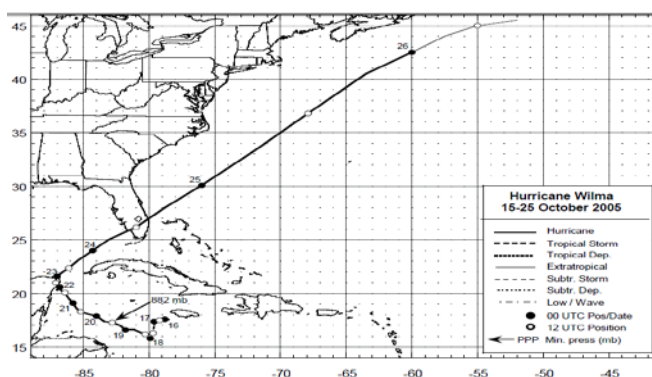


Figura 3. Trayectoria del huracán Wilma (Wikipedia 2012)

Es el huracán más intenso registrado en el Atlántico y el décimo ciclón tropical más intenso registrado en todo el mundo (los otros 9 fueron tifones), con la presión más baja reportada en el hemisferio occidental, un récord que ostentaba el huracán Gilbert con 888 hPa, pero Wilma registró 882 hPa, con lo que resultó ser el huracán más intenso de la zona hasta entonces. Wilma alcanzó tierra en más de una ocasión y provocó sus efectos más destructivos en la península mexicana de Yucatán, Cuba y en la parte sur de la península estadounidense de la Florida. (Wikipedia 2012).

Descripción de la variable estadística

El coeficiente de determinación (R^2) devuelve el cuadrado del coeficiente de correlación de momento del producto Pearson mediante los puntos de datos conocidos, con el cual, mientras el error entre lo modelado y medido se aproxime más a la unidad (1), mejor será la simulación.

Información batimétrica a utilizar en la investigación

En toda modelación matemática, y más aún cuando se requiere dar resultados de forma continua, ya sea para pronóstico (forecasting) o para análisis (hindcasting), se deberá tener sumo cuidado con la relación tiempo de cómputo – precisión, ya que se debe llegar a una combinación entre estos aspectos tal que se obtenga una buena precisión (fijada previamente con un error determinado) con el menor tiempo de cómputo posible. Para la simulación de un huracán, teniendo en cuenta su amplio desplazamiento por la geografía global, se hace necesario realizar varios dominios de cómputo, con el objetivo de ir ganando en precisión a medida que se acerque a la zona de interés mediante el incremento de la resolución de la información batimétrica. Para esta investigación, se determinó realizar entre 4 y 5 dominios, en dependencia de la variante que se utilice, lo que será abordado detalladamente más adelante. El tiempo de cómputo de una simulación está determinado principalmente por dos factores:

- Intervalo de salida de datos.
- Resolución del dominio de cómputo.

Es por eso que la primera parte de esta investigación consistirá en variar las resoluciones de los dominios 1 (mares interamericanos) y 2 (Cuba), hasta conseguir la mejor combinación entre precisión y tiempo de cómputo, este último determinado principalmente por la resolución que se utilice. Vale destacar que el intervalo de salida de datos se ha fijado, para todas las variantes, cada 3600 s.

Dominios de cómputo para la primera fase de la investigación

El dominio 1 (figura 4) abarca los mares interamericanos y por consiguiente el Golfo de México, Estrecho de La Florida, el Mar Caribe y parte del Océano Atlántico. Tendrá sus límites entre los 36° y los 12° de latitud N, y entre los 98° y los 62° de longitud W. Las dimensiones de este dominio están establecidas teniendo en cuenta que debe tener todas las posiciones de la trayectoria del huracán de estudio, así como de tres boyas de la NOAA colocadas en el Golfo de México, las cuales tienen una función muy importante que será explicada posteriormente. El dominio 2 (figura 5) abarca la isla de Cuba y el sur de la Florida.

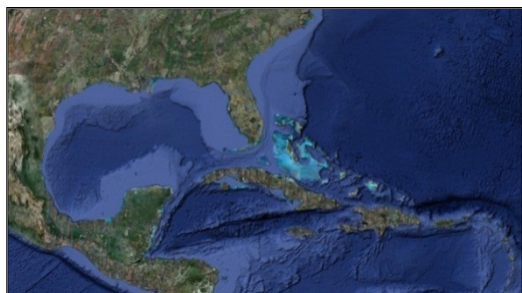


Figura 4. Extensión del dominio 1
(Google Earth 2009)



Figura 5. Extensión del dominio 2
(Google Earth 2009)

Este dominio 2 tiene límites por el norte en los 27° de latitud N, por el sur en los 18° de latitud N, por el oeste en los 86° de longitud W, y por el este en los 73° de longitud W. La simulación en este dominio tendrá como objetivo obtener los datos de oleaje en los mares que rodean a Cuba.

Dominios de cómputo para la segunda fase de la investigación

La segunda fase de investigación consiste en determinar la mejor variante de anidado de los modelos matemáticos utilizados. Partiendo de los dominios 1 y 2, que son constantes para las cuatro variantes a estudiar, se establecen otros hasta llegar a la zona del Malecón de La Habana (zona de estudio), variando en algunos casos, tanto el modelo a utilizar como el tipo de simulación (estacionario o no estacionario). Después del dominio de Cuba, se determinó obtener los datos de oleaje de forma más precisa en las costas occidentales del país, ya que la zona de estudio está enmarcada en esas coordenadas, por lo que se confeccionó un dominio de cómputo que tiene sus límites por el norte en los $23,8^\circ$ de latitud N, por el sur en los $20,5^\circ$ de latitud N, por el oeste en los 85° de longitud W y por el este en los 81° de longitud W. La figura 6 muestra la extensión del dominio confeccionado. Este dominio es utilizado en las variantes 1,3 y 4. Los datos batimétricos fueron obtenidos de GEBCO (2009) con una resolución de 30 s.

La variante 2 utilizó un dominio intermedio entre Cuba y la zona del Malecón de La Habana, ya que por estudios realizados previamente por los autores, se conoce que no se deben anidar dominios que tengan una diferencia de extensión y resolución muy marcada. Es por eso que se confeccionó un dominio llamado “SWAN aguas profundas” que tendrá sus límites entre los $23,8^\circ$ y $22,8^\circ$ de latitud N y entre los 83° y los 82° de longitud W. Este dominio también fue utilizado en la variante 4, entre los dominios de “Occidente” y “Malecón”. En la figura 7 se muestra la extensión del dominio antes explicado.



Figura 6. Extensión del dominio 3
(Google Earth 2009)



Figura 7. Extensión del dominio 4
(Google Earth 2009)

El dominio del Malecón de La Habana será el mismo para las cuatro variantes, y tendrá sus límites por el norte en los $23,165^\circ$ de latitud N, por el sur en $23,13^\circ$ de latitud N, por el oeste en $82,413^\circ$ de longitud W y por el este en $82,355^\circ$ de longitud W. Los datos batimétricos para este dominio se obtuvieron de una colaboración mutua entre el INSMET (Inst. de Meteorología de Cuba) y el grupo de Ing. Costera y Marítima del CIH. En la figura 8 se muestra la extensión del dominio del Malecón.

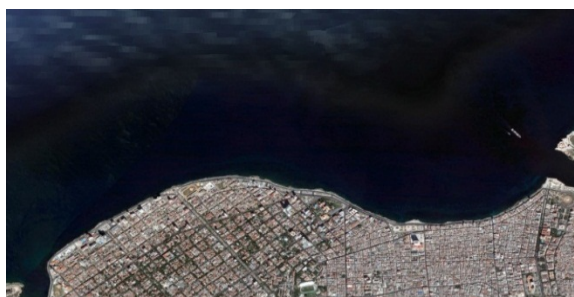


Figura 8. Extensión del dominio 5 (Google Earth 2009)

FASE DE INVESTIGACIÓN # 1. DETERMINACIÓN DE LA MEJOR VARIANTE EN CUANTO A LA RELACIÓN PRECISIÓN VS. TIEMPO DE CÓMPUTO

Como se señaló antes, la fase 1 de la investigación consistió en variar las resoluciones de los dominios 1 y 2 para obtener la mejor variante en cuanto a tiempo de cómputo vs. precisión.

Condiciones iniciales para las simulaciones

Los datos iniciales que se deben entrar en el modelo para realizar las simulaciones son principalmente los datos de viento y la información batimétrica. Los datos de viento fueron obtenidos a partir de una simulación realizada del huracán Wilma utilizando el modelo atmosférico MM5, calibrado para las condiciones cubanas por especialistas del Instituto de Meteorología. El dominio de cómputo de esta simulación tenía un mayor alcance que el dominio 1 de WW3, con una resolución de $0,243^\circ$ (27 km), con el objetivo de que los datos de vientos obtenidos se pudieran interpolar para todos los puntos de la malla de cómputo del modelo de oleaje. En la figura 9 (a y b) se muestran 2 horas de simulación del huracán Wilma utilizando MM5. Vale destacar que el formato de salida de MM5 es incompatible con WW3, por lo que se tuvo que crear un procedimiento para transformar los datos de un formato a otro.

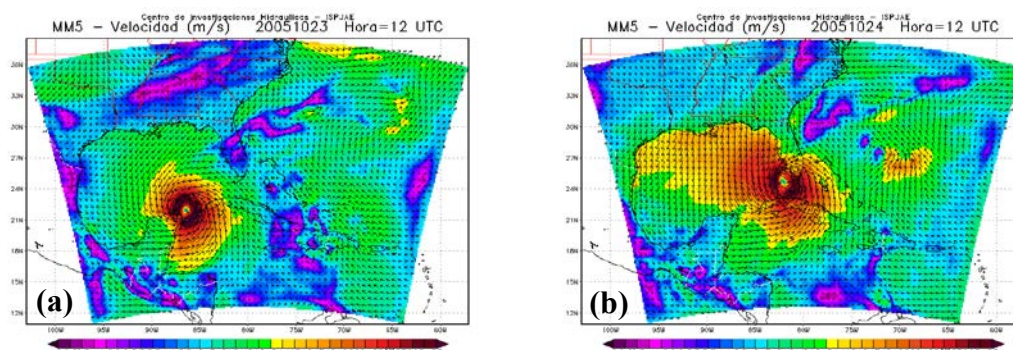


Figura 9. Simulación del huracán Wilma utilizando MM5 (día 23 12:00 UTC, día 24 12:00 UTC)

Simulaciones utilizando WW3

Teniendo en cuenta el tamaño de los dominios 1 y 2, las simulaciones para determinar la mejor resolución se realizan solamente utilizando el modelo WW3, ya que está demostrado que refleja mejor el proceso de generación del oleaje. Buscando la mejor variante, en el dominio 1 se probaron un total de 8 resoluciones, comenzando por $0,15^\circ$ (≈ 17 km) hasta $0,5^\circ$ (≈ 56 km) con un intervalo de $0,05^\circ$. La tabla 1 muestra las variantes de cómputo y la cantidad de nodos en cada dirección para cada resolución.

Tabla 1. Variantes de cómputo para la fase 1 de investigación (dominio 1)

Corridas	$\Delta X = \Delta Y$	Cantidad de nodos en X	Cantidad de nodos en Y
1	$0,15^\circ$	241	161
2	$0,20^\circ$	181	181
3	$0,25^\circ$	145	97
4	$0,30^\circ$	121	81
5	$0,35^\circ$	104	70
6	$0,40^\circ$	91	61
7	$0,45^\circ$	81	54
8	$0,50^\circ$	73	49

El procedimiento esta fase de investigación consistió en realizar simulaciones con WW3 y obtener en sus salidas datos de velocidad y dirección del viento, así como altura, dirección y período de ola significativa, en las coordenadas de tres boyas de la NOAA colocadas en la parte oeste, centro y este del Golfo de México, como se muestra en la figura 10. Vale destacar que los vientos introducidos en WW3, como elemento forzador del oleaje, fueron obtenidos a partir de MM5 (PSU 2008).

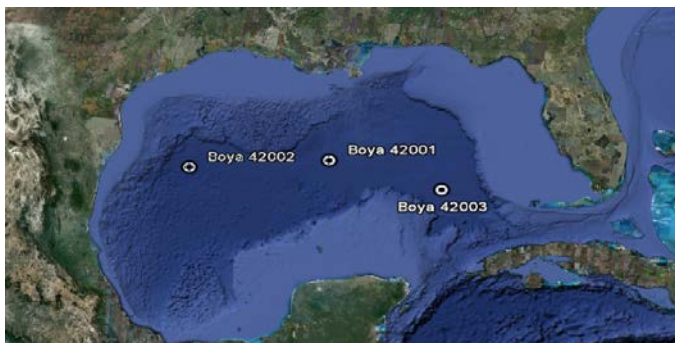


Figura 10. Boyas de la NOAA colocadas en el golfo de México (Google Earth 2009)

El objetivo es comparar los resultados de las simulaciones con mediciones de estas boyas, que en este caso son la 42002, 42001 y 42003. En la figura 11 (a, b y c) se muestra la comparación entre la simulación utilizando $0,4^\circ$ como resolución y las mediciones de la boya 42003 para las 73 horas de simulación del fenómeno, comenzando el día 22 octubre 2005 a las 12:00 horas hasta el día 25 de octubre de 2005 a las 12:00 horas.

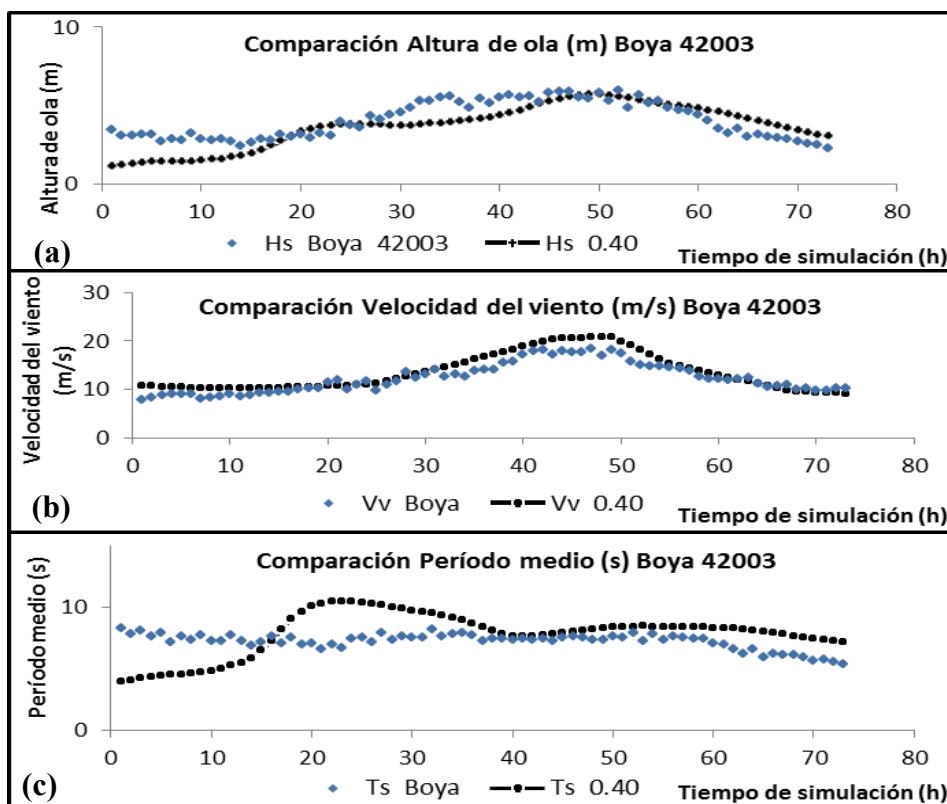


Figura 11. Comparación de simulaciones con resolución $0,4^\circ$ de mediciones en boya 42003

Resultados de la comparación entre simulaciones y mediciones en boyas para el dominio 1

Análogamente al procedimiento explicado anteriormente, se trabajó para todas las resoluciones, dando como resultado que para la resolución de $0,4^\circ$ se obtuvo el mejor balance entre tiempo de cómputo y precisión. En la figura 12 (a, b y c) se demuestra lo antes expuesto utilizando R^2 como variable estadística a comparar.

A pesar de que para la boya 42001 la resolución $0,5^\circ$ arrojó mejores resultados en cuanto a R^2 y tiempo de cómputo, esta resolución se desprecia, ya que para las boyas 42002 y 42003 los resultados son los más bajos.

Resultados de la comparación entre simulaciones y mediciones en boyas para el dominio 2

Siguiendo el mismo procedimiento explicado anteriormente, se hizo el análisis para el dominio 2. Vale destacar que en este caso sólo se compararon los resultados de la simulación con las mediciones de la boya 42003, ya que las posiciones de las restantes boyas no están dentro de los límites de este dominio. En la tabla 2 se muestran las variantes de cómputo y la cantidad de nodos en cada dirección para cada resolución.

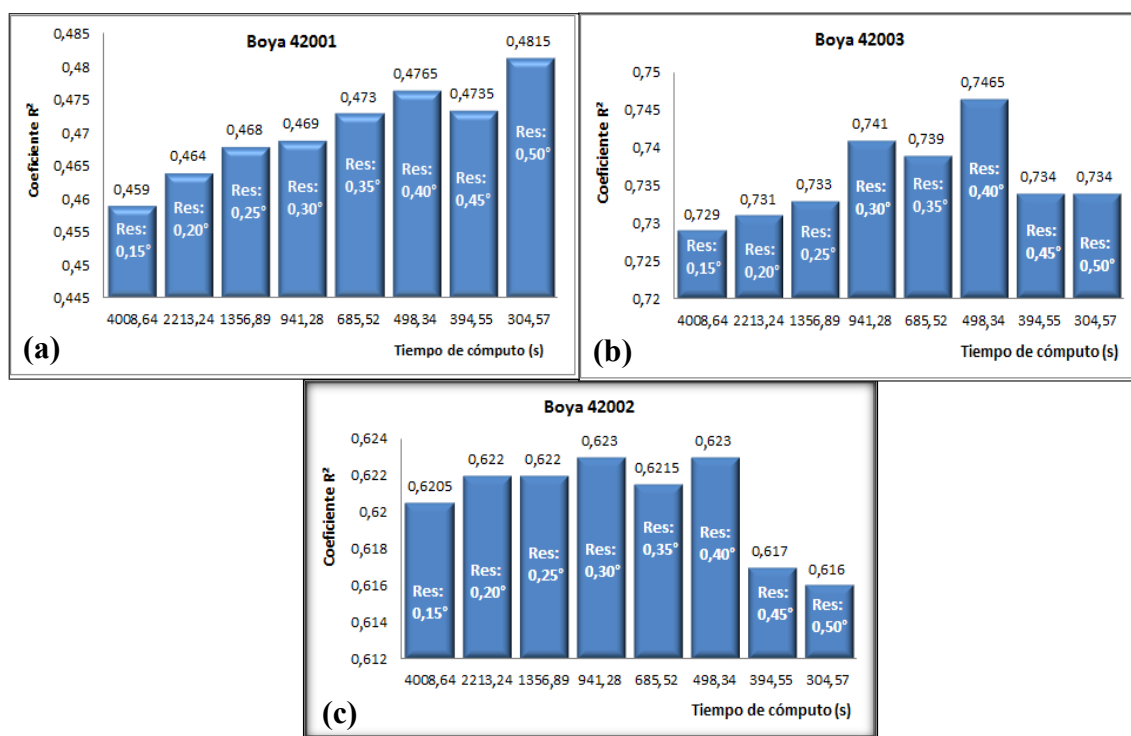


Figura 12. Comparación de variantes de resoluciones a partir de R^2

Tabla 2. Variantes de cómputo para la fase 1 de investigación (dominio 2)

Corridas	$\Delta X = \Delta Y$	Cantidad de nodos en X	Cantidad de nodos en Y
1	$0,10^\circ$	131	91
2	$0,12^\circ$	109	76
3	$0,15^\circ$	88	61

En la figura 13 (a, b y c) se muestra la comparación entre la simulación utilizando $0,15^\circ$ como resolución y las mediciones de la boya 42003 para las 73 horas de simulación del fenómeno, desde el día 22 octubre a las 12:00 horas hasta el día 25 de octubre de 2005 a las 12:00 horas.

En el dominio 2 se obtuvo como resultado que para la resolución de $0,15^\circ$ se logró el mejor balance entre tiempo de cómputo y precisión. En la figura 14 se demuestra lo antes expuesto, utilizando R^2 como variable estadística a comparar.

A pesar de que para la resolución de $0,12^\circ$ se obtiene mejor R^2 , la diferencia es despreciable con respecto a la de $0,15^\circ$, sin embargo, se obtiene mucho menos tiempo de cómputo para la resolución de $0,15^\circ$, por lo que se decidió tomarla como mejor resultado.

FASE DE INVESTIGACIÓN # 2. DETERMINACIÓN DE LA MEJOR VARIANTE EN CUANTO AL ANIDADO DE LOS MODELOS DE OLAJE

La fase de investigación 2 consistió en determinar la mejor variante en cuanto al proceso de anidado de los modelos de generación y propagación de oleaje WW3 y SWAN. Para esto se definieron 4 variantes de anidado, las cuales se muestran en la figura 15.

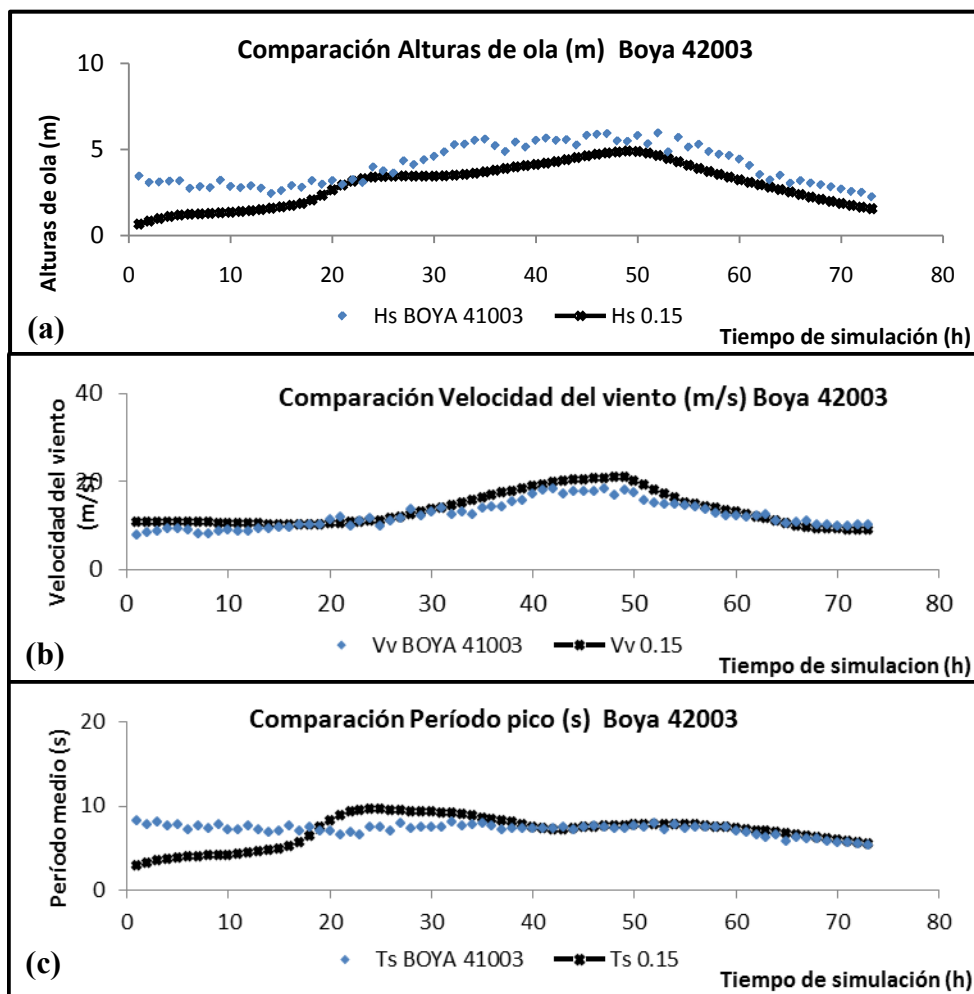


Figura 13. Comparación de las simulaciones utilizando resolución 0,1 con las mediciones de la boya 42003

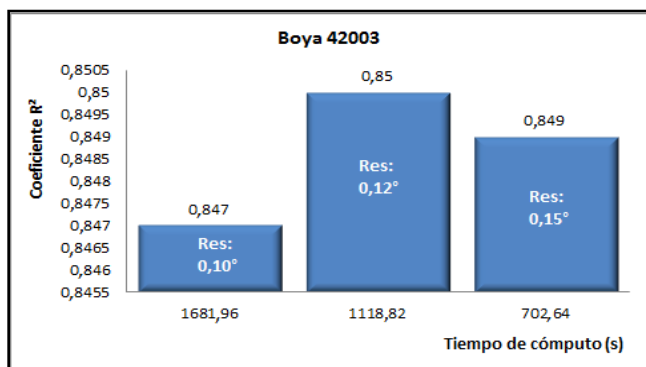


Figura 14. Comparación de variantes de resoluciones a partir de R^2



Figura 15. Variantes para el proceso de anidado entre los modelos de estudio

Variante 1

Para la variante 1 se utilizaron 4 dominios de cómputo, comenzando por el dominio 1 en aguas profundas, explicado anteriormente. Los datos de vientos para todos los dominios y variantes fueron los mismos que se utilizaron en la primera fase de investigación, interpolando en cada caso para llegar a la resolución requerida. Los resultados de esta simulación fueron principalmente las características del oleaje y del viento en las posiciones de las 3 boyas colocadas en el golfo de México, así como un fichero de espectros de oleaje que serviría como condiciones de entrada en el dominio siguiente. Vale reafirmar que en todos los dominios y variantes los datos de salida se obtuvieron cada una hora. En la figura 16 (a y b) se muestran 2 horas de simulación utilizando WW3 en este dominio.

Las condiciones de entrada para el dominio 2 fueron el fichero de espectros de oleaje obtenido a partir de la simulación anterior, además de los datos de vientos de MM5. El objetivo principal de esta simulación es obtener el fichero de espectros de oleaje para el dominio 3. En la figura 17 (a y b) se muestran 2 horas de simulación utilizando WW3 en este dominio.

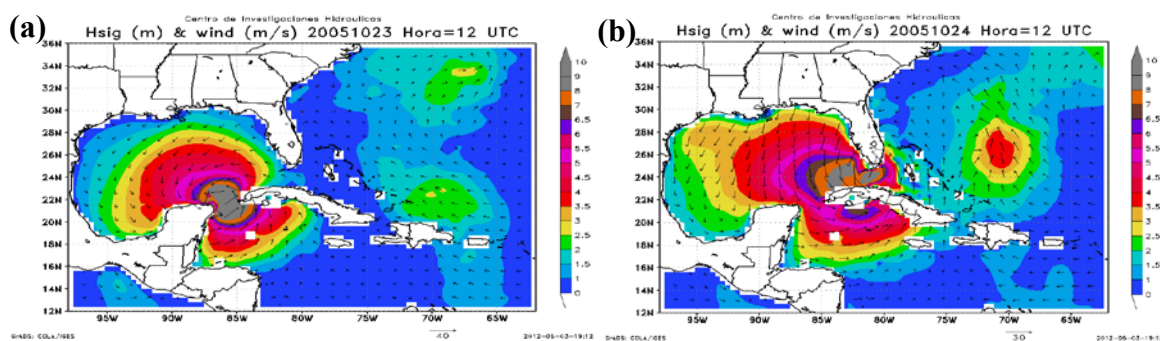


Figura 16. Simulación del huracán Wilma utilizando WW3 (día 23 12:00, día 24 12:00) dominio 1

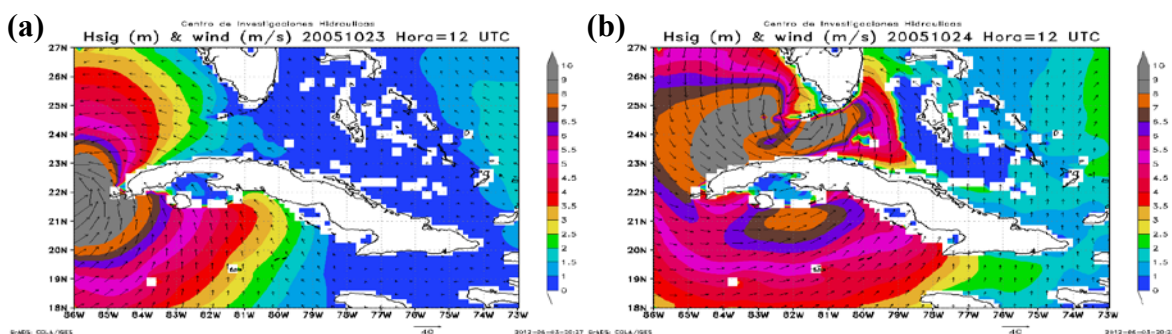
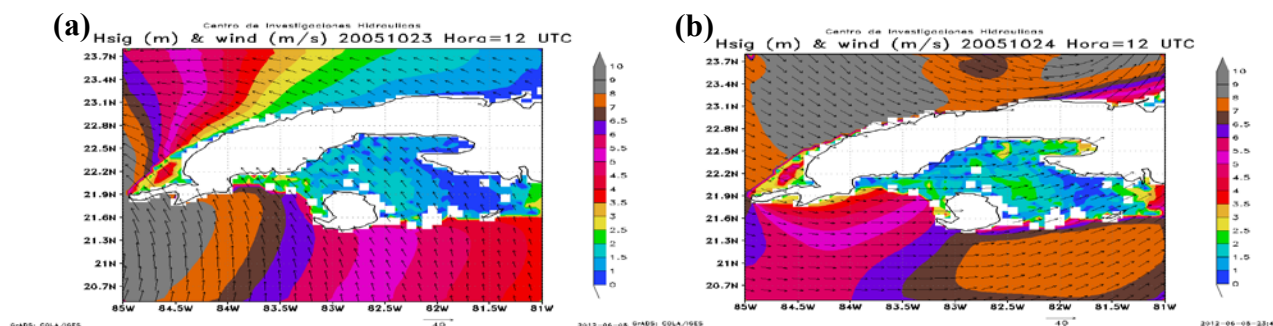


Figura 17. Simulación del huracán Wilma utilizando WW3 (día 23 12:00, día 24 12:00) dominio 2

La simulación para el dominio 3 tiene como objetivos fundamentales obtener las características del oleaje en la región occidental de Cuba, así como el fichero de espectros para el dominio 4, que en este caso, como es para SWAN, se obtiene como salida de la corrida del módulo *WW3_outp*, estableciendo, en la entrada (input) del módulo *WW3_shel* las coordenadas de los puntos frontera del dominio de SWAN. Para obtener las características del oleaje en el occidente cubano, basta con poner puntos de salidas en las coordenadas que se quiera. En la figura 18 (a y b) se muestran 2 horas de simulación utilizando WW3 en este dominio.



**Figura18. Simulación del huracán Wilma utilizando WW3
(día 23 12:00, día 24 12:00) dominio 3**

Las condiciones de entrada para la simulación en el dominio del Malecón son el fichero de espectro obtenido de la simulación en el dominio 3 de WW3, así como los niveles del mar, ya que en aguas poco profundas es importante tener en cuenta este fenómeno. Los niveles del mar que se entran a SWAN tiene en cuenta tanto la marea astronómica como la marea meteorológica. Los valores de la marea astronómica son obtenidos a partir del software “Tides&Currents v 1.05” el cual es un programa predictor de mareas y corrientes (NSI 1994).

En el caso del Wilma, su posición más cercana al Malecón de La Habana fue de 213,39 km y ocurrió el día 24 de Octubre de 2005 a las 4:00 a.m. hora de Cuba. Una hora antes existía una pleamar en el Malecón, por lo que el nivel de tormenta máximo introducido en SWAN fue de 1,41 m para la hora de mayor afectación, ya que el nivel de marea astronómica era de 0,41 m y se le sumó 1 m por la surgencia debida al paso del huracán Wilma. La figura 19 expresa la marea por tormenta introducida a SWAN para la simulación del huracán Wilma en el Malecón de La Habana.

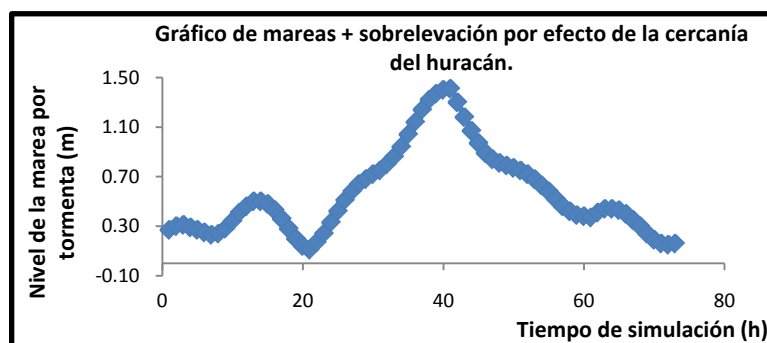


Figura 19. Elevación del mar debido a tormenta (storm surge)

Estos valores de elevación del mar son introducidos en SWAN a través de un ciclo que se lee de forma automática por el programa. Los resultados de la simulación en el dominio del Malecón fueron las características del oleaje en aguas poco profundas próximas al muro, específicamente en las isobatas -4 m y -5 m, así como en puntos de interés en el tramo de estudio seleccionado. Vale destacar que en esta variante se realizó la simulación de todos los dominios, incluido éste, de forma no estacionaria.

Variante 2

En la variante 2 se determinó realizar la simulación en el dominio 3 utilizando SWAN en lugar de WW3, en un dominio mucho más pequeño. Esto tuvo como principal objetivo lograr un anidado más preciso entre esta corrida y la del Malecón. El dominio establecido tiene una extensión de 1° por ambos ejes y una resolución de $0,005^\circ$. La simulación en el dominio del Malecón fue idéntica a la de la variante 1.

Variante 3

La variante 3 fue igual a la variante 1, pero se simularon 97 horas en lugar de 73. Esta decisión estuvo dirigida principalmente a que las primeras horas de simulación de estos modelos no se deben analizar, ya que sufren de una autocalibración que hace que sus resultados no sean confiables.

Variante 4

La variante 4 tuvo como principal característica que las simulaciones con SWAN se hicieron de forma estacionaria, algo que no se había realizado en ninguna de las tres variantes anteriores. A pesar de que en esta forma de simulación su realización es más engorrosa, en la actualidad está siendo muy utilizada, ya que se plantea que la simulación de forma no estacionaria introduce errores en los resultados, debido a que tiende a aparecer un desfase en cuanto a horas entre la simulación y la realidad, es decir, cuando en un punto en la simulación hay 4 m de altura de ola a las 5:00 p.m., esto ocurre en la realidad a las 10:00 p.m.

Las simulaciones de forma estacionaria tienen como principal característica que los datos se introducen manualmente hora por hora, es decir, se realizará una entrada (input) para cada hora de simulación, en los cuales se introducen los datos de velocidad y dirección del viento, así como altura, dirección y período del oleaje, entre otros parámetros, para la malla de cómputo “SWAN aguas profundas”. Es por eso que en la simulación del dominio 3, se obtuvieron estos datos en un punto cuyas coordenadas (-82,6; 23,5) estaban dentro, tanto del propio dominio 3 (Occidente) como del 4 (SWAN aguas profundas). En la figura 20 (a y b) se puede observar la posición del punto de salida de datos en los dominios 3 y 4.

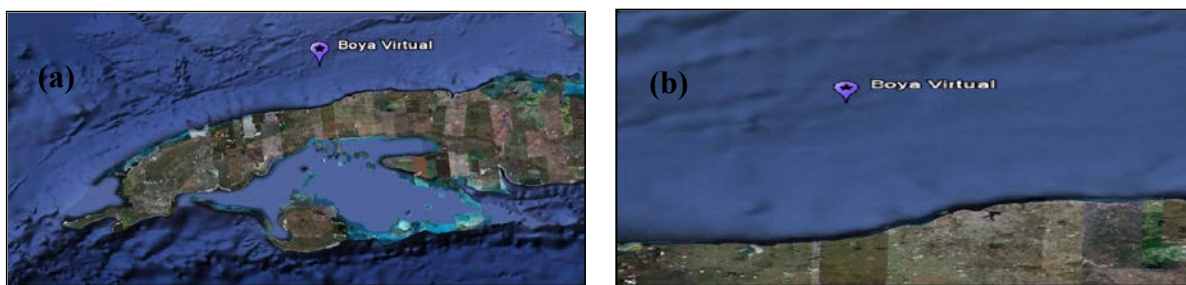


Figura 20. Posición del punto de salida de datos: a) Dominio 3 b) Dominio 4,
(Google Earth 2009)

Comparación de las variantes estudiadas

Debido a que en las costas cubanas no existen instrumentos de medición de características del oleaje, se determinó escoger como mejor variante aquella que se correspondiera con los datos ofrecidos por el Instituto de Meteorología (INSMET) y la Defensa Civil (DC) en cuanto a las alturas de ola que hubo en el Malecón de La Habana y a qué hora ocurrieron.

Según esos datos, en la madrugada del día 24 de Octubre (hora local) comenzaron a ocurrir alturas de olas considerables, en el rango de 3 a 4 m. En la tabla 3 se muestran las alturas de olas para un punto de la isobata -4 m. para 15 horas de simulación en las 4 variantes de estudio.

Como se puede observar, la variante 4 es la que más se ajusta a las informaciones del INSMET, ya que comienzan a ocurrir alturas de olas entre 3 y 4 m en la madrugada del día 24 de Octubre. Por tanto se escoge esta variante como la que mejor simula la realidad.

Tabla 3. Alturas de ola hora por hora para cada variante

Hora	Xp [grados]	Yp [grados]	Variante 1 Hsig [m]	Variante 2 Hsig [m]	Variante 3 Hsig [m]	Variante 4 Hsig [m]
20051024:00	277,591	23,137	0,12647	0,30975	0,09634	0,25587
20051024:01	277,591	23,137	0,11869	0,32441	0,09123	0,33189
20051024:02	277,591	23,137	0,10767	0,33959	0,08553	0,40271
20051024:03	277,591	23,137	0,09447	0,35197	0,07888	0,42474
20051024:04	277,591	23,137	0,07607	0,35761	0,07832	0,55262
20051024:05	277,591	23,137	0,05948	0,35404	0,08072	1,14089
20051024:06	277,591	23,137	0,04122	0,34252	0,08627	2,08241
20051024:07	277,591	23,137	0,02881	0,3263	0,08595	3,42981
20051024:08	277,591	23,137	0,01522	0,31103	0,07889	3,86761
20051024:09	277,591	23,137	0,01121	0,32588	0,07814	4,45923
20051024:10	277,591	23,137	0,00626	0,41852	0,0888	4,54737
20051024:11	277,591	23,137	0,00875	0,651	0,1031	4,59319
20051024:12	277,591	23,137	0,02758	1,19324	0,11941	4,59422
20051024:13	277,591	23,137	0,10307	1,97016	0,13297	4,55412
20051024:14	277,591	23,137	0,43997	2,71192	0,14535	4,57412
20051024:15	277,591	23,137	1,13029	3,14178	0,15759	4,56421
Leyenda: Xp (longitud W), Yp (latitud N), Hsig (altura de ola significativa)						

CONCLUSIONES

- Se realizaron 2 batimetrías para ser introducidas en los dominios de cómputo utilizados en la fase de investigación # 1, para determinar su mejor resolución, y así disminuir tiempos de cómputo obteniendo buena precisión. En esta fase se obtuvo que las mejores resoluciones batimétricas en los dominios 1 y 2 fueron 0,4° y 0,15° respectivamente.
- En la fase de investigación # 2 se estudiaron 4 variantes de anidado entre los modelos de oleaje, para determinar la que mejor simulaba la realidad, obteniéndose como mejor resultado la variante 4, la cual establecía que el modelo SWAN debía ser utilizado de forma estacionaria.

RECOMENDACIONES

- Continuar trabajando en el acoplamiento óptimo de modelos de oleaje para garantizar los menores tiempos de cómputo sin afectar la precisión.
- Acoplar a los modelos de oleaje un modelo hidrodinámico capaz de determinar los niveles del mar debido a surgencia, para garantizar mayor precisión en las simulaciones.
- Automatizar el acoplamiento de los modelos, ya que en la actualidad se hace engorroso trabajar con ellos.

REFERENCIAS

- Booij N., Haagsma J., and Van der Westhuysen A.** (2004). “Swan user manual”, Delft University of Technology, Holland.
- Córdova L. y Lamazares R.** (2012). “Simulación de los campos de viento y oleaje asociados a huracanes”. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), vol. 33, no. 2, pp. 50-65.
- GEBCO** (2009). “Digital Atlas software interface”. General Bathymetric Chart of the Oceans, British Oceanographic Data Centre, International Hydrographic Organization, Liverpool, United Kingdom.
- Google Earth** (2009). “Atlas interactivo en línea del planeta Tierra”, Keyhole Inc., USA, extraído de: <http://www.google.com/earth/index.html>, en febrero de 2013.
- Komen G.J., Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S. and Janssen P.A.E.M.** (1994) “Dynamics and Modeling of Ocean Waves”. Cambridge University Press, United Kingdom, 532 pp.
- NSI** (1994) “Tides and currents”. Programa informático predictor de mareas V 1.05. Nautical Software Inc. USA.
- PSU** (2008) “MM5 – Modelo atmosférico a gran escala”, Pennsylvania State University, USA, extraído de: <<http://www.mmm.ucar.edu/mm5>> en diciembre 2012.
- Tolman H.** (2009). “User manual and system documentation of WAVEWATCH III Version 3.14”. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 276, 194 pp, USA.
- WAMDI Group** (1988). “The WAM model - A third generation ocean wave prediction model”, Journal of Physical Oceanography, American Meteorological Society, vol. 18, pp.1775-1810, USA.
- Wikipedia** (2012). “Huracán Wilma”. Wikipedia, la enciclopedia libre, extraído de: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Hurac%C3%A1n_Wilma&oldid=56688708> en junio 2012.