

Hidrodinámica costera durante el huracán Wilma (2005) en Artemisa, Mayabeque y La Habana

Msc. Lic. Janner Rodríguez Pérez e-mail: janner@unica.cu
Universidad de Ciego de Ávila, Ciego de Ávila, 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

Msc. Ing. Ovel Díaz García e-mail: ovel.diaz@atmosfera.unam.mx
Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo estudiar, mediante simulación computacional, la influencia sobre el nivel del mar de los fenómenos: marea astronómica, surgencia y oleaje en las costas de las provincias Artemisa, Mayabeque y La Habana. Los códigos ADCIRC y ADCIRC+SWAN fueron ejecutados en tres escenarios, forzados por componentes de la marea y forzadores atmosféricos. Se seleccionó el huracán Wilma (2005). Se definieron ocho localidades: cuatro en la costa norte y cuatro al sur de la zona de estudio. Los resultados se comparan con datos aportados por la NOAA. Se concluyó que la surgencia de tormenta fue el fenómeno que más elevación del mar produjo en los sitios de la costa sur, mientras al norte la marea astronómica reportó los mayores niveles.

Palabras clave: hidrodinámica, huracanes, modelación numérica, surgencia.

Coastal hydrodynamics during Hurricane Wilma (2005) in Artemisa, Mayabeque and Havana

ABSTRACT

This work aimed to study, through computer simulation, the influence on sea level of the following phenomena: astronomical tide, storm surge and waves on the coasts of the provinces Artemisa, Mayabeque and Havana. The ADCIRC and ADCIRC + SWAN codes were executed in three scenarios, forced by components of the tide and atmospheric forces. Hurricane Wilma (2005) was selected. Eight locations were defined: four on the north coast and four south of the study area. The results are compared with data provided by NOAA. It was concluded that the storm surge was the phenomenon that increased more the sea level in the sites of the southern coast, while in the northern coast the astronomical tide reported the highest levels.

Keywords: hydrodynamics, hurricanes, numerical modeling, storm surge.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, más del 50 por ciento de la población mundial vive en zonas costeras y una parte importante en regiones vulnerables a inundaciones costeras. En los últimos años se ha incrementado el peligro de inundaciones costeras asociadas con el aumento del nivel medio del mar, la temperatura global promedio y la frecuencia e intensidad de los eventos meteorológicos extremos (EME) (Ashton et al. 2008). El Caribe es una de las regiones geográficas más afectadas por ciclones tropicales (CT), los cuales generan oleajes muy energéticos y considerables sobre-elevaciones del mar (Weisberg and Zheng 2008). Debido a la importancia que presenta el entendimiento de los EME, en la actualidad es un tema de investigación muy activo.

Teniendo en cuenta el desarrollo actual de modelos computacionales de generación del oleaje (ej. WWIII, SWAN), modelos hidrodinámicos (ej. FVCOM, ADCIRC), modelos atmosféricos (ej. NAM, WRF) y formulaciones con enfoques paramétricos (Holland et al., 2010), el trabajo tuvo como objetivo realizar un estudio de los fenómenos de marea astronómica, surgencia de tormenta y setup del oleaje durante el huracán Wilma en 2005, en las costas de las provincias de Artemisa, Mayabeque y La Habana.

Sitio de estudio

El sitio de estudio se encuentra ubicado entre los $81,89^\circ$ y $82,90^\circ$ longitud oeste y los $22,21^\circ$ y $23,40^\circ$ latitud norte, abarcando parte de la costa norte y sur de las provincias La Habana, Artemisa y Mayabeque (figura 1a).

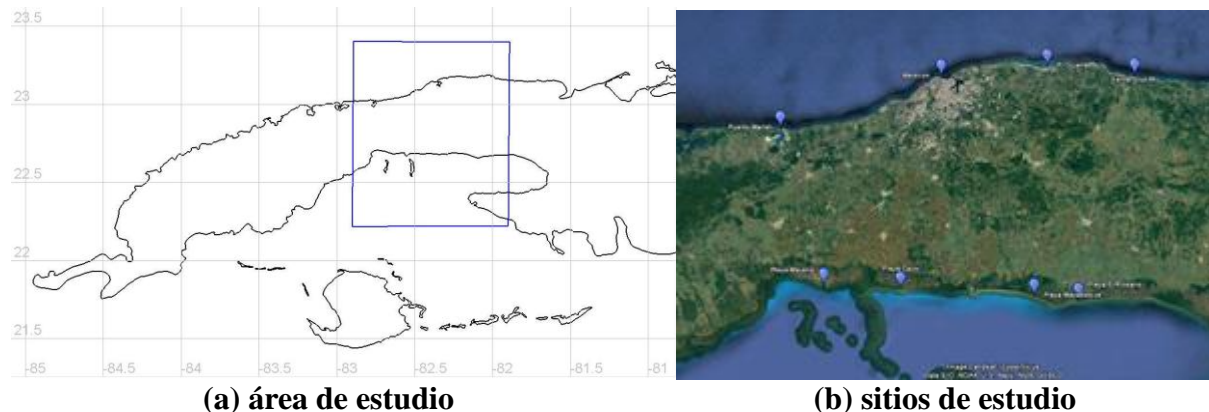


Figura 1. Sitio de estudio

Dentro del área de trabajo fueron seleccionados ocho sitios de estudio. En la costa norte fueron seleccionados el Malecón Habanero y el puerto del Mariel, así como las playas de Santa Cruz del Norte y Guanabo. Al sur, en el golfo de Batabanó, se escogieron las playas: Majana, Cajío, Mayabeque y Rosario (figura 1b).

Dominio de simulación, línea de costa y batimetría

El dominio de simulación seleccionado (fig. 2), incluye las Antillas menores y parte del noroeste del Océano Atlántico, el Golfo de México y el Mar Caribe, entre las coordenadas 58° y 97° longitud oeste y entre los 8° y 41° latitud norte. La figura 2, muestra la batimetría para todo el dominio, la cual se describe con mayor resolución para el área de estudio en la figura 3.

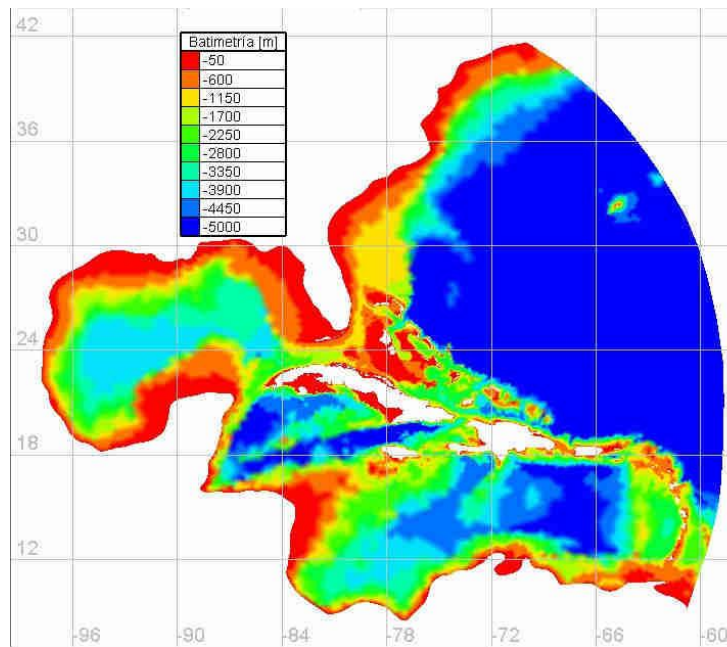
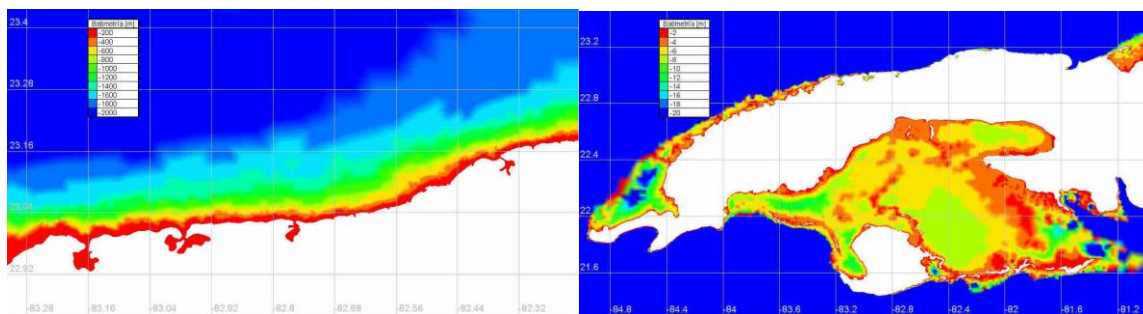


Figura 2. Batimetría y dominio de simulación



(a) Costa Norte

(b) Costa Sur

Figura 3. Batimetría del sitio de estudio

Modelos computacionales

ADvance CIRCulation Model (ADCIRC) es un modelo desarrollado en la University of North Carolina at Chapel Hill (Luettich and Westerink 1991), basado en la ecuación de aguas someras (Le Mehaute 1976), obtenida de la integración en la columna de agua de la ecuación de balance de momentum, la ecuación de continuidad y la aproximación de Boussinesq.

El modelo ADCIRC emplea los elementos finitos discretos de Galerkin (DGFE) para la discretización espacial y diferencias finitas para discretizar el tiempo, resuelve la ecuación generalizada de continuidad de la onda (GWC) y la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento (Hagen et al. 2007).

Simulating Waves Nearshore Model (SWAN) es un modelo de generación espectral de oleaje de 3ra generación, desarrollado por la Delft University of Technology, en el Departamento de Ingeniería Civil y Geociencias. Es aplicable en la generación de oleaje inducido por vientos a diferentes escalas espaciales y se basa en las ecuaciones de balance de acción del oleaje. En

nuestro país, Córdova (2010) utilizó el modelo SWAN para un estudio histórico de huracanes que han afectado Cuba, lo que permitió realizar las simulaciones de inundaciones en el malecón de La Habana con el objetivo de apoyar el diseño de soluciones contra las penetraciones del mar.

El modelo acoplado ADCIRC+SWAN realiza un intercambio de información entre ambos modelos, donde el ADCIRC aporta los niveles del mar y las velocidades de las corrientes al modelo SWAN, mientras el modelo de oleaje aporta las tensiones de radiación al modelo hidrodinámico ADCIRC. El intercambio de información logra la creación de un modelo acoplado que tiene en cuenta las interacciones oleaje-corriente. En la investigación los modelos fueron ejecutados en paralelo en el clúster de la Universidad Central de las Villas, Cuba. El recurso físico del clúster disponible consistió en 13 nodos de 8 núcleos, para un total de 104 procesadores. La malla de cómputo (no estructurada), de 150387 nodos (129714 nodos interiores y 20673 nodos de las fronteras) se observa en la figura 4.

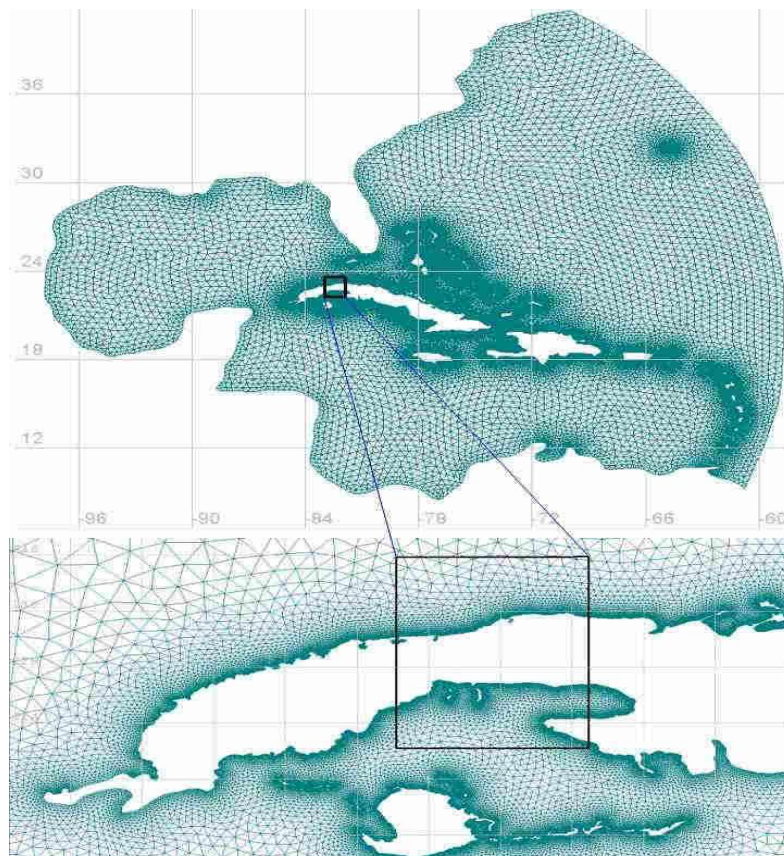


Figura 4. Malla de cómputo

Forzadores atmosféricos e hidrodinámicos

Del modelo atmosférico “Climate Forecasting System” (CFS) fueron tomadas las velocidades de los vientos y las presiones atmosféricas durante el huracán Wilma en 2005. Como forzador hidrodinámico, fueron seleccionadas ocho componentes de marea (K1, K2, M2, N2, O1, P1, Q1, y S2), extraídas de la base de datos Leprovost (Leprovost et al. 1998).

Boyas virtuales y oceanográficas

Las boyas virtuales seleccionadas coinciden con las ocho localidades de estudio. En la tabla 1 se muestran las coordenadas y la profundidad para el nivel medio del mar.

Tabla 1. Boyas virtuales en localidades de estudio

Localidad	Latitud	Longitud	Nivel (m)
Santa Cruz del Norte	23,1581	-81,9231	-1,44
Guanabo	23,1738	-82,1305	-1,30
Malecón	23,1452	-82,3807	-2,37
Puerto del Mariel	23,0231	-82,7584	-10,40
Cajío	22,6815	-82,4633	-0,29
Mayabeque	22,6738	-82,1477	-0,14
Majana	22,6839	-82,6451	-0,13
Rosario	22,6668	-82,0431	-0,13

En la investigación no se contó con datos en la zona de estudio debido a la no existencia de sensores oceanográficos, como alternativa de validación fue utilizado una estación oceanográfica de la NOAA, ubicada en los 18°,458 latitud norte y los 66°,116 longitud norte en San Juan, Puerto Rico.

Escenarios de simulación

En el trabajo fue seleccionado el huracán Wilma ocurrido entre el 15 y el 27 de octubre del 2005, el cual fue la vigésima primera tormenta tropical y el décimo segundo huracán de la temporada de huracanes del Atlántico de 2005 (Pasch et al. 2014).

Se ejecutaron tres escenarios de simulaciones para obtener la marea astronómica, la surgencia de tormenta y el wave setup ocurrido entre las 18:00 UTM del 15 de octubre del 2005 hasta las 06:00 UTM del día 26 de octubre del 2005.

El primer escenario, denominado NWS-0, fue forzado solo por las componentes de la marea extraídas de la base de datos Leprovost. El segundo escenario, NWS-5, además de las componentes de marea se tuvieron en cuenta forzadores atmosféricos tomados del modelo CFSR. En el tercer escenario, NWS-305, fueron utilizados como forzadores la marea, las velocidades de los vientos, las presiones atmosféricas y se incluyó la acción del oleaje mediante el modelo SWAN en el acoplamiento ADCIRC-SWAN.

Los dos primeros escenarios fueron ejecutados mediante el modelo ADCIRC, mientras que el tercer escenario fue ejecutado mediante el acoplamiento ADCIRC+SWAN. La marea astronómica se obtiene directamente del estudio del escenario NWS-0, mientras que la surgencia de tormenta fue calculada como la diferencia de nivel entre el escenario NWS-5 y NWS-0. En el caso del wave setup, su contribución al nivel fue calculada mediante la diferencia entre los niveles de los escenarios NWS-305 y NWS-5 respectivamente.

RESULTADOS

Escenario NWS.0: marea astronómica (ADCIRC)

La figura 5 muestra los resultados de nivel del mar obtenidos durante el escenario NWS-0. Se puede observar una marcada diferencia entre los valores de marea de las boyas del norte (Santa Cruz del Norte, Guanabo, Malecón y P. Mariel) y las boyas del sur, ubicadas en el golfo de Batabanó (Cajío, P. Mayabeque, Majana, y Rosario).

El nivel del mar máximo entre todos los sitios fue reportado en la boya de Santa Cruz del Norte, con 0,45 sobre el nivel medio del mar, el 20 de octubre del 2005 a las 01:00 horas. En la costa sur, los valores máximos ocurrieron en las playas Cajío y Majana, con un valor igual a 0,054 metros sobre el nivel medio del mar.

El rango máximo de variación de la marea, ocurrió en Santa Cruz del Norte, 0,83 metros, oscilando entre los 0,45 y -0,38 metros con referencia al nivel medio del mar. Mientras que, analizando solo las boyas del sur, el rango máximo de variación del nivel del mar tuvo lugar en playa Majana, 0,093 metros, entre los niveles -0,039 m y 0,054 m.

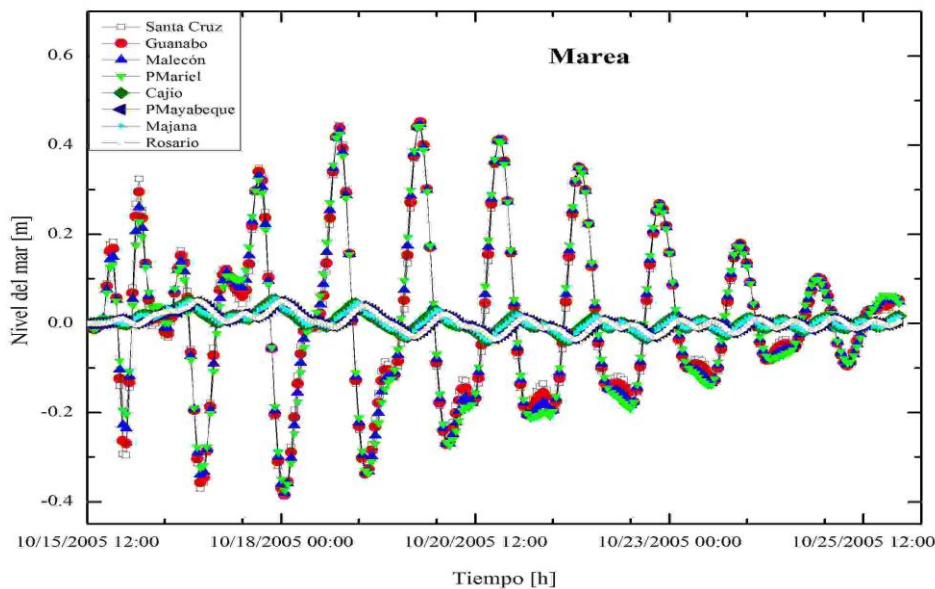
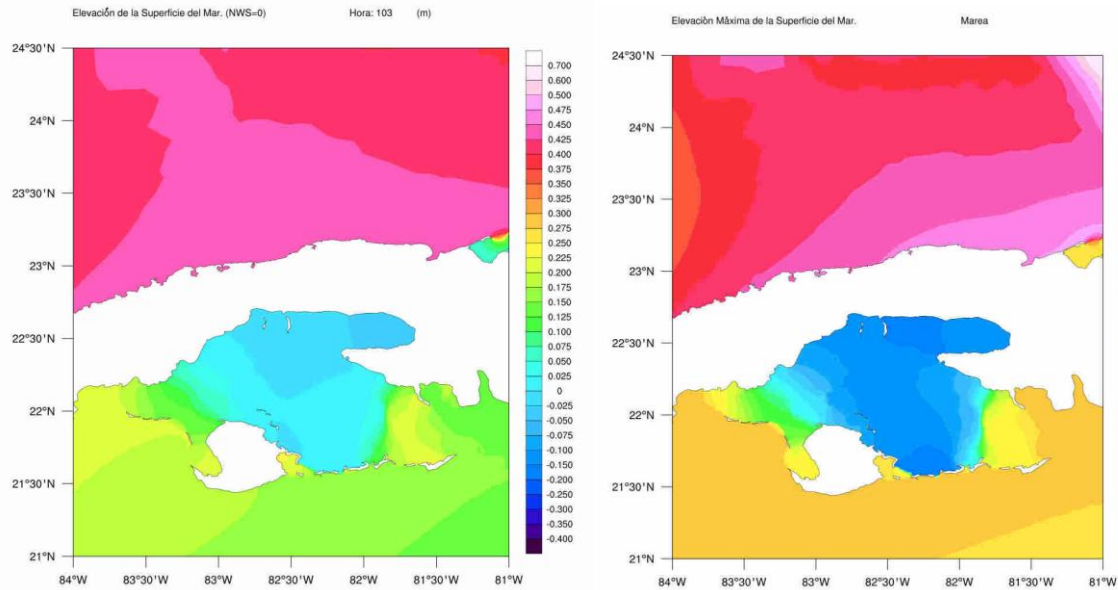


Figura 5. Nivel del mar en boyas virtuales. Escenario NWS-0

En la figura 6, se describe el nivel del mar en el dominio local, en el instante donde fue obtenido el máximo absoluto de nivel las boyas virtuales. Es decir, el estado del mar en el momento que la boya de Santa Cruz del Norte alcanzó su valor máximo.

En la tabla 2 se resumen los valores máximos, mínimos, medios y rangos de variación del nivel del mar durante el escenario NWS-0, y los horarios de ocurrencia de los valores extremos (Máx y Mín.) en los sitios de estudios.



(a) Escenario NWS-0. Nivel del mar (2005-10-20 01:00)
 (b) Nivel máximo absoluto del mar en cada nodo. Escenario NWS-0

Tabla 2. Valores máximos, mínimos, medios y rangos del nivel del mar(NWS-0)

Boyas	Máx. (m)	Hora	Mín. (m)	Hora	Medio (m)	Rango (m)
Santa Cruz N.	0,454	20051020 01	-0,387	20051018 07	-0,008	0,841
Guanabo	0,4551		-0,385		-0,007	0,836
Malecón	0,446		-0,381		-0,003	0,831
P. Mariel	0,442		-0,374		0,0004	0,816
Cajío	0,054	20051018 04	-0,039	20051021 22	0,001	0,093
Mayabeque	0,049	20051018 06	-0,034	20051022 00	0,0003	0,083
Majana	0,054	20051018 05	-0,039	20051021 23	0,002	0,093
Rosario	0,051	20051018 04	-0,036	20051022 01	0,001	0,087

Escenario NWS-5: marea, velocidad de los vientos y presiones atmosféricas. (ADCIRC)

En la figura 7 se puede observar que a diferencia del escenario NWS-0, las boyas ubicadas al sur obtuvieron los mayores valores de nivel del nivel del mar. En playa Majana fue obtenido el máximo absoluto de nivel, igual a 0,967 metros sobre el nivel medio del mar, el día 24 de octubre a las 00:00 horas. Al norte, el valor máximo de nivel del mar ocurrió en Santa Cruz del Norte el día 20 de octubre, a las 03:00 y en el Malecón el 24 a las 06:00, ambos con un valor de 0,409 metros sobre el nivel medio del mar.

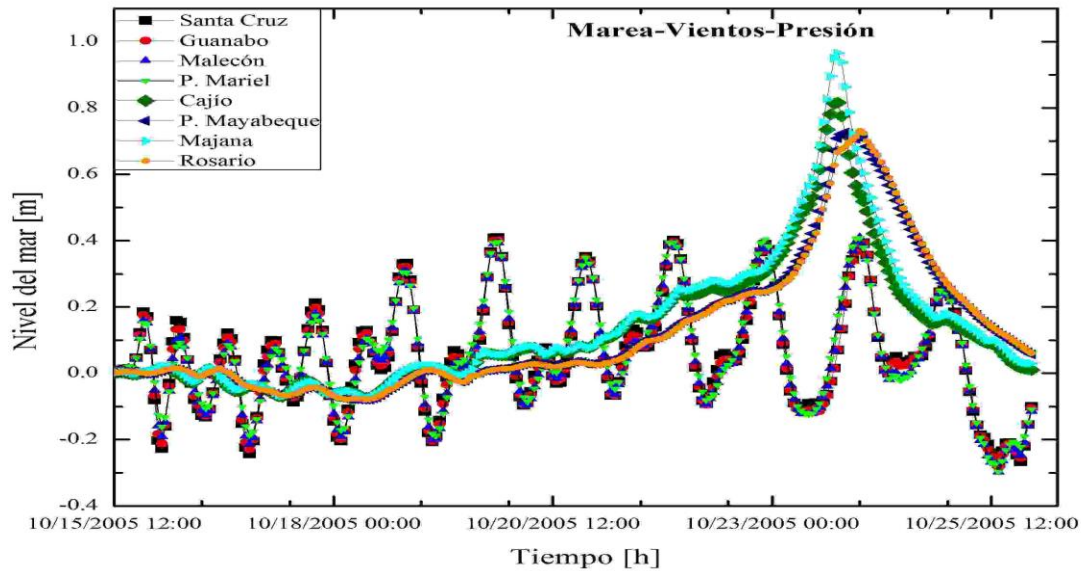


Figura 7. Nivel del mar obtenidos durante el escenario NWS-5

La figura 8a muestra el nivel del mar en el momento de máximo absoluto de nivel del mar en los sitios de estudio, durante el Escenario NWS-5. Se puede observar una sobre-elevación al norte del golfo de Batabanó y niveles mínimos en la zona sur, al norte de la Isla de la Juventud. Este comportamiento del mar evidencia la acción de los vientos del huracán Wilma. Fue notable la diferencia de nivel entre las zonas norte y sur del golfo de Batabanó. La figura 8b muestra los valores máximos absolutos del nivel del mar obtenidos por el Escenario NWS-5, en cada nodo.

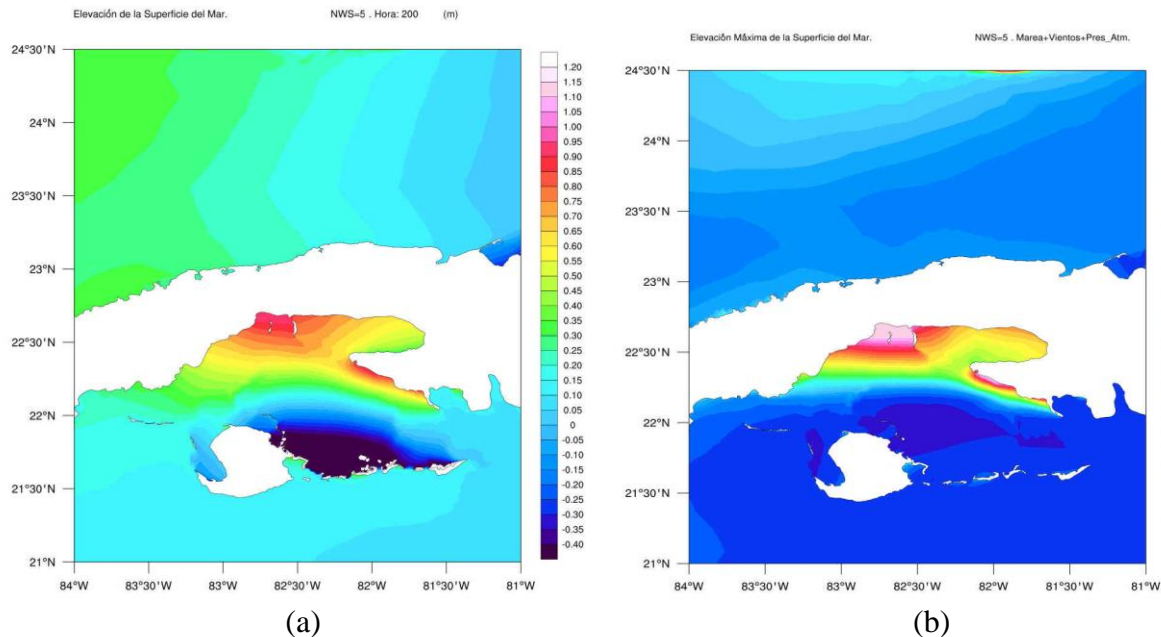


Figura 8. (a) Escenario NWS-5. Nivel del mar (2005-10-24 02:00) (b) Nivel del mar máximo absoluto en cada nodo. Escenario NWS-5

En la tabla 3 se resumen los valores extremos obtenidos durante la simulación del Escenario NWS-5, donde se abordan los valores de máximo y mínimo, así como los momentos de ocurrencia.

Tabla 3. Valores de máximos, mínimos, medios y rangos de nivel del mar (NWS-5)

Boyas	Máx. (m)	Hora	Mín. (m)	Hora	Medio (m)	Rango (m)
Santa Cruz N.	0,409	20051024 03	-0,272	20051025 20	0,041	0,681
Guanabo	0,401		-0,83		0,034	0,684
Malecón	0,409	20051024 06	-0,300		0,033	0,707
P. Mariel	0,408				0,041	0,705
Cajío	0,816	20051024 01	-0,074	20051022 00	0,067	0,890
Mayabeque	0,726	20051024 02	-0,080	20051018 15	0,030	0,806
Majana	0,967		-0,077		0,074	1,043
Rosario	0,731	20051024 06	-0,079	20051018 16	0,027	0,810

Escenario NWS-305: marea, vientos, presiones atmosféricas y oleaje (ADCIRC + SWAN)

La figura 9 muestra las series de nivel del mar obtenidas por el Escenario NWS-305 y se observan los máximos en las boyas del Golfo de Batabanó. El máximo absoluto del nivel tuvo lugar en playa Majana, igual a 1,08 metros sobre el nivel medio del mar, a las 00 del día 24 de octubre, 2005. Mientras el nivel del mar mínimo fue encontrado en el Malecón Habanero, con valor de 0,301 metros por debajo del nivel medio del mar. La tabla 4 muestra los valores extremos de máximos, mínimos, medios y rango del nivel del mar en los sitios de estudio para el escenario NWS-305.

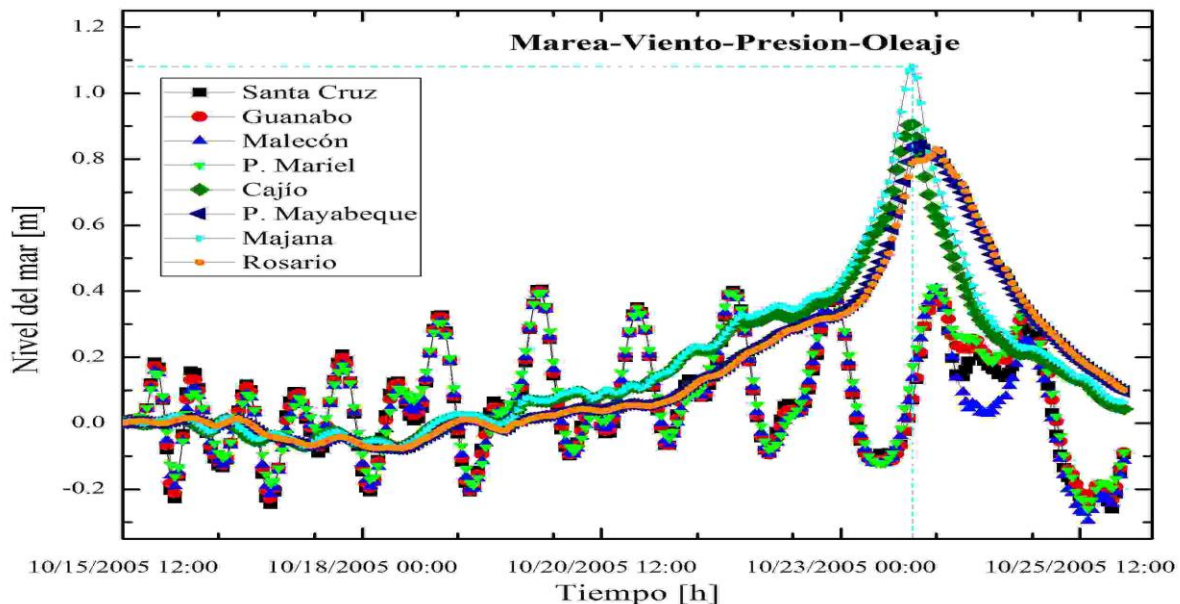


Figura 9. Escenario NWS-305. Series de nivel del mar de sitios de estudio

Tabla 4. Valores máximos, mínimos, medios y rangos de nivel del mar (NWS-305)

Boyas	Máx. (m)	Hora	Mín. (m)	Hora	Medio (m)	Rango (m)
Santa Cruz N.	0,406		-0,260	20051026 02	0,051	0,666
Guanabo	0,399	20051020 03	-0,246		0,048	0,645
Malecón	0,408		-0,301	20051025 20	0,038	0,705
P. Mariel	0,412	20051024 06	-0,259		0,060	0,671
Cajío	0,906	20051024 00	-0,073		0,088	0,979
Mayabeque	0,844	20051024 01	-0,078	20051018 15	0,053	0,921
Majana	1,081	20051024 00	-0,075		0,096	1,156
Rosario	0,831	20051024 06	-0,076	20051018 16	0,052	0,907

Comparación de nivel del mar

Se pudo apreciar una mayor influencia de la marea astronómica, la cual fue la generadora de los mayores niveles del mar. También se pudo corroborar que las menores amplitudes de la marea ocurrieron cuando el huracán Wilma ejerció la mayor influencia en la costa norte, y fueron alcanzados los máximos valores del nivel en los escenarios NWS-5 y NWS-305.

La figura 10 expone mediante un gráfico de barras las diferencias entre los máximos valores de nivel del mar obtenidos en los tres escenarios de simulación.

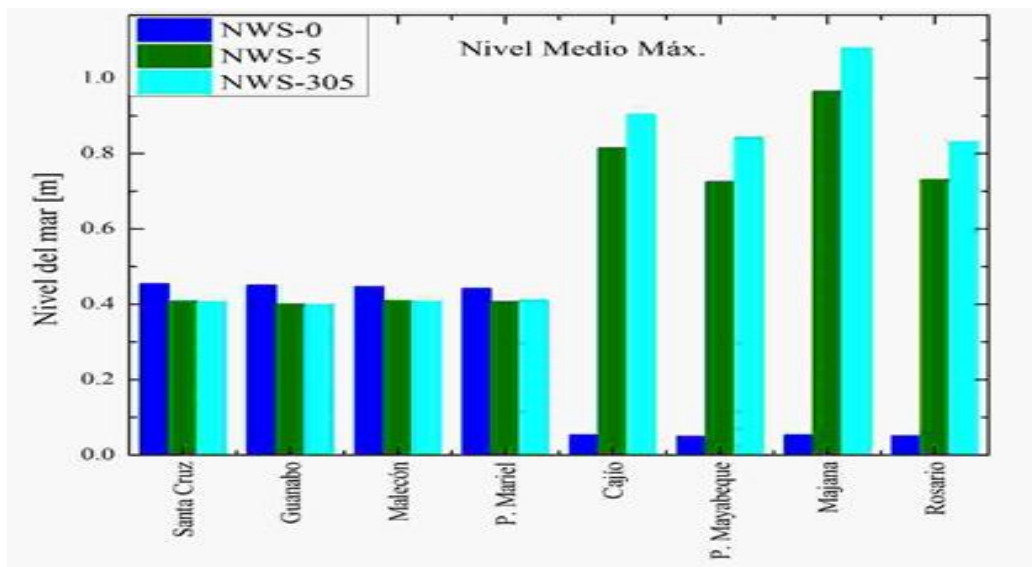


Figura 10. Valores de nivel máximo por escenarios en cada sitio de estudio

Validación de nivel del mar

La figura 11 muestra las series de nivel del mar obtenidas en los tres escenarios de simulación y la reportada por la NOAA para San Juan, Puerto Rico. Los resultados se corresponden en buena medida con el valor real. En la comparación estadística fueron aplicados el coeficiente de correlación de Pearson y el error cuadrático medio, los resultados se muestran en la tabla 5.

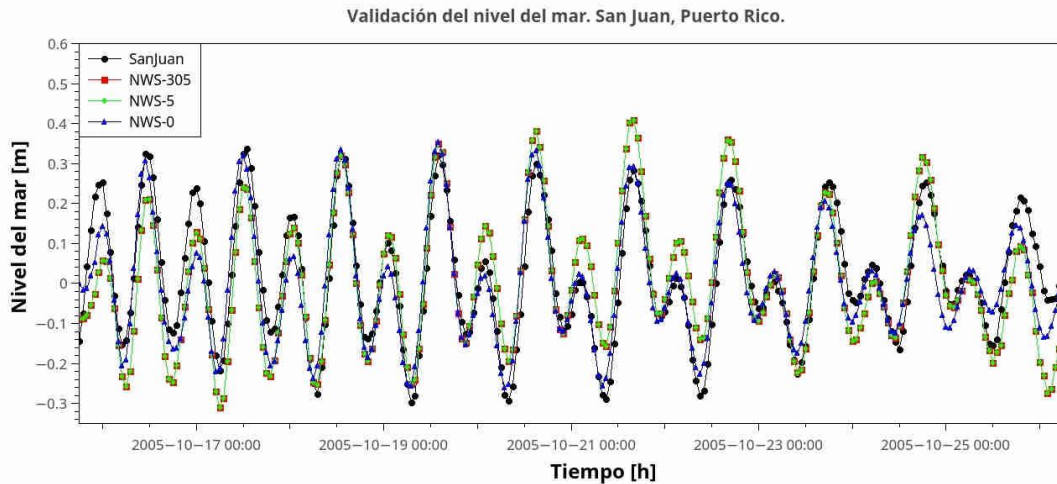


Figura 11. Series de nivel del mar en San Juan, Puerto Rico (simuladas y reportas por la NOAA)

Tabla 5. Estadística de comparación entre nivel del mar de escenarios y datos reales

Error	NWS-0	NWS-5	NWS-305
Coef. Corr. Pearson	0,85	0,92	0,88
Error Cuadrático Medio	0,13	0,07	0,10

Surgencia de tormenta

La surgencia de tormenta fue obtenida mediante la comparación de los niveles del mar obtenidos en los escenarios NWS-5 y NWS-0. En la figura 12 se muestran las series de surgencia de tormenta obtenidas en los sitios de estudio, se evidencia un incremento de la surgencia en las boyas ubicadas al sur, a partir del día 21 de octubre hasta alcanzar un máximo de 0,992 metros en playa Majana, a las 18:00 del 23 de octubre de 2005.

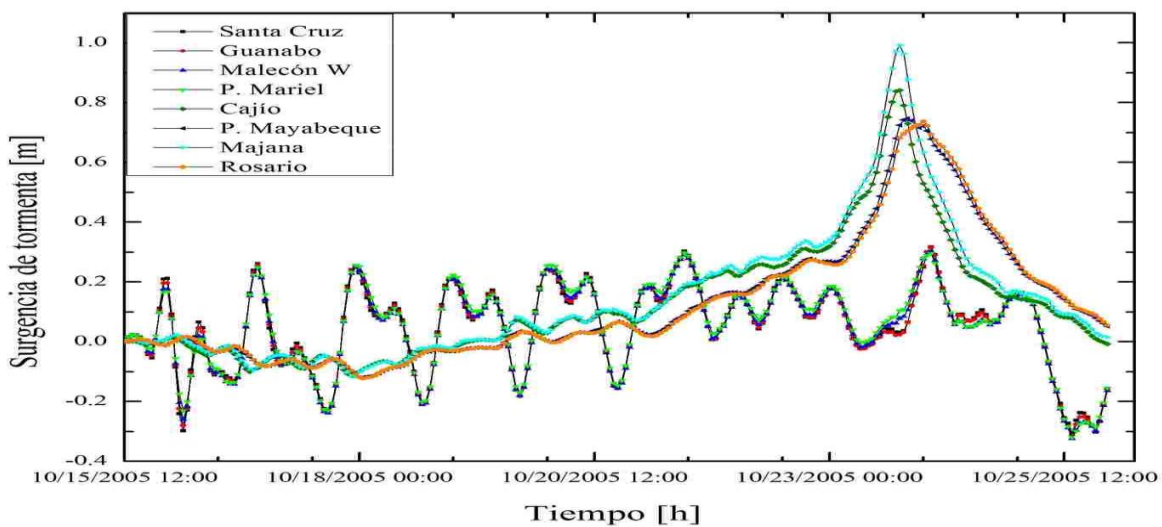


Figura 12. Series de surgencia de tormenta en los sitios de estudio de Wilma (2005)

La figura 13 muestra la surgencia y la dirección del viento en la zona de estudio, a las 18:00 del día 23 de octubre del 2005, momento donde ocurrió la máxima surgencia de tormenta en playa Majana.

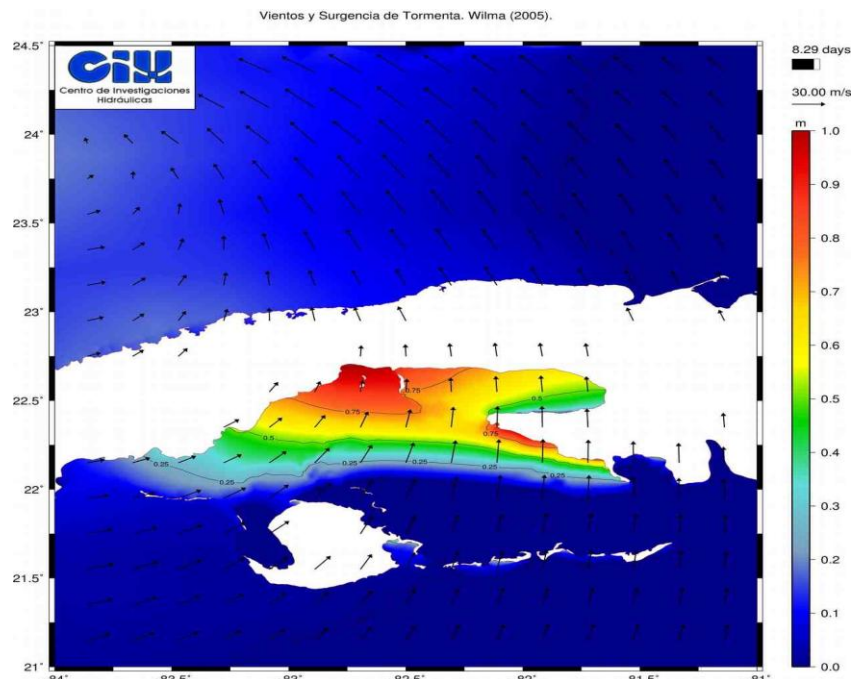


Figura 13. Surgencia de tormenta y velocidad del viento (2005-10-23 18:00)

El valor mínimo fue reportado en la boya del Malecón a las 23:00 del 17 de octubre del 2005, e igual a -0,32 metros. En general, las boyas del sur presentaron los máximos valores de surgencia, debido a la incidencia favorable de los vientos (sur-norte) y la configuración amplia y poco profunda de la batimetría del Golfo de Batabanó.

Sobreelevación por rotura de la ola (Wave setup)

El setup del oleaje (wave setup) fue estudiado mediante la incorporación del escenario NWS-305, utilizando el modelo acoplado ADCIRC + SWAN e incluyendo el oleaje como fenómeno hidrodinámico en las simulaciones y estimado a partir de la diferencia de nivel del mar obtenido en los escenarios NWS-305 y NWS-5.

La figura 14 describe las series de wave setup en las boyas seleccionadas, la cual muestra un incremento paulatino del wave setup en las boyas del sur, desde las 21:00 del 18 de octubre hasta obtener un máximo de 0,124 metros en playa Mayabeque. El máximo absoluto del setup fue reportado en el Puerto del Mariel, con un valor de 0,267 metros a las 14:00 del 24 de octubre de 2005.

En la figura 15 se muestra el wave setup estimado a las 14:00 del día 24 de octubre del 2005, momento de ocurrencia del máximo setup que tuvo lugar en el puerto del Mariel e igual a 0,267 metros. La figura muestra de forma correcta el fenómeno del wave setup, donde debido a las bajas profundidades, el oleaje comienza el proceso de rotura.

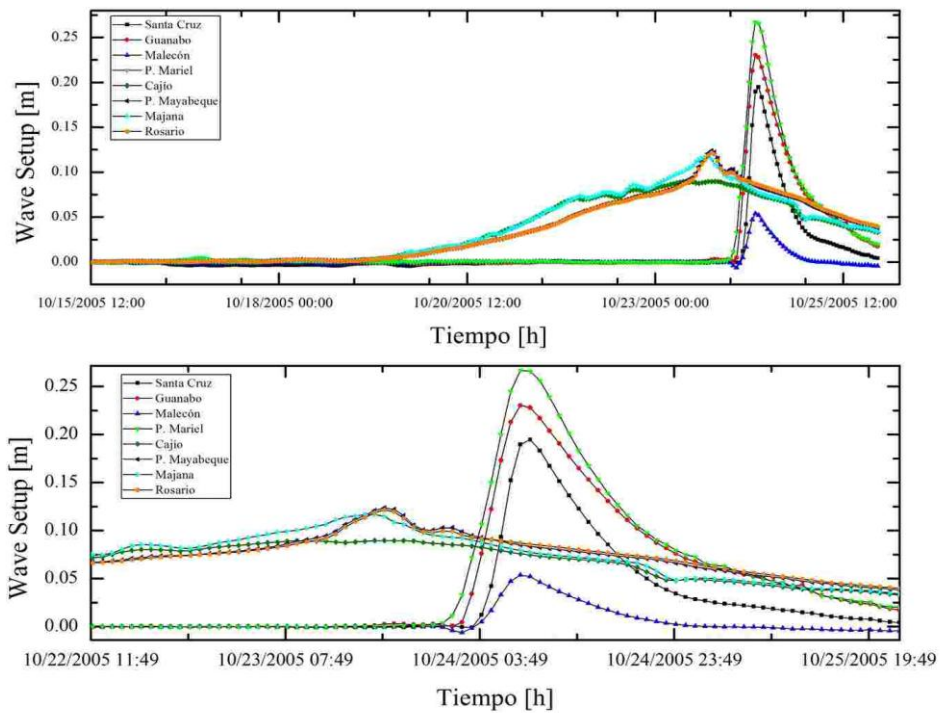


Figura 14. Serie de wave setup en sitios de estudios de Wilma (2005)

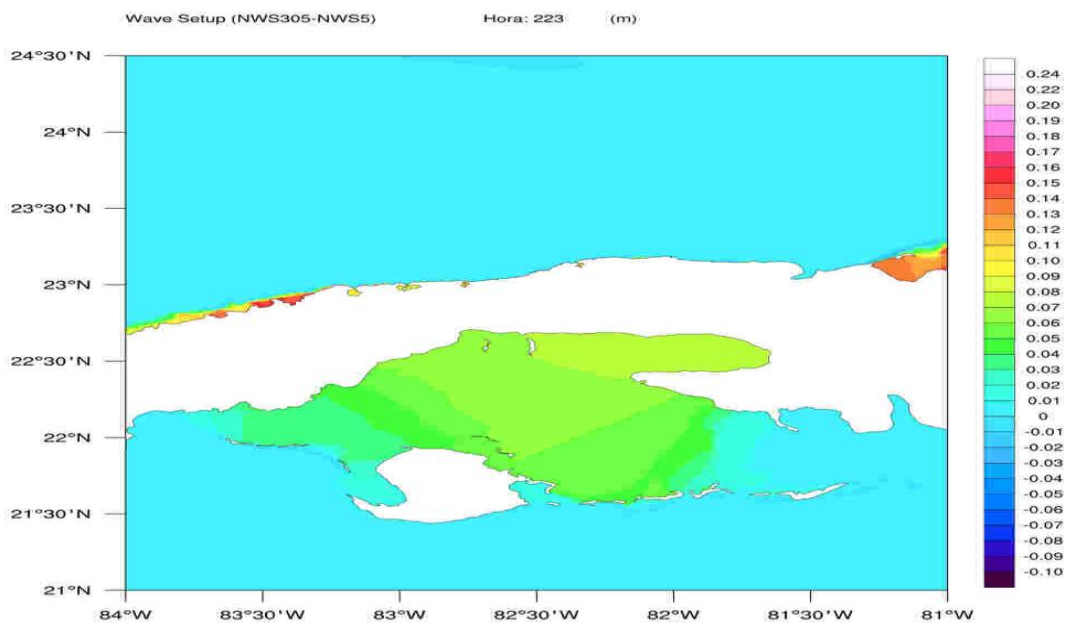


Figura 15. Serie de Wave setup en el sitio de estudio (2005-10-24 14:00)

Comparación de fenómenos hidrodinámicos

A continuación, se describen las contribuciones al nivel del mar de los fenómenos hidrodinámicos estudiados en el trabajo: marea astronómica, surgencia de tormenta y Setup del oleaje. Los resultados mostrados en la figura 16 demuestran que las boyas del norte tuvieron

mayor influencia de la marea astronómica, seguido de la surgencia de tormenta y el wave setup respectivamente. Sin embargo, en las boyas del sur la surgencia de tormenta fue el principal factor de elevación del nivel del mar, el setup del oleaje el segundo, aunque los valores no sobrepasaron los 0,15 metros. La marea astronómica ejerció la menor influencia al nivel del mar, del orden de los centímetros. En general, la surgencia de tormenta fue el fenómeno más importante en la elevación del nivel del mar, si se tiene en cuenta ambas costas del área de estudio. Por otra parte, el wave setup no ejerce influencia significativa cuando las condiciones atmosféricas no estuvieron influenciadas por el evento meteorológico extremo y se ha visto disminuida su influencia debido a la resolución de la malla.

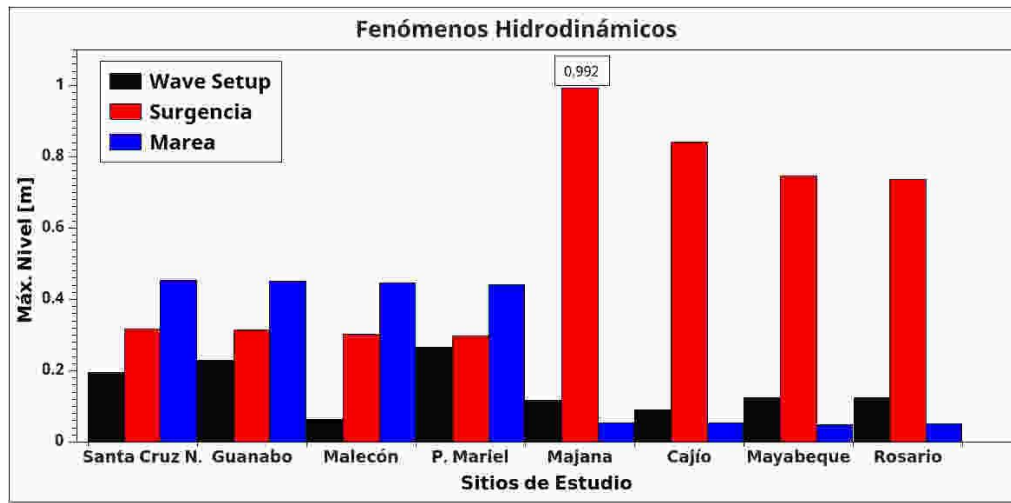


Figura 16. Comparación entre la Marea, Surgencia de tormenta y Wave setup.

CONCLUSIONES

- En el trabajo se concluye que los modelos ADCIRC y ADCIRC + SWAN describieron correctamente los niveles del mar en la zona de estudio durante el huracán Wilma en 2005, y no se reportaron inestabilidades numéricas en la malla utilizada.
- En la costa norte la marea astronómica fue el fenómeno que más contribuyó al elevar el nivel del mar, seguido por la surgencia de tormenta y el wave setup respectivamente. Al sur, la surgencia de tormenta fue el fenómeno que más elevación del nivel del mar generó, con un valor de 0,99 metros en playa Majana.
- Las mareas astronómicas de la costa sur fueron inferiores a los 10 centímetros, debido principalmente a la influencia del fondo y la batimetría poco profunda existente dentro del Golfo de Batabanó.
- La validación del nivel del mar en San Juan, Puerto Rico; mostró que el escenario NWS-5 fue el que más se ajustó a los valores reales con una correlación de Pearson de 0,92. En general, los tres escenarios mostraron correlaciones superiores a 0,85 donde los resultados describen correctamente tanto la amplitud como la fase del nivel del mar.
- La costa sur mostró mayor vulnerabilidad al fenómeno de la surgencia de tormenta, mientras la costa norte fue la marea astronómica quien más contribuyó al nivel del mar. Hay que tener presente que en el momento de mayor surgencia y wave setup en la costa norte, debido a la posición del huracán Wilma; las mareas estaban en la fase de menores amplitudes por lo que los niveles obtenidos en los escenarios NWS-5 y NWS-305 no superaron al máximo nivel reportado por el escenario NWS-0.

REFERENCIAS

- Ashton A. D., Donnelly J. P. and Evans R. L.** (2008). "A discussion of the potential impacts of climate change on the shorelines of the northeastern USA". *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 13, No. 7, pp. 719-743, ISSN: 1381-2386, Springer-Netherlands, Netherlands.
- Córdova L. F.** (2010). "Trayectoria más desfavorable de un huracán con intensa penetración del mar en el Malecón de la Habana mediante el modelo matemático SWAN". *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol. 31, No. 1, pp. 70-81, ISSN: 1815-591X, CIH, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba.
- Hagen S. C., Zundel A. K. and Kojima, S.** (2007). "Automatic, unstructured mesh generation for tidal calculations in a large domain". *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol. 20, No 8, pp. 593-608, ISSN: 1061-8562, Taylor & Francis Group, United Kingdom.
- Holland G. L., Belanger J. I. and Fritz A.** (2010). "A revised model for radial profiles of hurricane winds". *Monthly Weather Review*, Vol.138, pp. 4393-4401, ISSN: 0027-0644, Washington, United States.
- Le Mehaute B.** (1976). "An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves". Ed. Springer-Verlag, New York, United States.
- 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, pp. 5513-5529, ISSN: 2169-9291, American Geophysical Union, USA.
- Luetich R. A. and Westerink J. J.** (1991). "A solution for the vertical variation of stress, rather than velocity, in a three-dimensional circulation model". *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 12, No. 10, pp. 911-928, ISSN: 1097-0363, John Wiley & Sons Ltd, New York, United States.
- Pasch R. J., Blake E. S., Cobb III H. D. and Roberts D. P.** (2014). "Tropical Cyclone Report. Hurricane Wilma", National Oceanic and Atmospheric Administration, United States.
- Weisberg R. H. and Zheng L.** (2008). "Hurricane storm surge simulations comparing three-dimensional with two-dimensional formulations based on an Ivan-like storm over the Tampa Bay, Florida region". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, No. C12001, ISSN: 0148-0227, American Geophysical Union, United States.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Janner Rodríguez Pérez

<https://orcid.org/0000-0001-9683-0700>

Realizó contribuciones en la interpretación de datos. Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del informe final.

Luis Fermín Córdova López

<https://orcid.org/0000-0001-8175-6819>

Realizó contribuciones en la interpretación de datos. Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados y en la revisión y redacción del informe final.

Ovel Díaz García

<https://orcid.org/0000-0002-0946-0834>

Participó en la búsqueda de información y en la redacción final.