

Aplicación de los modelos WRF y WW3 en el pronóstico de los elementos de ola al paso de huracanes por la costa occidental de la República de México

Application of WRF and WW3 models on the wind wave elements forecast in presence of hurricanes along the west shore zone of Mexico

Ida Mitrani Arenal

ida.mitrani@jinsmet.cu

Daniel Martínez Castro

Yoandy Alonso Díaz

Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, Apdo. 17032, Loma de Casablanca, Regla, CP11700, La Habana, Cuba

Recibido: febrero 27, 2012; aceptado: mayo 5, 2012

Resumen

Se describe el uso del modelo numérico WW3 para la predicción de los elementos de ola en el Pacífico oriental, utilizando como entrada las salidas de pronóstico del campo de viento del modelo a mesoescala WRF, sobre las aguas aledañas a México, al paso los huracanes John, Lane y Paul de la temporada ciclónica de 2006. Se aprecia que el modelo WRF refleja con gran calidad los patrones de circulación atmosférica en el área de estudio, especialmente la interacción de dos o más vórtices ciclónicos. La predicción de trayectoria de los huracanes muestra resultados aceptables para plazos de varios días, lo cual garantiza la correcta localización del área de generación y desplazamiento del oleaje que afectó a las costas mexicanas al paso de estos eventos mencionados. Se pretende que los resultados obtenidos sean de utilidad no solo para entender la influencia de los huracanes sobre el estado dinámico de la superficie marina en el área de interés, sino también con miras a la elaboración de los pronósticos operativos del tiempo para esta región.

PALABRAS CLAVE: Huracán, México, oleaje, WRF, WW3.

Abstract

Numerical models WRF+WW3 are used to predict wind wave elements in the Eastern Pacific, on waters surrounding Mexico, under the influence of hurricanes John, Lane and Paul, during the 2006 hurricane season. It can be noticed that the WRF model reproduces the atmospheric circulation patterns in the study area with high quality, even when the interaction of two or more cyclonic vortices is present. Predicting hurricane tracks shows acceptable forecast results for several days. The aforementioned aspects ensure the correct location of the wind wave generation areas and its displacement to the Mexican coastal zone due the above mentioned hurricanes. The results are intended to be useful not only to understand the influence of hurricanes on the sea surface dynamic state in the area of interest, but also in the development of operational weather forecasts for this region.

KEYWORDS: hurricane, Mexico, wind wave, WRF, WW3.

Introducción

El poder destructivo de los ciclones tropicales es una preocupación de la humanidad; los fuertes vientos asociados con estos eventos generan olas peligrosas para la navegación, que pueden ocasionar inundaciones costeras, bien sea por el mar de fondo ocasionado, si el evento se mueve alejado de la costa; bien sea en combinación con la surgencia del huracán. Esta última es la situación peor, cuando el rompiente del oleaje que se desplaza sobre la onda de surgencia descarga toda su fuerza sobre las edificaciones y arroja disímiles objetos, tanto del fondo marino, como de origen antropogénico.

El objetivo del presente texto reside en la aplicación de los modelos numéricos WRF y WW3 para la predicción de los elementos de ola en el Pacífico oriental, sobre las aguas aledañas a la República de México, al paso los huracanes John, Lane y Paul de la temporada ciclónica del 2006. Se pretende que los resultados obtenidos sean de utilidad, no solo para entender la influencia de los huracanes sobre el estado dinámico de la superficie marina en el área de interés, sino también en la elaboración de los pronósticos operativos del tiempo para esta región.

Materiales y métodos

La representación de los campos de viento se obtuvo de las salidas del modelo a mesoescala WRF (Weather Research and Forecast model), descrito en WRF User Guide (2011) y aplicado en la región por Binimelis de Raga (2009), con dos dominios de 10 km y 30 km. El área de interés está centrada en los 20.0057°N con 113°W, y localizada entre los 8.6 y 31.33°N, y entre los 124.4 y 101.67 °W (Fig. 1).

En el dominio utilizado se presenta una frontera sólida en el cuadrante superior derecho de la malla, ocupada por las costas de México; en el resto de las fronteras se insertan condiciones artificiales genera-

das por el propio modelo, de modo que los valores de *fetch* en las cercanías de estas fronteras son irreales. Para vientos débiles, esta situación no es un gran problema, porque no se requiere de la prolongación del *fetch* para que la representación del oleaje sea correcta. Es conocido que los vientos con velocidades menores de 6 m/s requieren de un *fetch* de menos de 100 km para que se genere el oleaje desarrollado (Titov, 1973), de manera que, en el dominio escogido, el oleaje generado por estos vientos débiles es bastante parecido a la realidad sobre una distancia de hasta un grado de latitud. Por otra parte, el *fetch* del campo de viento de un huracán está limitado por su propia circulación, de manera que el sistema, al entrar completamente al dominio, deja de ser afectado por las condiciones de frontera. No obstante, es una limitación que ha de tenerse en cuenta para la presencia de sistemas de escala sinóptica, acompañados de fuertes vientos que requieran longitudes de *fetch* de varias centenas de kilómetros, porque la existencia de las fronteras podría introducir el acortamiento irreal del *fetch*, con la consiguiente subvaloración del oleaje.

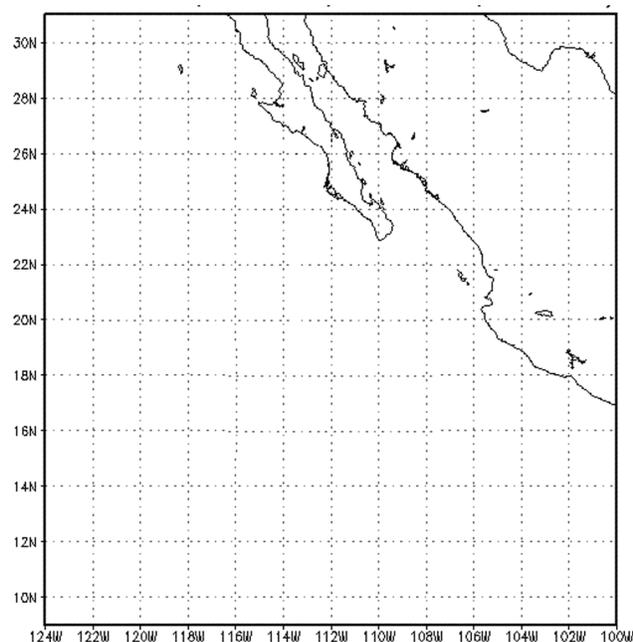


Figura 1. Área del Pacífico Oriental, sobre la cual se localiza el dominio de trabajo WRF-WW3

Se asimiló la versión 2.22 del modelo de oleaje Wave Watch III (WW3), descrito en los trabajos de Tolman y Chalikov (1994, 1996) y Tolman (2002, 2004, 2006), y elaborado en el Environmental Modeling Center/Marine Modeling and Analysis Branch at the National Center of Environmental Prediction/National Ocean and Atmospheric Administration (NCEP-NOAA). En este modelo se asume que las propiedades del medio ambiente son variables en el tiempo (las corrientes marinas y el nivel del mar). De ser necesario, el modelo incluye la presencia de hielo como un campo variable, a la vez que se asume que el campo de olas, en general, varía en escalas temporales y espaciales mayores que las de una onda solitaria. Se considera que la propagación de la ola es lineal y se parametrizan los efectos no lineales, lo cual implica que las parametrizaciones no limitan de forma rígida la evolución del oleaje en relación con la batimetría y que el modelo pueda utilizarse con dominios anidados en área costera.

Esquemas de parametrización utilizados

1. El espectro Jonswap para la aproximación espectral del oleaje, con el cual las condiciones *fetch* se calculan a partir de las características del campo de viento de entrada. Esta particularidad es muy conveniente dada la complejidad del campo eólico al paso de huracanes que, efectivamente, limita la longitud del *fetch*.
2. El esquema de propagación descrito por Tolman (2002), con inclusión de un suavizado del efecto “rociador” del viento, que cuando es sobrestimado produce una excesiva deformación sobre la dirección de traslación del oleaje, sobre todo cuando este es generado por vientos huracanados.
3. La parametrización de Tolman y Chalikov (1994, 1996), mejorada por Tolman (2002), para los términos disipativos, refleja en detalle la formación de la mar de leva, así como su propagación y amorti-

guamiento en tiempo y espacio. Esto es importante, puesto que si un huracán se mueve alejado de la costa, podría provocar inundaciones por la combinación de mar de viento con mar de fondo e, incluso, con predominio de este último.

Para la inclusión del relieve submarino y la configuración costera en WW3, se utilizó la matriz de batimetría y topografía procedente del General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) Digital Atlas (GEBCO, 2003), donde la resolución es de 0,5 min (900 km). En las salidas gráficas se muestran los elementos de ola significativa (altura, período, longitud de onda), acompañados de las características del viento.

El modelo WW3 está programado en Fortran-90 sobre sistema Linux. Los experimentos se realizaron en una computadora personal con doble procesador, 2.50 GB de RAM y 90 GB de memoria en disco duro. Todos los programas de ambientación, pre y posprocesamiento de datos, han sido elaborados íntegramente por los especialistas del Centro de Física de la Atmósfera del Instituto de Meteorología (CFA/INSMET). Con el fin de conservar la estabilidad en las corridas de WW3 y, a un tiempo, que tuviesen una duración razonable que posibilitara su uso operativo con medios de cómputo económicos, para el dominio de trabajo de WW3, se realizaron varios intentos de corrida con diferentes resoluciones espaciales de 10 km, 15 km, 20 km y 25 km. Tomando en cuenta la estabilidad matemática y la rapidez de la corrida, acorde con los recursos computacionales disponibles, se decidió utilizar el paso espacial de 25 km, en una malla de 102 puntos x 102 puntos, con pasos temporales de 900 s, para la propagación e integración de las ecuaciones del modelo; y de 3 600 s, para la propagación intraespectral. Las matrices de datos de viento y de batimetría, procedentes de WRF con paso de 10 km y de GEBCO (2003), respectivamente, se llevaron a la resolución de 25 km, con actualización

de las fronteras de WW3 cada tres horas (10 800 s). Las salidas de los elementos de ola se muestran cada una hora. Una corrida de WW3 para un plazo de 24 horas demora entre 8 min y 10 min; de manera que un plazo de hasta cinco días puede demorar 50 min, muy adecuado para el trabajo operativo.

Para la efectividad de los pronósticos de oleaje es necesario garantizar que desde el campo de viento se introduzcan los menores errores posibles; asimismo, resulta de importancia particular la correcta localización de las áreas de generación a partir del análisis de los patrones de circulación. En el caso de los huracanes, los momentos de cambios en intensidad pueden introducir variaciones importantes en las características del oleaje. Si bien es cierto que los modelos de circulación atmosférica a escala regional no reflejan los valores extremos de los elementos meteorológicos que caracterizan la región central de un ciclón tropical (como son la presión mínima y el viento máximo sostenido en 1 min), también es preciso tener en cuenta que este no es el relacionado con la generación del oleaje, sino el viento promedio de varias horas de permanencia (en dirección y velocidad) que, a la vez, está influido por las fluctuaciones de la intensidad del sistema.

Para valorar el campo de viento en el presente trabajo, se tomó en cuenta lo siguiente:

1. Localización de la trayectoria de los huracanes estudiados, analizando los campos de viento y la función de corriente en las salidas de WRF, en la resolución utilizada para el pronóstico de oleaje (paso espacial de 25 km), en comparación con la información de los reportes publicados por el National Hurricane Center (NHC), disponibles en su sitio web.
2. Análisis de los patrones de circulación pronosticados por WRF, mediante la comparación con los reanálisis de campo de viento y presión, disponibles en el sitio web NOMAD3 (2010).

Tanto las salidas WRF_WW3, como las de reanálisis disponibles en la web NOMAD3 (2010) de la NOAA, son productos procesados en sistema GrADS, donde los reanálisis se construyeron de forma interactiva con las mismas características de las salidas de los modelos, referidas, entre otras, a las dimensiones, la regularidad de las mallas, las fronteras, la proyección cartográfica (en este caso, Lambert) y el tipo de variable.

No fue posible evaluar los pronósticos de los elementos de ola, al no existir sus registros instrumentales en la región de estudio. No obstante, se pueden aprovechar las experiencias de otros trabajos y, de conjunto con la validación del campo de viento, más la localización de las áreas de generación del oleaje al paso de los ciclones tropicales, puede brindarse al usuario, al menos, una visión aproximada del estado de la superficie marina en el área de interés.

Resultados y discusión

La temporada ciclónica de 2006 fue muy activa en el área nororiental del Océano Pacífico; según datos de archivo del NHC (2010), en la zona se registraron 18 tormentas tropicales, de las cuales diez alcanzaron la categoría de huracán. Entre estos, se incluyen los huracanes John, Lane y Paul, que penetraron en tierra mexicana y causaron daños notables a la población. Para cada uno de estos, se realizó la predicción del oleaje, mediante la combinación de modelos WRF-WW3, con plazos de hasta 120 horas y 96 horas, respectivamente. A continuación, se analizará la calidad de las salidas, con la inclusión de los momentos de intensificación y debilitamiento de los huracanes tomados como casos de estudio.

John

Según datos de archivo del NHC (Pasch, 2006), este huracán se formó (el 28/08/2006) en aguas cercanas a la República de México, a partir de una onda tropical procedente de la costa occidental de África. En toda

su evolución posterior, realizó una trayectoria casi paralela a las costas mexicanas e hizo su entrada en tierra por el sur de Baja California (el 02/09) y, prácticamente, mantuvo el mismo rumbo hasta su total disipación (el 04/09). Esta trayectoria favoreció que las fuertes marejadas generadas al paso del huracán afectaran las costas mexicanas. El 29/08 alcanzó la categoría de huracán, con una rápida profundización y el 30/09, a las 1800 UTC, adquirió su máxima intensidad, con categoría 4. Con posterioridad, se debilitó, pero, al moverse sobre aguas muy cálidas, cobró intensidad hasta la categoría 3 (el día 01/09); al día siguiente (02/09), ligeramente debilitado, tocó tierra en la península de Baja California y continuó moviéndose sobre este territorio hasta su disipación, el día 04/09.

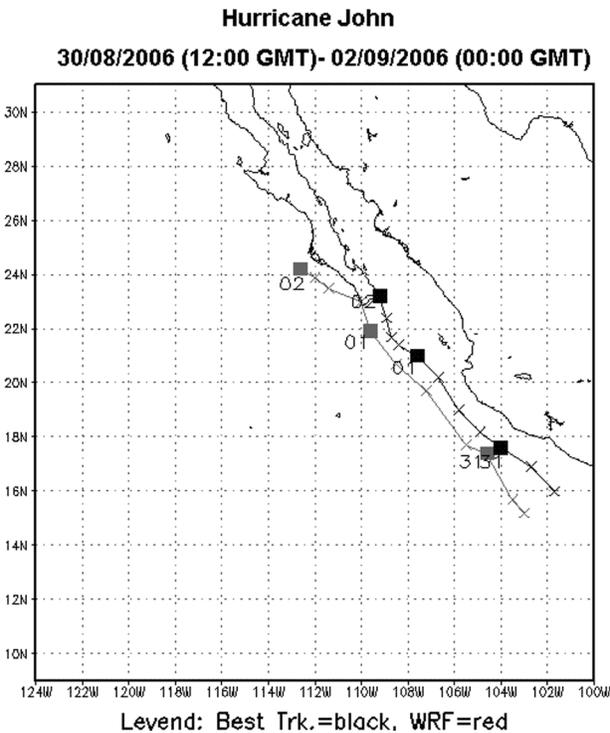


Fig. 2 Trayectorias real (negro) y pronosticada con WRF (rojo) del huracán John.

El huracán John entra en el dominio de trabajo poco antes de las 72 horas de corrida de WRF. La figura 2 muestra las trayectorias pronosticada por WRF y la *best track*, dada por NHC (Pasch, 2006);

entretanto, la Tabla 1 recoge los errores (en km) de la trayectoria pronosticada con WRF, en comparación con la *best track* y los resultados de NHC, según el reporte de Pasch (2006). Obsérvese que los pronósticos se corresponden muy bien con los resultados de NHC.

Tabla 1

Errores (en km) de los pronósticos de trayectoria del huracán John, en comparación con NHC

	72 horas	96 horas	120 horas
WRF	70.20	243.44	393.39
NHC	145.0	242.0	334.0
NHC promedio (2001-2005)	268.54	355.584	427.812

Para mostrar la correspondencia entre los patrones de los campos de viento que fueron salida de WRF y entrada en WW3 con los campos en tiempo real, se muestran las salidas gráficas de WRF y las de los reanálisis para el viento y la presión, tomadas del sitio web (NOMAD3, 2010), en dos momentos de intensificación del huracán John (Fig. 3a-d).

En el dominio de trabajo están presentes dos ciclones tropicales: John y Kristy. Se observa que los patrones de circulación de los vórtices ciclónicos presentes en el área, en general, muestran la misma orientación y los valores del campo de viento medio; fuera de la zona de vientos máximos, también exhiben gran coincidencia. Dentro del área de viento máximo de ambos sistemas, el modelo muestra más información que los reanálisis porque la resolución también es mayor.

En las figuras 4a-d y 5a-d se aprecian las salidas del campo de viento de WRF sobre los rangos de altura de ola significativa, para los plazos de pronóstico de 66 horas, 72 horas, 81 horas y 84 horas; y 96 horas, 102 horas, 108 horas y 120 horas. Tomando en cuenta que el oleaje es generado por el viento con permanencia de varias horas, puede asumirse que se obtienen valores razonables para la altura de ola y, de este modo, la mayor confiabilidad se aprecia, precisamente, en el área del huracán, cuando este se encuentra por completo

dentro del dominio. Aunque los vientos de mayor intensidad, en realidad, se hayan registrado el día 30, a las 1800 UTC (Pasch, 2006), no le corresponde a este momento el máximo de oleaje dentro del dominio de WRF/WW3, sino que se conservó con alturas menores de 3 m y esto es atribuible a que la circulación aún no estaba por completo dentro del dominio (Fig. 4a).

A medida que el huracán ganó en latitud, su campo de viento fue combinándose con la circulación correspondiente al huracán Kristy, localizada entre los 15-16°N con 115-116°W, aproximadamente; de manera que los fuertes vientos de región sur ocuparon una zona amplia y alargada, que condujo al aumento del fetch con permanencia de más de doce horas con la misma orientación. Esta situación favoreció el desarrollo del oleaje hasta 4 m de altura en el área de vientos máximos del huracán, a partir del día 31, entre las

0900 y las 1200 UTC (Fig. 4b-d), en aguas aledañas a las costas mexicanas.

El área de generación de oleaje del orden de 4 m alcanzó su máxima dimensión el día 01/09, a las 0600 UTC (Fig. 5b), poco antes de que John penetrara en tierra, según el pronóstico de WRF, que muestra un adelanto de al menos unas 10 horas con respecto a la *best track*; lo mismo ocurre con el área de oleaje peligroso. El área de fuerte oleaje se dividió por ambas costas de la península de Baja California y, dadas las condiciones de *fetch*, de ser mucho más corto hacia el Golfo de California, se conservó por más tiempo en la costa exterior sobre los remanentes de las circulaciones de ambos huracanes (Fig. 5c-d).

Lane

Según Knabb (2006), Lane se formó como una de-

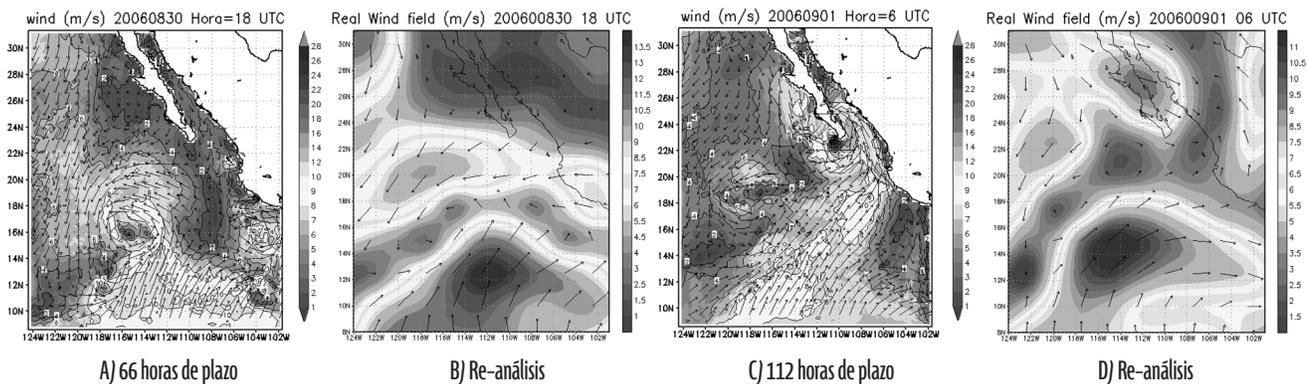


Figura 3 Salidas de campo de viento de WRF (A y C) y reanálisis NOAA (B y D) al paso del huracán “John” por el dominio del trabajo en dos momentos de intensificación

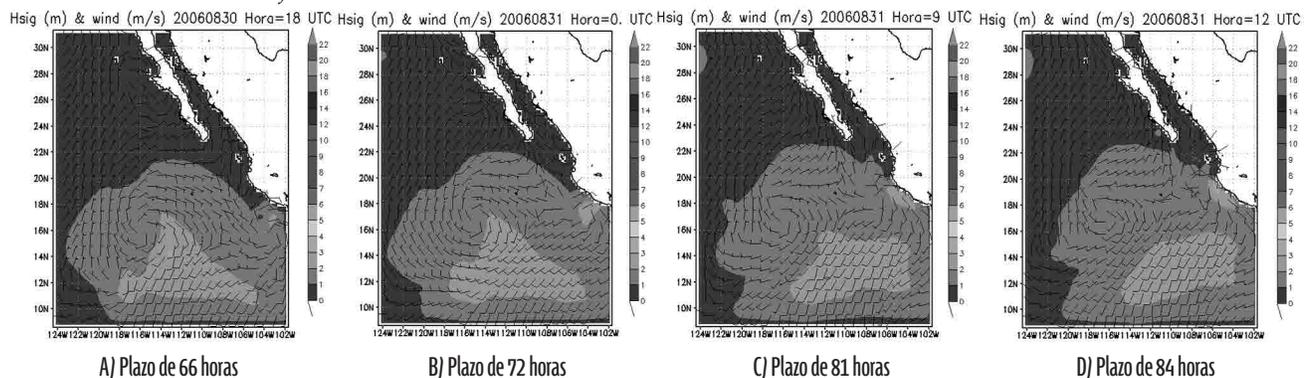


Figura 4 Campo de viento y altura significativa de las olas, pronosticados con WRF-WW3, al paso del huracán “John” por aguas aledañas a la República de México, del 30/08 a las 18 UTC al 31/08 a las 12 UTC del 2006, con la presencia del huracán “Kristy” en océano abierto.

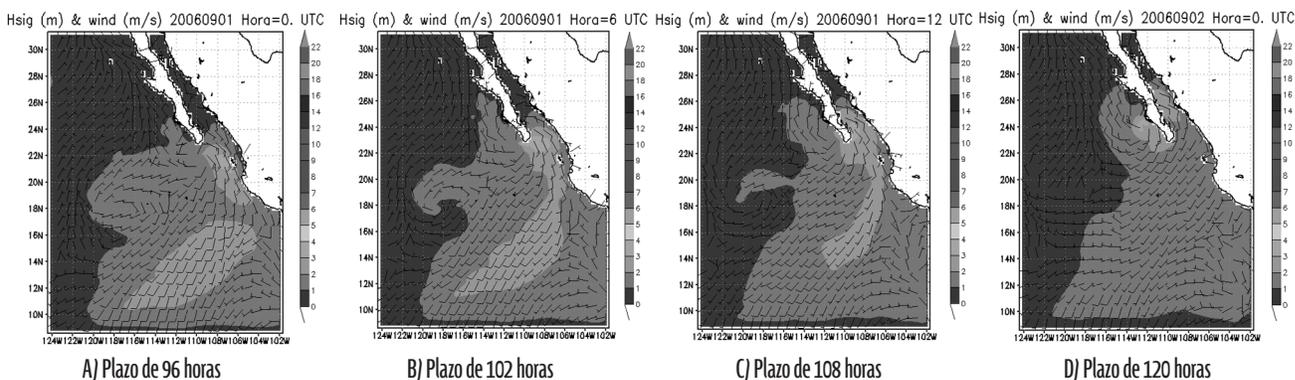


Figura 5 Campo de viento y altura significativa de las olas, pronosticados con WRF-WW3, al paso del huracán “John” por aguas aledañas a la República de México, del 01/09 a las 00 UTC al 02/09 a las 00 UTC del 2006, con la presencia del huracán “Kristy” en océano abierto.

presión tropical (el 13/09) a las 18 UTC, como resultado de una onda tropical procedente del continente africano. Las aguas cálidas y la débil cizalladura del viento favorecieron su formación como una tormenta tropical (el 14/09), en las cercanías de Acapulco. A partir del día 15/09, a las 12 UTC, se convierte en huracán y alcanza su máxima intensidad como categoría 3 (el 16/09, a las 12 UTC). Hizo un movimiento bastante paralelo a la costa mexicana, hasta casi lle-

gar a la boca del Golfo de California, donde realizó un giro y penetró en tierra (el 16/09, a las 19:15 UTC) con poco cambio en su estructura; luego se degrada hasta disiparse al final del día 17/09.

En este caso de estudio, el huracán penetra en el dominio de trabajo antes de las doce horas de corrida de WRF y sale poco después de las 72 horas. La figura 6 popone la comparación entre el pronóstico realizado con WRF y la *best track* del NHC publicada por Knabb (2006). En lo que a trayectoria se refiere, se observa una buena correspondencia hasta el día 16, en las 48 horas de plazo; en cambio, no sucede lo mismo con la velocidad, donde el modelo se adelanta.

En la Tabla 2 se muestran los errores (en *km*) de la trayectoria pronosticada con WRF, en comparación con la *best track*, con la inclusión del pronóstico oficial de NHC. Aunque, en general, la calidad de los pronósticos no es alta en los primeros plazos –mejora bastante en los plazos intermedios y después de las 36 horas– supera los resultados de NHC.

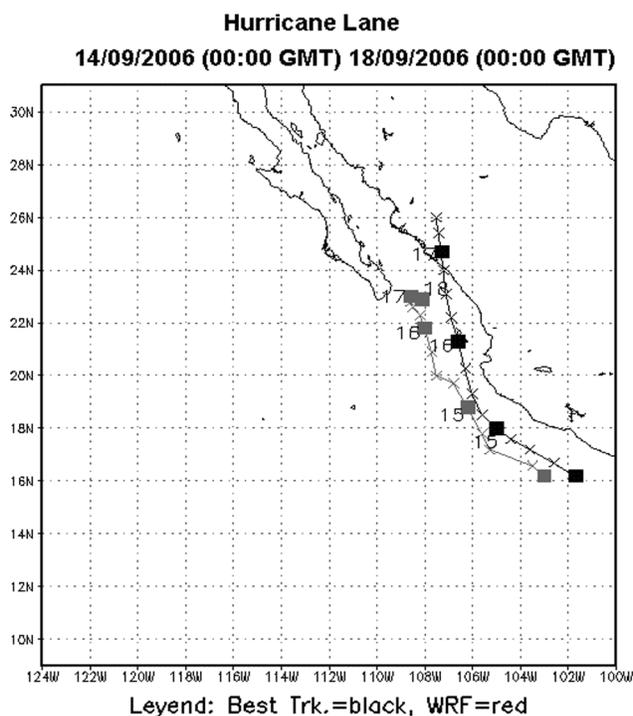


Figura 6 Trayectorias real (negro) y pronosticada con WRF (rojo) del huracán “Lane”.

Tabla 2 Errores (en *km*) de los pronósticos de trayectoria del huracán Lane, en comparación con NHC

	12 horas	24 horas	36 horas	48 horas	72 horas
WRF	188.7	160.09	183.74	165.01	237.55
NHC	35.188	74.08	161.124	253.724	481.52

NHC promedio (2001-2005)	64.82	111.12	153.716	190.756	268.54
--------------------------	-------	--------	---------	---------	--------

Las figuras 7 a-d muestran las salidas gráficas de WRF y los reanálisis en tiempo real para dos momentos de intensificación de Lane. Es posible apreciar la concordancia entre los campos pronosticados y de tiempo real; se observa la presencia de dos ciclones tropicales (Lane y Miriam), con la combinación de los campos de viento de ambos sistemas.

Las figuras 8a-d y 9a-d representan la evolución del campo de olas generado por el huracán Lane. Este penetra en el dominio de trabajo (el 14/09, a las 0600 UTC), con un oleaje de hasta 2 m en el área de vientos máximos, que ya ocupa un espacio apreciable a las 1200 UTC (Fig. 8a). En estos momentos, aún es una tormenta tropical, pero, al irse intensificando, el

área generadora de oleaje fuerte va extendiéndose y al combinarse el campo de viento del huracán con la circulación de baja que se observa en el dominio —la cual, más tarde, fue la tormenta tropical Miriam—, el *fetch* se prolonga para los vientos de región sur. El 15/09, a las 18 UTC (Fig. 8b), Lane era ya un huracán, con una altura de ola en el área de vientos máximos de hasta 5 m; y el día 16/09, a las 00 UTC (Fig. 8d), aparece un núcleo de olas de 6 m.

El modelo muestra el oleaje muy fuerte el día 16/09, a las 1800 UTC (Fig. 9a), seis horas después del momento en que Lane debió alcanzar la máxima intensidad, con categoría 3, seguido de un ligero debilitamiento, pero el campo de viento no se ha degradado ni en velocidad ni en *fetch* y, por tal motivo, el oleaje sigue desarrollándose hasta llegar a alturas de 7 m, a

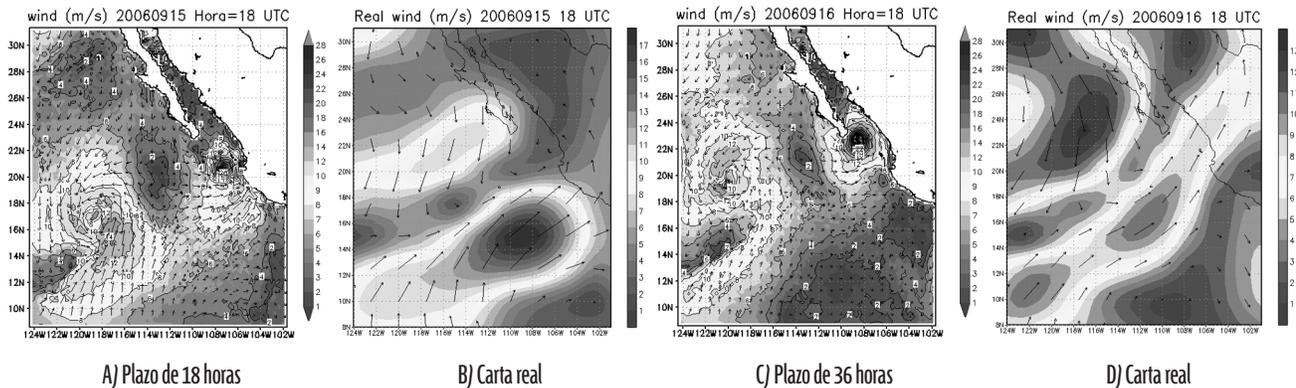


Figura 7 Salidas de campo de viento de WRF (A y C) y re-análisis NOAA (B y D) al paso del huracán “Lane” por el dominio del trabajo en dos momentos de intensificación

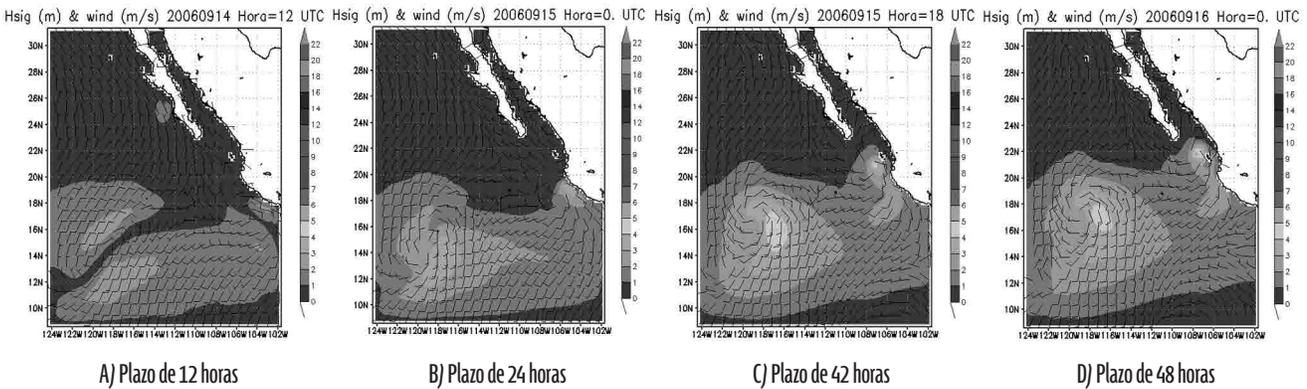


Figura 8 Campo de viento y altura significativa de las olas, pronosticados con WRF-WW3, al paso del huracán “Lane” por aguas aledañas a la República de México, del 14/09 a las 12 UTC al 16/09 a las 00 UTC, del 2006, con la presencia de la tormenta tropical “Miriam” en el océano abierto.

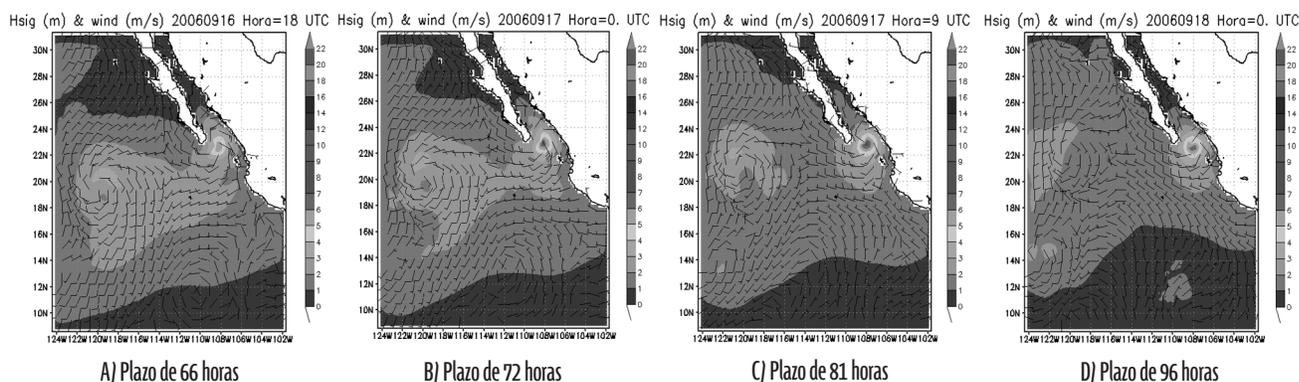


Figura 9 Campo de viento y altura significativa de las olas, pronosticados con WRF-WW3, al paso del huracán “Lane” por aguas aledañas a la República de México, del 16/09 a las 18 UTC al 18/09 a las 00 UTC, del 2006, con la presencia de la tormenta tropical “Miriam” en océano abierto.

las 2100 UTC. Esta es la forma lógica en que debe evolucionar el oleaje en presencia de vientos huracanados con gran permanencia en dirección y velocidad, solo que, en realidad, en este momento el huracán Lane ya estaba en tierra. En el campo de viento de WRF aún se observa el huracán sobre el mar durante el día 17/09 (Fig. 9c), bien organizado y con olas de hasta 8 m; continúa el oleaje fuerte y desarrollado hasta el día 18/09, a las 0000 UTC, porque, según el campo de viento de WRF, no penetra en tierra (Fig. 9d).

La interacción entre Miriam y Lane influyó en la formación del oleaje fuerte que se generó en las costas mexicanas. En esta ocasión, la interacción fue más fuerte que entre Kristy y John, porque Miriam y Lane estaban a menor distancia entre sí. Como dificultad, se presenta la poca habilidad de WRF para pronosticar el giro de Lane hacia el noreste y su momento de penetración en tierra.

Paul

El huracán Paul se localiza dentro del dominio de trabajo desde el momento inicial del pronóstico de campo de viento de WRF, con carta base del 22/10, a las 0000 UTC. La figura 10 indica las trayectorias pronosticada por WRF y la *best track* publicada en el sitio web de NHC (Rhome and Berg, 2006). Se observa una buena correspondencia hasta poco más de 24 horas; después, se alejan bastante una de otra. Se ori-

ginó, al igual que en los dos organismos anteriores, a partir de una onda tropical procedente de las costas africanas (Rhome and Berg, 2006) que cruzó el territorio de América Central. El día 20/10 aparece el área de bajas presiones y el 20/10, a las 1900 UTC, se forma como depresión tropical en las cercanías de Manzanillo, México. Rápidamente, se profundiza y alcanza la etapa de tormenta tropical en las próximas 6 horas;

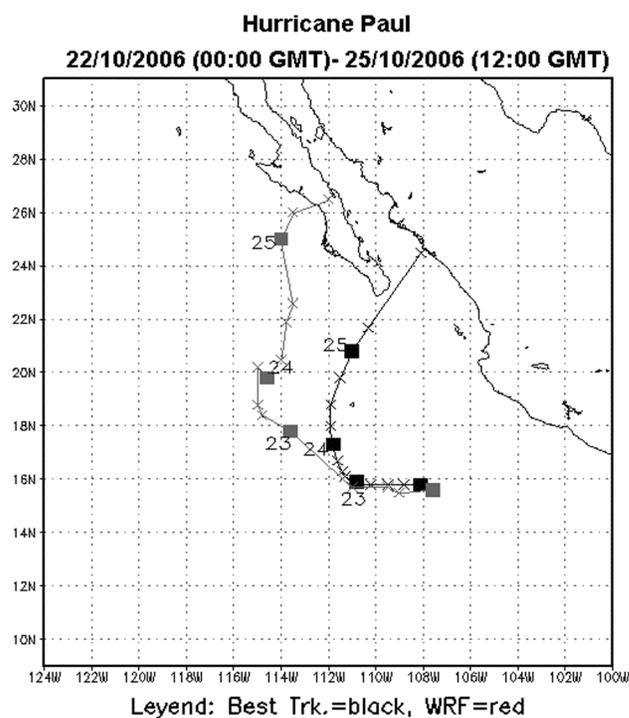


Figura 10 Trayectorias real (negro) y pronosticada con WRF (rojo) del huracán “Paul”.

sin embargo, su desarrollo en las siguientes 24 horas es de proporciones modestas, hasta que las condiciones sinópticas favorecen su profundización entre las 1800 UTC del día 22/10 y las 1200 UTC del 23/10. En estas 18 horas alcanza su intensidad máxima, hasta la categoría 2. En el entorno de las 1200 UTC del 23/10 comienza un giro hacia el norte y pierde intensidad; a partir del 24/10, alrededor de las 1200 UTC, se degrada a tormenta tropical y, orientándose hacia el noreste, alcanza el sur de la península de Baja California (el 25/10, a las 1200 UTC). Con debilitamiento lento, continúa hacia el continente y penetra en tierra, ya degradado a depresión tropical, en el entorno de las 0400 UTC del día 26/10; pocas horas después, se disipa.

La Tabla 3 muestra los errores (en km) de la trayectoria pronosticada con WRF, en comparación con la *best track* y los resultados de NHC, según aparece en el reporte de Rhome and Berg, 2006. Se aprecia que solo en el plazo corto arrojó resultados satisfactorios.

Tabla 3
Errores (en km) de los pronósticos de trayectoria para el huracán Paul, en comparación con NHC

	12 horas	24 horas	36 horas	48 horas	72 horas
WRF	11.1	375.6	486.5	416.66	572.91
NHC	70.376	131.492	177.792	266.688	372.252
NHC promedio (2001-2005)	64.82	111.12	153.716	190.756	268.54

Las figuras 11a–b muestran los momentos de máxima intensidad y de degradación del huracán, para los plazos de 18 horas y 36 horas, donde, a pesar de observarse un incremento del error en la trayectoria, se reflejan muy bien los cambios de intensidad.

Las figuras 12a–f y 13a–d exponen los aspectos generales del campo de oleaje, acordes con la evolución de Paul. En el plazo de 12 horas de pronóstico (el día 22/10, a las 1200 UTC) (Fig. 12a), todavía es tormenta tropical y el oleaje presenta alturas de hasta 2 m en su área de vientos máximos. A las 1800 UTC del mismo día, cuando comienza su etapa de mayor intensidad, y poco antes de que realice el giro hacia el norte, el oleaje se incrementa hasta 3 m y continúa creciendo entretanto Paul se intensifica, de manera que entre las 1200 y las 1800 UTC (del 23/10), aparece un área de oleaje de hasta 4 m de altura; en el modelo, se aprecia esta área al oeste de la península de Baja California (Fig. 12b) porque el huracán se ha movido más al norte que en el tiempo real y no ha cambiado el rumbo de su trayectoria. Sin embargo, la pérdida de intensidad del sistema se observa en el horario que indica el reporte de NHC y el oleaje se amortigua hasta desaparecer el núcleo de 4 m, cuando Paul pierde intensidad (Fig. 12d).

Se degrada a tormenta tropical en el entorno de las 1200 UTC del día 24/10 (Fig. 13a). En los plazos sucesivos, a medida que Paul pierde intensidad, la altura

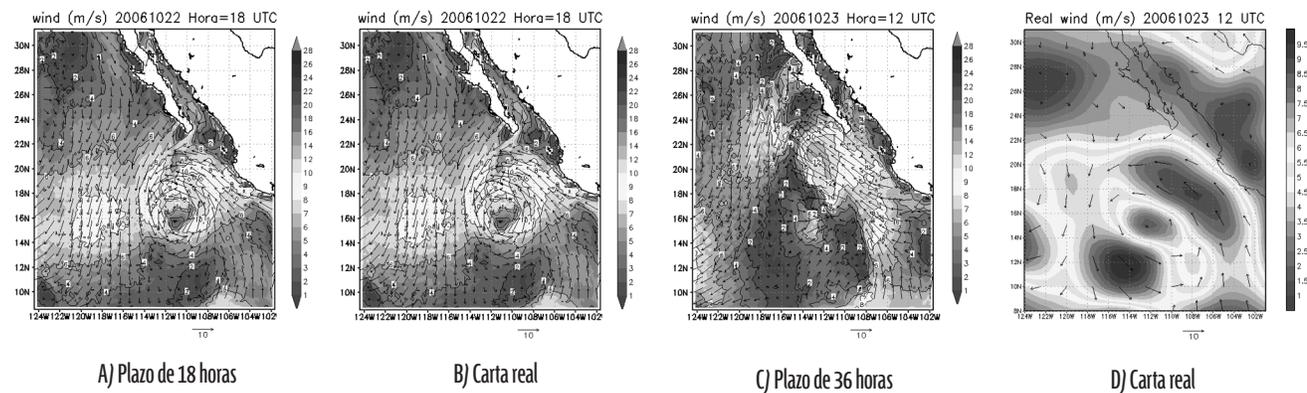


Fig. 11 Salidas de campo de viento de WRF (A y C) y reanálisis NOAA (B y D) al paso del huracán “Paul” en un momento de intensificación y otro de degradación.

de ola también disminuye hasta 2 m y este estado de la superficie marina se conserva en las cercanías de las costas de Baja California, por donde el pronóstico de WRF indica que Paul entraría en tierra, hasta el último plazo de pronóstico (Fig. 13b-d).

De lo antes referido, se aprecia que al paso de Paul por el dominio de trabajo, el pronóstico del oleaje por vientos huracanados es confiable en lo referente a la localización del área de generación para menos de 24 horas de plazo; con respecto a la evolución de la altura de ola, hasta este plazo, puede considerarse satisfactoria, puesto que los momentos de intensificación y debilitamiento del sistema, en general, coincidieron con lo descrito por el reporte NHC (Rhome and Berg, 2006) para tiempo real.

En el manual de WW3, los autores afirman que los errores relativos del cálculo de los elementos de ola significativa no sobrepasan 20 % (Tolman y Chalikov,

2006). Recientemente, algunos autores del presente trabajo participaron en la aplicación de WW3 para el pronóstico de oleaje al paso de los huracanes Iván y Paloma por los mares interamericanos, con salidas de viento del modelo a mesoescala MM5V3 (Mitrani *et al.* 2009). Esta experiencia confirmó que cuando los pronósticos de campo de viento y de trayectoria del huracán son de buena calidad, para alturas de ola menores de 12 m, el error relativo se mantiene menor o igual que 20 %, pero para olas de mayores dimensiones, el error puede ser ligeramente mayor (Mitrani *et al.*, 2009).

De la propia investigación, se aprecia que la representación de la trayectoria de los huracanes es satisfactoria en plazos de más de 36 horas en los casos de Lane y John; no así en el caso de Paul, donde solo fue de buena calidad en plazos menores a 24 horas. Se muestra la poca habilidad del modelo en presencia de recur-

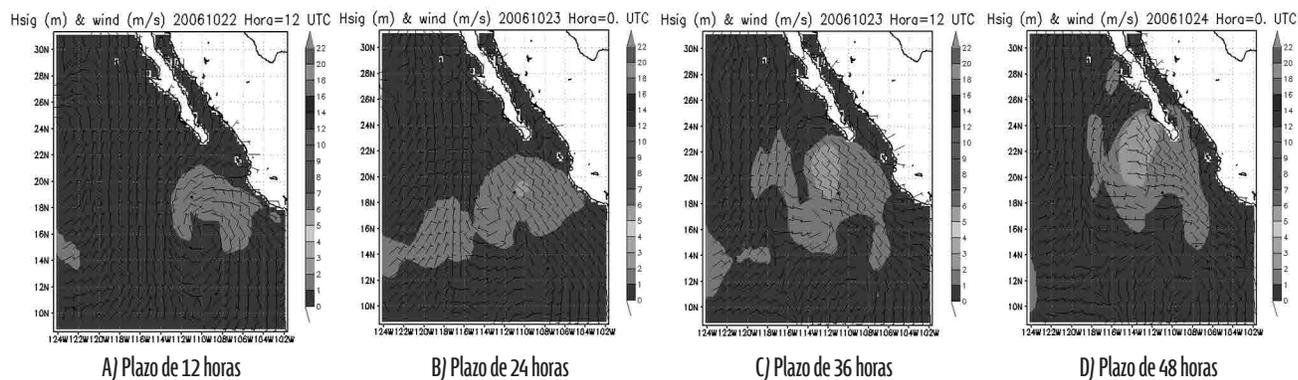


Figura 12 Campo de viento y altura significativa de las olas , pronosticados con WRF-WW3, al paso del huracán “Paul” por aguas aledañas a la República de México, del 22/10 a las 12 UTC al 24/10 a las 00 UTC, del 2006.

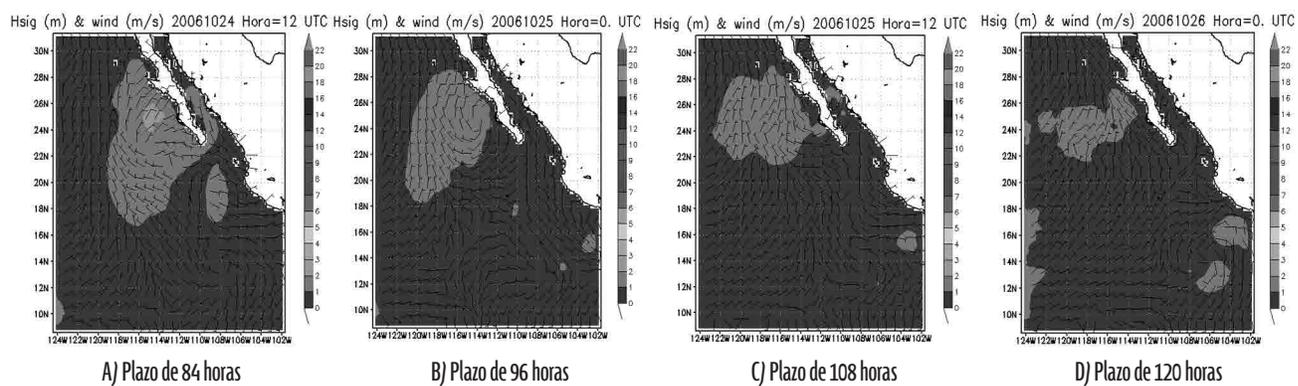


Figura 13 Campo de viento y altura significativa de las olas , pronosticados con WRF-WW3, al paso del huracán “Paul” por aguas aledañas a la República de México, del 24/10 a las 12 UTC al 26/10 a las 00 UTC, en la temporada ciclónica del 2006.

va, tanto en el caso de Paul (en los plazos menores de 24 horas), como en el de Lane, donde la recurva y la penetración en tierra debió reflejarse en las 72 horas de plazo. Asimismo, debe tenerse en cuenta la escasez de datos meteorológicos en esta zona del planeta, lo cual estropea la calidad de los pronósticos numéricos.

Dadas las inexactitudes en los pronósticos de trayectoria, las áreas de generación del oleaje por vientos huracanados no siempre están bien localizadas. Sin embargo, las alturas de ola siempre fueron menores de 6 m, acordes con las características del campo de viento en todo el dominio de trabajo, donde se reflejan correctamente el viento promedio y los patrones de circulación sinóptica, con diversos momentos de intensificación y debilitamiento de los huracanes.

Conclusiones y recomendaciones

El dominio utilizado sobre el Pacífico oriental para la predicción del oleaje al paso de ciclones tropicales, mediante el uso de WRF + WW3, es adecuado para sistemas que se encuentren totalmente dentro del área, puesto que las condiciones de *fetch*, en tal caso, son determinadas por la propia circulación del sistema.

Para los recursos computacionales utilizados en el presente trabajo, la proporción entre el paso temporal de 900 s y el espacial de 25 000 m, garantizan la estabilidad en la integración de las ecuaciones del modelo WW3 para varios días de pronóstico, al tener en cuenta la posible existencia de ondas con longitudes de más de 100 m y períodos de más de 10 s en el área de vientos máximos de los huracanes, lo cual implica que la velocidad de grupo C_g puede ser bastante mayor de 10 m/s. Con las resoluciones utilizadas, el criterio de estabilidad se conserva menor que la unidad.

Las salidas de campo de viento de WRF en presencia de los huracanes estudiados, en general, muestran resultados satisfactorios en la representación de

trayectorias de huracanes sin recurvas. En presencia de giros, el modelo WRF mostró poca habilidad, lo cual se aprecia en la representación de las trayectorias de los huracanes Lane y Paul. Esto influye de forma negativa en la calidad de la localización del área de generación del oleaje por vientos huracanados. Sin embargo, estuvieron bien representados varios momentos de cambio de intensidad, lo cual se reflejó en la evolución del oleaje.

En los casos de John y Lane, se aprecia una prolongación del *fetch* en los vientos de región sur, por la interacción con otros ciclones tropicales (Kristy y Miriam, respectivamente), donde la influencia de Miriam es más notable, al localizarse más cerca de su asociado Lane. Se recomienda que esta peculiaridad sea tomada en cuenta en los pronósticos marinos y del tiempo para esta área del océano, velando porque el dominio sea lo suficientemente amplio para que pueda apreciarse la interacción de los vórtices.

No fue posible evaluar de forma cuantitativa los pronósticos de campo de viento y los elementos de ola, obtenidos con WRF-WW3, dada la ausencia de registros instrumentales en la región. Por experiencia de trabajos anteriores, es conocido que el error relativo de WW3 en el cálculo de la altura de ola significativa no sobrepasa 20 %, mientras que el de WRF en la predicción del viento medio, según bibliografía consultada, está en ese orden. Por otra parte, las trayectorias de los tres huracanes estudiados están representadas de forma satisfactoria en algunos plazos. A partir de estos criterios, es posible asumir que las predicciones de oleaje, realizadas con la combinación WRF-WW3 al paso de huracanes en el Pacífico oriental, fueron satisfactorias para diversos plazos de pronóstico.

Se recomienda continuar este tipo de experimento para otros huracanes, con la finalidad de apreciar mejor las ventajas y limitaciones de los modelos WRF+WW3.

Bibliografía

- BINIMELIS DE RAGA G. (2009): “Tropical cyclones: current characteristics and potential changes under a warmer climate” IAI/CRN-II-048, Third Annual Report, 18 pp., Consultado el 10 de julio de 2010, Disponible en: http://cabernet.atmosfcu.unam.mx/IAI/files/Third_Annual_Report_CRNII-048.pdf.
- GEBCO (2003): Digital Bathymetry Atlas, Published by the British Oceanographic Data Centre, under the joint auspices of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographical Organization, with founding provided by the Environment Research Council (digital support).
- KNABB R. D. (2006): Tropical Cyclone Report. “Hurricane Lane, 13-17 September 2006, National Hurricane Center, Consultado el 5 de marzo de 2010, Disponible en: <http://www.nhc.noaa.gov>.
- MITRANI I., I.BORRAJERO, Y. ALONSO, A. BEZANILLA, D. MARTÍNEZ (2009): “Asimilación de modelos a mesoescala, combinados para la predicción de la circulación atmosférica y el oleaje, en territorio cubano y mares adyacentes”, Informe Final de Resultado Científico, Instituto de Meteorología, La Habana, 34 pp.
- NHC (2011): NHC Archive of Hurricane Seasons, National Hurricane Center, Consultado el 1ro. de junio de 2011, Disponible en: <http://www.nhc.noaa.gov>.
- NOMAD3 (2010): NOAA’s Operational Model Archive Distribution System 3, National Oceanic Atmospheric Administration/U.S. Commerce Department, Consultado el 6 de marzo del 2010, Disponible en: (<http://nomad3.ncep.noaa.gov>).
- PASCH R. J. (2006): Tropical Cyclone Report. “Hurricane John, 28 Aug.-4 Sep. 2006, National Hurricane Center, Consultado el 5 de marzo de 2010, Disponible en: <http://www.nhc.noaa.gov>.
- RHOME J. R., R.J. BERG (2006): Tropical Cyclone Report. “Hurricane Paul, 21-26 Oct. 2006, National Hurricane Center, Consultado el 5 de marzo de 2010, Disponible en: <http://www.nhc.noaa.gov>.
- TITOV L. F. (1973): “Wind driven waves” (translated from Russian), Binding Wiener Ltd., Jerusalem, 244 pp.
- TOLMAN, H. L., (2002): User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22. NOAA / NWS / NCEP / OMB technical note _____ (2004): “WAVEWATCH; Model Description”, National Ocean Atmosphere Administration, web site: polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch.
- _____ (2006): “WAVEWATCH III”; Model Description”, web site: polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch.
- TOLMAN, H. L., AND D. V. CHALIKOV (1994): Development of a third-generation ocean wave model at NOAA-NMC. Proc. Waves-Physical and numerical modelling, M. Isaacson and M.C. Quick Eds., Vancouver, pp.: 724-733.
- TOLMAN, H. L., AND D. V. CHALIKOV (1996): “Source terms in a third-generation wind-wave model”, *J. Phys. Oceanography*, 26, pp. 2497-2518.
- WRF USER’S GUIDE (2011): Weather Research and Forecast Modeling System- User’s Guide, National Centers Atmospheric Research (NCAR)-WRF Development Team, Consultado el 7 de enero de 2011, <http://www.wrf.com>.
- WW3 (2010) Wave Watch III User’s Guide, National Centers Atmospheric Research (NCAR):WW3 Development Team, Consultado el 10 de marzo de 2010, <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch-/wavewatch.html>.

Agradecimientos

A la *National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA)*, por facilitar el acceso a los datos del modelo global GFS, a los archivos de reanálisis de las páginas NOMADS y del National Hurricane Center, así como a los códigos de los modelos numéricos WRF y WW3.