

Comparación entre los núcleos dinámicos ARW y NMM del modelo WRF para simulaciones de ciclones tropicales que afectaron el territorio de Cuba.

Autores:

Dayana Fernández Domínguez⁽¹⁾

Adrián Luis Ferrer Hernández⁽²⁾

Oscar O. Díaz Rodríguez⁽²⁾

⁽¹⁾ Facultad de Medio Ambiente, Instituto de Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Cuba, dayanafd@instec.cu

⁽²⁾ Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, Cuba, {adrian.ferrer, oscar.diaz}@insmet.cu

Resumen:

En este trabajo se analizan los resultados obtenidos en la comparación de las simulaciones realizadas con los núcleos ARW y NMM del modelo WRF, para los ciclones tropicales del Atlántico: Charley e Iván (2004), Dennis y Wilma (2005), Gustav, Ike y Paloma (2008), Sandy (2012), Matthew (2016) e Irma (2017). Hasta el presente, en Cuba no se cuentan con suficientes investigaciones y experiencias en el trabajo operativo con el núcleo dinámico NMM, trabajándose solamente con el núcleo ARW. Por tal razón, resulta de interés estudiar la habilidad del núcleo NMM para representar la evolución de los procesos físicos que tienen lugar en la atmósfera, específicamente sobre la región de Cuba y en este caso haciendo mayor énfasis en casos con presencia de ciclones tropicales, ya que estos son los eventos extremos que más afectan al archipiélago de Cuba. En el trabajo se realiza una evaluación del pronóstico de trayectoria e intensidad de estos sistemas tropicales, donde se profundiza en el error de trayectoria, de presión mínima y velocidad máxima del viento. Para esto se aplicó una herramienta de seguimiento del vórtice donde se extrajo toda esta información y fue comparada con los datos reales del BestTrack del NHC. Además, se realiza una verificación de los acumulados de precipitación haciendo uso del producto multisatélite TRMM-3B42.

Palabras claves: WRF, ARW, NMM, Ciclones Tropicales.

Abstract:

This paper analyzes the results obtained in the comparison of the simulations carried out with the ARW and NMM cores of the WRF model, for the Atlantic tropical cyclones: Charley and Iván (2004), Dennis and Wilma (2005), Gustav, Ike and Paloma (2008), Sandy (2012), Matthew (2016) and Irma (2017). Up to now, in Cuba there is not enough research and experience in operational work with the NMM dynamic core, working only with the ARW core. For this reason, it is interesting to study the ability of the NMM core to represent the evolution of the physical processes that take place in the atmosphere, specifically on the region of Cuba and in this case placing greater emphasis on cases with the presence of tropical cyclones, that these are the extreme events that most affect the Island of Cuba. In the work an evaluation of the trajectory and intensity forecast of these tropical systems is carried out, where the trajectory error, minimum pressure and maximum wind speed is deepened. For this, a vortex tracking tool was applied to extract all this information and compared with real data of the NHC BestTrack. In addition, a verification of precipitation accumulations using the multisatellite product TRMM-3B42 is carried out.

Keywords: WRF, ARW, NMM, Tropical Cyclones.

Introducción

Los ciclones tropicales son los sistemas atmosféricos tropicales más peligrosos que pueden afectarnos a través de fenómenos que se presentan en el interior de estos, tales como vientos intensos, marejada ciclónica, olas impulsadas por el viento, lluvias fuertes e inundaciones, tornados y rayos, entre otros. A pesar de que en

los últimos años se ha mejorado mucho los pronósticos de trayectorias obtenidos a partir de los modelos numéricos, aún no son suficientes los resultados alcanzados en el pronóstico de los cambios de intensidad.

En la actualidad, las predicciones meteorológicas de este tipo de fenómenos son imprescindibles, puesto que permiten tomar importantes medidas para salvaguardar vidas humanas y materiales con suficiente tiempo de antelación. Para esto, se utilizan distintos modelos numéricos de circulación atmosférica y oceánica, los cuales incluyen gradualmente los procesos físicos relevantes para la predicción meteorológica en sus distintos horizontes temporales, ya sea para la predicción a corto plazo o a mediano plazo. (Herrera, 2011). Estos modelos meteorológicos están basados en conjuntos de ecuaciones matemáticas que describen los procesos físicos que tienen lugar en la atmósfera (Jorba, 2005).

La experiencia de los meteorólogos, las observaciones meteorológicas y los modelos de pronóstico numérico del tiempo (MPNT), se combinan para responder inquietudes de una sociedad en constante evolución. Entre los MPNT de alta resolución más empleados en el mundo se encuentran los núcleos dinámicos ARW y NMM del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) (Skamarock, 2008), por ser hábil en el trabajo con pequeñas escalas que pueden llegar hasta 1km de resolución espacial con una dinámica no hidrostática. Además de disponer de una gran variedad de parametrizaciones físicas, este modelo permite ser empleado en un gran número de aplicaciones, como simulaciones climáticas, estudios para el aprovechamiento de fuentes de energía renovable, estudios de calidad de aire, entre otras.

Otro modelo que ha sido desarrollado a partir del modelo WRF es el Hurricane WRF (HWRF). Este modelo fue desarrollado por el National Centers for Environmental Prediction (NCEP), basado en el núcleo dinámico NMM del WRF y en los esquemas de parametrizaciones físicas designados específicamente para los trópicos y la formación de ciclones tropicales (Gopalakrishnan, S. et. al., 2010). Presenta como ventaja la localización del dominio móvil que varía de un plazo de corrida a otro, dependiendo de la posición del centro del ciclo tropical simulado. Actualmente se encuentra corriendo de forma operativa en muchos países del mundo, mejorando grandemente al pronóstico de trayectoria de los fenómenos meteorológicos.

Algunos estudios internacionales han investigado acerca de las diferencias entre ambos núcleos dinámicos del modelo WRF; tal es el caso de Comparación de Simulación de Tormentas por el modelo WRF-NMM y WRF-ARW sobre la Región Este de la India. Como resultado de esta investigación se obtuvo que el núcleo NMM, muestra una mejor captura de la génesis, intensificación y propagación de las líneas de tormentas asociadas a estos sistemas con respecto al ARW (Litta et. al., 2012). En el año 2008 se realiza un estudio comparativo del rendimiento de los modelos MM5 y WRF (ARW y NMM), efectuando una simulación del ciclón Mala sobre la bahía de Bengala. En este se obtuvo que el WRF-ARW mostró un mejor comportamiento en el pronóstico de intensidad, mientras que el WRF-NMM realizó un mejor pronóstico de trayectoria (Pattanayak et. al., 2008). Posteriormente en el año 2009, Pattanayak y Mohanty realizan simulaciones para un pronóstico cuantitativo de la precipitación del huracán Nargis, en la India, donde se emplea el modelo WRF-NMM para evaluar las características del pronóstico de precipitación en ciclones tropicales, utilizando diferentes esquemas de parametrizaciones de cúmulos disponible en el modelo. También otros estudios comparativos se han realizado entre los modelos HWRF y WRF (ARW y NMM) en simulaciones del huracán Katrina del 2005 de la cuenca del Atlántico. Los resultados de estos experimentos resaltaron el rendimiento superior de HWRF sobre el ARW y NMM en la predicción de trayectoria e intensidad de dicho huracán (Dodla et. al., 2011).

Por otro lado el modelo regional WRF-ARW ha sido empleado en diversas investigaciones de nuestro país, mostrando un buen comportamiento de variables de interés: como la precipitación, la temperatura, la velocidad del viento y otras. Entre los estudios más significativos se encuentra la implementación del Sistema de Predicción a Muy Corto Plazo basado en el Acoplamiento de Modelos de Alta Resolución y Asimilación de datos (SisPI) (Sierra et. al., 2014), y el Sistema de Predicción Numérica Océano-Atmósfera para la República de Cuba (SPNOA) (Pérez et. al., 2014). Ambos tienen como objetivo un pronóstico de mayor calidad en la zona de Cuba y el Mar Caribe. También se han realizados estudios de sensibilidad de las parametrizaciones físicas en estos proyectos y otros como los de Mayor, Y. y Mesquita, M. (2015) para el área de Cuba.

Teniendo en cuenta todos estos resultados internacionales y la inexistencia de experiencias en Cuba con el núcleo dinámico NMM del modelo WRF, se trazó como objetivo principal de este trabajo: verificar y

comparar los pronósticos numéricos con los núcleos dinámicos ARW y NMM del modelo WRF para el pronóstico de trayectoria, precipitación, presión mínima y velocidad máxima del viento durante el paso de ciclones tropicales.

Materiales y Métodos

El modelo WRF (Weather Research and Forecast) es muy utilizado para el pronóstico del tiempo y el clima (MMM, 2014), en algunos casos este es empleado como la componente dinámica de varios de los sistemas de predicción numérica operacionales de los servicios meteorológicos de muchos países. Este modelo ha sido desarrollado por la división de Meteorología de Microescala y Mesoescala de la NCAR (Skamarock, 2008). Este sistema de modelación tiene dos núcleos dinámicos, el NMM (Non-hydrostatic Mesoscale Model) y el ARW (Advanced Research WRF). Este último será el utilizado en esta investigación, ya que el núcleo NMM fue diseñado solo para la predicción del tiempo. El WRF (ARW) actualmente está en su versión 3, disponible desde abril de 2008 y que ha sufrido actualizaciones hasta la versión 3.9.1, la más reciente. Según sus desarrolladores, es posible su aplicación en un amplio espectro de escalas espaciales que van desde metros a miles de kilómetros. El código fuente del modelo se encuentra disponible en internet y esta implementado en Fortran 90.

Este modelo posee la versatilidad de ser usado en un gran número de aplicaciones dentro de las que se pueden citar las simulaciones idealizadas, reales con predicción numérica en tiempo real, modelación de la calidad del aire, así como estudios de interacción océano-atmósfera mediante el acople con modelos oceánicos. También se utiliza para investigar sobre parametrizaciones físicas, casos de estudios de eventos meteorológicos de interés, pronóstico del tiempo a corto plazo, asimilación de datos, pronóstico especializado para la producción de energía renovable, y predicción del clima regional. Este modelo es además de código abierto a la comunidad y está optimizado de forma tal que puede ser utilizado tanto en supercomputadoras trabajando en paralelo, como en computadoras personales.

Núcleos del modelo numérico

ARW: (Advanced Research WRF) (núcleo para investigación) desarrollado por el NCAR. Algunas de sus características fundamentales son:

- Sistema de ecuaciones completo no hidrostático con la opción hidrostática.
- Términos completos de Coriolis y de curvatura.
- Anidamiento en una y dos direcciones.
- El espaciamiento en la vertical puede variar con la altura.
- Discretización en mallas de tipo Arakawa C.
- Integración en el tiempo mediante Runge-Kutta de 2do y 3er orden.
- Condiciones de fronteras periódicas, simétricas, forzadas, entre otras.
- Opciones físicas completas para la capa fronteriza atmosférica, la radiación en superficie y atmosférica, la microfísica y los cúmulos.

NMM: (Nonhydrostatic Mesoscale Model) (núcleo para pronóstico) desarrollado por el NCEP y el National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Es conveniente para el uso en un rango ancho de aplicaciones por escalas que van desde los metros hasta los miles de kilómetros, incluyendo tiempo real, investigación de pronóstico, acoplamiento y aplicaciones del modelo. Entre los rasgos más importantes del WRF-NMM se encuentran:

- Totalmente compresible, modelo no hidrostático con una opción hidrostática (Janjic, 2003a).
- Coordenadas verticales híbrida (sigma-presión).
- Esquema implícito para propagar las ondas verticales (Adams-Bashforth esquema de advección horizontal, Cigüñal-Nicholson esquema de advección vertical).
- Conservación del primer número y cantidad de segundo orden, incluso energía y entropía.
- Opciones físicas para tierra-superficie, la capa límite planetaria, radiación superficial y atmosférica, microfísica y convección de cúmulos.

- Sentido único y bidireccional de los múltiples dominios anidados.
- Discretización en mallas de tipo Arakawa E.

Datos empleados.

Para la realización de las simulaciones se emplearon como condiciones iniciales y de frontera los datos del modelo Global Forecast System (GFS) de la NOAA, utilizando específicamente los ficheros de la base de datos de GFS-FNL (Final Analysis), los cuales son datos de análisis construidos ya no en tiempo real, donde se incorporan aproximadamente un 10% más de observaciones que no se reciben en tiempo real en los ficheros de análisis operativos de este modelo en NCEP. Toda esta información se encuentra disponible en el sitio web de <http://nomads.ncdc.noaa.gov> del National Climate Data Center (NCDC) de la NOAA. Estos datos cuentan con una resolución temporal de 6 horas y una resolución espacial de 1° (~111.1 km). Para realizar las simulaciones se tomaron como criterio para determinar el momento de inicialización 3 días antes de que el ciclón tropical estuviera en las inmediaciones de Cuba, y 2 días después de que pasara, siendo un total de 5 días, coincidiendo con los estándares del trabajo de predicción del Centro Nacional de Pronósticos del INSMET de 3 y 5 días. En el caso del pronóstico de 3 días, este es el tiempo mínimo de anticipación del pronóstico que se requiere para la realización de los avisos especiales de ciclones tropicales del sistema de alerta temprana cubana y el tiempo mínimo de respuesta para la toma de medidas preventivas por parte de la Defensa Civil. Los ciclones tropicales estudiados y las fechas de inicialización se explican con más detalles en la Tabla No.1.

Tabla No.1 Lista de los ciclones tropicales que se estudiaron en este trabajo.

Nombre del CT	Fecha Inicial	Fecha Final	Nombre del CT	Fecha Inicial	Fecha Final
Charley	2004080900	2004081400	Iván	2004091100	2004091600
Dennis	2005070500	2005071000	Wilma	2005101912	2005102412
Gustav	2008082712	2008090112	Ike	2008090500	2008091000
Paloma	2008110500	2008111000	Sandy	2012102100	2012102600
Matthew	2016100212	2016100712	Irma	2017090612	2017091112

En la verificación de los pronósticos de trayectorias se empleó información de los Best Tracks del HURricane DATAbases (HURDAT) del NHC (National Hurricane Center) (Landsea et. al., 2004). Con esta información se comparan los errores de trayectoria, el sesgo de la presión mínima del centro de ciclón tropical, así como también el sesgo de la velocidad máxima del viento. Estos datos se encuentran disponibles gratuitamente en el sitio web de <http://www.nhc.noaa.gov>. Para la evaluación del pronóstico de precipitación se utilizó información de la base de datos de TRMM-3B42 (~25 km de resolución espacial - <ftp://disc2.nascom.nasa.gov>) (Huffman y Bolvin, 2014). Dentro de los estadígrafos utilizados se emplearon el error medio absoluto y el sesgo. Aunque también se calculan los índices de CSI, FAR, POD y BIAS para la evaluación espacial (Rodríguez, C.F., Sierra, M. & Ferrer, A.L., 2016 y https://dtcenter.org/plots/hwt/traditional_eval.php).

Para el diseño de los experimentos se tomaron 2 dominios de resoluciones espaciales de 37 y 12 km aproximadamente, siendo el primero de estos dominios 1/3 de la resolución espacial de los datos de entrada de GFS-FNL (ver Figura No.1). En el caso de la herramienta utilizada para determinar la trayectoria de los ciclones tropicales estudiados en las simulaciones del modelo WRF, se empleó la herramienta Cysearch (Sierra et. al., 2016). Esta herramienta permite realizar la detección automática de vórtices ciclónicos en las salidas numéricas del modelo WRF. El método de detección utiliza los campos de presión a nivel del mar y de velocidad del viento a 10m. Este método ha sido aplicado con éxito en trabajos anteriores tales como (Martínez et. al., 2011). Las configuraciones empleadas con ambos núcleos dinámicos se presentan en la Tabla No.2. Para los experimentos se decidió emplear las configuraciones físicas empleadas en los sistemas SisPI (Sierra et. al., 2014) y SPNOA (Pérez et. al., 2014) basados en el núcleo ARW, los cuales ya han sido evaluados para el área de Cuba y se cuentan con experiencias en aplicación de sus pronósticos para diferentes propósitos. Por otro lado, en el caso del núcleo NMM se decidió trabajar con la configuración recomendada

en el manual de usuario de ese modelo, ya que con este núcleo no se cuenta con experiencias de investigaciones sobre estudios de sensibilidad de parametrizaciones físicas para el área del Caribe.

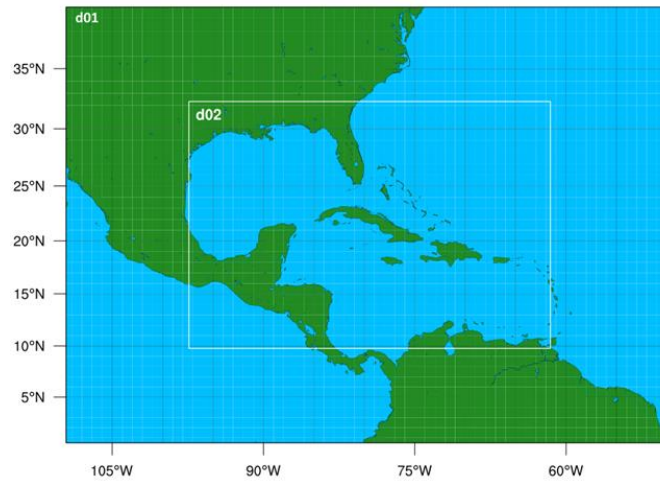


Figura 1: Se muestra el dominio 1 (de ~37 km de resolución espacial) y dominio 2 (~12 km de resolución espacial) empleados para los experimentos.

Esta configuración del NMM fue utilizada por NCEP/NOAA durante varios años como la configuración del sistema de pronóstico NAM (North American Mesoscale model). Por tal motivo, fue necesario añadir una última configuración del núcleo ARW, el cual fuera con las mismas configuraciones que se utilizaran con NMM para establecer una mejor comparación entre ambos núcleos dinámicos, a lo cual se le compararía también con las configuraciones físicas de SisPI y SPNOA ya conocidas en Cuba, aunque no exactamente los mismos tamaños y resoluciones de dominios. También se incluyó la configuración operativa por la NOAA con el modelo HWRF (basado en el núcleo NMM).

Tabla 2: Configuraciones del Modelo WRF utilizadas.

Parámetros	CONF 01 (WRF-ARW- SPNOA)	CONF 02 (WRF- ARW-SisPI)	CONF 03 (WRF-ARW- NCEP)	CONF 04 (WRF-NMM- NCEP)	CONF 05 (WRF-NMM- HWRF)
Tiempo de integración	180 segundos	180 segundos	180 segundos	180 segundos	180 segundos
Cantidad de nodos en la dirección x	169, 301	169, 301	169, 301	169, 301	169, 301
Cantidad de nodos en la dirección y	121, 205	121, 205	121, 205	121, 205	121, 205
Cantidad de niveles verticales en la atmósfera	35	35	35	35	35
Tope superior de la malla de simulación	10 mb	10 mb	10 mb	10 mb	10 mb
Cantidad de niveles verticales en el suelo	4	4	4	4	4
Parametrización de microfísica	Lin et al. scheme	WSM 5-class graupel scheme	Ferrier scheme	Ferrier scheme	WSM 5-class graupel scheme
Parametrización de la convección	Kain-Fritsch scheme	Grell-Freitas ensemble scheme	Betts-Miller-Janjic scheme	Betts-Miller-Janjic scheme	Simplified Arakawa-Schubert scheme
Parametrización de radiación de onda larga	RRTM scheme	RRTM scheme	GFDL scheme	GFDL scheme	GFDL scheme
Parametrización de radiación de onda corta	Dudhia scheme	Dudhia scheme	GFDL scheme	GFDL scheme	GFDL scheme
Parametrización de la	Monin-	Monin-	Monin-	Monin-	NCEP Global

capa superficial	Obukhov (Janjic Eta) scheme	Obukhov (Janjic Eta) scheme	Obukhov (Janjic Eta) scheme	Obukhov (Janjic Eta) scheme	Forecast System scheme
Parametrización de la física del suelo	unified Noah land-surface model	unified Noah land-surface model	unified Noah land-surface model	unified Noah land-surface model	GFDL slab land surface model
Parametrización de la capa fronteriza planetaria	Mellor-Yamada-Janjic scheme	MYNN 2.5 level TKE scheme	Mellor-Yamada-Janjic scheme	Mellor-Yamada-Janjic scheme	NCEP Global Forecast System scheme

Todos los cálculos realizados, así como también gráficos y mapas que se generaron, fueron implementados en el lenguaje de programación PYTHON, con el cual se crearon todos los scripts que se utilizaron en este trabajo.

Resultados y Discusión

En análisis realizado a partir de las simulaciones para los casos de estudio de este trabajo, se pudo apreciar que el modelo WRF con todas estas configuraciones empleadas, dispone de una gran habilidad en la representación de los campos de las variables meteorológicas simuladas. En la presente investigación se hizo énfasis en algunas de las variables meteorológicas más importantes en el uso operativo para la elaboración de los pronósticos meteorológicos y el estudio de los ciclones tropicales, que en este caso fueron: la precipitación, la velocidad del viento y la presión atmosférica. También se hizo énfasis en el pronóstico de trayectoria.

El análisis de las salidas del modelo para las variables velocidad del viento y la presión atmosférica permitieron comprobar el desempeño del modelo WRF (ARW y NMM) en el pronóstico de intensidad de los ciclones tropicales estudiados. Además, los campos de estas dos variables permitieron el uso de herramientas para el seguimiento de estos fenómenos meteorológicos, y así analizar el desempeño de los pronósticos de trayectoria. También se realizaron análisis de eficiencia en la ejecución de ambos núcleos dinámicos ARW y NMM del modelo WRF, donde se comprobó la importante rapidez en ejecución del núcleo NMM con vistas a su uso operativo.

De forma general, en el caso de las trayectorias pronosticadas con el modelo WRF, el error osciló alrededor de 50 km de diferencia con respecto a la trayectoria oficial del NHC (BestTrack) durante el primer día, destacándose como objeto de interés las diferencias que se aprecian en la posición de los huracanes estudiados en el primer plazo (inicialización) de las simulaciones realizadas para todas las configuraciones. Esta diferencia en la posición inicial en las simulaciones con respecto a la real, se debe al suavizado que tienen los datos de entrada del modelo global GFS, lo cual además depende de la resolución original del dato. Luego del segundo hasta el cuarto día de pronóstico los errores oscilan entre 100 y 300 km de diferencia con respecto a las trayectorias oficiales, llegando a ser hasta de 450 y 500 km de error en el quinto día de simulación.

Tabla 3: Configuraciones del Modelo WRF (ARW y NMM) que obtuvieron los mejores resultados en el pronóstico de trayectoria de los ciclones tropicales estudiados.

Resultados del pronóstico de trayectorias		
0 – 24 horas	24 – 72 horas	72 – 120 horas
1) NCEP – ARW (CONF 03)	1) SisPI – ARW (CONF 02) 2) HWRF – NMM (CONF 05) 3) NCEP – ARW (CONF 03)	1) SisPI – ARW (CONF 02) 2) NCEP – ARW (CONF 03)

Comparando entre las configuraciones 3 y 4 similares para los núcleos ARW y NMM respectivamente, se encontró que a diferencia de Pattanayak et. al., 2008, en los casos analizados se obtiene mejores resultados en el pronóstico de trayectoria con el núcleo ARW (ver ejemplo en la Figura 2.a). En el caso de la representación de la intensidad de estos fenómenos meteorológicos, se obtuvo que en el caso de la presión mínima atmosférica del centro de los vórtices es mejor pronosticada con las configuraciones de ARW y no con NMM, siendo estos últimos después de las primeras 24 horas de pronósticos el doble o más que la

presión atmosférica pronosticada por las corridas de ARW, aunque en el caso de la configuración 3 y 4 no son tan significativas las mejoras de ARW como lo es con las configuraciones 1 y 2 de SPNOA y SisPI respectivamente, las cuales obtienen los mejores pronósticos de esta variable atmosférica, especialmente después de las primeras 12 horas de simulación. De forma general para esta variable todas las configuraciones sobre-estimaron los valores pronosticados, viéndose que no reflejaron correctamente el descenso de la presión con respecto a los valores del BestTrack, aunque en la mayoría de los casos las curvas sí responden al mismo comportamiento observado de la variable (ver Figura 2.c,e.).

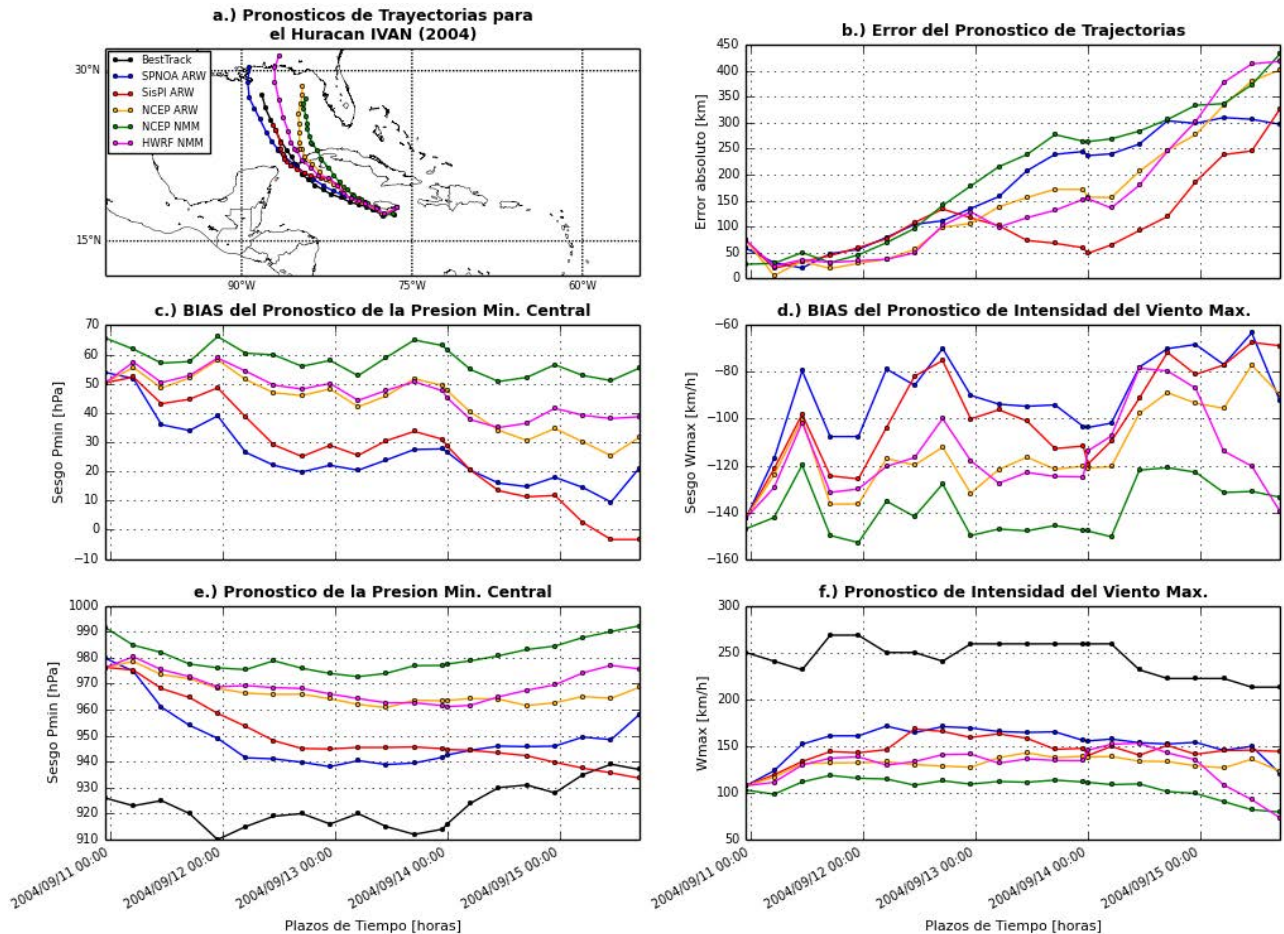


Figura 2: Se muestra un análisis de los errores del modelo en el pronóstico de trayectoria del Huracán Iván, así como de intensidad, donde se analizan las variables de presión mínima del centro del ciclón tropical y la velocidad máxima del viento del mismo.

En el análisis de la velocidad máxima del viento se obtuvieron resultados contrastantes con la presión atmosférica y el pronóstico de trayectoria. Viéndose que en todas las configuraciones los valores máximos de la velocidad de los vientos pronosticados son sub-estimados (ver Figura 2d,f). Las configuraciones que mejor representaron esta variable fueron las configuración 1 y 2 (de SPNOA y SisPI respectivamente), mientras que en la comparación de ambos núcleos dinámicos en las configuraciones 3 y 4 (ARW y NMM respectivamente), se obtuvo que el núcleo ARW representó mejor el comportamiento de esta variable. En el caso de los valores del sesgo se obtuvo que para todos los plazos de pronóstico, el modelo realiza una sub-estimación del orden de los 100 km/h en el caso del huracán Iván, siendo menor este error en los otros casos estudiados. En el Anexo No.2 se podrán encontrar gráficos similares para los casos de estudio más importantes, viéndose comportamientos similares a lo antes explicado. En estos se podrá encontrar para el caso del huracán Matthew, como en el momento de la recurva, cuando se encontraba pasando sobre la provincia de Guantánamo en el Oriente de Cuba, la configuración NCEP – ARW (CONF 03) fue capaz de reproducir adecuadamente este proceso, lo cual en su momento fue algo complicado de pronosticar, pues muchos de los

modelos operacionales en ese entonces no fueron capaces de reproducir adecuadamente esta trayectoria en sus pronósticos.

Por otro lado, para la verificación del pronóstico de precipitación se utilizaron datos del producto TRMM-3B42 para analizar la intensidad de los acumulados y el comportamiento espacial de los mismos. En la mayoría de los casos de estudio se aprecia que todas las configuraciones empleadas del modelo WRF tienden a sobre-estimar la intensidad de los acumulados de precipitación, especialmente sobre tierra, donde estos llegan a ser considerablemente mayores que los observados. En cuanto a los mejores resultados estos se obtienen con la configuración 1 (ARW-SPNOA), la cual refleja valores más cercanos a los observados y además una mejor correspondencia del área de barrido tras el paso de los huracanes estudiados (ver Figura 3). En el caso de la comparación entre los núcleos dinámicos ARW y NMM de las configuraciones 3 y 4 respectivamente, se aprecia que el pronóstico del núcleo ARW es más realista en todos los casos simulados y además la configuración 4 del núcleo NMM reproduce áreas de barrido de la precipitación asociada a los huracanes estudiados más estrechas y atenuadas que lo que se obtiene con el núcleo ARW (ver Anexo No.1).

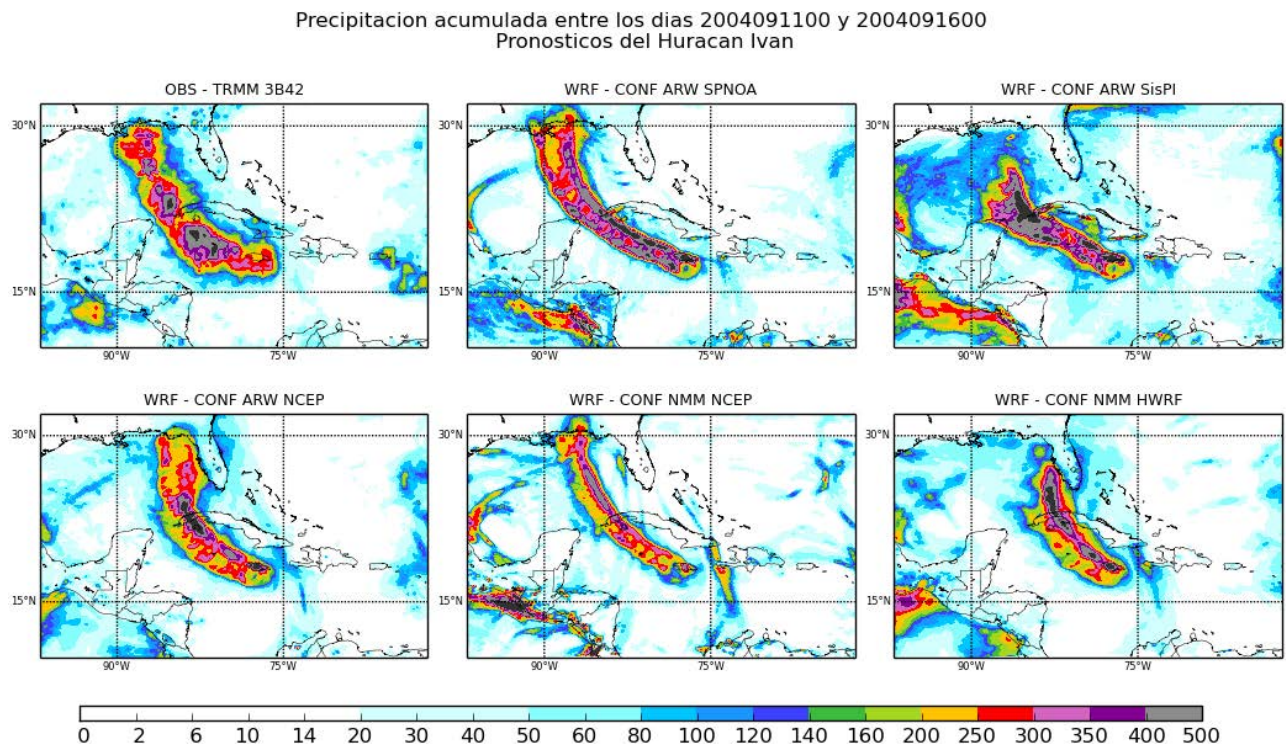


Figura 3: Se muestran las salidas del campo de precipitación acumulada en 5 días para el dominio 2 (~12 km de resolución espacial) empleado en las 5 configuraciones estudiadas y el campo de precipitación real estimado por el producto TRMM-3B42 para el Huracán Iván.

En los casos donde los huracanes simulados interactuaron con tierra se puede apreciar la correcta habilidad del modelo WRF, el cual reproduce síntomas de debilitamiento y desorganización de estos sistemas. Este comportamiento se produce debido, principalmente, a la pérdida de la fuente de energía (el océano) y el aumento de la fricción sobre tierra. Otro aspecto que no se puede dejar de señalar es que, las diferencias iniciales en las posiciones de los vórtices y de los valores de los campos tomados de GFS-FNL (diagnósticos) para la presión atmosférica y velocidad del viento principalmente, ocasionaron en algunas de las simulaciones errores importantes en el pronóstico, especialmente en los primeros plazos, producto al tiempo de autoajuste que tarda el modelo en atenuar el efecto del suavizado del campo de entrada. En la mayoría de los casos el modelo WRF (ARW y NMM) fue capaz de representar adecuadamente el comportamiento observado, pero en algunas de las configuraciones empleadas la combinación de esos dos aspectos llegó a producir el desplazamiento de las trayectorias pronosticadas y en unos pocos casos se afectó el pronóstico de intensidad de los fenómenos de estudio. Esto se puede observar mejor en los resultados (ver Anexo No.1) que

se obtuvieron para el resto de los casos de estudio con respecto al comportamiento de la precipitación. En el análisis espacial se empleó un área sobre la región de Cuba, donde se calcularon los indicadores de Aciertos (Hits), Falsas Alarmas (FA), Fallos (Miss) y Áreas sin precipitación (Clear - No Rain). En el análisis de ejemplo que se muestra en la Figura 4, correspondiente al pronóstico de precipitación del huracán Iván, se aplica un umbral de 100 mm en el acumulado de precipitación en 5 días. Con este umbral se separa en cierta medida la precipitación generada con el paso de estos ciclones tropicales y los acumulados menos intensos asociados a otros procesos convectivos locales. En la mayoría de los casos el mejor índice de aciertos (Hits) se obtiene con la configuración 2 (ARW-SisPI) en la correspondencia espacial con el campo observado. A pesar de que esta configuración obtuvo mejores resultados en Hits, no fue así con las falsas alarmas, pues en esta configuración se obtuvo un número relativamente grande para este indicador con respecto al resto de las configuraciones, ocasionando esto que se sobre-estimara el pronóstico del área con precipitación mayor de 100mm/5 días, y que realmente no fuera observada. En este sentido las configuraciones 1 y 3 con el núcleo ARW reportaron un número considerablemente menor de FA y similar en cuanto a Hits, manteniéndose además similar los valores de Miss en este ejemplo. Por otro lado, entre las configuraciones 3 y 4 de los núcleos NMM y ARW se obtuvo mejores resultados en la configuración 3 del ARW. En este se obtuvo valores considerablemente mayores de Hits y relativamente un número menor de Miss, con igual cantidad en por ciento de FA de forma aproximada.

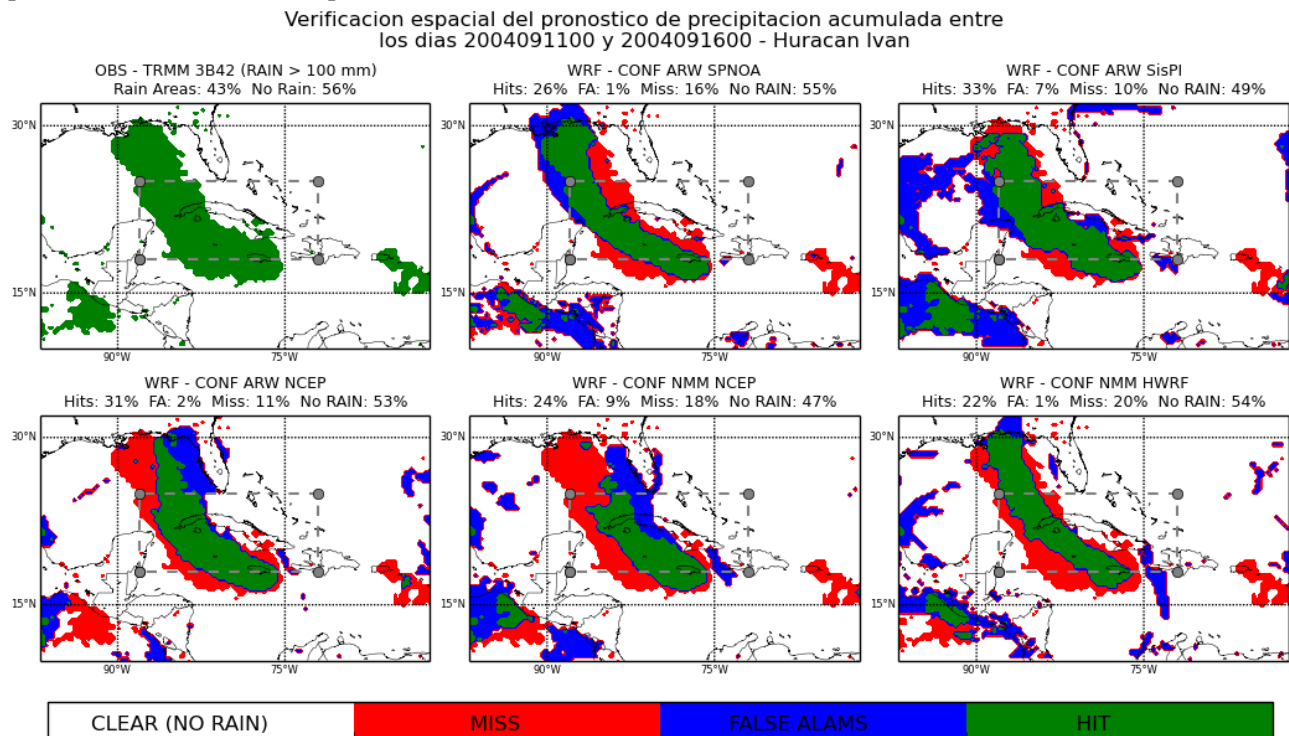


Figura 4: Se muestra la verificación espacial de las salidas del campo de precipitación acumulada en 5 días (umbral de 100 mm/5días) correspondiente al huracán Iván para el dominio 2 (~12 km de resolución espacial).

Aplicando esta metodología en la comparación del campo pronosticado de precipitación para todos los casos simulados se obtienen los valores de aciertos, falsas alarmas y fallos correspondientes a cada configuración. Esto permitió crear la Tabla No.4 donde se muestran todos estos indicadores y se calculan además los promedios de ellos para cada configuración del modelo WRF utilizada en el trabajo. De esta forma con los valores promedios se obtienen el comportamiento promedio de cada configuración analizando los 10 casos de estudio, en lo cual se destaca con mayor cantidad de Hits las configuraciones 2 y 5 de ARW-SisPI y NMM-HWRF respectivamente.

Tabla 4: Resultados de la verificación espacial de las salidas de precipitación para los 10 huracanes simulados.

Nombre de Huracanes	Observación		Conf 01 ARW-SPNOA				Conf 02 ARW-SisPI				Conf 03 ARW-NCEP				Conf 04 NMM-NCEP				Conf 05 NMM-HWRF			
	Rain	No Rain	H	FA	Miss	Clear	H	FA	Miss	Clear	H	FA	Miss	Clear	H	FA	Miss	Clear	H	FA	Miss	Clear
Charley	6	93	0	4	6	89	0	4	6	89	0	0	6	93	1	4	4	89	0	0	6	93
Ivan	43	56	26	1	16	55	33	7	10	49	31	2	11	53	22	1	20	54	24	9	18	47
Dennis	20	79	15	8	4	71	1	10	18	69	5	6	14	73	3	10	16	69	4	8	15	71
Wilma	42	57	15	0	27	56	12	6	29	51	27	8	14	49	7	1	34	55	30	7	11	49
Gustav	15	84	6	11	9	72	8	24	7	59	1	7	13	77	1	3	14	80	4	11	11	72
Ike	21	78	4	12	16	66	0	1	21	77	0	3	21	75	4	3	16	75	1	9	20	69
Paloma	17	82	8	13	8	69	12	10	4	71	5	2	11	79	6	9	10	73	10	4	6	78
Sandy	36	63	26	6	9	57	30	19	5	43	28	14	7	49	17	2	18	61	30	10	5	53
Matthew	37	62	19	2	18	59	18	4	19	58	18	1	18	61	15	2	22	60	21	1	16	61
Irma	47	62	15	1	31	51	32	4	14	48	17	1	29	51	19	0	28	52	22	0	24	52
% Promedio	28	71.6	13.4	5.8	14.4	65	15	8.9	13.3	61.4	13	4.4	14.4	66	9.5	3.5	18	67	15	5.9	13	64.5

A diferencia de analizar solamente la cantidad de Hits de estas configuraciones, se puede calcular a partir de los indicadores Hits, FA y Miss en conjunto, un grupo de índices que brindan información más detallada y general de esta comparación, con vistas a determinar en los resultados de la verificación espacial la mejor configuración del modelo. Estos índices son el Índice de Éxito Crítico (CSI), la Probabilidad de Detección (POD), la Probabilidad de Falsas Alarmas (FAR) y el Sesgo (BIAS), los cuales brindan un análisis más completo en cuanto a la calidad del pronóstico desde el punto de vista espacial. En este sentido se pudo determinar que la mejor configuración que pronostica el comportamiento espacial de la precipitación es la de NMM-HWRF (CONF 05), donde se obtienen los valores de CSI y POD más altos, con una tendencia similar al resto de las corridas al pronosticar áreas de falsas alarmas FAR (ver Figura 5). En el caso de la comparación entre los núcleos dinámicos estudiados del modelo WRF, se obtiene mejores resultados con ARW-NCEP (CONF 03).

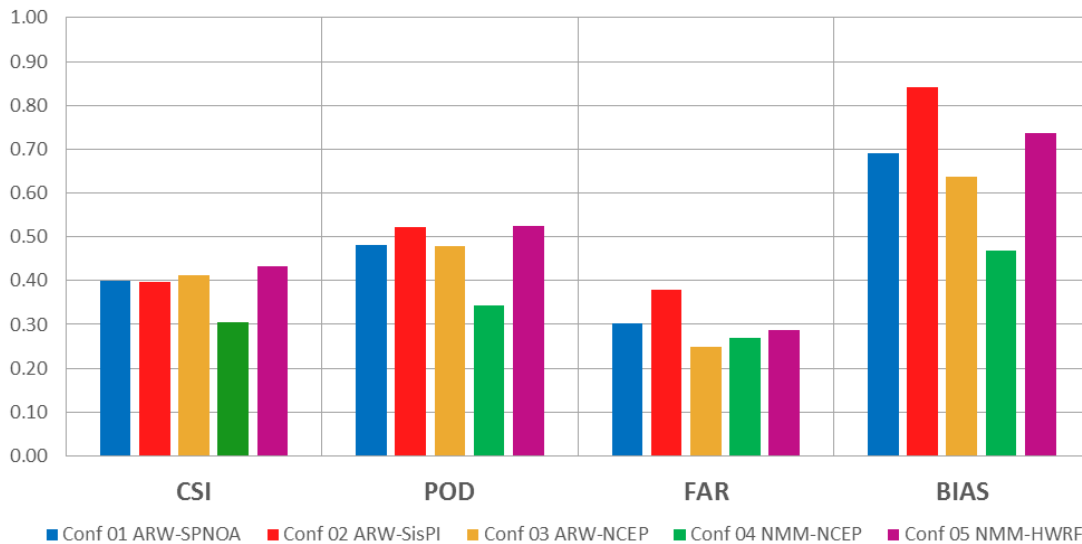


Figura 5: Se muestra la verificación espacial de las salidas del campo de precipitación acumulada en 5 días para el dominio 2 (~12 km de resolución espacial), donde se aplica para la comparación un umbral de precipitación de 100 mm/5días.

Conclusiones.

En presente trabajo se logró verificar los pronósticos obtenidos en las simulaciones con los núcleos dinámicos NMM y ARW del modelo WRF, donde se arribaron a las siguientes conclusiones:

- La comparación de los resultados obtenidos con los núcleos dinámicos ARW y NMM presentaron gran similitud en cuanto a los errores de los pronósticos. Destacándose una mayor eficiencia computacional del núcleo NMM en cuanto al tiempo de ejecución.

- Para el pronóstico de trayectoria se comprobó que entre las configuraciones 3 y 4, similares para los núcleos ARW y NMM respectivamente, se obtienen mejores resultados con el núcleo ARW, mientras que de forma general entre todas las configuraciones estudiadas se obtiene los mejores resultados en las primeras 24 horas con la configuración 3 (ARW-NCEP). Para el rango de 24 a 72 horas los mejores pronósticos de trayectorias se lograron con las configuraciones 2,3 y 5, destacándose en este caso la de ARW-SisPI. Por otro lado en el rango de 72 a 120 horas los mejores resultados fueron con las configuraciones 2 y 3 correspondientes a ARW-SisPI y ARW-NCEP respectivamente.
- En la posición inicial de los huracanes analizados se encontró, en las inicializaciones del modelo mediante el algoritmo de identificación, una importante diferencia con respecto a la posición en el BestTrack del NHC. Esto es debido al suavizado de los datos de entrada del modelo global GFS producto a su resolución espacial, lo cual refleja la importancia de la asimilación de datos en este momento inicial de las simulaciones.
- De forma general el pronóstico de la presión mínima atmosférica del centro de los huracanes estudiados resultó presentar una importante sobre-estimación de estos valores, viéndose que a pesar de estas diferencias los comportamientos pronosticados de las curvas de presión sí fueron similares. Aunque no se obtienen diferencias significativas entre las configuraciones 3 y 4, se destacan las configuraciones de ARW en SisPI y SPNOA como las de mejores resultados.
- Las configuraciones que mejor representaron la velocidad máxima de los vientos fueron las configuración 1 y 2 (de SPNOA y SisPI respectivamente), aunque se mostró una sub-estimación general de estos valores en todos los casos. En cuanto a la comparación entre las configuraciones 3 y 4 fue más acertado el pronóstico con el núcleo ARW.
- En la mayoría de los casos de estudio se aprecia que todas las configuraciones empleadas del modelo WRF tienden a sobre-estimar la intensidad de los acumulados de precipitación, especialmente sobre tierra, donde estos llegan a ser considerablemente mayores que los observados. En cuanto a los mejores resultados estos se obtienen con la configuración 1 (ARW-SPNOA). Por otro lado, en la comparación entre los núcleos dinámicos ARW y NMM de las configuraciones 3 y 4 respectivamente, se aprecia que el pronóstico del núcleo ARW es más realista en todos los casos simulados.
- En la verificación espacial se obtuvo que la mejor configuración es la CONF-05 (NMM-HWRF), mientras que comparando entre las configuraciones 3 y 4 (ARW-NCEP y NMM-NCEP respectivamente), se muestran mejores resultados para el núcleo ARW (CONF 03).

Recomendaciones.

- Estudiar otras combinaciones de parametrizaciones físicas disponibles en el núcleo dinámico NMM.
- Emplear otras herramientas para la detección automática del centro de los ciclones tropicales como el GFDL Vortex Tracker.
- Utilizar otras metodologías de verificación de los pronósticos que permitan realizar estudios más profundos en temas más puntuales.
- Realizar experimentos con el nuevo núcleo dinámico NMMB el cual se creó a partir del WRF-NMM.

Referencias Bibliográficas.

- Developmental Testbed Center (DTC): HWT 2009 Spring Experiment Objective Verification - Traditional Verification Methods. https://dtcenter.org/plots/hwt/traditional_eval.php
- Dodla, V. B., Desamsetti, S. and Yerramilli, A., 2011: A Comparison of HWRF, ARW and NMM Models in Hurricane Katrina (2005) Simulation. Int. J. Environ. Res. Public Health 2011, 8, 2447-2469; doi:10.3390/ijerph8062447, ISSN 1660-4601
- Gopalakrishnan, S. et. al. (2010): Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF) Model Scientific Documentation. NOAA Earth System Research Laboratory, Boulder, CO.

- Herrera, S., 2011: “Desarrollo, validación y aplicaciones de Spain02: Una rejilla de alta resolución de observaciones interpoladas para precipitación y temperatura en España”. Tesis Doctoral. Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación. Universidad de Cantabria. España., pp. 1
- Huffman, G. J. y Bolvin D. T., 2014: TRMM and Other Data Precipitation Data Set Documentation (Documento técnico). Mesoscale Atmospheric Processes Laboratory, NASA Goddard Space Flight Center y Science Systems and Applications, Inc., <http://trmm.gsfc.nasa.gov/3b42.html>
- Janjic, 2003a: A nonhydrostatic model based on a new approach. https://www.researchgate.net/publication/227308412_A_nonhydrostatic_model_based_on_a_new_approach
- Jorba Casellas, O., 2005: Simulación de los campos de viento de la Península Ibérica y el área geográfica de Catalunya con alta resolución espacial para distintas situaciones meteorológicas típicas. B-21945-2005/84-689-1740-0. <http://www.tesisenred.net/TDX-0317105-174201>
- Landsea, C. W., C. Anderson, N. Charles, G. Clark, J. Dunion, J. Fernandez-Partagas, P. Hungerford, C. Neumann, and M. Zimmer, 2004a: The Atlantic hurricane database re-analysis project: Documentation for the 1851-1910 alterations and additions to the HURDAT database. Hurricanes and Typhoons: Past, Present and Future, R. J. Murname and K.-B. Liu, Eds., Columbia University Press, 177-221.
- Litta, A. J., Ididcula, S. M., Mohanty, U. C. and Prasad, S. K., 2012: Comparison of Thunderstorm Simulations from WRF-NMM and WRF-ARW Models over East Indian Region. The Scientific World Journal, Volume 2012, Article ID 951870, 20 pages doi:10.1100/2012/951870.
- Martínez, C. D.; Borrajero, M. I.; Bezanilla, M. A. & Centella, A. A. 2011. “La ocurrencia de ciclones tropicales en el Caribe y México y el calentamiento global. Aplicación de un modelo climático regional”. Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio: II Época, (12): 17–30, ISSN: 1729-3790.
- Mayor, Y. and Mesquita, M., 2015: Numerical Simulations of the 1 May 2012 Deep Convection Event over Cuba: Sensitivity to Cumulus and Microphysical Schemes in a High-Resolution Model. Hindawi Publishing Corporation - Advances in Meteorology. Volume 2015, Article ID 973151, 16 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/973151>
- Pattanayak, S., Mohanty, U. C., Rizvi, S. R., Huang, X. -Y. and Ratna, K. N., 2008: A Comparative study on performance of MM5 and WRF (ARW & NMM) models in simulation of tropical cyclone over bay of Bengal. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.582.9792&rank=1>
- Pérez et. al., 2014: Sistema de predicción numérica Océano-Atmósfera para la República de Cuba. Informe Científico presentado al Consejo Científico del Instituto de Meteorología de Cuba. Proyecto: Asimilación de modelos numéricos regionales para representar la circulación atmosférica y oceánica en los Mares Interamericanos y Aguas Cubanas.
- Rodríguez, CF, Sierra, M & Ferrer, AL, 2016, “Modificación e implementación del método de evaluación espacial MODEModpara su uso operativo en Cuba”, Ciencias de la Tierra y el Espacio, Vol.17, No.1,pp. 18-31
- Sierra, M. et. al., 2014: Sistema automático de predicción a mesoescala de cuatro ciclos diarios. Informe Científico presentado al Consejo Científico del Instituto de Meteorología de Cuba. Proyecto: Sistema de Predicción a muy corto plazo basado en el Acoplamiento de Modelos de Alta Resolución y Asimilación de Datos.
- Sierra, M., Borrajero, I., Hinojosa, M., Roque, A., Rodríguez, C.F., Vázquez, L., y Ferrer, A.L., 2016: Herramientas de detección, reporte y evaluación para salidas de modelos de pronóstico numérico desarrollado en Cuba. Revista Cubana de Meteorología, Vol.22, No.2, pp.150-163, 2016, ISSN: 0864-151X.
- Skamarock, W., J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, M.G.Duda, X-Y. Huang, W. Wang and J.G. Powers, 2008: A Description of the Advanced Research WRF version 3, NCAR Technical Note TN-475+STR, NCAR, Boulder, Colorado.

Anexos

Anexo No.1: Pronósticos de precipitación para los huracanes estudiados empleando los núcleos dinámicos NMM y ARW del modelo WRF.

Precipitación acumulada entre los días 2005101912 y 2005102412
Pronosticos del Huracan Wilma

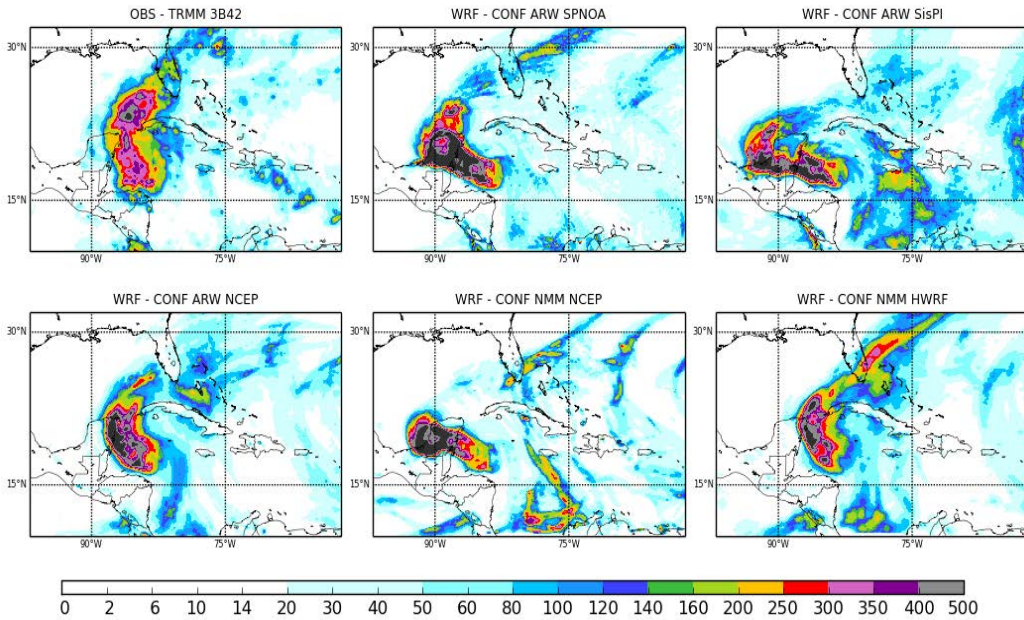


Figura 6: Se muestran las salidas del campo de precipitación acumulada en 5 días para el dominio 2 (~12 km de resolución espacial) empleado en las 5 configuraciones estudiadas y el campo de precipitación real estimado por el producto TRMM-3B42 para el Huracán Wilma (2005).

Precipitación acumulada entre los días 2008110500 y 2008111000
Pronosticos del Huracan Paloma

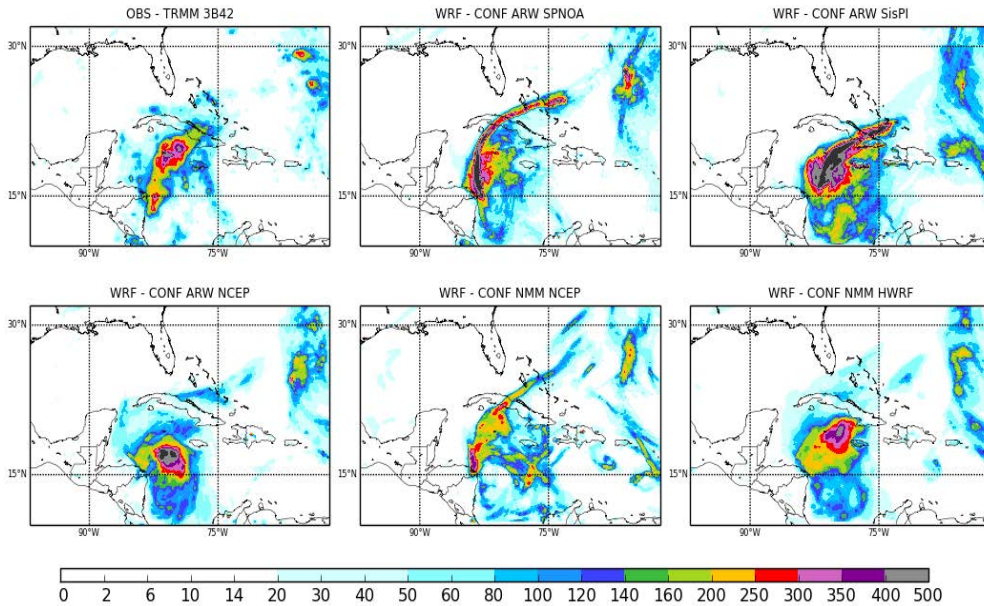


Figura 7: Se muestran las salidas del campo de precipitación acumulada en 5 días para el dominio 2 (~12 km de resolución espacial) empleado en las 5 configuraciones estudiadas y el campo de precipitación real estimado por el producto TRMM-3B42 para el Huracán Paloma (2008).

Precipitación acumulada entre los días 2012102100 y 2012102600
Pronosticos del Huracan Sandy

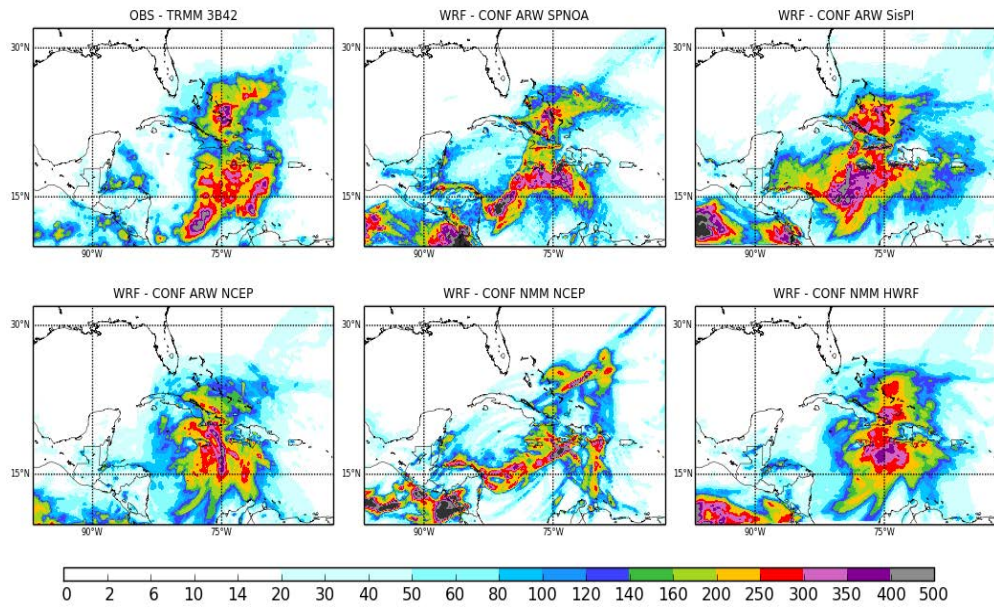


Figura 8: Se muestran las salidas del campo de precipitación acumulada en 5 días para el dominio 2 (~12 km de resolución espacial) empleado en las 5 configuraciones estudiadas y el campo de precipitación real estimado por el producto TRMM-3B42 para el Huracán Sandy (2012).

Precipitación acumulada entre los días 2017090612 y 2017091112
Pronosticos del Huracan Irma

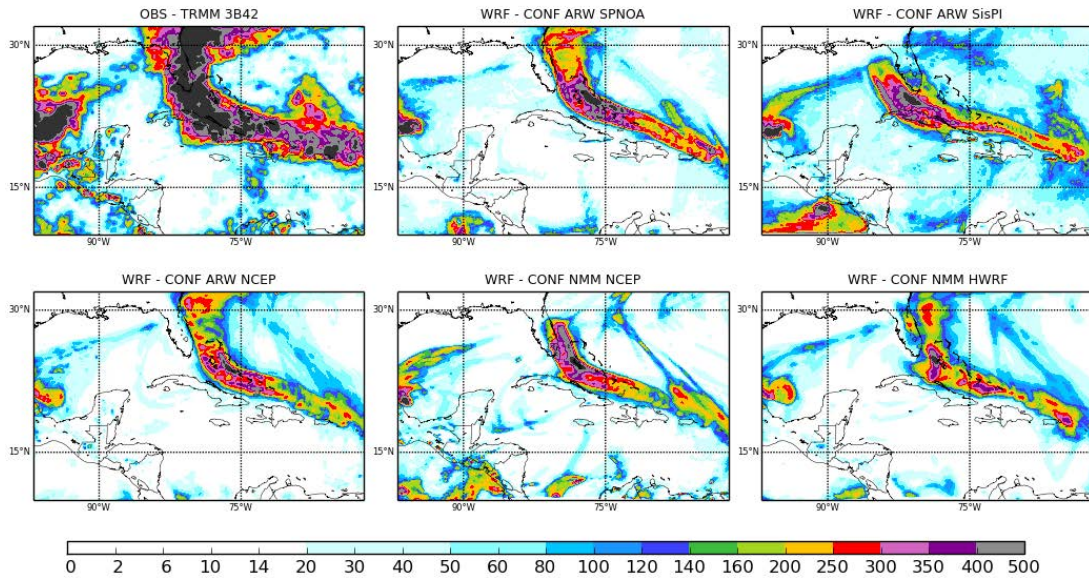


Figura 9: Se muestran las salidas del campo de precipitación acumulada en 5 días para el dominio 2 (~12 km de resolución espacial) empleado en las 5 configuraciones estudiadas y el campo de precipitación real estimado por el producto TRMM-3B42 para el Huracán Irma (2017).

Anexo No.2: Pronósticos de trayectorias e intensidad para los huracanes estudiados más intensos, empleando los núcleos dinámicos NMM y ARW del modelo WRF.

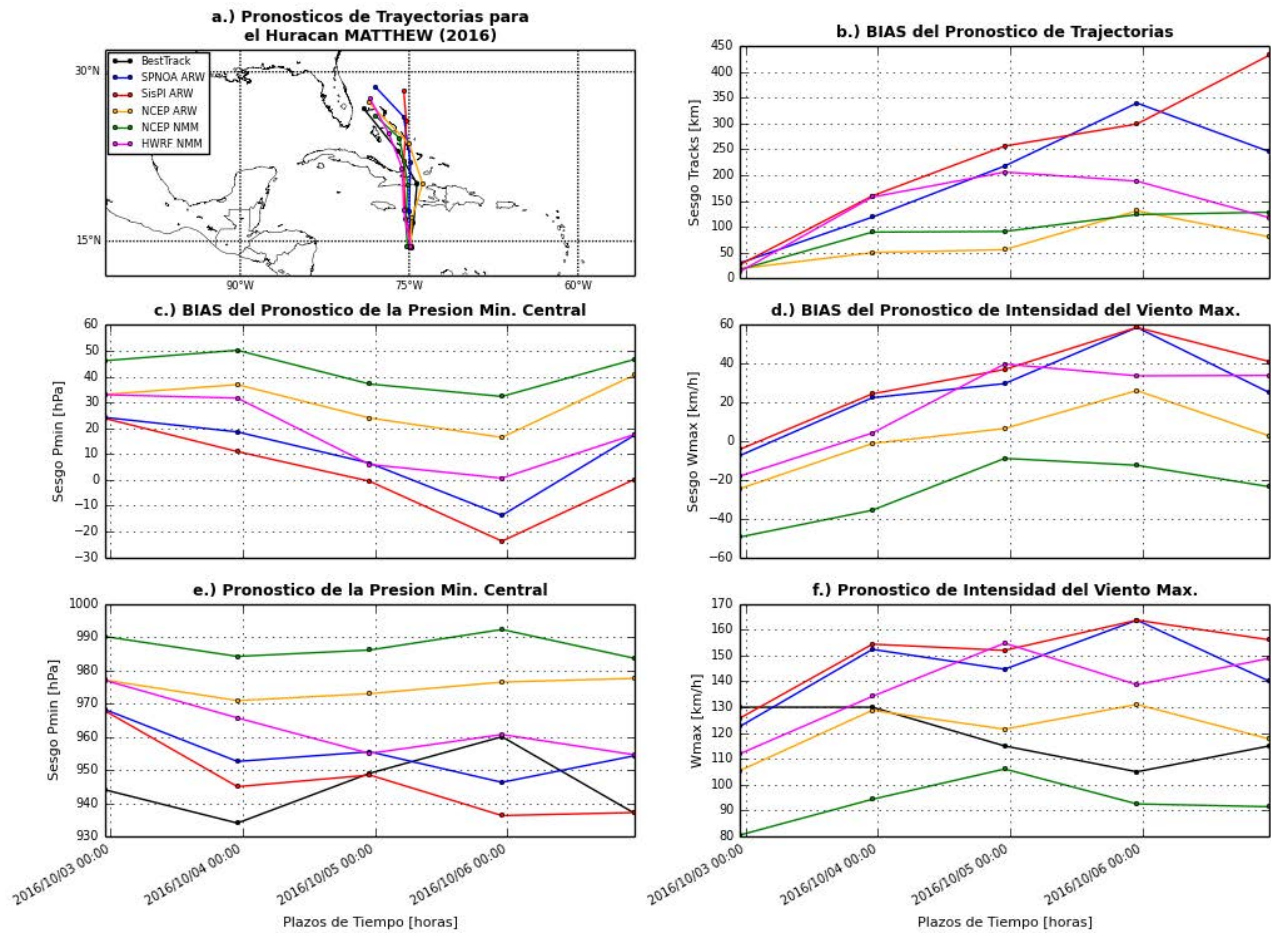


Figura 10: Se muestra un análisis de los errores del modelo en el pronóstico de trayectoria del Huracán Matthew (2016), así como de intensidad, donde se analizan las variables de presión mínima del centro del ciclón tropical y la velocidad máxima del viento del mismo.