

# **Verificación del pronóstico cuantitativo de la precipitación del modelo WRF para las provincias Artemisa, Mayabeque y La Habana**

Lic. Sidney Moreno Pacheco,

Lic. Carlos Manuel González Ramírez,

Lic. Adrián Luis Ferrer

*Instituto de Meteorología, Código Postal 11700, La Habana, Cuba*

## **Resumen**

Se verifica puntual y espacialmente el pronóstico cuantitativo de la precipitación (PCP) que se obtiene del modelo WRF-ARW para la región de las provincias de Artemisa, Mayabeque y La Habana, en el occidente de Cuba. Esta evaluación se realiza utilizando datos de estimación cuantitativa de la precipitación (ECP) del radar polarimétrico de Cayo Hueso (KBYX) donde se utilizan los acumulados en 3 horas y 24 horas. También se realizan comparaciones con estas estimaciones corregidas a partir de datos pluviométricos del INSMET. Para la corrección fue necesario emplear dos metodologías basadas en el método de interpolación de Cressman y una modificación del mismo donde se consideran las elevaciones del terreno y su influencia en el campo de ECP, obteniéndose marcadas diferencias entre ambos procedimientos. Los períodos de estudio fueron los meses de

mayo 2008, julio 2012, enero 2013 y septiembre 2013. Los estudios fueron realizados empleando salidas numéricas del modelo WRF, inicializado a partir de los ciclos de corridas de las 0000 y 1200 UTC del modelo de pronóstico GFS. Con la verificación de las simulaciones se pudo demostrar que el PCP presenta una sobrestimación de los valores de acumulados en 3 y 24 horas, a pesar de esto el modelo mantuvo una buena representación espacial de las áreas de lluvia. La comparación con los datos corregidos de ECP mantuvo una sobrestimación de los valores de la lluvia, pero los errores absolutos medios disminuyeron.

**Palabras clave:** precipitación, pronóstico numérico, verificación, estimación cuantitativa.

### **Abstract**

It is made a punctual and spatial verification of the quantitative precipitation forecast (QPF), obtained from the model WRF-ARW in the provinces of Artemisa, Mayabeque and Havana, in Western region of Cuba. This evaluation was made throughout the use of quantitative precipitation estimation (QPE) data from the polarimetric radar of Key West (KBYX), especially 3-hours and 24-hours accumulates. Comparisons were made between these estimations and the pluviometric data obtained from INSMET. Due to correct it, was necessary to take into account two methodologies according to the Cressman interpolation method and a modification of the same one, where the orography and its influence in the QPE values are considered; noticeable differences between both procedures were obtained. The analyzed period included months of May 2008, July 2012,

January 2013 and September 2013. Investigations were based on model WRF numerical outputs, initialized throughout the 0000 and 1200 UTC runs of the GFS model forecast loops. With the simulation verification process, it was demonstrated that the QPF presents an over-estimation of the total accumulated precipitation values in 3 and 24 hours experiments; however, the model maintained a good spatial representation of rain areas. The comparison with rectified QPE data kept an over-estimation of BIAS, but the mean absolute error decreased.

**Key words:** precipitation, numeric forecast, verification, quantitative estimation

## **Introducción**

La precipitación muestra grandes variaciones en su intensidad y distribución espacial lo que dificulta en gran medida los pronósticos de la misma, trayendo consecuencias directas e indirectas a la población en general; por lo que el pronóstico de las precipitaciones constituye un factor de primer orden y necesidad. En Cuba se realiza el pronóstico de lluvias según la distribución espacial que pueda alcanzar, pero en cuanto a la intensidad no se tiene un pronóstico debido a lo complejo que resulta los procesos físicos y dinámicos generadores de los volúmenes de precipitación en la zona tropical. Sin embargo, en los últimos años se ha alcanzado un alto grado de desarrollo y se ha incrementado notablemente la capacidad de representación de los fenómenos atmosféricos utilizando modelos numéricos, que junto a la información de los radares meteorológicos aportan elementos importantes tanto cualitativos como cuantitativos de las variables y los campos meteorológicos que conllevan a los análisis y pronósticos del

tiempo. De aquí se deriva la necesidad de mejorar y perfeccionar la calidad de dichos modelos. Una forma eficiente de lograr esto es mediante la evaluación de los pronósticos que estos brindan.

Diversas investigaciones nacionales se han desarrollado pero estas se han concentrado en la predicción de fenómenos peligrosos, desarrollados por Sierra *et al.*, (2014), llevaron a cabo el proyecto: "Sistema de Predicción a muy corto plazo basado en el Acoplamiento de Modelos de Alta Resolución y Asimilación de Datos"; en cuanto a la evaluación de los pronósticos encontramos el Proyecto: "Actualización de la distribución espacial de las tormentas eléctricas en Cuba" en el que se realizó la "Asimilación y desarrollo de métodos de evaluación de pronóstico numérico para Cuba y Mares Interamericanos" por Díaz *et al.* (2013), donde se expone los resultados de la implementación de métodos de evaluación con la intención de ofrecer a los usuarios un grupo de herramientas que permita unificar los criterios de evaluación del pronóstico numérico. Mitrani *et al.* (2006), verifica el pronóstico de lluvia del modelo MM5V3 a lo largo de la trayectoria de los huracanes Charley e Iván sobre el occidente del país, en la temporada ciclónica del año 2004.

A pesar de estas investigaciones se hace necesario realizar la verificación del pronóstico cuantitativo de la precipitación del modelo WRF para las provincias Artemisa, Mayabeque y La Habana en el período del 2008-2013 pues nos permitirá contar con los errores que produce el modelo WRF una vez obtenidas las estimaciones de la precipitación del radar meteorológico de Cayo Hueso corregidas para las provincias en estudio.

Para esta investigación fueron plateados los siguientes objetivos:

- Corregir los productos de estimaciones de precipitación acumulada obtenidos del radar meteorológico de Cayo Hueso (KBYX) a partir de los datos pluviométricos.
- Verificar el pronóstico cuantitativo de la precipitación acumulada cada 3 horas del modelo WRF utilizando las estimaciones del radar meteorológico y las correcciones de estos campos de observaciones.

Verificar el pronóstico cuantitativo de la precipitación acumulada en 24 horas del modelo WRF utilizando las estimaciones del radar meteorológico.

## **Materiales y Métodos**

Provincias de gran importancia económica para el país como son Artemisa, Mayabeque y La Habana todas ubicadas en la región occidental de Cuba fueron escogidas para realizar la investigación, fundamentalmente por la densidad de estaciones meteorológicas y red de pluviómetros del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos; unido al creciente interés del servicio meteorológico de Cuba de brindar pronósticos cuantitativos de lluvias, además en la actualidad las diferentes instituciones como es el caso de la Defensa Civil y el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos a las que se le brindan servicios, están sugiriendo una mayor precisión en los pronósticos de lluvias que se le brindan.

Para la realización de la evaluación del pronóstico cuantitativo de la precipitación del modelo WRF en los períodos de estudio que se muestran en la tabla 1 se realizaron las simulaciones del modelo utilizando la configuración establecida por Sierra *et al.* (2014), para el área de Cuba (Tabla 2).

**Tabla 1.** Períodos de estudio para las provincias Artemisa, Mayabeque y La Habana

NÚMERO	FECHA
1	1-31 mayo 2008
2	1-30 junio 2012
3	1-31 enero 2013
4	1-30 septiembre 2013

A partir de los datos de lluvia en 24 horas de los 191 pluviómetros y reportes diarios perteneciente a las provincias de Artemisa, Mayabeque y La Habana, obtenido de la base de datos del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos; y los datos de 10 estaciones meteorológicas de la red de estaciones del Instituto de Meteorología de Cuba en el período 2008-2013, exceptuando los datos de 40 pluviómetros y la estación meteorológica de Bahía Honda (318) que se encuentran ubicado fuera del alcance del rango corto (124 mn) del radar meteorológico (Figura 2) se corrigieron los datos de precipitación estimados por el radar meteorológico KBYX: para lo cual primeramente se realizaron un grupo de programas en el lenguaje Python para calcular los coeficientes adimensionales de ajustes puntuales a partir de la división de los datos de observaciones tomados en las estaciones meteorológicas entre las estimaciones de precipitación realizadas por el radar meteorológico (ecuación 1). Una vez calculados estos coeficientes para las coordenadas de las estaciones se genera una malla mediante el método de interpolación de Cressman (Cressman, 1959) y una modificación del mismo, en el que se considera la influencia de la topografía en la interpolación de la nueva malla (Borrajero, 2016, comunicación

personal). Finalmente, el resultado de estos dos métodos se le multiplica a la malla original lo cual nos brinda dos tipos de correcciones de la precipitación estimada por el radar meteorológico.

$$\text{Coef. ajuste} = \frac{\text{Acumulados de estación}}{\text{Acumulados de radar (interpolado a las estaciones)}} \quad (1)$$

Una vez corregidos los datos y realizadas las simulaciones se verifica puntual y espacialmente el pronóstico cuantitativo de la precipitación que se obtiene de las simulaciones del modelo WRF (Figura 3).

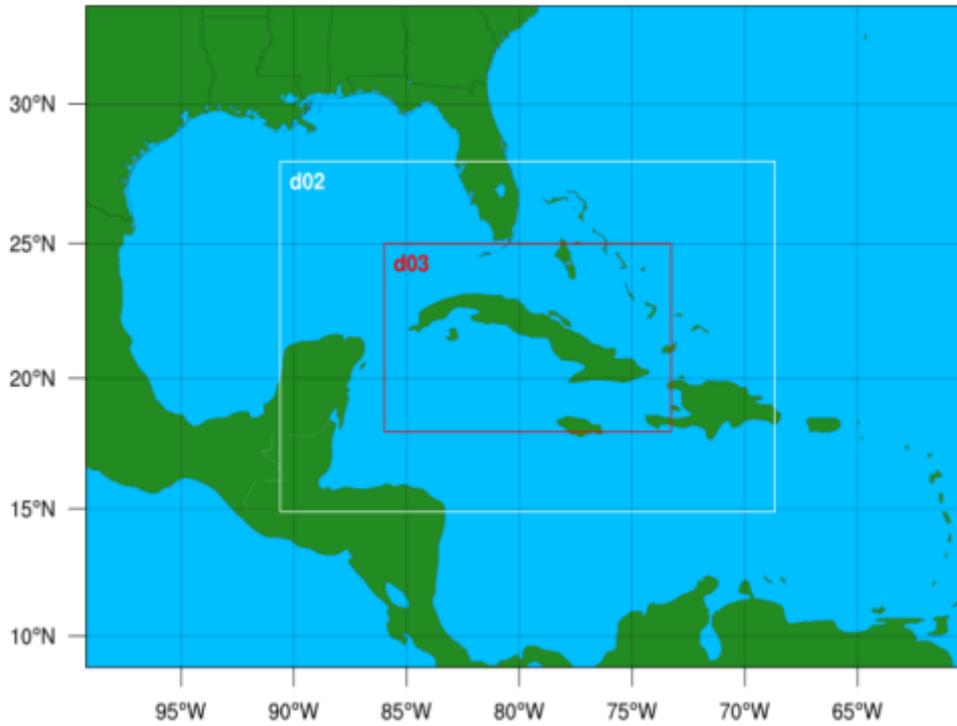
### Verificación del modelo WRF

En la actualidad existen diversos tipos de pronóstico y junto con ellos diversos métodos de evaluación. Hoy en día no se ha desarrollado ningún protocolo de evaluación para estos modelos, siendo una tarea pendiente y necesaria. La mayoría de los estudios científicos dedicados a la evaluación se destacan por resultados cualitativos, y en aquellos donde se cuantifica el análisis optan por el uso de estadísticos simples como el error cuadrático medio, el error medio absoluto o el sesgo.

**Tabla 2.** Características de las simulaciones realizadas

Modelo	WRF versión 3.5 (núcleo dinámico ARW)
Cantidad de Dominios	3
Resoluciones espaciales de los dominios	27, 9 y 3 km (ver figura 1)
Total de horas pronosticadas	36 horas (salidas analizadas solo hasta 24 horas)
Intervalo de tiempo de las salidas	Cada 1 hora (salidas analizadas solo cada 3 horas)
Inicializaciones	Datos análisis del modelo global GFS para los ciclos de las 00 y 12 UTC.
Forzamiento en las fronteras	Cada 3 horas
Tipo de anidamiento	Dominio de 27 km – 9 km (Two-way nesting)

	Dominio de 9 km – 3 km (One-way nesting)
--	---



**Figura 1.** Dominios de la configuración

### Verificación puntual

Para la verificación presentada para el modelo WRF y el análisis de los errores de estimación de la precipitación del radar meteorológico se decidió utilizar el error medio absoluto (MAE) y el sesgo (BIAS). Estos índices permiten medir el promedio del grado de correspondencia entre pares individuales de valores pronosticados y valores observados.

Error medio absoluto (2) (MAE):

$$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|\phi_i - \phi_{i\text{ obs}}|}{N} \quad (2)$$

Donde,

$\phi_i$ - Valor pronosticado en la celda i

$\phi_{i\text{obs}}$ - Valor observado en la celda i

N- Numero de valores analizados

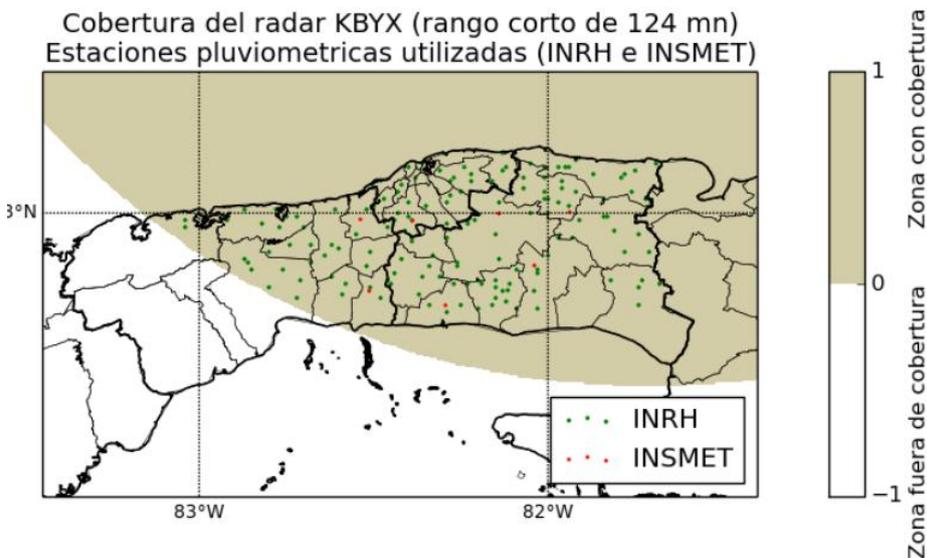
El sesgo (4) (BIAS) da información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable, el BIAS cuantifica el error sistemático del modelo. Pielke lo definió en 1984 como:

$$BIAS = \sum_{i=1}^N \frac{|\phi_i - \phi_{i\text{obs}}|}{N} \quad (3)$$

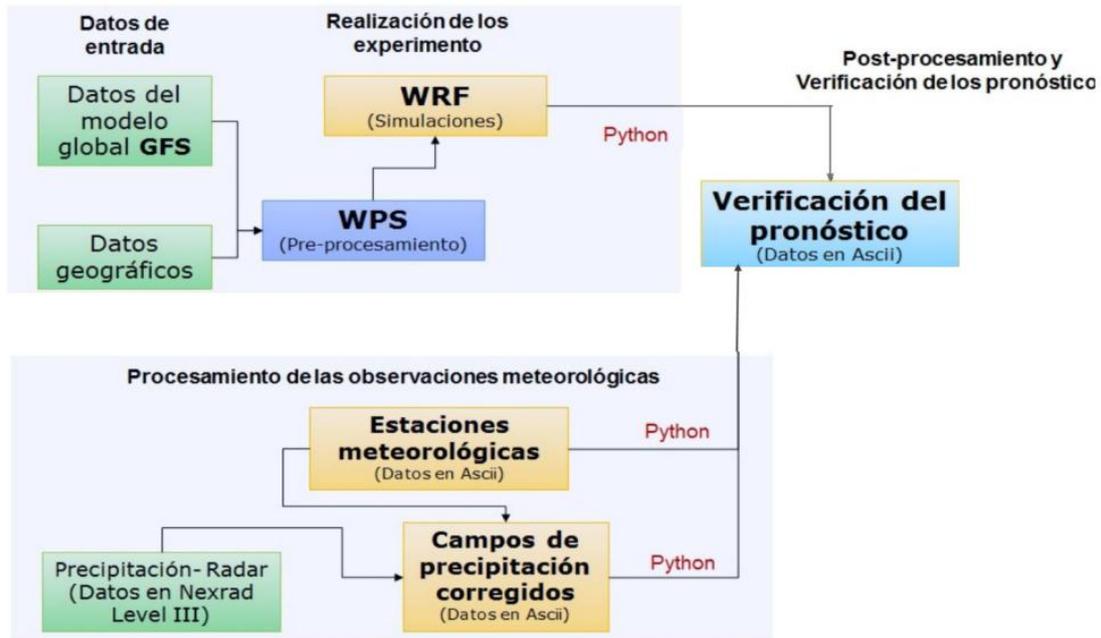
### Verificación espacial

En la actualidad, los métodos tradicionales empleados en la verificación de los pronósticos no son suficientes para satisfacer la demanda de información, además, no proporcionan información alguna sobre la forma en que el pronóstico fue erróneo, por lo que es difícil determinar la causa del error y realizar el posterior análisis y mejoramiento del modelo.

Por estas razones, en los últimos años los métodos de verificación de los pronósticos procedentes de los modelos numéricos tienden a hacerse cada vez más complejos. Uno de ellos son los llamados métodos de evaluación espacial, los que presentan una gran importancia en la evaluación del pronóstico de las lluvias.



**Figura 2.** Distribución de los pluviómetros y estaciones meteorológicas



**Figura 3.** Esquema donde se explica la metodología empleada

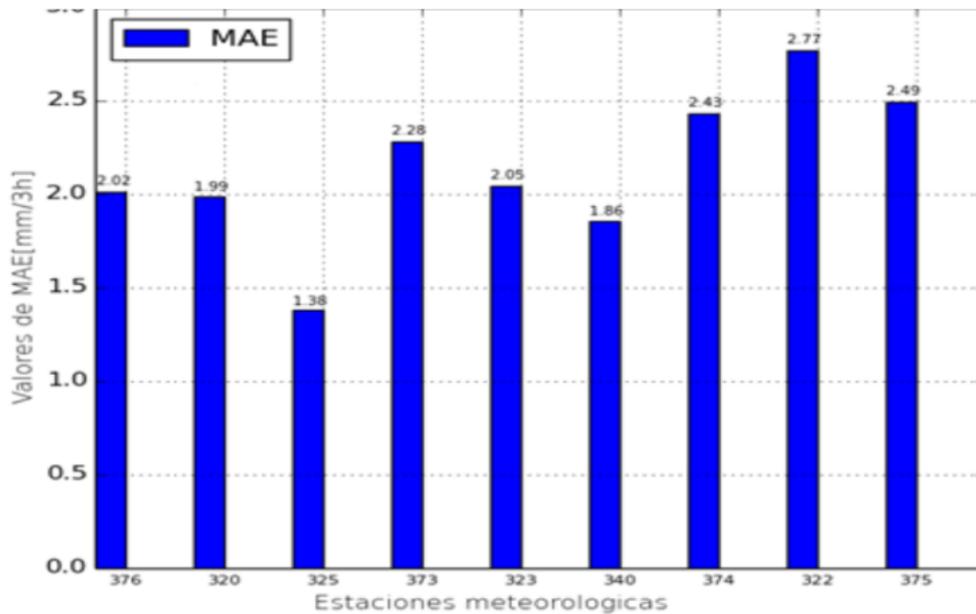
Para esta investigación la verificación espacial de los acumulados de precipitación se realiza mediante una comparación entre la malla de las salidas del pronóstico numérico y las mallas de las observaciones del radar meteorológico. Esta verificación malla-malla se realiza aplicando una máscara la cual descarta los nodos que quedan fuera de la zona de cobertura del radar. De esta forma se procesa toda la información de los valores medios de ambas mallas, donde para esto se emplea el índice estadístico BIAS y MAE.

## Resultados y Discusión

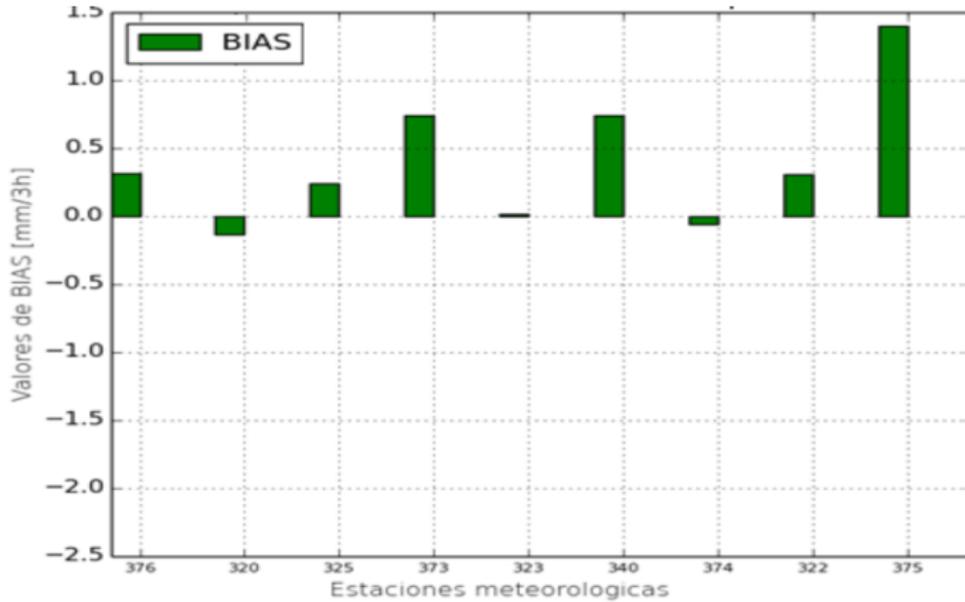
En este capítulo se hace una descripción de los resultados obtenidos analizando el comportamiento de los errores medios absolutos (MAE), error relativo medio y del sesgo (BIAS) del modelo WRF, para acumulados cada 3 horas a partir de los acumulados estimados por el radar meteorológico de Cayo Hueso sin corregir y estos mismos acumulados corregidos mediante dos métodos. Para el caso de acumulados en 24 horas se calculan estos estadígrafos a partir de las estimaciones del radar sin corregir.

### Análisis de los estadígrafos MAE y BIAS del Radar Meteorológico de Cayo Hueso (KBYX) para precipitación acumulada en 3 horas

En el análisis de los estadígrafos empleados para comparar los datos pluviométricos y las estimaciones de precipitación del radar meteorológico en los 4 períodos de estudio, se obtuvieron valores relativamente bajos entre los 1.38 y 2.77 mm/3h para el índice MAE, mostrándose el mes de enero de 2013 con los valores más pequeños. Los valores más elevados se produjeron en las estaciones meteorológicas más alejadas del alcance del radar como es el caso de Batabanó (322) y Melena del Sur (375), figura 4. En el caso del índice BIAS analizado para los 4 períodos de estudio, los valores se encontraron entre -0.3 y 1.4 mm/3h, mostrándose los mayores valores en la estación meteorológica de Melena del Sur, por encontrarse como se dijo anteriormente más alejadas del alcance del radar, no obstante, estos resultados permiten confirmar la utilidad que tiene el radar meteorológico de Cayo Hueso para la estimación de los acumulados de precipitación en 3 horas en la región de estudio (figura 5).



**Figura 4.** Error medio absoluto del radar meteorológico de Cayo Hueso para los 4 períodos de manera general



**Figura 5.** BIAS del radar meteorológico de Cayo Hueso para los 4 períodos de manera general

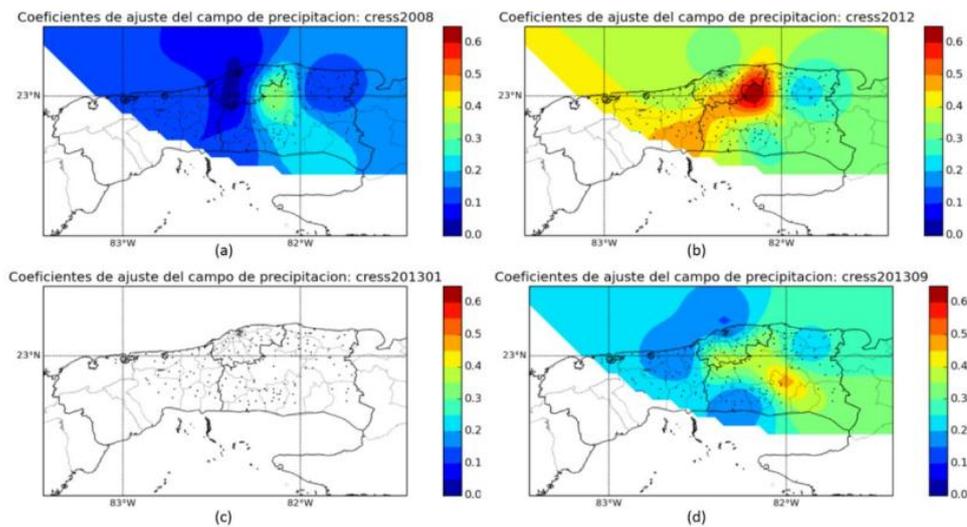
### **Corrección de las estimaciones del Radar Meteorológico de Cayo Hueso (KBYX) para precipitación acumulada en 3 horas (h)**

Como la distribución de las estaciones no presenta una forma uniforme y no tiene una organización homogénea se decidió utilizar uno de los métodos más usados en la interpolación de datos meteorológico: el método de interpolación de Cressman y el método de interpolación de Cressman modificado en el cual se tiene en cuenta la influencia del relieve. El código fuente de la implementación de estos métodos (Borrajero, 2016, comunicación personal), está basado en el lenguaje de programación C. Con estos dos métodos se pudo apreciar una mejor representación de las mallas de coeficientes generados a partir de los coeficientes calculados para cada estación

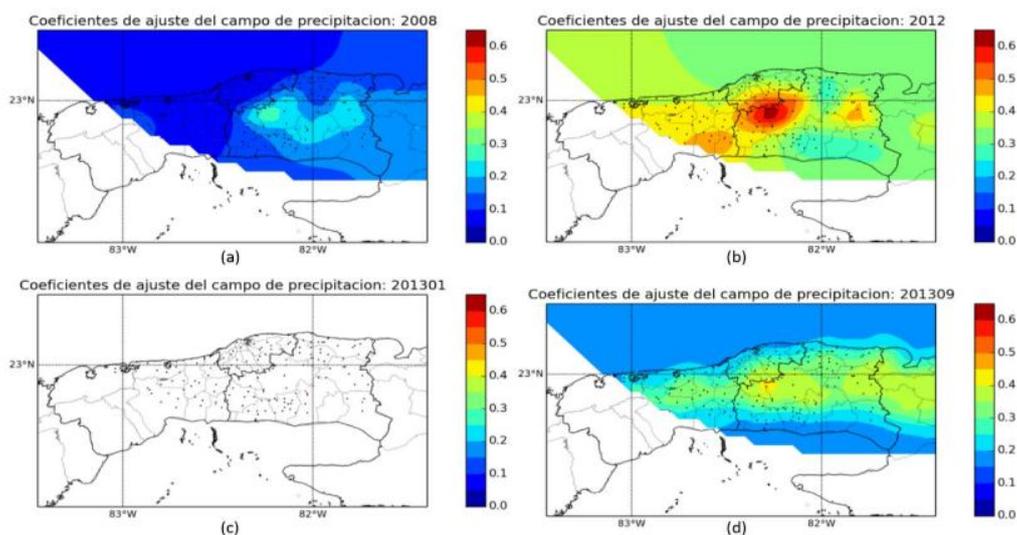
### **Coefficientes de ajustes**

Para poder realizar la corrección del radar se calcularon los coeficientes de ajuste, que para el caso de acumulados en 3 horas mostraron valores entre 0 y 0,6. En las figuras 6 y 7 se muestran el comportamiento de los coeficientes en cada período de estudio utilizando el método de Cressman y el de Cressman modificado respectivamente; donde se puede apreciar como existen áreas donde las diferencias entre los acumulados del radar y las estaciones meteorológicas, son menores coincidiendo estas áreas con las zonas de mayor elevación en el terreno, así como la zona de confluencia del flujo a mesoescala donde

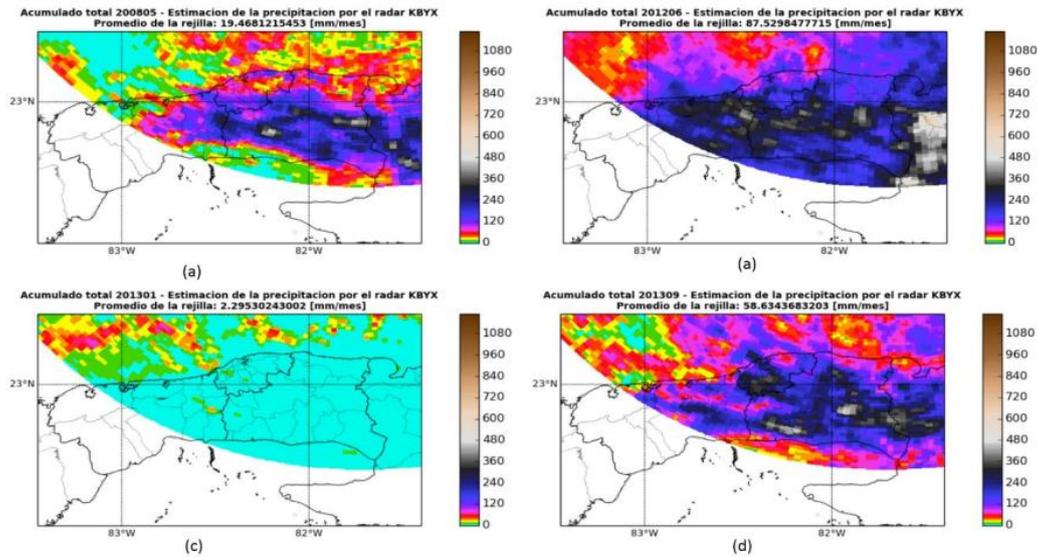
ocurrieron los mayores acumulados de precipitación en los períodos analizados. En el caso del mes de enero 2013 los coeficientes de ajuste tomaron valores cero para toda el área, (Figura 6c y 7c) lo que se debe a que en ninguna estación meteorológica se reportó precipitación, esto también se pudo corroborar con los datos del radar, el que muestra que los acumulados de este mes se concentraron sobre el Estrecho de la Florida, alejado de las estaciones meteorológicas utilizadas en la investigación (Figura 8c).



**Figura 6.** Coeficientes de ajuste para acumulados en 3 h utilizando el método de Cressman: a) mayo 2008, b) junio 2012, c) enero 2013, d) septiembre 2013



**Figura 7.** Coeficientes de ajuste para acumulados en 3 h utilizando el método de Cressman modificado: a) mayo 2008, b) junio 2012, c) enero 2013, d) septiembre 2013



**Figura 8.** Acumulados mensuales según el radar meteorológico: a) mayo 2008, b) junio 2012, c) enero 2013, d) septiembre 2013

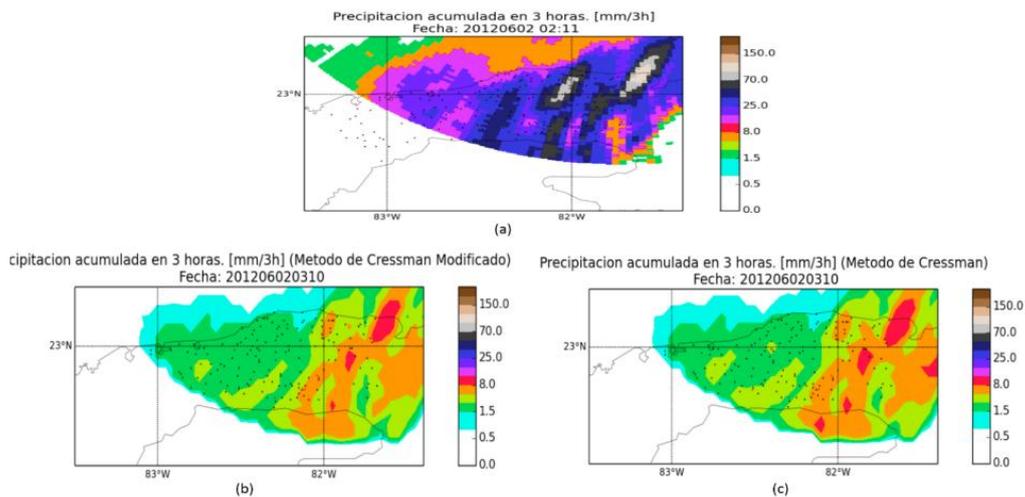
### Corrección de los datos del radar meteorológico

Luego de tener los coeficientes entre las estaciones y el radar para cada mes se pasó a la multiplicación de la malla de los coeficientes de ajuste por la malla de los acumulados del radar para corregir la lluvia estimada mediante el método de Cressman y Cressman modificado.

Esto mostró que con ambos métodos, se aprecia una gran correspondencia con lo que estimaba el radar meteorológico pues se mantenía la similitud espacial con las áreas de acumulados que el radar estimaba (Figura 9 y 10), en el caso del método de Cressman modificado se ve una mejor representación de las áreas de menores acumulados teniendo una mejor representación espacial de las lluvias sin eliminar áreas de lluvia estimadas por la estimación original (Figura 9b y 10b); sin embargo en la figura 9c y 10c se puede observar que el método de Cressman clásico tiende a suavizar menos los campos, reflejando mejor la intensidad de los acumulados, pues mantiene las áreas de máximos acumulados a pesar de que se disminuya la intensidad de la lluvia, concentrando núcleos de precipitación y generando un gradiente hacia la periferia de las tormentas. En ambos métodos se corrige la sobrestimación que realiza el estimado de precipitación calculado a partir de la observación del radar. Las imágenes muestran las correcciones de los días 2 de junio del 2012 y 8 de septiembre del 2013 escogidos por la representatividad de los acumulados de manera espacial que cubre una gran parte del área de estudio, así como por la intensidad de estos.

**Análisis de los estadígrafos MAE y BIAS de los acumulados de precipitación en 3 horas utilizados para verificar el pronóstico del modelo WRF**

Después de corregido el campo de precipitación estimado por el radar meteorológico de Cayo Hueso, se calcularon los estadígrafos MAE y BIAS para las salidas del modelo WRF; en un primer análisis se utilizaron los datos de precipitación estimadas por el radar y para un segundo análisis se utilizaron los datos del radar ya corregidos; esto nos permite apreciar el comportamiento del pronóstico cuantitativo de la precipitación del modelo para los acumulados de precipitación cada 3 horas.



**Figura 9.** Corrección del Radar Meteorológico KBYX para el 2 de junio del 2012: (a) observación real, (b) Método de Cressman Modificado, (c) Método de Cressman

**Análisis de los estadígrafos correspondientes a las simulaciones inicializadas a las 0000 UTC**

Para el primer análisis de las salidas del modelo WRF se apreció un comportamiento similar de los errores en cada uno de los meses de estudio tomando valores cercanos al cero en las primeras horas de pronóstico y con una tendencia al aumento de estos errores mientras avanzan las horas. Los valores de los errores oscilan entre 0-3 mm/3h para el dominio de 3Km (D03) de resolución espacial, mostrándose en la tabla 3 los valores del índice MAE promediados mensualmente para todos los plazos de pronóstico.

**Tabla 3.** Promedios mensuales de MAE, para el dominio de 3km

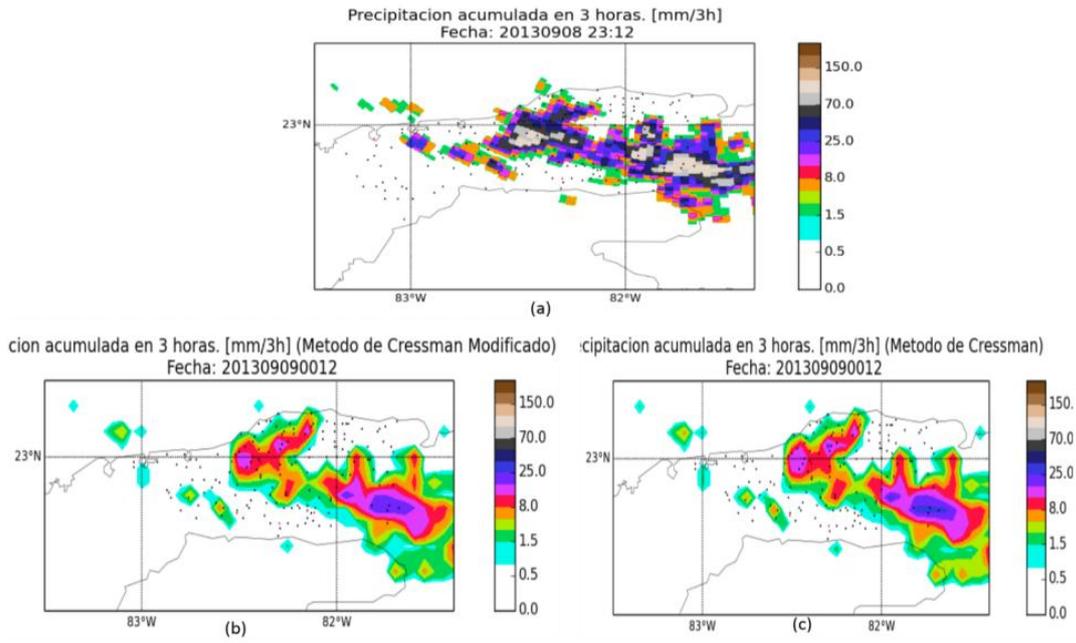
MESES	MAE (MM/3H)
MAYO 2008	0.4
JUNIO 2012	1.1

ENERO 2013	0.2
SEPTIEMBRE	0.8

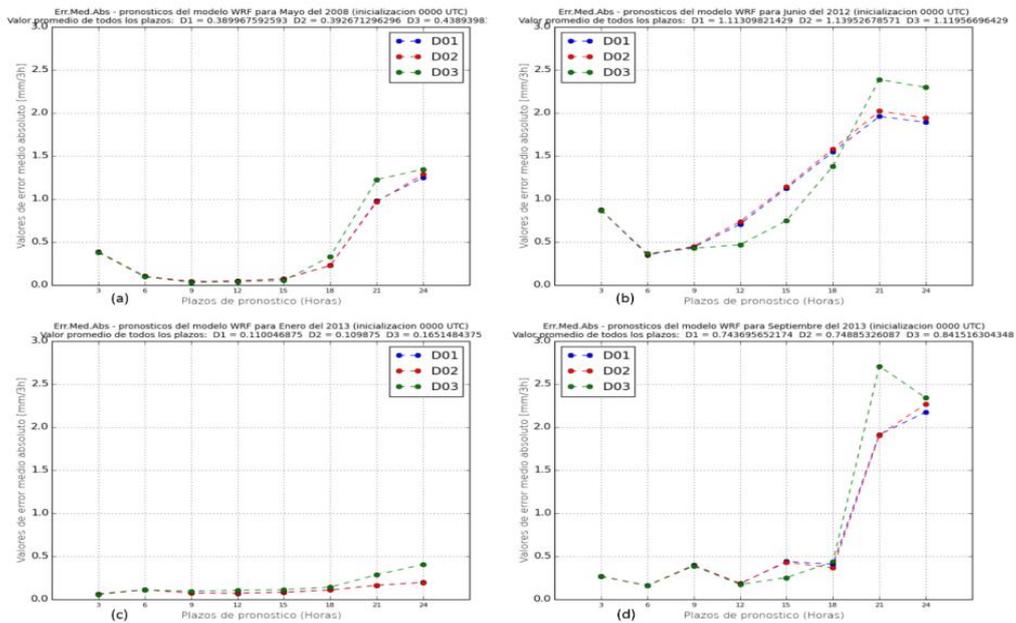
Para el caso de los restantes dos dominios 27 Km (d-01) y 9 Km (d-02) los errores que presenta el modelo WRF son relativamente menores manteniendo la misma tendencia al aumento en el transcurso de las horas de pronóstico, esto se debe a que en los modelos numéricos a medida que se aumenta la resolución espacial se tiene una mayor sensibilidad a procesos a escala local y a la influencia del ruido numérico, el cual aumenta con la resolución espacial (Figura 11) Cuando se analiza el BIAS por cada mes examinado, se puede observar que toma valores entre -1 y 1 mm/3h, con una tendencia a sobrestimar los valores de la precipitación en las últimas horas de pronóstico, figura 12; mostrando además que entre las 6 y las 15 horas, los pronósticos de precipitación son más confiables ya que los valores son próximos a cero.

Para el segundo análisis de los errores del modelo WRF donde se utilizan los datos del radar meteorológico ya corregido, se obtuvo que para ambos métodos (Cressman y Cressman modificado) el error medio absoluto del modelo presenta una disminución de 0.25 mm/3h, con respecto al obtenido para el caso de los datos del radar sin corregir; manteniendo la misma tendencia del aumento del error a medida que transcurren las horas de pronóstico (Figura 13).

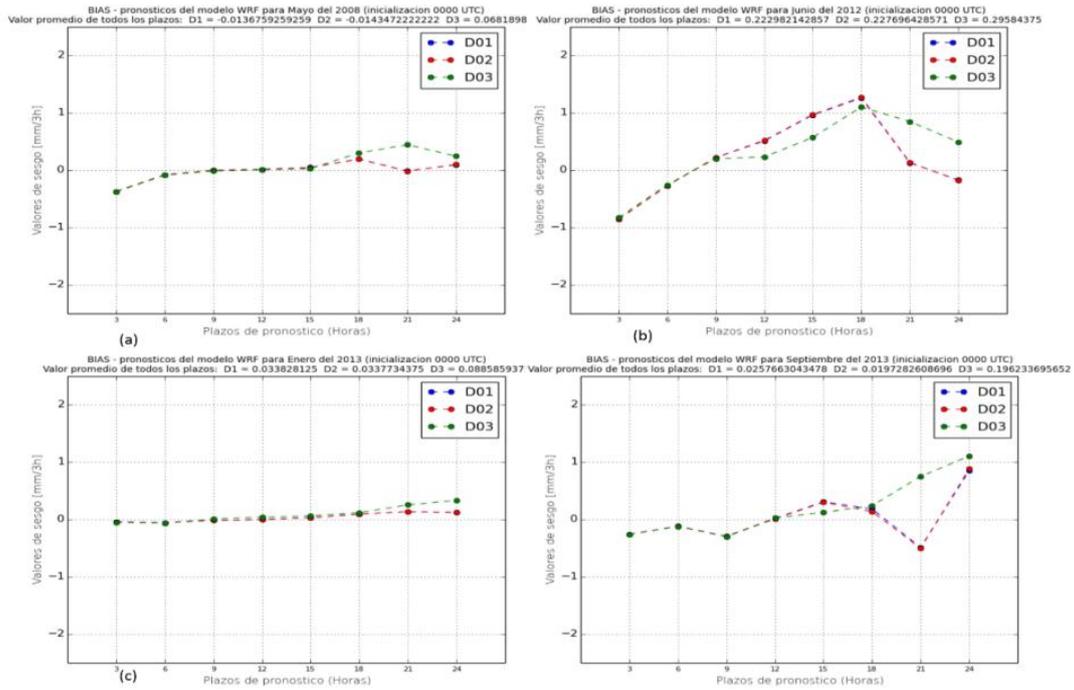
Para este caso el BIAS de las salidas del modelo toma valores entre 0 y 2 mm/3h para cualquiera de los métodos de corrección del radar utilizados; con una tendencia a la sobrestimación de los valores durante todas las horas, dando los mejores pronósticos entre las 3 y las 12 horas (Figura 14).



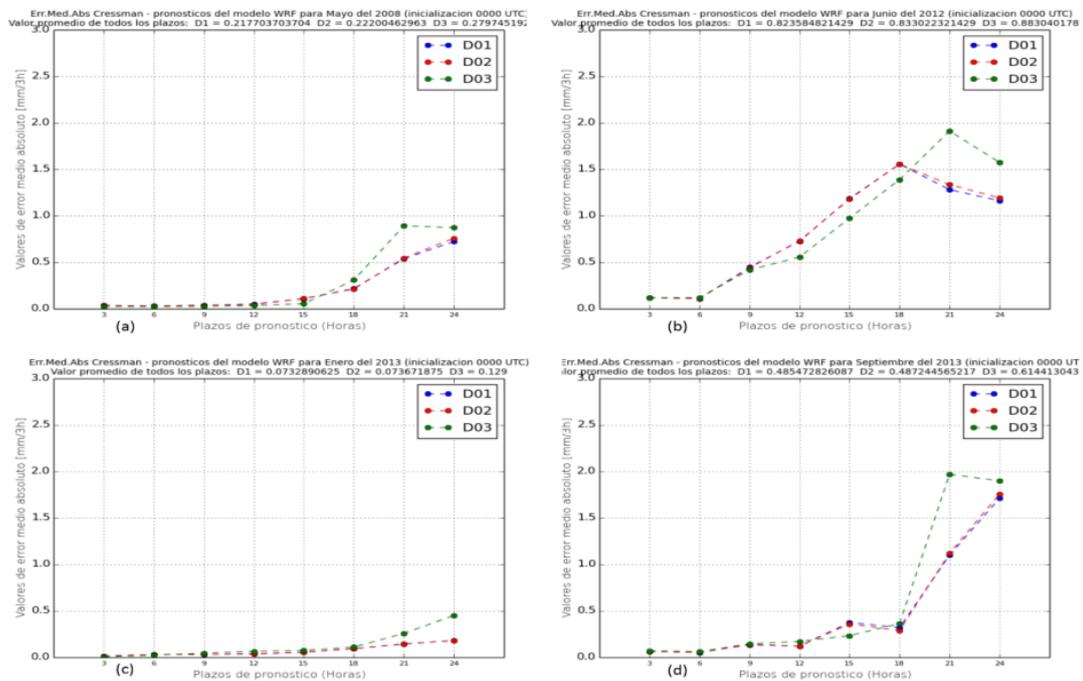
**Figura 10.** Corrección del Radar Meteorológico KBYX para el 8 de septiembre del 2013: (a) observación real, (b) Método de Cressman Modificado, (c) Método de Cressman



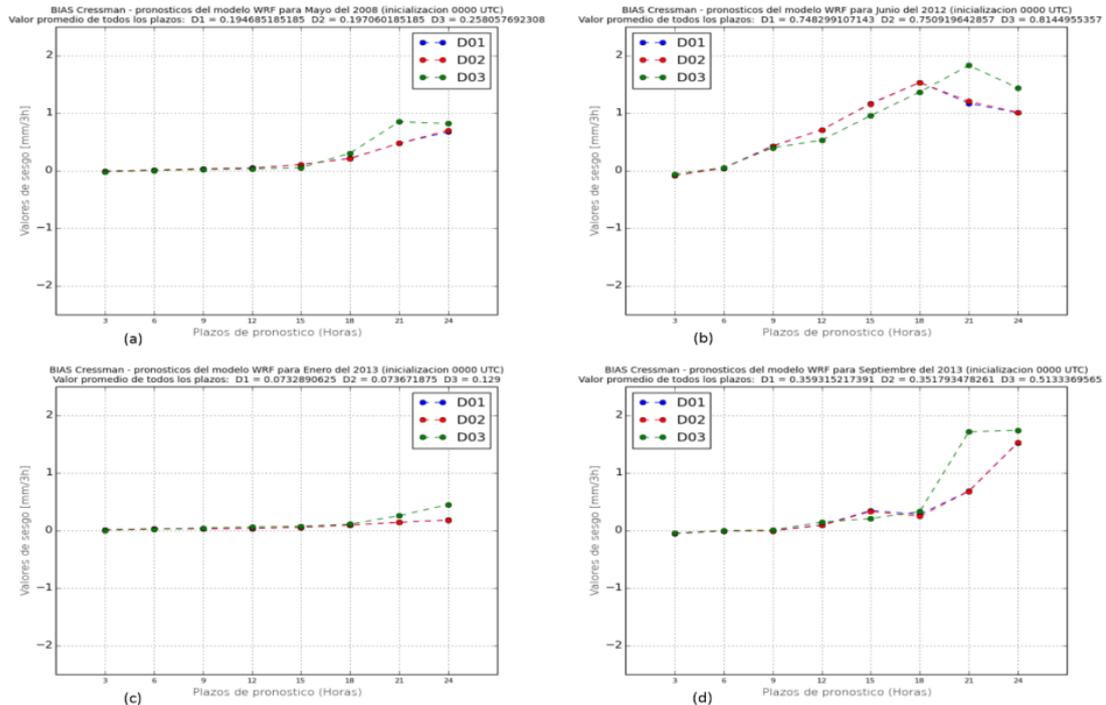
**Figura 11.** Error medio absoluto (MAE) para las 00 UTC; a) mayo 2008, b) junio 2012, c) enero 2013, d) septiembre 2013



**Figura 12.** BIAS para las 00 UTC: a) mayo 2008, b) junio 2012, c) enero 2013, d) septiembre 2013



**Figura 13.** MAE para las 0000 UTC mediante el método de Cressman: a) mayo 2008, b) junio 2012, c) enero 2013, d) septiembre 2013



**Figura 14.** BIAS para las 0000 UTC mediante el método de Cressman: a) mayo 2008, b) junio 2012, c) enero 2013, d) septiembre 2013

### **Análisis de los estadígrafos correspondientes a las simulaciones inicializadas a las 1200 UTC**

En el caso de las corridas inicializadas a las 1200 UTC, se aprecia en el primer análisis de las salidas del modelo, como este toma valores mayores del error medio absoluto que en las corridas inicializadas a las 0000 UTC para iguales plazos de pronóstico, manteniendo un comportamiento similar de las curvas de errores en cada uno de los meses de estudio; pero en este caso los valores más altos se dan en las primeras horas de pronóstico y la tendencia es a la disminución de los errores en el transcurso de las horas. Tanto para el error medio absoluto como para el BIAS su comportamiento coincide con el comportamiento de las precipitaciones y su relación con el ciclo diurno, coincidiendo que en este caso la mayor actividad convectiva se encuentra en los plazos intermedios de las simulaciones inicializadas a las 1200 UTC, mientras que en el caso de las inicializadas a las 0000 UTC ocurre esto hacia los plazos finales de las simulaciones.

Los errores oscilan entre 0 y 3 mm/3h para el dominio de 3Km (d-03) de resolución, mostrándose en la tabla 3 los valores promedios mensuales para todas las horas de pronóstico (Tabla 4)

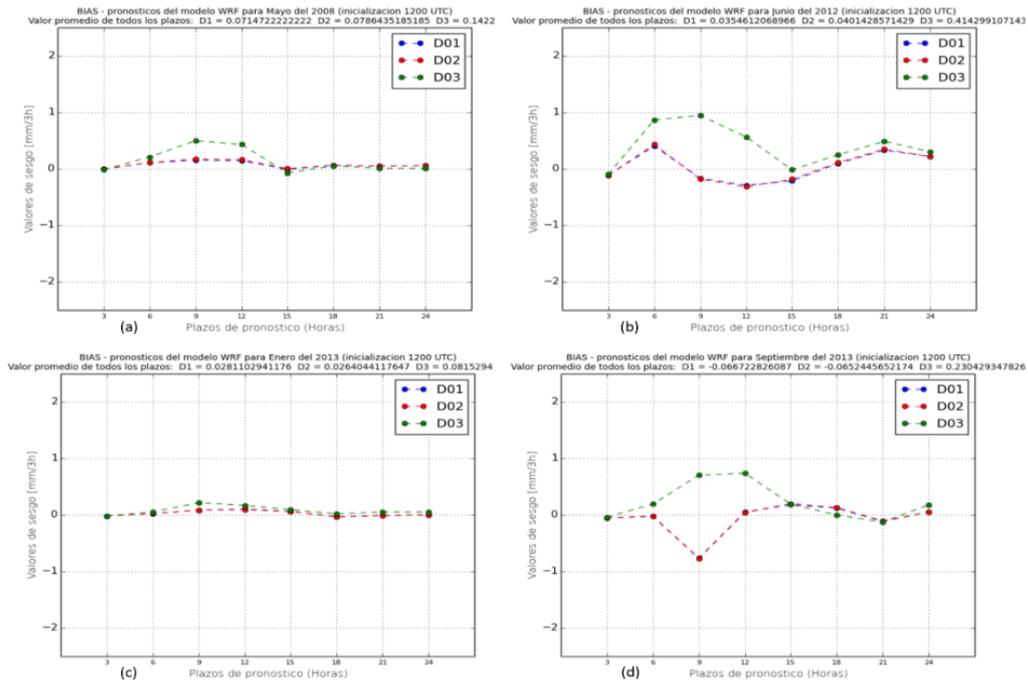
**Tabla 4.** Promedios mensuales de MAE, para el dominio de 3km

<b>MESES</b>	<b>MAE (MM/3H)</b>
MAYO 2008	0.4
JUNIO 2012	1.2
ENERO 2013	0.2
SEPTIEMBRE	0.9

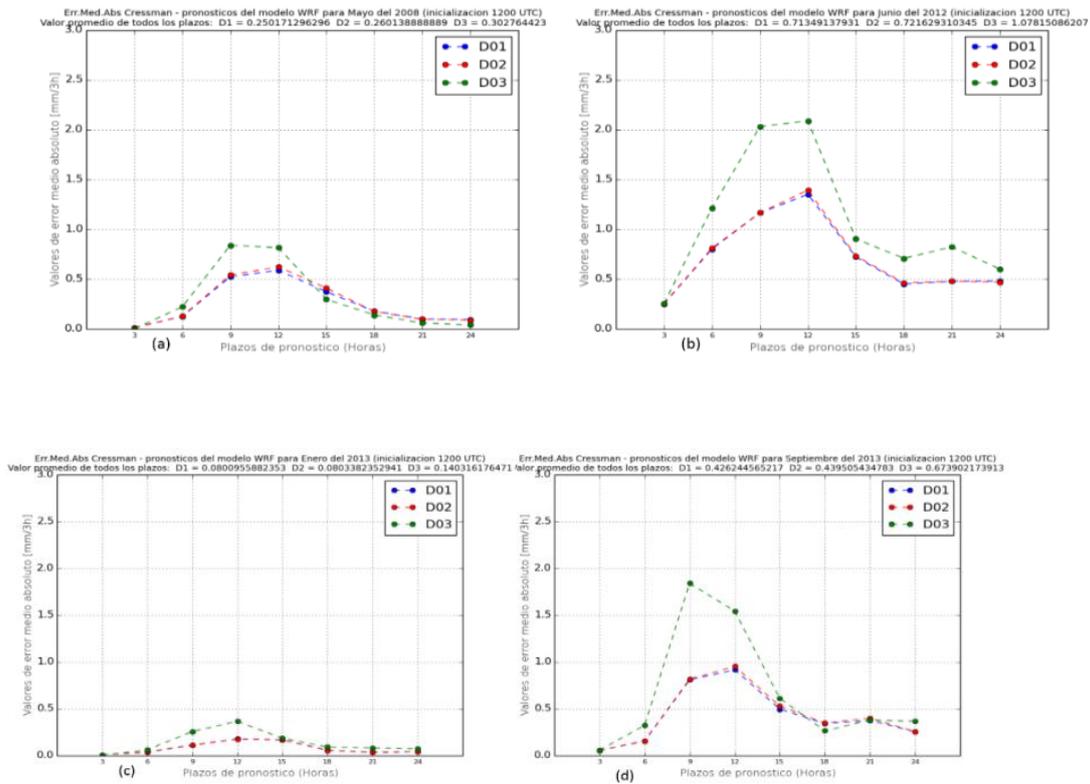
Para el resto de los dominios de 27 Km (D01) y 9 Km (D02) los valores del error medio absoluto son menores o igual que para las simulaciones inicializadas a las 0000 UTC (Figura 15).

Cuando analizamos el BIAS (o sesgo) para las corridas inicializadas a las 1200 UTC podemos ver que toma valores entre -1 y 1 mm/3h, con una tendencia a sobrestimar los valores de la precipitación al igual que en las inicializadas a las 0000 UTC, pero en este caso en las primeras horas de pronóstico, lo que se representa en la figura 16. Entre las 15 y 24 horas los valores de BIAS son más cercanos a cero.

Para el segundo análisis en el caso de la corrida a las 1200UTC, se obtuvo que mediante ambos métodos de corrección, el error medio absoluto el modelo presenta una disminución de 0,2 mm/3h con respecto al comportamiento del mismo índice obtenido al realizar la comparación con los datos del radar sin corregir. Se observa como mantiene una tendencia a la disminución del error a medida que aumentan las horas de pronóstico y tomando valores mayores para los meses de junio y septiembre (Figura 17).

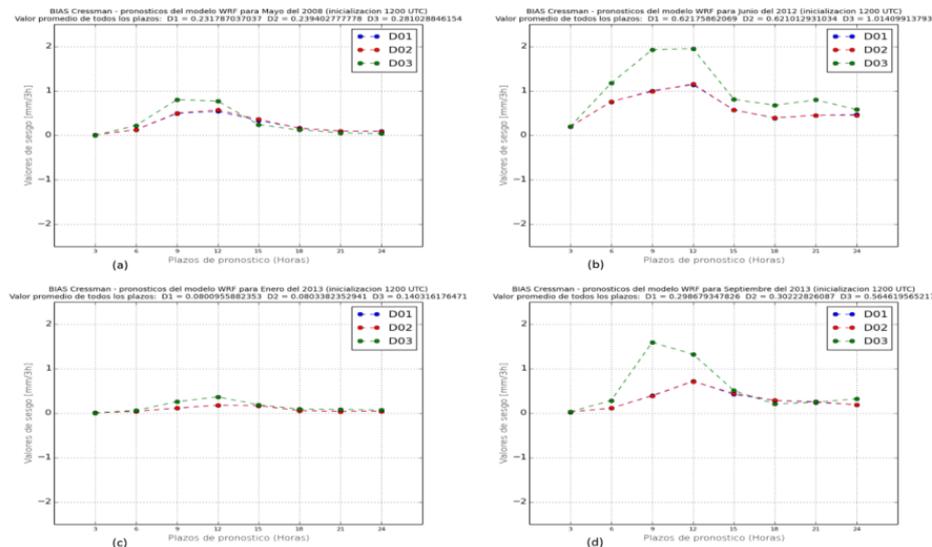


**Figura 16.** BIAS para las 12 UTC: a) mayo 2008, b) junio 2012, c) enero 2013, d) septiembre 2013



**Figura 17.** MAE para las 1200 UTC mediante el método de Cressman: a) mayo 2008, b) junio 2012, c) enero 2013, d) septiembre 2013

En el caso del índice BIAS vemos como toma valores entre 0 y 2.1 mm/3h, con una tendencia a la sobrestimación en todas las horas de pronóstico pero disminuyendo su valor y haciéndolo cercano a cero en las últimas horas (Figura 18).



**Figura 18.** BIAS para las 0000 UTC mediante el método de Cressman: a) mayo 2008, b) junio 2012, c) enero 2013, d) septiembre 2013

## Conclusiones

Al verificar el modelo WRF se encontró que:

- El pronóstico cuantitativo de la precipitación del modelo WRF tiende a reflejar una sobrestimación de los valores de esta variable, dando una buena representación espacial de la misma.
- De los métodos utilizados para corregir los productos de estimación de la precipitación el método de Cressman ajusta mejor a los núcleos de máximos acumulados.
- La precipitación acumulada en 3 horas pronosticada por el modelo WRF refleja una tendencia a sobreestimar los valores de dicha variable.
- Los valores del error medio absoluto de las salidas del modelo comparadas con los datos corregidos de estimación de la precipitación a partir del radar meteorológico, mostraron una disminución de 0,25 mm/3h.
- El pronóstico cuantitativo de la precipitación del modelo WRF es más factible entre las 6 y 15 horas de los plazos de pronóstico.

- Las simulaciones del modelo WRF inicializadas a las 1200 UTC presentan los mayores valores de error medio absoluto.

## Referencias

- Cressman, G. P., 1959: "An operational objective analysis system." *Mon. Wea. Rev.*87, 367-374.
- Díaz O., Sierra M. et al. (2013): "Asimilación y desarrollo de métodos de evaluación de pronóstico numérico para Cuba y Mares Interamericanos". Proyecto: "Actualización de la distribución espacial de las tormentas eléctricas en Cuba". Código Agencia: 300.20455.
- Mesoscale & Microscale Meteorology Division. 2014. ARW Version 3 Modeling System User's Guide. Complementary to the ARW Tech Note, 411pp. NCAR: Boulder, Colorado, USA. Web: <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/userguide3/ARWUsersGuideV3.pdf>
- Mitrani, I., I. Borrajero, A. Bezanilla (2006): "Pronóstico de lluvia sobre territorio cubano al paso de los huracanes Charley e Iván, usando MM5V3". *Climate Variability and Change-Hydrological Impacts (FRIEND 2006, Havana, Cuba)*. IAHS Publ. No.308, ISSN: 0144-7815.:201-206, November2006.
- Reggiani, P. and A. H. Weerts (2008): *Probabilistic Quantitative Precipitation Forecast for Flood Prediction: An Application*. American Meteorological Society. Volume 9, February 2008.
- Rezacova et al. (2014): Verification of high resolution precipitation forecast by radar based data.
- Sinclair, G., and G. Pegram, 2004: Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging. *Atmos. Sci. Lett.*,6, 19–22
- Sierra, M., A. Ferrer et al. (2014): "Sistema automático de predicción a mesoescala de cuatro ciclos diarios". Proyecto: "Sistema de Predicción a muy corto plazo basado en el Acoplamiento de Modelos de Alta".