

Evaluación de diferentes configuraciones de WRF para el pronóstico de lluvia en Panamá



CATHALAC
Centro del Agua del Trópico Húmedo
para América Latina y el Caribe

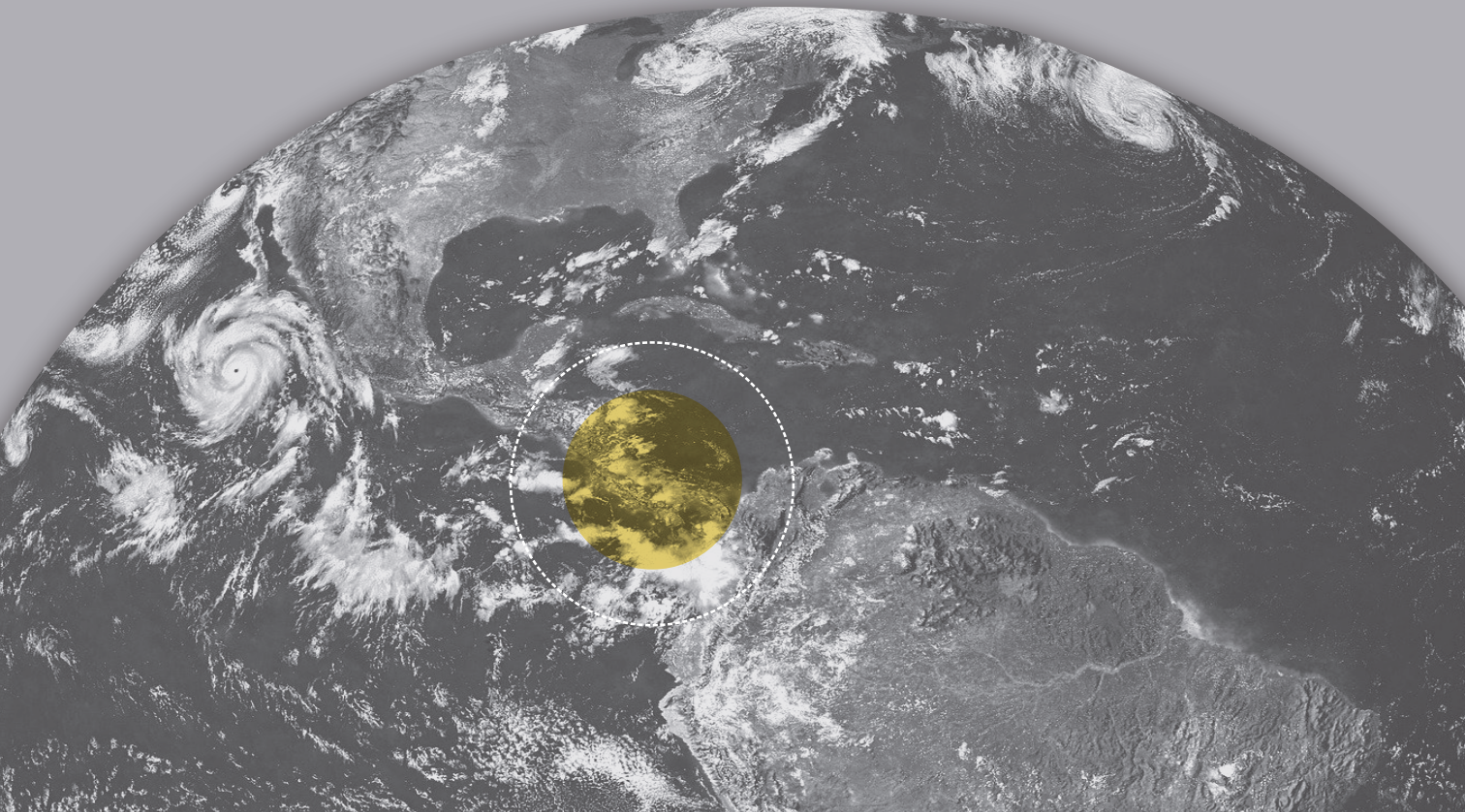


SENACYT
Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación



INSMET

Evaluación de diferentes configuraciones de WRF para el pronóstico de lluvia en Panamá



CATHALAC
Centro del Agua del Trópico Húmedo
para América Latina y el Caribe



SENACYT
Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación



INSMET

Este trabajo se pudo llevar a cabo gracias a la subvención de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Panamá (SENACYT), para la ejecución del proyecto “Análisis del Modelo Numérico WRF-ARW para la predicción de lluvia a escala de cuencas en Panamá”. Este proyecto contó también con la participación del Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología de la República de Cuba (INSMET).

Las opiniones expresadas en esta publicación, no reflejan necesariamente los puntos de vista de SENACYT.

Esta publicación puede ser reproducida en su totalidad o en parte, y en cualquier forma, para fines educativos o sin fines de lucro, sin permiso especial del titular de los derechos de autor, siempre que se cite la fuente.

El Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC), agradecerá recibir una copia de cualquier publicación que utilice este documento como fuente. Ningún uso de esta publicación puede ser para su venta o para cualquier otro propósito comercial.

Copyright (derechos de autor) © 2020, CATHALAC, SENACYT, INSMET

ISBN: 978-9962-674-14-6

Autores: Maibys Sierra, Arnoldo Bezanilla Morlot, Abel Centella Artola, Anisbel León Marcos, Israel Borrajero Montero, Adrian Ferrer Hernández (Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, INSMET, Cuba), Jesús Leonel Salazar-Gaitán (Sección de Recursos Hídricos, Autoridad del Canal de Panamá); Alcely Lau-Melo (Dirección de Hidrometeorología, Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A., Panamá); Freddy Picado Traña, Joel Pérez Fernández) Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe - CATHALAC).

Diseño e Impresión: De Todo en Mercadeo (DTEM)

Para mayor información:

Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y El Caribe (CATHALAC www.cathalac.int
Secretaría de Ciencia, Innovación y Tecnología (SENACYT) www.senacyt.gob.pa
Instituto de Meteorología de la República de Cuba. www.insmet.cu



CATHALAC es un organismo internacional con sede en la ciudad de Panamá, establecido en 1992 para promover el desarrollo sostenible en los países del trópico húmedo de América Latina y el Caribe, por medio de la investigación aplicada, la educación y la transferencia de tecnología de los recursos hídricos y el ambiente. Las áreas de trabajo de CATHALAC se enfocan en lo siguiente: Gestión integrada de cuencas, gestión de riesgo, cambio climático y modelación y análisis ambiental.



La Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de la República de Panamá es una institución autónoma, que fue creada por la Ley 13 de 15 de abril de 1997, modificada posteriormente por la Ley 50 de 21 de diciembre de 2005 y por la Ley 55 de 14 de diciembre de 2007, que le confirió autonomía a la institución en sus tareas administrativas. Todas las actividades, proyectos y programas de la SENACYT, tienen como objetivo fortalecer, apoyar, inducir y promover el desarrollo de la ciencia, la tecnología y la innovación con el propósito de elevar el nivel de productividad, competitividad y modernización en el sector privado, el gobierno, el sector académico-investigativo, y la población en general.



La Misión principal del Instituto de Meteorología es suministrar información meteorológica y climática autorizada, confiable y oportuna sobre el estado y comportamiento futuro de la atmósfera. Esta información está dirigida a velar por la seguridad de la vida humana y a reducir las pérdidas de bienes materiales ante desastres naturales de origen meteorológico, contribuyendo directamente al bienestar de la comunidad y al desarrollo sostenible.

INDICE CONTENIDO

7	Resumen
8	1. Introducción
9	2. Configuraciones del Modelo, datos y métodos utilizados
11	2.1 Datos disponibles
13	2.2 Metodología
13	3. Discusión de resultados
13	3.1 Análisis de situación sinóptica
15	3.2 Correspondencia entre la precipitación estimada de GPM y los reportes de las estaciones en superficie
16	3.3 Verificación de precipitación
23	3.4 Verificación con un sondeo atmosférico
25	4. Conclusiones
26	Agradecimientos
27	Acrónimos y Abreviaturas
27	Referencias



Evaluación de diferentes configuraciones de WRF para el pronóstico de lluvia en Panamá

Resumen

Un conjunto de 15 combinaciones de microfísica y parametrizaciones de cúmulos para el modelo numérico WRF, se probaron en el pronóstico de un evento de lluvia del 16 de enero del 2018 sobre Panamá. Para evaluar el rendimiento de cada configuración, se utilizaron los datos de satélite GPM, los sondeos de aire superior y las estaciones meteorológicas sobre el área de estudio.

Se utilizaron diferentes métricas para obtener las configuraciones que produjeron los mejores pronósticos. El análisis mostró una fuerte fluctuación en el ciclo diurno de la precipitación de una región a otra. Del conjunto de pruebas realizadas, el esquema de ajuste convectivo de Betts-Miller-Janjic (BMJ) con Morrison produjo ligeramente mejores resultados

cuando se comparó con las otras combinaciones en la representación del ciclo diurno de la precipitación para algunas de las áreas del dominio estudiado. Seguida por Thom-Gr, WSM6-BMJ y WSM6-KF.

Aunque los experimentos tuvieron un mejor desempeño pronosticando sobre el mar, no pudieron igualar los valores más altos del total de precipitación. Con respecto a la distribución espacial de la lluvia, todas las combinaciones usando BMJ con cualquier esquema de cúmulo, muestran las mejores habilidades, principalmente en el área que comprende el Canal de Panamá, mientras que los demás experimentos, tienden a sobrestimar la lluvia. Finalmente, la mayoría de experimentos con BMJ mostraron el factor de correlación más alto y un mejor desempeño representando los perfiles verticales de humedad relativa, temperatura y viento.

1. Introducción

Los eventos de lluvia se encuentran entre los fenómenos que causan impactos negativos significativos en la economía y la sociedad. Este tipo de eventos son bastante frecuentes en Panamá, donde actividades importantes nacionales y regionales, como las operaciones en el Canal de Panamá o el Centro Internacional de Vuelos de COPA, han sido afectados a menudo. Por lo tanto, la implementación de un sistema numérico de pronóstico del tiempo se convierte en una contribución de alta prioridad para la mejora de los mecanismos de alertas tempranas y el desarrollo de nuevos servicios climáticos orientados a la energía, la agricultura y el sector transporte.

Panamá, un país relativamente pequeño ubicado en el extremo sur de Centroamérica, es frecuentemente afectado por eventos de lluvia de diferentes niveles de magnitud. En un sentido general, se producen grandes cantidades de precipitación durante todo el año aunque son más frecuentes en verano. Los Sistemas meteorológicos a gran escala, tales como disturbios asociados con la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y frentes fríos que penetran desde altas latitudes al norte, aparecen como dos de los principales sistemas de circulación que desencadenan la actividad convectiva [1][2]. La estrecha y alargada posición del país entre el Océano Pacífico y el Mar Caribe, así como el transporte de humedad desde ambos cuerpos de agua, también son un factor clave [3]. Finalmente, la influencia de la orografía sobre la convergencia de bajos niveles,

tiende a aumentar la actividad de la convección y favorece la aparición de fuertes lluvias. Como ha sido señalado por [4][5], una importante actividad convectiva se lleva a cabo sobre la ensenada de Panamá, con fuertes lluvias después del medio día sobre el istmo de Panamá.

Los episodios de precipitación y particularmente los eventos de lluvia, son muy difíciles de predecir a plazos cortos en una región compleja como Panamá, donde interactúan varios mecanismos diferentes. A pesar de que los modelos de predicción numérica global del tiempo han mejorado continuamente durante los últimos años, su baja resolución les impide producir un pronóstico razonablemente bueno en regiones tan complejas, donde la convección es un factor crítico. Los modelos regionales que representan explícitamente muchas de estas complejidades, como la convección y las interacciones con fenómenos meteorológicos a gran escala, parecen ser una buena opción para implementar un sistema pronóstico de precipitación [6][7] que pueda producir información útil y relevante para una comunidad de usuarios más amplia, y crear base para el futuro desarrollo de servicios para usuarios finales [8][9][10].

Este trabajo presenta una evaluación de la capacidad del núcleo de investigación avanzada del modelo de Previsión e Investigación Meteorológica (en lo sucesivo denominado WRF) para pronosticar la precipitación sobre Panamá, mediante la exploración

de diferentes configuraciones de modelos basadas en varias combinaciones de parametrizaciones de cúmulos y microfísica. Los resultados del modelo se evalúan exhaustivamente, utilizando observaciones de diferentes fuentes disponibles para encontrar respuestas basadas en la física, a los pronósticos producidos.

El WRF es un modelo regional muy popular y ampliamente utilizado para la investigación [6] [7] [11] y el pronóstico operativo en tiempo real [12] [13] [14] [15] de una variedad de eventos meteorológicos, como la lluvia extrema. A pesar de la gran cantidad de trabajo publicado que se puede encontrar sobre

el uso de este modelo en todo el mundo, solo hay unos pocos estudios en Centroamérica [16] [17] y en particular en Panamá [2].

El documento se ha organizado de la siguiente manera. La Sección 2 ofrece los detalles de la versión WRF empleada en este estudio, así como las diferentes configuraciones de modelo consideradas. Introduce las diferentes fuentes de registros de lluvia y otros datos utilizados para el análisis sinóptico y de procesos. También se explican los métodos aplicados para la verificación y las evaluaciones de sensibilidad. La sección 3 está dedicada a presentar y discutir los resultados obtenidos.

2. Configuraciones del modelo, datos y métodos utilizados

El modelo WRF-ARW V3.8.1 se utilizó para llevar a cabo la simulación de los eventos de precipitación. La inicialización y las condiciones de frontera cada 3 horas, fueron proporcionadas por el Sistema de Pronóstico Global (GFS) de NOAA con resolución de 0.5°. La Figura 1 muestra los tres dominios de simulación definidos, con resoluciones de 27, 9 y 3 km. La verificación se centró en el dominio más interno, es decir, 3 km.

Los detalles principales de la configuración física utilizada para el modelo, se presentan en la Tabla 1. El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) proporcionó datos estáticos seleccionados, con

33 categorías de uso del suelo y una resolución topográfica de 30 s. La malla vertical estaba compuesta de 29 niveles sigma desde la superficie hasta ~ 10 km, usando un espacio más pequeño en los niveles bajos. Esta configuración fue la base para realizar 15 experimentos diferentes resultantes de la combinación de cinco parametrizaciones de microfísica (BMP) y tres parametrizaciones de cúmulos (CU). Los experimentos se desarrollaron siguiendo los resultados de la implementación del sistema de pronóstico operativo establecido en Cuba [12][13][14]. Las simulaciones se llevaron a cabo durante un período de 48 horas a partir del 16 de enero de 2018 a las 0000 UTC.

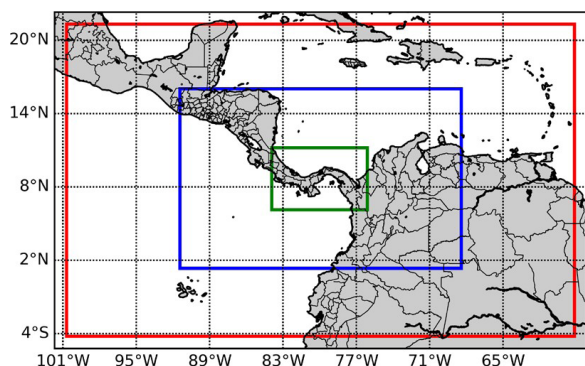


Figura 1. Dominios de las simulaciones sobre Panamá. El cuadro rojo, azul y verde corresponde a las resoluciones de 27, 9 y 3 km, respectivamente. El área cubierta por el cuadro verde, indica la región identificada como el núcleo del área de verificación (CVA).

Tabla 1. Detalles de la configuración física para el modelo WRF-ARW

Proceso	Esquema de parametrización
Radiación de Onda Larga	Esquema RRTM: Modelo de Transferencia Rápida Radiativa [32]
Radiación de Onda Corta	Esquema Dudhia: Esquema de integración descendente que permite eficientemente la absorción y dispersión con nubes y cielo claro. [33]
Capa superficial	Similaridad ETA: Usado en el modelo ETA [34]
Física Superficial	Modelo superficial de Noah: esquema unificado NCEP/NCAR/AFWA con temperatura de suelo y humedad en 4 niveles, cobertura de nieve fraccional y física de suelo congelado. [35]
Capa Límite Planetaria	PBL Escala de eliminación Cuasi-normal

Los esquemas BMP incluyen tres esquemas de un solo momento (Lin[18], WSM6[19] y Thompson[20] [21]) y dos esquemas de doble momento (WDM6[22] y Morrison[23]). En el caso de CU, los esquemas seleccionados fueron el esquema de ajuste convectivo de Betts-Miller-Janjic (BMJ)[24] y los dos esquemas de flujo de masa Grell-Freitas (Gr)[25] y Kain-Frisch (KF)[26].

Los BMP de un solo momento, pronostican el momento de tercer orden de la distribución de tamaño (variables de relación de mezcla de masa) de diferentes categorías de agua. El esquema de Lin, simula cinco clases de hidrometeoros (agua de nube, hielo de nube, lluvia, nieve y granizo). La distribución de tamaño exponencial y la formulación de velocidad terminal, se utilizan para representar solo las partículas de precipitación: lluvia, nieve y granizo, incluido el hielo. WSM6 se basa en WSM5[27], agregando procesos relacionados con graupel. La velocidad terminal para graupel, se calcula usando una expresión ponderada en masa [18][28]. Thompson ha implementado una forma de distribución gamma generalizada para cada hidrometeoro, un parámetro de forma de distribución gamma variable para gotas de agua en la nube, basado en observaciones y el cálculo de la variable de intercepción de lluvia y graupel, dependiendo de las relaciones de mezcla respectivas. Las BMP de doble momento, se desarrollaron para mejorar la representación explícita de nubes y precipitación en modelos atmosféricos de mesoescala. El esquema predice

la evolución de la masa, así como las densidades numéricas de los cinco tipos de hidrometeoros, gotas de nubes, gotas de lluvia, hielo de nubes, nieve y graupel [22][23]. Dado que las concentraciones numéricas de todos estos hidrometeoros se calculan explícitamente, los procesos de nucleación homogéneos y heterogéneos relevantes se han parametrizado, incluida la activación de los núcleos de condensación de nubes, que no se predice en la mayoría de los modelos de resolución de nubes de última generación.

El esquema BMJ de CU, introduce el parámetro “eficiencia de la nube” para calcular el tiempo de relajación y la convección profunda, utilizando estados de referencia específicos en la parametrización de Betts-Miller [29][30]. El esquema de parametrización de Kain-Fritsch, utiliza un modelo de pluma de entrada/salida unidimensional, suponiendo que cualquier mezcla obtiene una flotabilidad negativa/positiva al salir o entrar a la nube. Por otro lado, el esquema de Grell implementado en el modelo WRF,

sigue el método desarrollado para representar una transición suave automática [31] a medida que aumenta la resolución.

2.1 Datos disponibles

La Tabla 2 resume las características relevantes de las diferentes fuentes de datos disponibles que se utilizaron en este trabajo. El reanálisis de ERA-Interim [37], se empleó para la descripción de las condiciones sinópticas durante el día seleccionado. Los datos de precipitación dentro del CVA, provienen de un grupo de 38 estaciones meteorológicas (WS) operadas por La Empresa de Transmisión Eléctrica de Panamá (ETESA) y la Autoridad del Canal de Panamá (ACP). También se utilizaron datos de precipitación de la Misión Global de Precipitación (GPM) [38], considerando su alta resolución espacial y temporal, así como su disponibilidad para el período de tiempo de este estudio, esto permitió que estos datos se compararan de manera muy conveniente con los campos de salida de precipitación del modelo.

Tabla 2. Observaciones meteorológicas y datos utilizados para la verificación

Datos	Descripción	Referencia o proveedor
ERA-Interim	Datos Climáticos de Reanálisis, periodo 1979-31 de agosto de 2019. Son de acceso abierto y gratuito para su descarga y cualquier uso desde los archivos de datos de ECMWF. Utilizan una versión compuesta del Sistema de predicción numérica del tiempo (NWP) para producir datos reanalizados (IFS-CY31r2). Este trabajo usa los campos atmosféricos cada 6 horas de niveles de presión y cada 3 horas para campos en superficie.	ECMWF
Estaciones meteorológicas	38 estaciones meteorológicas automáticas	Empresa de Transmisión Eléctrica S.A. (ETESA)

Datos	Descripción	Referencia o proveedor
GMP_3IMERGHH	Productos GPM IMERG finales de precipitación (versión 06) utilizados bajo una resolución temporal de 30 minutos y resolución espacial de 0.1° X 0.1°. Este es un producto de precipitación de múltiples satélites con cobertura global y es un producto de nivel 3 de NASA que unifica y se calibra internamente a partir de algunas constelaciones y tipos de satélites de varias agencias espaciales.	NASA
Sondeos	Sondeos verticales lanzados desde 8.98 N, 79.57 W, el 17 de enero de 2018, a las 0000UTC	ACP

También se utilizó un conjunto de otros datos meteorológicos, como los sondeos del aire superior proporcionados por la ACP, para evaluar la habilidad del WRF en relación con las características de

precipitación y otros procesos asociados con su formación. La Figura 2 muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas.

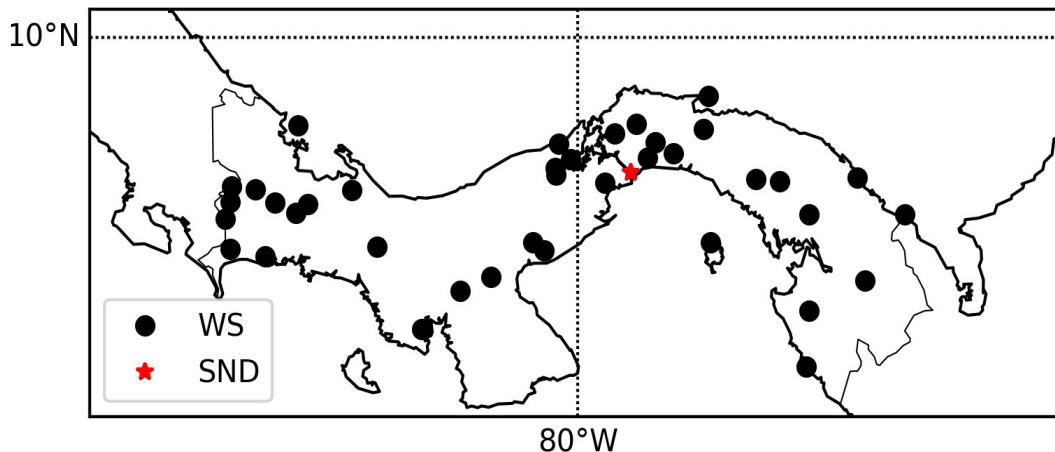


Figura 2. Localización geográfica de las diferentes estaciones meteorológicas de superficie (puntos negros) y sondeos verticales (estrellas rojas) utilizados como fuentes de verificación.

2.2 Metodología

El enfoque metodológico utilizado, incluyó los siguientes pasos: Primero, se realizó una comparación de las 24 horas de precipitación acumulada en las estaciones meteorológicas y sus correspondientes celdas subyacentes de GPM. El objetivo de la comparación, fue evaluar la precisión de GPM para representar el comportamiento de la lluvia sobre Panamá. Los experimentos de WRF se volvieron a interpolar bilinealmente en la cuadrícula del GPM y se compararon estadísticamente, adoptando diferentes métricas ampliamente utilizadas. Estas métricas incluían el coeficiente de correlación de Pearson (r) y un conjunto de índices categóricos [39][40], que se calcularon para explorar el rendimiento de detección de lluvia de los experimentos de WRF. Los índices fueron: la probabilidad de detección (POD), relación de falsa alarma (FAR) e índice crítico de éxito (CSI). POD se utiliza para describir la extensión de los eventos de lluvia que se pronostican correctamente; FAR refleja la extensión de los eventos de lluvia pronosticados que son falsas alarmas, y CSI ilustra la proporción general de eventos de lluvia que se detectan correctamente en el pronóstico. La Tabla 3 presenta las expresiones matemáticas para calcular los índices categóricos.

Tabla 3. Índices categorizados y utilizados en la evaluación de los experimentos [40]. Las letras mayúsculas I, H, M y FA corresponden a aciertos, fallos y falsas alarmas, respectivamente

Índice	Ecuación	Valor Perfecto
Probabilidad de detección (POD)	$H / (H + M)$	1
Relación de falsa alarma (FAR)	$FA / (H + FA)$	0
Índice crítico de éxito (CSI)	$H / (H + FA + M)$	1

3. Discusión de resultados

3.1 Análisis de situación sinóptica

El gráfico de superficie (Figura 3) del 17 de enero de 2018 a las 0000 UTC, muestra un frente estacionario sobre el Mar Caribe en etapa de disipación, que abarca desde la parte oriental de Cuba hasta la zona fronteriza norte entre Costa Rica y Panamá.

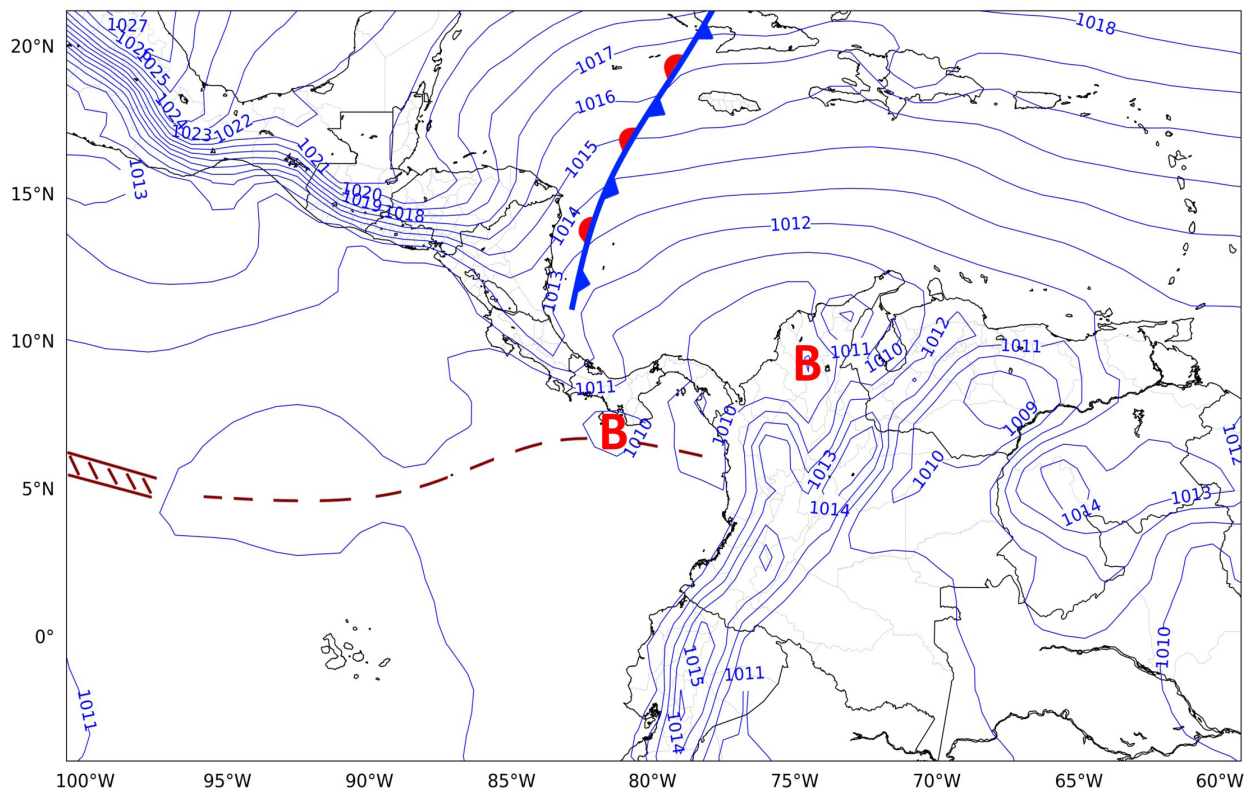


Figura 3. Localización geográfica de las diferentes estaciones meteorológicas de superficie (puntos negros) y sondeos verticales (estrellas rojas) utilizados como fuentes de verificación.

Se proyecta un eje a través de la costa del Pacífico de Panamá, que se une con la ZCIT. A lo largo del día se observa un aumento y desarrollo de la nubosidad debido al calentamiento diurno, más relevante en el centro y este del país. Esto fue influenciado por un sistema frontal estacionario y dos sistemas de baja presión sobre el suroeste de Panamá y el norte de Colombia.

El análisis del perfil vertical (Figura 4), dado por un sondeo vertical de aire superior, muestra un alto contenido de agua en los niveles bajos principalmente desde la superficie hasta 3 kilómetros de altura y un viento de 10 a 15 nudos en promedio desde el noreste.

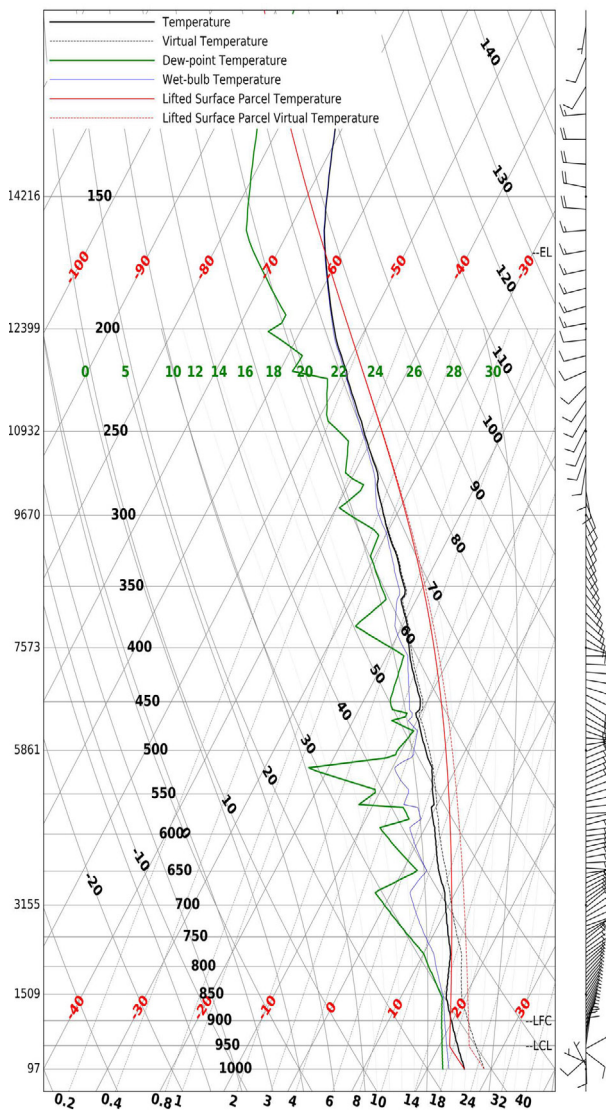
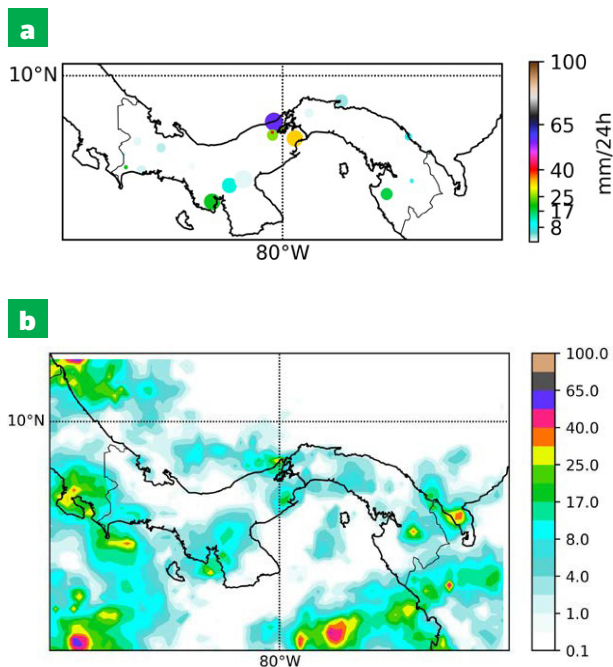


Figura 4. Sondeo vertical lanzado desde 8.98 N, 79.57 W el 17 de enero de 2018, a las 0000 UTC

En niveles medios se observa una capa con una humedad relativa del 50% y vientos del este de 10 a 15 nudos, mientras que los niveles altos muestran vientos del sudoeste y oeste con una humedad relativa del 50% al 60%. El perfil vertical del viento, muestra poca cizalladura y la temperatura del disparador es de 29,6 grados Celsius.

3.2 Correspondencia entre la precipitación estimada de GPM y los reportes de las estaciones en superficie

Como se mencionó en la sección anterior, para evaluar el desempeño de los experimentos con una mejor resolución espacial y temporal, se utilizó la precipitación estimada por el producto GPM. Sin embargo, como no es una medición directa, se necesita una caracterización del producto. La Figura 5 presenta la precipitación acumulada de 24 horas registrada por la red de estaciones (Figura 5 (a)) y la misma variable estimada por GPM (Figura 5 (b)). Como puede verse, a pesar de mostrar una baja densidad de estaciones, la lluvia acumulada parece estar bien representada para este caso de estudio particular. La distribución espacial de los eventos de precipitación que ocurrieron en el área de la Ciudad de Panamá y el Canal de Panamá, muestra que hubo dos núcleos de estos eventos, uno sobre el área del Mar Caribe, donde se registraron las mayores precipitaciones de aproximadamente 60 mm / 24h y el otro, en el área de la vertiente pacífica del canal, con acumulaciones muy cercanas a 30 mm / 24h; ambos medidos en las estaciones meteorológicas de superficie.



Figuras 5. Lluvia diaria (mm/24 hr) para el 16 de enero de 2018: (a) registrado en las estaciones meteorológicas; (b) estimadas por los productos GPM.

En GPM se observan estos dos máximos, que concuerdan con las observaciones. Otros lugares donde se observa esta correspondencia, son la parte occidental cerca de la costa y la frontera con Costa Rica, y al sur de la Sierra Madre centroamericana; donde se observan pequeños núcleos de precipitación, también reflejados en GPM. Una característica importante, es que los datos de GPM no reflejaron la precipitación en lugares donde las estaciones no informaron, lo cual es una buena indicación de acuerdo. A pesar de

la buena representación espacial de las áreas de precipitación, se observa una subestimación general de la cantidad de precipitación en el producto GPM. Los valores de precipitación son aproximadamente entre 20 y 30 mm por debajo de los registrados en las estaciones meteorológicas.

Aunque existen diferencias cuantitativas en la precipitación obtenida de GPM para el caso estudiado en esta investigación, estos datos fueron útiles en el sentido espacial, para la verificación de los experimentos desarrollados. También fue importante para cubrir las regiones donde no hay estaciones meteorológicas, por ejemplo, cerca de la frontera con Colombia. Por lo tanto, estos datos se usaron para ilustrar la lluvia a valores sub-diarios en ausencia de ambas estaciones, y datos horarios de estaciones en superficie.

3.3 Verificación de precipitación

Los gráficos del ciclo diurno de precipitación para las 15 combinaciones de BMP y CU, en un mosaico de nueve cuadros que divide el dominio interno WRF sobre Panamá, se presentan en la Figura 6. Cada gráfico se ubica sobre su región geográfica correspondiente, y un mapa sombreado de las 24 horas GPM. La precipitación acumulada se muestra en el fondo. Donde ocurrieron precipitaciones totales significativas, la mayoría de las combinaciones representaron adecuadamente los picos correspondientes, aunque en general, con ligeros desplazamientos en el tiempo (recuadros 1,

2, 5 y 7). Para estos cuadros destacan, con mejores resultados, las combinaciones Mor-BMJ, Thom-Gr, WSM6-BMJ y WSM6-KF.

La precipitación estimada por GPM para las regiones 6 y 9, que cubren el Mar Caribe, no fue significativa y fue en estas áreas donde más de la mitad de las

combinaciones se acercaron mejor a los acumulados de GPM. Un comportamiento similar ocurrió en el recuadro 1, que también se encuentra sobre el Océano Pacífico. Esto indica que la mayoría de las combinaciones presentaron una mayor capacidad para pronosticar la precipitación sobre el mar para el caso estudiado.

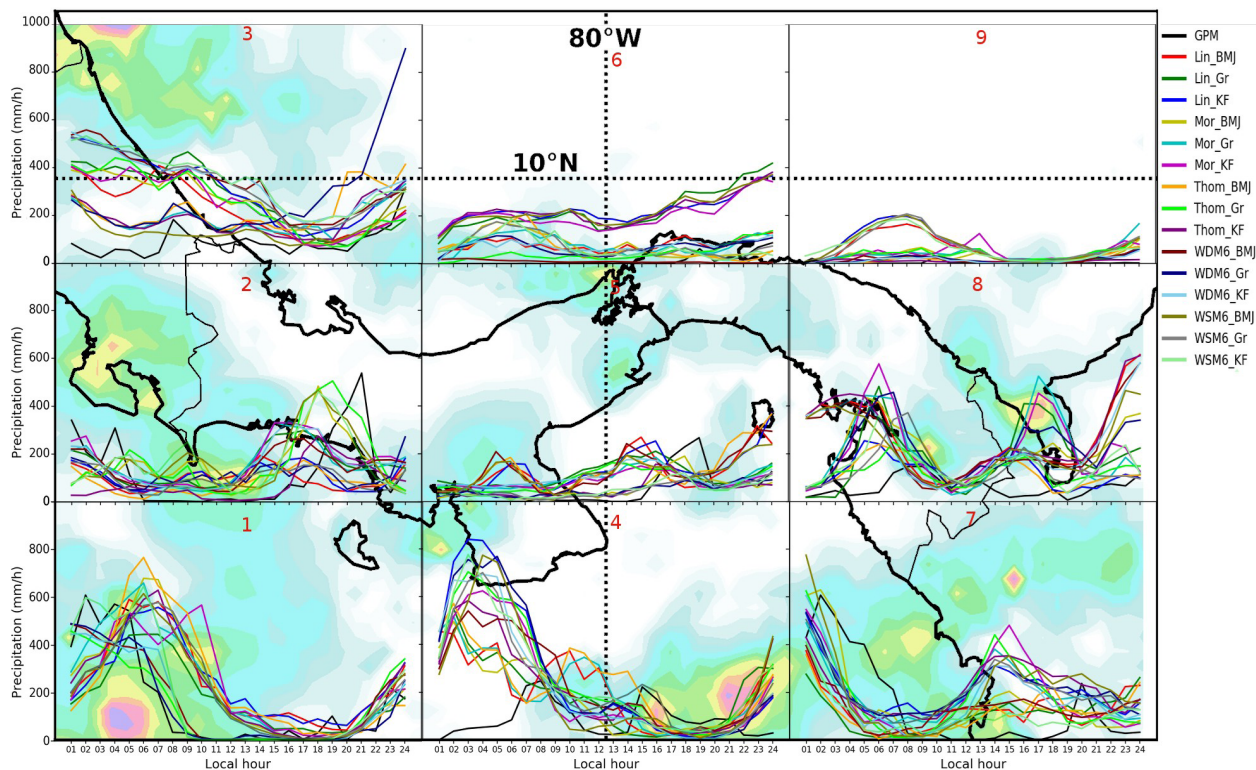


Figura 6. Ciclo diurno horario de la precipitación el 16 de enero de 2018, iniciando a la media noche. El CVA fue dividido en 9 recuadros donde se calculó de manera horaria el total de la precipitación.

Este es un rendimiento esperado, considerando que sobre el mar, la fricción superficial es menor, lo que lleva a un campo de viento más uniforme y a cambios de temperatura menos pronunciados, lo que permite una mejor representación de los procesos convectivos. Lin-KF, Mor-KF y Thom-KF presentaron las mayores sobreestimaciones en estas áreas.

Sin embargo, en el recuadro 4, a pesar de tener una gran parte del área ocupada por el mar, el modelo tuvo dificultades para representar la lluvia en las primeras y últimas horas del día para todas las configuraciones, con una sobreestimación enorme. Algo similar ocurre en el recuadro 3, pero menos pronunciado y con mayor dispersión en los pronósticos. Sobre la zona 8, que presenta áreas costeras irregulares, el modelo presentó dificultades, sobreestimando la precipitación. También ocurrió en el recuadro 7, donde se produjo una sobreestimación en la tarde. Una vez más, las combinaciones con la parametrización de cúmulos KF produjeron los valores más altos de lluvia acumulada con mayores diferencias de GPM.

Las Regiones 2 y 5, también encerraron zonas de interfaz agua-tierra y el sistema montañoso (Sierra Madre centroamericana). A pesar de ello, la mayoría de las configuraciones pudieron pronosticar la precipitación con bajos errores, lo que representa bien, aunque de forma anticipada, los picos de precipitación. Mor-BMJ logró una mejor representación del ciclo diurno en el recuadro número 5, donde las estaciones meteorológicas registraron la precipitación acumulada más significativa.

¿En general, la capacidad de cada combinación de BMP-CU varía significativamente de una región a otra, por lo que no se puede identificar fácilmente, cuáles lograron una mayor precisión. Como característica común, todos los experimentos sobreestiman el área total de precipitación por hora en cada recuadro, presentando una mayor precisión en las regiones donde predomina el mar. Se encontró que los experimentos que usan KF como esquema de Cu, sobreestiman fuertemente los valores de lluvia, mientras que los que usan BMJ, se ajustan mejor al comportamiento diario de la precipitación.

Desde el punto de vista de los índices de verificación categóricos, en los que se evalúa la habilidad de los experimentos para el pronóstico de la ocurrencia o no de precipitación, la Figura 7 muestra la probabilidad de detección para cada combinación de BMP-CU. El POD es una medida de si los eventos de precipitación se identificaron correctamente en términos de ocurrencia, no de cantidad. Observe que los 15 experimentos numéricos presentaron un patrón espacial similar del índice, con valores más altos en las áreas donde GPM estimó la lluvia acumulada más significativa. Esto se encuentra en la región del Océano Pacífico, cerca de la frontera entre Panamá y Colombia, y en la parte suroeste del CVA. En estas regiones, el POD alcanzó valores de 0,8, mientras que en las zonas donde se registraron los mayores episodios de precipitación (valores superiores a 50 mm / 24 h), la capacidad de detección cae a 0,5.

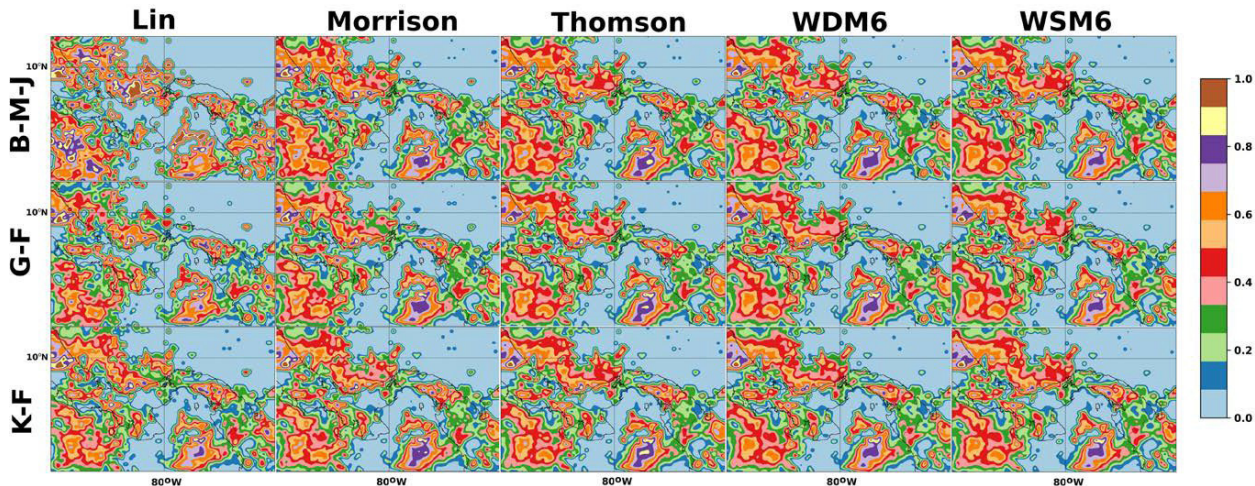


Figura 7. Índice POD para todos los experimentos. Las filas están ordenadas por las parametrizaciones de Cúmulos y las columnas están organizadas por las parametrizaciones de microfísica.

Por otro lado, el rendimiento de la detección de eventos disminuye, teniendo valores por debajo de 0.4, en lugares donde las estaciones meteorológicas registraron valores entre 30 y 60 mm / 24h, como el suroeste y el noroeste de las provincias Centrales de Panamá. La mejor habilidad es presentada por el grupo de combinaciones que usan BMJ como parametrización Cu. Para el área que comprende el Canal de Panamá, BMJ presentó una mejora que podría ser cuantificable hasta un 10% en el índice POD en comparación con las otras dos parametrizaciones de cúmulos. El experimento de Lin-BMJ, se destacó por presentar valores cercanos a 1 en las partes norte y sur del centro de Panamá, disminuyendo a 0.5 en las zonas donde GPM registró los mayores episodios de precipitación.

El índice CSI, que refleja la proporción de eventos que se predicen correctamente, se muestra en la Figura 8. En general, los valores son muy bajos en comparación con POD, esto se debe a la consideración de falsas alarmas en el cálculo del índice. Lo anterior sugiere que todos los experimentos dan una cantidad considerable de áreas que de hecho son falsa alarma (FA). El índice FAR (no mostrado), aumenta a valores muy cercanos a 1 en la mayor parte del área de verificación central que explica los bajos valores de CSI. Las regiones cubiertas por el Mar Caribe, merecen un interés particular, donde CSI apenas alcanza valores de 0.1. Sobre esta región no ocurre ningún evento de precipitación de acuerdo con la Figura 5 (a). El pobre comportamiento de las combinaciones de BMP-CU indica que, aunque la capacidad del modelo es buena cuando se registra la lluvia, falla cuando no se produce precipitación.

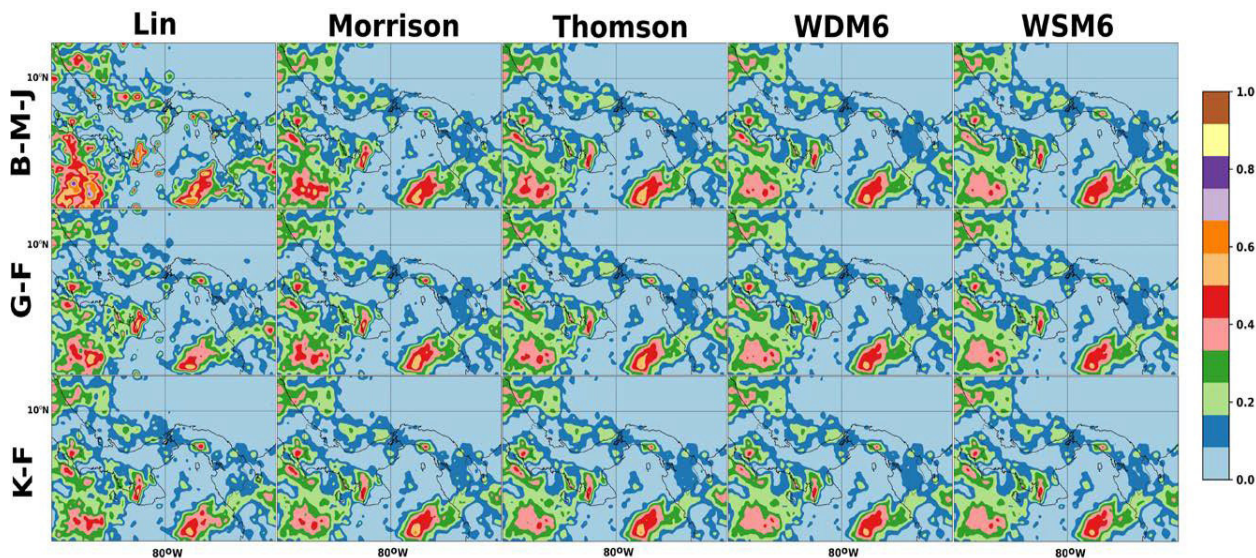


Figura 8. Índice CSI para todos los experimentos realizados. Las filas están ordenadas por parametrizaciones de cúmulos y las columnas están organizadas por parametrizaciones de microfísica.

Estos resultados están altamente relacionados con la sobreestimación encontrada sobre el CVA en el análisis del ciclo diurno. Para este caso particular, al igual que con POD, la mejor combinación de parametrizaciones fue BMJ con Lin, mientras que los experimentos que tienen KF como CU, mostraron la peor habilidad.

Se calculó la correlación de Pearson para GPM (Figura 9 (a)) y WS (Figura 9 (b)) en 24 horas de precipitación acumulada. Esta correlación es espacial, en el sentido que se calculó para cada combinación, para todo el CVA y todas las estaciones meteorológicas. Todos los experimentos aquí mostraron una

habilidad pobre, especialmente cuando se compara con GPM. Los valores inferiores a 0.4, indican que las combinaciones de BMP-CU fallaron, posiblemente porque las áreas de precipitación se desplazaron en el espacio, se deformaron o no se pronosticaron. WDM6-BMJ, se destaca ligeramente en la verificación con GPM, con 0.3 como correlación y WSM6-BMJ, sobresale como el mejor con valores alrededor de 0.8, en la comparación con estaciones meteorológicas. Centrándose en las evaluaciones de experimentos con estaciones meteorológicas, otras dos combinaciones que usaron BMJ como CU, alcanzaron altos valores de correlación, estas son Mor-BMJ y Thom-BMJ, ambos con más de

0.5. Nuevamente, BMJ se destaca como la mejor selección de CU en tres de las combinaciones estudiadas. Por el contrario, aquellos que usan la parametrización de cúmulos Gr, no mostraron altas correlaciones o correlaciones negativas con valores reales.

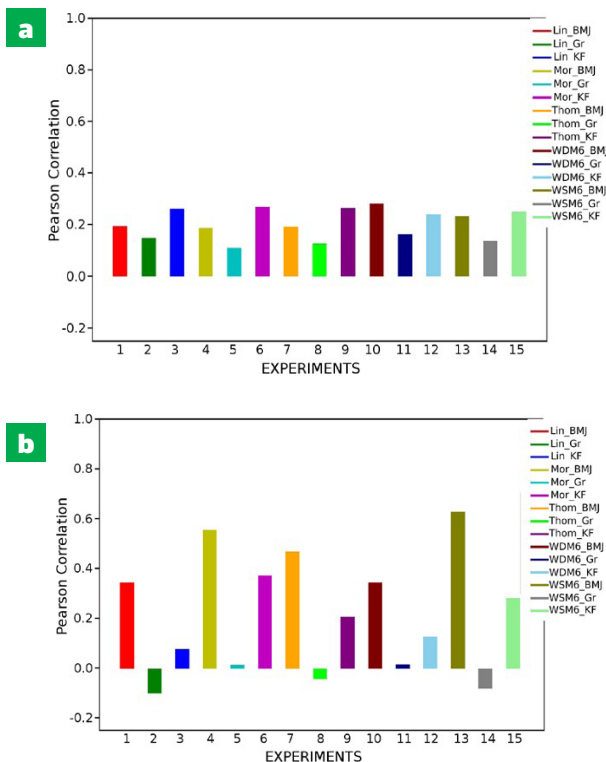


Figura 9. Correlación de Pearson: (a) calculado con GPM; (b) calculado con estaciones meteorológicas de superficie.

Como una verificación del desplazamiento y / o deformación de las áreas de precipitación, la Figura No. 10 (a) presenta la lluvia acumulada de una hora de GPM para el 17 de enero de 2018 a las 0000 UTC. La Figura 10 (b) y la Figura 10 (c), muestran la precipitación acumulada para el mismo período de Mor-BMJ y Mor-KF respectivamente. La Figura 10 (d) y la Figura 10 (e), muestran los mapas categóricos resultantes de las comparaciones con GPM. Se puede observar que las áreas pronosticadas para ambas combinaciones, son bastante más pequeñas que las que se muestran en el gráfico GPM. También, se observa que hay zonas de precipitación registradas por GPM, que los experimentos pronosticaron, pero cambiaron espacialmente (ver, por ejemplo, el área de precipitación sobre Veraguas).

Otros eventos de precipitación mostrados en GPM, faltaban en los experimentos, por ejemplo, el suroeste de la ciudad de Panamá. Todo esto podría explicar la presencia de grandes áreas de categorías de faltas y falsas alarmas y, por lo tanto, las bajas correlaciones de área entre las combinaciones GPM y BMP-CU. La sobreestimación de la precipitación por KF, también se hace evidente en las numerosas áreas de falsa alarma que aparecen en la Figura 10 (e).

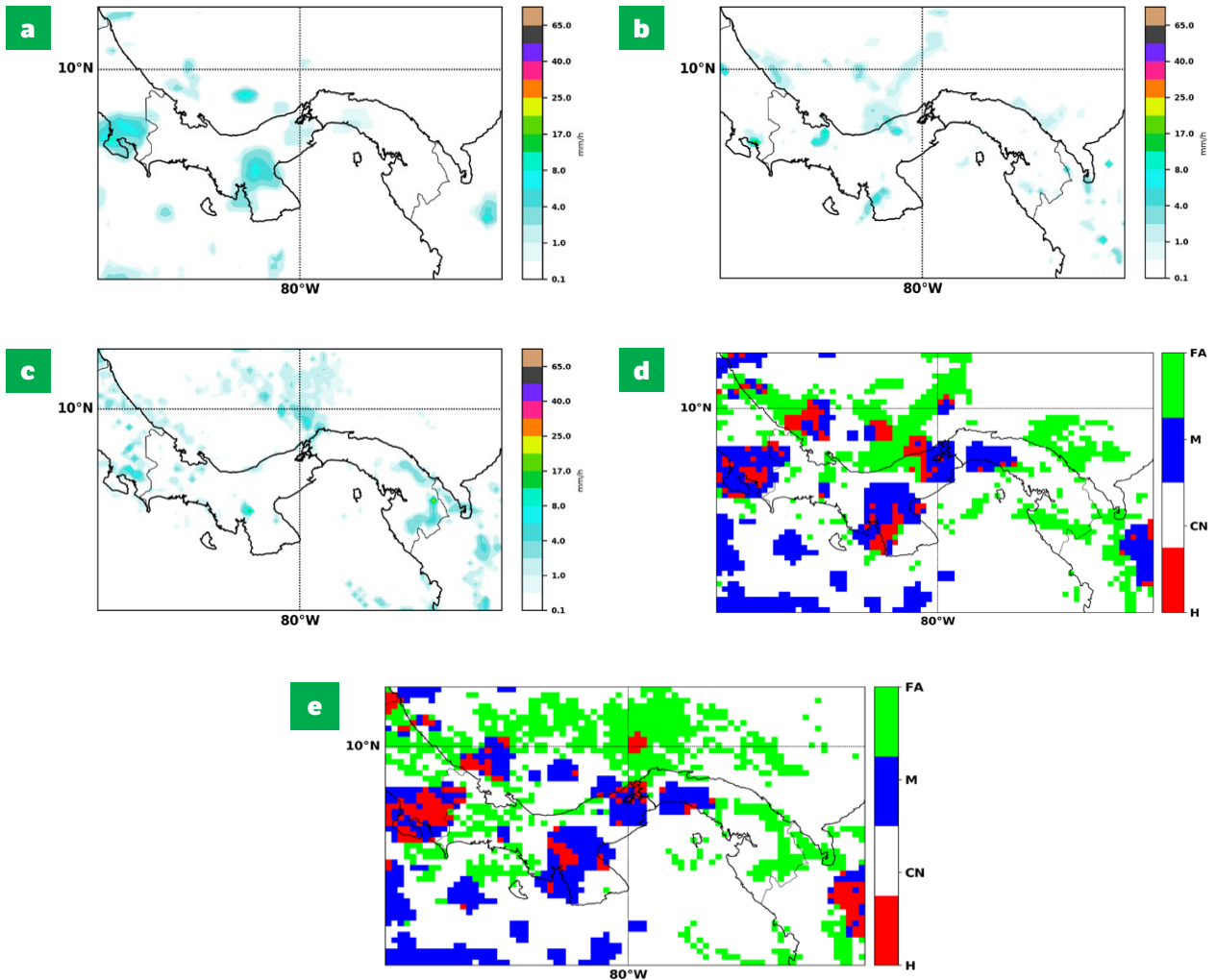


Figura 10. Categorías de verificación espacial para el 17 de enero de 2018 a las 0000UTC; H, CN, M, y FA media de aciertos, negativos correctos, errores y falsas alarmas, respectivamente: (a) Precipitación estimada por GPM; (b) Lluvia acumulada con Mor-BMJ; (c) Lluvia acumulada con Mor-KF; (d) categorías de Mor-BMJ; y (e) categorías de Mor-KF.

3.4 Verificación con un sondeo atmosférico

Para lograr una mejor comprensión de los resultados, se llevó a cabo una evaluación con el sondeo del 17 de enero de 2018 a las 0000 UTC. Los perfiles numéricos verticales para la velocidad del viento, la humedad relativa y la temperatura, se extrajeron de cada experimento siguiendo la trayectoria de sondeo real. La Figura 11 muestra estos perfiles verticales. Las discontinuidades en los perfiles pronosticados, se deben al hecho de que la pista del dispositivo de sondeo dejó el área de dominio del modelo a aproximadamente 400 hPa y volvió a entrar a aproximadamente 200 hPa.

Con respecto a los perfiles de viento (Figura No. 11 (a)), mientras que para BMJ, el perfil pronosticado subestimó el viento medido en niveles más bajos, el resto de las combinaciones y WSM6-BMJ excedieron los valores de intensidad.

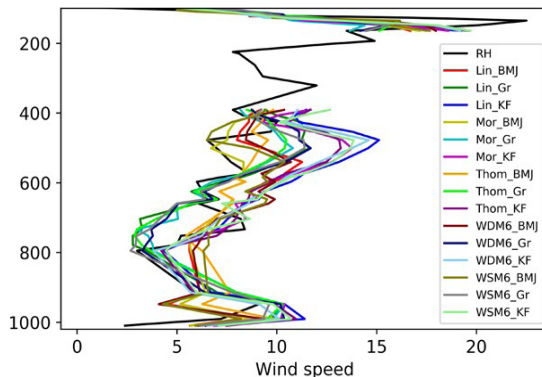


Figura 11. (a) Perfiles verticales para todos los experimentos y sondeo atmosférico real el 17 de enero de 2018 a las 0000UTC. Velocidad del viento (m/s)

Los cambios rápidos pero ligeros en la velocidad del viento en niveles medios, fueron mejor representados por BMJ, excepto WSM6-BMJ. En general, la mayoría de las combinaciones siguieron con éxito el pico agudo por encima del nivel de 200 hPa informado por el sondeo, así como la disminución significativa de la intensidad del viento experimentada en niveles más altos. Todos los experimentos pudieron representar el perfil de humedad vertical cercano a la medición de sondeo (Figura 11 (b)). Sin embargo, entre 700 y 600 hPa, mostraron dificultades en la estimación de la variable, esto podría estar relacionado con la cantidad de niveles verticales definidos en la cuadrícula del modelo. Es apreciable que los esquemas BMJ y KF, combinados con todos los esquemas BMP, son los que mejor representan el perfil vertical de humedad relativa. A pesar de que BMJ no tiene en cuenta los cambios que se producen por debajo de la base de la nube [24], mostró el comportamiento más apropiado de la humedad a niveles más bajos (excepto cuando se combina con WSM6).

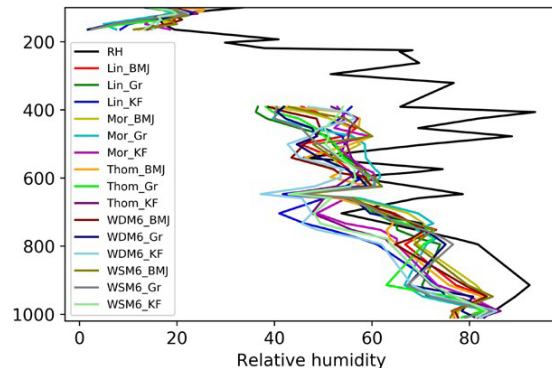


Figura 11 (b). Perfiles verticales para todos los experimentos y sondeo atmosférico real el 17 de enero de 2018 a las 0000UTC. Humedad relativa.

En el esquema BMJ, los perfiles de humedad son un factor determinante en la identificación de los diferentes estados de equilibrio convectivo. El esquema también logró representar bien los perfiles de humedad y temperatura (no mostrados), que se utilizan para calcular la entropía y la “eficiencia de la nube”, que mide la capacidad de la columna convectiva para transportar la entalpía en la vertical, produciendo la menor precipitación posible. Esto podría explicar la capacidad presentada por BMJ para representar bien la cantidad total de precipitación, así como el comportamiento del ciclo diurno, para este caso estudiado. La lluvia en el área de sondeo, fue causada principalmente por el calentamiento diurno. Los perfiles de temperatura y humedad, reflejaron los ajustes realizados por el esquema que los obligó a perfiles de referencia climatológicos. Esos esquemas lograron representar adecuadamente el perfil vertical de ambas variables. La parametrización de BMJ, respaldada por el concepto de que la convección es un proceso puramente termodinámico, fue, por lo tanto, la más capaz de reproducir la precipitación en el área.

Por otro lado, Gr presentó menos habilidad para predecir las variables, sobrestimando la precipitación en la mayoría de las combinaciones. Un estudio realizado en la zona tropical, que describe el monzón africano, presentó dificultades similares con esta parametrización [41]. Todas las combinaciones de KF, también sobreestimaron la cantidad de lluvia, lo que puede estar relacionado con el hecho de que este esquema tiende a dejar una capa saturada extremadamente profunda después de la convección [42] para representar mejor los perfiles de sondeo. Esto es una deficiencia, ya que estas condiciones permanecen en el medio ambiente, y activan el esquema de microfísica que tiende a producir precipitación estratiforme. La Figura 12 representa el diagrama de Taylor para la velocidad del viento y la humedad relativa. Tenga en cuenta que, una vez más, los experimentos que usan BMJ como parametrización de cúmulos, tuvieron las correlaciones más altas, mientras que los configurados con Gr y KF, presentaron el peor rendimiento, como se muestra en el diagrama del perfil del viento. Lo contrario ocurrió al comparar los perfiles de humedad, donde las combinaciones que usan KF, se correlacionaron ligeramente más alto.

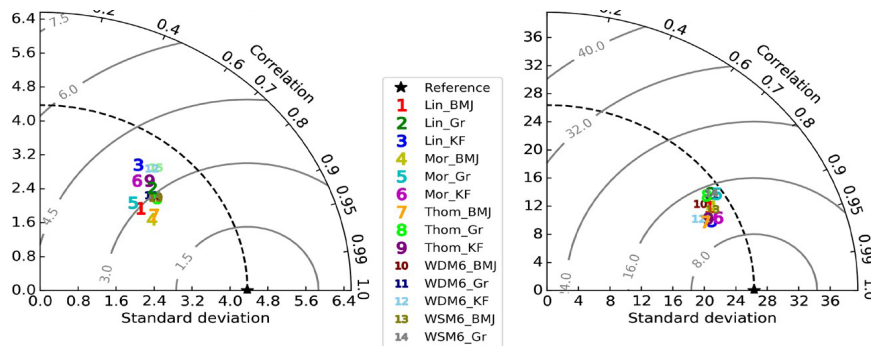


Figura 12. Diagrama de Taylor para los perfiles de viento y humedad relativa

4. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo, fue evaluar la capacidad del modelo WRF para pronosticar eventos de lluvia en Panamá. En este sentido, el rendimiento de WRF se probó verificando la precipitación simulada por el modelo y analizando la sensibilidad de los pronósticos, a un grupo de diferentes esquemas de parametrización. La investigación incluye la evaluación de la capacidad del modelo para reproducir las características de los procesos atmosféricos asociados con la lluvia ocurrida en la región de estudio. Las simulaciones del modelo, se llevaron a cabo durante un período de 24 horas en tres dominios anidados, con una resolución de 27, 9 y 3 km respectivamente. Se desarrollaron experimentos que incluyeron combinaciones de parametrizaciones de microfísica de Lin, WSM6, Thompson, WDM6 y Morrison y esquemas de cúmulos de Betts-Miller-Janjic, Grell-Freitas y Kain-Fritsch.

La capacidad de las combinaciones de microfísica-cúmulo seleccionadas para pronosticar la lluvia, varía significativamente entre las diferentes áreas, lo que dificulta la identificación clara de aquellas que simulan mejor el ciclo diurno de lluvia. En áreas donde ocurrieron altas cantidades de precipitación diaria, la mayoría de los experimentos produjeron una representación aceptable de los picos, aunque con ligeros desplazamientos en el tiempo. El Mor-BMJ

surgió como la mejor combinación que representa el ciclo diurno en varias áreas del CVA, seguido de las combinaciones Thom-Gr, WSM6-BMJ y WSM6-KF. Muchas de las combinaciones presentan una buena habilidad para pronosticar precipitaciones sobre las zonas marinas. La mayor sobreestimación para estas zonas, se produce mediante combinaciones que incluyen el esquema de cúmulos KF.

La evaluación categórica de la ocurrencia de precipitación, demuestra la mejor capacidad de aquellos esquemas que combinan BMJ como parametrización de cúmulos. Esto sucede principalmente en el área que comprende el Canal de Panamá, donde Lin-BMJ presentó una clara mejora sobre todos los demás esquemas de cúmulos. El rendimiento general del WRF para el pronóstico de los eventos de lluvia / no lluvia, fue bastante pobre y explica la sobreestimación encontrada en el ciclo diurno dentro del área de validación. Las peores combinaciones fueron aquellas que incluyen la parametrización KF. Para todas las combinaciones, hubo valores bajos de correlación espacial de la lluvia pronosticada con respecto a las estimaciones de GPM, lo que sugiere una deficiencia del modelo para representar la distribución espacial de la precipitación para el caso de estudio seleccionado. Cuando se calcularon las correlaciones espaciales frente a los datos de las estaciones, surgieron valores más altos. Aquí también las combinaciones de BMJ fueron mejores. Los experimentos que utilizan el esquema Gr, se destacaron

como los peores, ya que no mostraron correlación o correlaciones negativas con las observaciones de las estaciones.

Todos los experimentos representaron el perfil de humedad vertical cerca del sondeo. Es apreciable que los esquemas BMJ y KF, combinados con todos los esquemas BMP, produjeron los mejores perfiles de humedad. BMJ mostró el comportamiento más apropiado de humedad a niveles más bajos. Si bien la mayoría de los experimentos de BMJ subestimaron los perfiles de viento a niveles más bajos, el resto de las combinaciones de BMP-CU y también WSM6-BMJ, excedieron los valores de

intensidad. Para niveles medios, BMJ representaba mejor el cambio en la velocidad del viento, con la excepción también de WSM6-BMJ. En general, la mayoría de las combinaciones siguieron el pico del perfil por encima del nivel de 200 hPa informado por el sondeo.

Una característica general que se destaca de todas las pruebas realizadas, es que los cambios en las parametrizaciones de cúmulos tienen un mayor impacto en el rendimiento del modelo que las de microfísica, siendo el esquema BMJ el de los mejores resultados.

Agradecimientos

El Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC) y el Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET), agradecen el financiamiento de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT), por medio de su convocatoria IOMA17 de 2017. De igual manera, también agradecen a Johisy Yasury Bethancourt de la Dirección de Hidrometeorología de ETESA S.A.



ETESA
Empresa de Transmisión Eléctrica, S.A.



Acrónimos y abreviaturas

BMJ	Esquema de Cúmulos tipo Betts-Miller-Janjic
BMP	Parametrizaciones de microfísica
CU	Parametrizaciones de cúmulos
CSI	Índice crítico de éxito
CVA	Núcleo del área de verificación
FA	Falsa alarma
FAR	Relación de falsa alarma
Gr	Esquema de Cúmulos tipo Grell, G.A.
GPM	Global Precipitation Model / Modelo Global de Precipitación
hPa	Hectopascal
KF	Esquema de Cúmulos tipo Kain-Frisch
Lin	Parametrización microfísica tipo Lin, Y.
Mor	Parametrización microfísica tipo Morrison, H
POD	Probabilidad de detección
RE	Eventos de lluvia
Thom	Parametrización microfísica tipo Thompson, G
UTC	Tiempo Universal Combinado
WDM6	Esquema de WRF de doble momento, clase 6
WRF	Modelo de Pronóstico e Investigación Meteorológica
WSM6	Esquema de WRF de Simple momento, Clase
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical

Referencias bibliográficas

1. Hastenrath, S. (2002) The Intertropical Convergence Zone of the Eastern Pacific Revisited. *International Journal of Climatology*, 22, 347-356. <https://doi.org/10.1002/joc.739>
2. Nakaegawa, T., Pinzon, R., Fabrega, J., Cuevas, J.A., De Lima, H.A., Cordoba, E., Nakayama, K., Batista Lao, J.I., Lau Melo, A. and Gonzalez, D.A. (2019) Seasonal Changes of the Diurnal Variation of Precipitation in the Upper Río Chagres Basin, Panamá. *PLoS ONE*, 14, e0224662. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224662>
3. Durán-Quesada, A.M., Reboita, M. and Gimeno, L. (2012) Precipitation in Tropical America and the Associated Sources of Moisture: A Short Review. *Hydrological Sciences Journal*, 57, 612-624. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.673723>
4. Mapes, B.E., Warner, T.T., Xu, M. and Negri, A.J. (2003) Diurnal Patterns of Rain-fall in Northwestern South America. Part I: Observations and Context. *Monthly Weather Review*, 131, 799-812. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<0799:DPORIN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<0799:DPORIN>2.0.CO;2)
5. Warner, T.T., Mapes, B.E. and Xu, M. (2003) Diurnal Patterns of Rainfall in Northwestern South America. Part II: Model simulations.

Monthly Weather Re- view, 131, 813-829. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<0813:DPORIN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<0813:DPORIN>2.0.CO;2)

6. Moya-Álvarez, A.S., Gálvez, J., Holguín, A., Estevan, R., Kumar, S., Villalobos, E., Martínez-Castro, D. and Silva, Y. (2018) Extreme Rainfall Forecast with the WRF-ARW Model in the Central Andes of Peru. *Atmosphere*, 9, 362. <https://doi.org/10.3390/atmos9090362>
7. Patel, P., Ghosh, S., Kaginalkar, A., Islam, S. and Karmakar, S. (2019) Performance Evaluation of WRF for Extreme Flood Forecasts in a Coastal Urban Environment. *Atmospheric Research*, 223, 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.03.005>
8. Baklanov, A., Schlünzen, K., Suppan, P., Baldasano, J., Brunner, D., Aksoyoglu, S., Camichael, G., Douros, J., Flemming, J. and Forkel, R. (2013) Online Coupled Regional Meteorology-Chemistry Models in Europe: Current Status and Prospects. *Atmospheric Chemistry and Physics, Discussions*, 13, 12541-12724. <https://doi.org/10.5194/acpd-13-12541-2013>
9. Givati, A., Gochis, D., Rummler, T. and Kunstmann, H. (2016) Comparing One-Way and Two-Way Coupled Hydrometeorological Forecasting Systems for Flood Forecasting in the Mediterranean Region. *Hydrology*, 3, 19. <https://doi.org/10.3390/hydrology3020019>
10. Simpson, C.C., Sharples, J.J., Evans, J.P. and McCabe, M.F. (2013) Large Eddy Simulation of Atypical Wildland Fire Spread on Leeward Slopes. *International Journal of Wildland Fire*, 22, 599-614. <https://doi.org/10.1071/WF12072>
11. Bhomia, S., Kumar, P. and Kishtawal, C.M. (2019) Evaluation of the Weather Research and Forecasting Model Forecasts for Indian Summer Monsoon Rainfall of 2014 Using Ground Based Observations. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 55, 617-628. <https://doi.org/10.1007/s13143-019-00107-y>
12. Sierra-Lorenzo, M., Ferrer-Hernández, A.L., Valdés-Hernández R., González-Mayor, Y., Cruz-Rodríguez, R.C., Borrajero-Montejo, I., Rodríguez-Genó, C.F., Quintana-Rodríguez, N. and Roque-Carrasco, A. (2015) Sistema Automático de Predicción a Mesoescala de Cuatro Ciclos Diarios.
13. Sierra-Lorenzo, M., Borrajero-Montejo, I., Ferrer-Hernández, A.L., Morfa-Ávalos, Y., Morejón-Loyola, Y. and Hinojosa-Fernández, M. (2017) Estudios de Sensibilidad del SisPI a Cambios de la PBL, la Cantidad de Niveles Verticales y, las Parametrizaciones de Microfísica y Cúmulos, a muy Alta Resolución.
14. Mitrani-Arenal, I., Perez-Bello, A., Cabrales-Infante, J., Povea-Perez, Y., Hernandez-Gonzalez, M. and Diaz-Rodriguez, O.O. (2019) Coastal Flood Forecast in Cuba, Due to Hurricanes,

- Using a Combination of Numerical Models. *Revista Cubana de Meteorología*, 25, 121-138.
15. Hsiao, L.-F., Chen, D.-S., Kuo, Y.-H., Guo, Y.-R., Yeh, T.-C., Hong, J.S., Fong, C.-T. and Lee, C.-S. (2012) Application of WRF 3DVAR to Operational Typhoon Prediction in Taiwan: Impact of Outer Loop and Partial Cycling Approaches. *Weather Forecast*, 27, 1249-1263. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-11-00131.1>
 16. Poleo, D., Vindas, C. and Stoltz, W. (2017) Comparación y Evaluación de Diferentes Esquemas de Parametrización de Cúmulos con WRF EMS Aplicadas al Caso del Huracán Otto. *Tópicos Meteorológicos y Oceanográficos*, 16, 28-40.
 17. Maldonado-Mora, T.J. (2012) Regional Precipitation Study in Central America, Using the WRF Model. Examensarbete vid Institutionen för geovetenskap, Uppsala.
 18. Lin, Y.-L., Farley, R.D. and Orville, H.D. (1983) Bulk Parameterization of the Snow Field in a Cloud Model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 22, 1065-1092. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022<1065:BPOTS F>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTS F>2.0.CO;2)
 19. Hong, S.-Y. (2006) The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society*, 42, 129-151.
 20. Thompson, G., Rasmussen, R.M. and Manning, K. (2004) Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part I: Description and Sensitivity Analysis. *Monthly Weather Review*, 132, 519-542. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0519:EFO WPU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0519:EFO WPU>2.0.CO;2)
 21. Thompson, G., Field, P.R., Rasmussen, R.M. and Hall, W.D. (2008) Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. *Monthly Weather Review*, 136, 5095-5115. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2387.1>
 22. Lim, K.-S.S. and Hong, S.-Y. (2010) Development of an Effective Double-Moment Cloud Microphysics Scheme with Prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for Weather and Climate Models. *Monthly Weather Review*, 138, 1587-1612. <https://doi.org/10.1175/2009MWR2968.1>
 23. Morrison, H., Thompson, G. and Tatarskii, V. (2009) Impact of Cloud Microphysics on the Development of Trailing Stratiform Precipitation in a Simulated Squall Line: Comparison of One- and Two-Moment Schemes. *Monthly Weather Review*, 137, 991-1007. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2556.1>
 24. Janjić, Z.I. (1994) The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence

- Closure Schemes. *Monthly Weather Review*, 122, 927-945. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2)
25. Grell, G.A. and Freitas, S.R. (2014) A Scale and Aerosol Aware Stochastic Convective Parameterization for Weather and Air Quality Modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 5233-5250. <https://doi.org/10.5194/acp-14-5233-2014>
 26. Kain, J.S. (2004) The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology*, 43, 170-181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2)
 27. Lim, J.-O.J., Hong, S. and Dudhia, J. (2004) The WRF Single-Moment-Microphysics Scheme and Its Evaluation of the Simulation of Mesoscale Convective Systems. 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction, Seattle, 1-15 January 2004, 1-4.
 28. Rutledge, S.A. and Hobbs, P.V. (1984) The Mesoscale and Microscale Structure and Organization of Clouds and Precipitation in Midlatitude Cyclones. XII: A Diagnostic Modeling Study of Precipitation Development in Narrow Cold-Frontal Rainbands. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 41, 2949-2972. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1984\)041<2949:TMAMSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1984)041<2949:TMAMSA>2.0.CO;2)
 29. Betts, A.K. (1986) A New Convective Adjustment Scheme. Part I: Observational and Theoretical Basis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 112, 677-691. <https://doi.org/10.1002/qj.49711247307>
 30. Betts, A. and Miller, M. (1986) A New Convective Adjustment Scheme. Part II: Single Column Tests Using GATE Wave, BOMEX, ATEX and Arctic Air-Mass Data Sets. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 112, 693-709. <https://doi.org/10.1002/qj.49711247308>
 31. Arakawa, A., Jung, J.-H. and Wu, C.-M. (2011) Toward Unification of the Multiscale Modeling of the Atmosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics, Discussions*, 11, 3731-3742. <https://doi.org/10.5194/acp-11-3731-2011>
 32. Iacono, M.J., Delamere, J.S., Mlawer, E.J., Shephard, M.W., Clough, S.A. and Collins, W.D. (2008) Radiative Forcing by Long-Lived Greenhouse Gases: Calculations with the AER Radiative Transfer Models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113, D13103. <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>
 33. Ruiz-Arias, J.A., Dudhia, J., Santos-Alamillos, F.J. and Pozo-Vázquez, D. (2013) Surface Clear-Sky Shortwave Radiative Closure Intercomparisons in the Weather Research and Forecasting Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 9901-9913. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50778>

34. Black, T.L. (1994) The New NMC Mesoscale Eta Model: Description and Forecast Examples. *Weather Forecast*, 9, 265-278. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1994\)009<0265:TNNM EM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1994)009<0265:TNNM EM>2.0.CO;2)
35. Ek, M.B., Mitchell, K.E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V. and Tarpley, J.D. (2003) Implementation of Noah Land Surface Model Advances in the National Centers for Environmental Prediction Operational Mesoscale Eta Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108, 1-16. <https://doi.org/10.1029/2002JD003296>
36. Sukoriansky, S., Galperin, B. and Perov, V. (2005) Application of a New Spectral Theory of Stably Stratified Turbulence to the Atmospheric Boundary Layer over Sea Ice. *Boundary-Layer Meteorology*, 117, 231-257. <https://doi.org/10.1007/s10546-004-6848-4>
37. Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M., Balsamo, G. and Bauer, P. (2011) The ERA-Interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 553-597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
38. Hou, A.Y., Kakar, R.K., Neeck, S., Azarbarzin, A.A., Kummerow, C.D., Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K. and Iguchi, T. (2014) The Global Precipitation Measurement Mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95, 701-722. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1>
39. Warner, T.T. (2010) *Numerical Weather and Climate Prediction*. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511763243>
40. Dorninger, M., Friederichs, P., Wahl, S., Mittermaier, M.P., Marsigli, C. and Brown, B.G. (2018) Forecast Verification Methods Across Time and Space Scales—Part I. *Meteorologische Zeitschrift*, 27, 433-434. <https://doi.org/10.1127/metz/2018/0955>
41. Gbode, I.E., Dudhia, J., Ogunjobi, K.O. and Ajayi, V.O. (2019) Sensitivity of Different Physics Schemes in the WRF Model during a West African Monsoon Regime. *Theoretical and Applied Climatology*, 136, 733-751. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2538-x>
42. Gallai, I., Giaiotti, D.B., Gladich, I. and Stel, F. (2008) *On the Onset and Evolution of Deep Moist Convection over Areas Characterized by Complex Orography: The Case of Friuli Venezia Giulia*; Università di Trento. Dipartimento di ingegneria civile e ambientale.



CATHALAC

Centro del Agua del Trópico Húmedo
para América Latina y el Caribe

Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y El Caribe (CATHALAC).
Edificio 111, Ciudad del Saber, Clayton Ciudad de Panamá, República de Panamá.
Tel: +507-317-3200. Fax: +507-317-3299.
www.cathalac.int