



# UNIVERSIDAD DE COSTA RICA SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

## ESTUDIO DE SENSIBILIDAD DEL PRONÓSTICO DE LLUVIA A LAS PARAMETRIZACIONES DE CUMULOS EN EL MODELO WRF PARA EL SALVADOR

Trabajo final de investigación aplicada sometido a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera para optar al grado y título Maestría Profesional en Meteorología Operativa.

**SIDIA SIRE MARINERO TOBAR**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2018

## Dedicación.

A Dios, quien por su gracia y misericordia me ha ayudado a llegar hasta este momento, quien me capacita y me ha dado las fuerzas necesarias para no desfallecer y lograr la meta.

A mi madre, quien mostró su apoyo incondicional en todo momento y llenó de palabras de ánimos en los momentos difíciles para seguir adelante.

## Agradecimientos.

A Dios, por la sabiduría y la inteligencia que me proveyó para afrontar el reto y haber culminado con éxito, tengo la convicción que sin Él no hubiera sido posible lograrlo.

A mi familia, por la paciencia que han tenido a lo largo de este tiempo de estudio, en mis jornadas largas de trabajo y por el apoyo, por su amor, por sus oraciones y porque sé que con ellos puedo contar en todo momento. Los amo.

A la UCR, a todos y cada uno de los profesores a lo largo de la maestría, por compartir sus conocimientos y estar atentos a resolver dudas cuando estas se hicieron presente, en especial mis asesores Dr. Tito Maldonado y al Dr. Erick Rivera.

A mis compañeros de trabajo, por su apoyo y ayuda oportuna e incondicional en los momentos que lo necesité, en especial a mi amigo y compañero MSc. José Valles colaborador clave y lector externo de esta investigación. De igual forma, a Juan José Figueroa por su apoyo y paciencia en la realización de las simulaciones, parte fundamental de la investigación. Así mismo a mi equipo de trabajo en turnos y colegas de otras áreas del Observatorio Ambiental por su apoyo.

A mis jefes MSc. Celina Kattan, MSc. Luis García, Lic. Lorena Soriano por su apoyo, su ayuda y los consejos prestados y sobre todo por la confianza depositada.

Al Programa Regional de Cambio Climático y el Gobierno de Estados Unidos a través de USAID y al Comité de Regional Recursos Hidráulicos, CRRH por haberme tomado en cuenta y el financiamiento de la beca para la realización de tan importante estudio.

Al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, por la oportunidad; sin duda este logro será de gran beneficio para las actividades que la gerencia de meteorología lleva a cabo en tan encomiable misión de vigilancia meteorológica para El Salvador.

¡Gracias a Todos!

“Este trabajo final de investigación aplicada fue aceptado por la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado de Maestría Profesional en Meteorología Operativa”

---

Dr. Eric Alfaro Martínez  
**Representante del Decano Sistema de Estudios de Posgrado**

---

Dr. Tito Maldonado Mora  
**Profesor Guía**

---

Dr. Erick Rivera Fernández  
**Lector**

---

MSc. Luis Alberto García Guirola  
**Lector**

---

Dra. Ana María Durán Quesada  
**Directora**  
**Programa de Posgrado en Ciencias de la Atmósfera**

---

Sidia Sire Marinero Tobar  
**Candidata**

## Tabla de contenidos

<b>Portada.....</b>	<b>i</b>
<b>Dedicación.....</b>	<b>ii</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>iii</b>
<b>Hoja de Aprobación .....</b>	<b>iv</b>
<b>Tabla de contenidos.....</b>	<b>v</b>
<b>Resumen.....</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>xii</b>
<b>Abreviaciones y siglas utilizadas.....</b>	<b>xiii</b>
<b>Capítulo 1 Aspectos introductorios .....</b>	<b>1</b>
1.1 Marco contextual .....	1
1.2. Alcance del estudio.....	3
1.3. Justificación y antecedentes.....	3
1.3.1. Justificación.....	3
1.3.2. Antecedentes .....	6
1.4. Hipótesis de la investigación.....	7
1.5. Objetivos.....	7
1.5.1. Objetivo general .....	7
1.5.2. Objetivos específicos.....	8
<b>Capítulo 2 . Marco teórico.....</b>	<b>9</b>
2.1. Generalidad del clima de El Salvador .....	9
2.1.1. Fenómenos Atmosféricos productores de lluvia en El Salvador.....	11
2.1.1.1. Ondas tropicales .....	11
2.1.1.2. Sistemas convectivos de mesoescala (SCM).....	14
2.2. Predicción numérica del tiempo.....	16
2.2.1. Modelos regionales y de área limitada.....	16
2.2.1.1. Fuentes de error de pronósticos del modelo.....	17
2.2.2. Modelo regional de mesoescala WRF (Weather Research and Forecasting Model).....	18
2.2.2.1. Opciones físicas.....	18

2.2.3. Parametrizaciones de la convección de cúmulos en la predicción numérica del tiempo. ....	19
2.2.3.1 Betts-Miller-Janjic (BMJ) .....	21
2.2.3.2. Esquema Grell-Devenyi (GD).....	22
2.2.3.3. Kain-Fritsch (KF).....	23
<b>Capítulo 3 Datos y métodos. ....</b>	<b>25</b>
3.1. Métodos.....	25
3.1.1. Caso de estudio. ....	25
3.1.1.1. Afectaciones del evento. ....	27
3.1.3. Diseño del experimento.....	28
3.2. Datos observados.....	30
3.3. Metodología de análisis de resultados. ....	31
3.3.1. Verificación.....	31
3.3.1.1. Propósitos de la verificación .....	32
3.3.2. Proceso de verificación .....	32
3.3.2.1 Comparación cualitativa.....	33
3.3.2.2. Comparación cuantitativa.....	35
<b>Capítulo 4 Resultados.....</b>	<b>39</b>
4.1. Análisis cualitativo.....	39
4.1.1 Día 23 de agosto 2017 .....	39
4.1.1.1 Análisis regional.....	39
4.1.1.2 Análisis para El Salvador .....	45
4.1.2 Día 24 de agosto 2017 .....	49
4.1.2.1 Análisis regional.....	49
4.1.2.2 Análisis para El Salvador .....	54
4.2. Análisis cuantitativo. ....	57
4.2.1 Día 23 de agosto 2017 .....	58
4.2.2 Día 24 de agosto .....	60
<b>Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>1-0</b>
5.1. Conclusiones .....	1-0
5.2. Recomendaciones .....	1-4

**Referencias.....1-6**

**Anexos .....2-11**

Anexo 1. Tablas de atributos de desempeño por región. ....2-12

Anexo 2. Histogramas comparativos de las series de tiempo por región. ....2-18



## Resumen

Esta investigación pretende por medio de un caso de estudio analizar el rendimiento del modelo WRF que se corre en El Salvador, estableciendo una metodología de estudio para conocer que parametrizaciones del modelo tienen un mejor y adecuado desempeño en el pronóstico de lluvias para El Salvador.

Se escogió como caso de estudio el paso de una Onda Tropical sobre territorio salvadoreño entre los días 23 y 24 de agosto de 2017. Con el objetivo de determinar la sensibilidad del modelo WRF al uso de diferentes configuraciones físicas (parametrizaciones), mediante la realización de tres experimentos numéricos. Se determinó que en cada experimento se varíe la física de cúmulos, utilizando los esquemas: Kain-Fritsch (KF), Betts-Miller-Janjic (BMJ) y Grell-Devenyi 3D (G3D).

Con los resultados de cada simulación se procedió a la comparación de forma cualitativa y cuantitativa. Se definieron “Atributos de Desempeño del Pronóstico”, para determinar en cual o cuales de los experimentos se presenta un mejor rendimiento al contrastar los resultados con las observaciones disponibles.

Se obtuvo diferentes rendimientos en cada experimento. Para el primer día del caso de estudio se obtuvo un mejor resultado con el pronóstico del WRF con el esquema de G3D; mientras que en el segundo día un mejor resultado se obtuvo con el esquema de KF, siendo este último el esquema más húmedo en sus pronósticos, mientras que G3D el menos húmedo de los 3 pronósticos del WRF.

Además, para este caso de estudio en particular, el pronóstico del modelo Regional WRF en distribución de lluvia y ubicación de máximos presenta una relativa mejora con respecto al pronóstico del modelo global (GFS). También se pudo verificar que en cada una de las parametrizaciones estudiadas se muestra una tendencia a subestimar las cantidades de lluvia, siendo esto más evidente en zonas costeras (al sur de El Salvador); mientras que en las zonas montañosas del país principalmente en la franja norte-occidental, presenta una tendencia a la sobrestimación.

Los resultados obtenidos en esta investigación se relacionan muy bien con resultados de investigaciones previas en donde en términos generales se observa que el pronóstico de KF, tiene una tendencia a pronosticar escenarios más húmedos que otras parametrizaciones de cúmulos, además, de observar un ajuste aceptable en el pronóstico en términos de distribución que realiza G3D, pero como se verá con una marcada tendencia a subestimar acumulados de precipitación.

Debido a la naturaleza de la atmósfera, no es posible obtener resultados totalmente concluyentes con un único evento, por lo que se recomienda replicar ampliamente el ejercicio aquí presentado con otros eventos de Onda Tropical sobre el país.

## Lista de figuras

Fig. 1. Formato Actual de pronóstico de cantidades de lluvia acumulada por áreas esperada en 24 horas. Las cantidades son expresadas en milímetros de lluvia. ____	3
Fig. 2. Mapa de Altitudes de El Salvador y ubicación de regiones de pronóstico. _____	5
Fig. 3. Mapa de lluvia promedio en El Salvador. Serie 1965-2012 _____	10
Fig. 4. Registro de lluvia acumulada del desde las 7am del miércoles 23 de agosto a las 7am del jueves 24 de agosto de 2017. Acumulado de lluvia de 24 horas, por influencia de una perturbación en el flujo del este sobre El Salvador y el acercamiento de una onda tropical. _____	26
Fig. 5. Registro lluvia acumulada del desde las 7am del jueves 24 de agosto a las 7am del viernes 25 de agosto de 2017. Acumulado de lluvia de 24 horas, por influencia de una onda tropical sobre El Salvador. _____	27
Fig. 6. Dominios configurados para las simulaciones. a) Dominios anidados, dominio 1 abarca Centroamérica y el Caribe a una resolución de 30 kilómetros y b) dominio 2 para El Salvador a una resolución de 10 km. _____	29
Fig. 7. Mapas de viento 200 hPa, válidos para el 23 de agosto 2017. a) Modelo Global GFS, b) Pronóstico KF, b) Pronóstico BMJ, c) Pronóstico G3D. _____	40
Fig. 8. Mapas de viento 850 hPa, válidos para el 23 de agosto 2017. a) Modelo Global GFS, b) Pronóstico KF, b) Pronóstico BMJ, c) Pronóstico G3D. _____	41
Fig. 9. Comparación de pronóstico de convección correspondiente para las 9:00pm del 23 de agosto 2017 (hora local). a) Imagen de satélite GOES16 correspondiente a las 8:45pm del 23 de agosto 2017 (hora local), b) Pronostico de Tope de nubes KF, c) Pronostico de Tope de nubes BMJ, d) Pronostico de Tope de nubes G3D. _____	43
Fig. 10. Comparación de pronóstico de convección correspondiente para las 12 de la media noche del 23 de agosto 2017 (hora local). a) Imagen de satélite GOES16, b) Pronostico de Tope de nubes KF, c) Pronostico de Tope de nubes BMJ, d) Pronostico de Tope de nubes G3D. _____	43
Fig. 11. Comparación de distribución de lluvia a nivel Regional en 24 horas para el 23 de agosto de 2017. a) Estimación de lluvia por satélite TRMM, b) Lluvia pronosticada GFS, c) Lluvia pronosticada KF, d) Lluvia pronosticada BMJ, d) Lluvia pronosticada G3D. _____	44
Fig. 12. Comparación lluvia acumulada en 24 horas expresadas en milímetros. Correspondientes al día 23 de agosto de 2017. a) Estimación de precipitaciones por TRMM, b) Pronostico del modelo Global GFS, c) Pronóstico de lluvia Kain-Fritsch, d) Pronóstico de lluvia Bett-Miller-Janjic, y e) Pronóstico de lluvia Grell 3D. _____	46
Fig. 13. Comparación de pronóstico de intensidad de lluvia para las 9pm del 23 de agosto 2017 (hora local). a) Imagen de Radar Meteorológico Salvadoreño correspondiente a las 8:45pm del 23 de agosto 2017, b) Reflectividad pronosticada KF, c) Reflectividad pronosticada BMJ y d) Reflectividad pronosticada G3D _____	48
Fig. 14. Comparación de pronóstico de intensidad de lluvia para la 12 de la media noche del 23 de agosto 2017 (hora local). a) Imagen de Radar Meteorológico Salvadoreño correspondiente a las 23:30pm del 23 de agosto 2017, b) Reflectividad pronosticada KF, c) Reflectividad pronosticada BMJ y d) Reflectividad pronosticada G3D _____	49

- Fig. 15. Mapas de viento 200 hPa, válidos para el 24 de agosto 2017. a) Modelo Global GFS, b) Pronóstico KF, b) Pronóstico BMJ, c) Pronóstico G3D. \_\_\_\_\_ 51
- Fig. 16. Mapas de viento 850 hPa, válidos para el 24 de agosto 2017. a) Modelo Global GFS, b) Pronóstico KF, b) Pronóstico BMJ, c) Pronóstico G3D. \_\_\_\_\_ 51
- Fig. 17. Comparación de pronóstico de convección correspondiente para las 12 de la media noche del 24 de agosto 2017 (hora local). a) Imagen de satélite GOES16, b) Pronóstico de Tope de nubes KF, c) Pronóstico de Tope de nubes BMJ, d) Pronóstico de Tope de nubes G3D. \_\_\_\_\_ 52
- Fig. 18. Comparación de pronóstico de convección correspondiente para las 3:00am del 25 de agosto 2017 (hora local). a) Imagen de satélite GOES16 correspondiente a las 3:30am del 25 de agosto 2017 (hora local), b) Pronóstico de Tope de nubes KF, c) Pronóstico de Tope de nubes BMJ, d) Pronóstico de Tope de nubes G3D. \_\_\_\_\_ 53
- Fig. 19. Comparación de distribución de lluvia a nivel Regional en 24 horas para el 23 de agosto de 2017. a) Estimación de lluvia por satélite TRMM, b) Lluvia pronosticada GFS, c) Lluvia pronosticada KF, d) Lluvia pronosticada BMJ, d) Lluvia pronosticada G3D. \_\_\_\_\_ 54
- Fig. 20. Comparación lluvia acumulada en 24 horas expresadas en milímetros. Correspondientes al día 24 de agosto de 2017. a) Estimación de precipitaciones por TRMM, b) Pronóstico del modelo Global GFS, c) Pronóstico de lluvia Kain-Fritsch, d) Pronóstico de lluvia Bett-Miller-Janjic, y e) Pronóstico de lluvia Grell 3D. \_\_\_\_\_ 55
- Fig. 21. Comparación de pronóstico de intensidad de lluvia para las 12 de la media noche del 24 de agosto 2017 (hora local). a) Imagen de Radar Meteorológico Salvadoreño correspondiente a las 00:45pm del 25 de agosto 2017, b) Reflectividad pronosticada KF, c) Reflectividad pronosticada BMJ y d) Reflectividad pronosticada G3D \_\_\_\_\_ 56
- Fig. 22. Comparación de pronóstico de intensidad de lluvia para las 3am del 25 de agosto 2017 (hora local). a) Imagen de Radar Meteorológico Salvadoreño correspondiente a las 3:45am del 25 de agosto 2017, b) Reflectividad pronosticada KF, c) Reflectividad pronosticada BMJ y d) Reflectividad pronosticada G3D, \_\_\_\_\_ 57
- Fig. 23. Comparación de Atributos de Desempeño por Región para el 23 de agosto 2017. a) Comparación del RSME y b) Comparación del Sesgo. \_\_\_\_\_ 59
- Fig. 24. Comparación de Atributos de Desempeño por Región para el 24 de agosto 2017. a) Comparación del RSME y b) Comparación del Sesgo \_\_\_\_\_ 62
- Fig. 25. Comparación de Series de Tiempo pronosticadas y Observadas para la Región 3 del día 24 de agosto. a) Pronóstico KF, b) Pronóstico BMJ y c) Pronóstico G3D\_\_ 62
- Fig. 26. Comparación de Series de Tiempo pronosticadas y Observadas para la Región 3 del día 23 de agosto. a) Pronóstico KF, b) Pronóstico BMJ y c) Pronóstico G3D. \_ 63

## **Anexos**

- Fig. 27. Región 1. – Histogramas de series de tiempo, día 23 y 24 (derecha) de agosto 2017. a) Observaciones y pronostico KF, b) Observaciones y pronostico BMJ, c) Observaciones y pronostico G3D \_\_\_\_\_ 2-18
- Fig. 28. Región 2. – Histogramas de series de tiempo, día 23 (izquierda) y 24 (derecha) de agosto 2017. a) Observaciones y pronostico KF, b) Observaciones y pronostico BMJ, c) Observaciones y pronostico G3D \_\_\_\_\_ 2-18

- Fig. 29. Región 4. – Histogramas de series de tiempo, día 23 (izquierda) y 24 (derecha) de agosto 2017. a) Observaciones y pronostico KF, b) Observaciones y pronostico BMJ, c) Observaciones y pronostico G3D* \_\_\_\_\_ 2-18
- Fig. 30. Región 5. – Histogramas de series de tiempo, día 23 (izquierda) y 24 (derecha) de agosto 2017. a) Observaciones y pronostico KF, b) Observaciones y pronostico BMJ, c) Observaciones y pronostico G3D* \_\_\_\_\_ 2-19
- Fig. 31. Región 6. – Histogramas de series de tiempo, día 23 (izquierda) y 24 (derecha) de agosto 2017. a) Observaciones y pronostico KF, b) Observaciones y pronostico BMJ, c) Observaciones y pronostico G3D* \_\_\_\_\_ 2-19

## Lista de tablas.

Tabla 1. Configuraciones distintivas de cada una de las salidas operativas WRF/El Salvador	6
Tabla 2. Parametrizaciones y esquemas utilizados en las simulaciones del caso de estudio de la Onda Tropical del 24 de agosto de 2017 en El Salvador.	30
Tabla 3. Estaciones automáticas utilizadas para el análisis.	31
Tablas 4. Estaciones meteorológicas por Región para análisis cualitativo	36
Tabla 5. Resumen de acumulados promedios por región comparándolo con lo observado para el día 23 de agosto 2017.	59
Tabla 6. Resumen de los atributos de desempeño en el pronóstico del 23 de agosto 2017.	59
Tabla 7. Resumen de acumulados promedios por región comparándolo con lo observado para el día 24 de agosto 2017.	61
Tabla 8. Resumen de los atributos de desempeño en el pronóstico del 24 de agosto 2017	62

### Anexos

Tabla 9. Región 1. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 23 de agosto 2017.	2-12
Tabla 10. Región 1. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 24 de agosto 2017.	2-12
Tabla 11. Región 2. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 23 de agosto 2017.	2-13
Tabla 12. Región 2. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 24 de agosto 2017.	2-13
Tabla 13. Región 3. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 23 de agosto 2017.	2-14
Tabla 14. Región 3. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 24 de agosto 2017.	2-14
Tabla 15. Región 4. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 23 de agosto 2017.	2-15
Tabla 16. Región 4. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 24 de agosto 2017.	2-15
Tabla 17. Región 5. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 23 de agosto 2017.	2-16
Tabla 18. Región 5. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 24 de agosto 2017.	2-16
Tabla 19. Región 6. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 23 de agosto 2017.	2-17
Tabla 20. Región 6. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 24 de agosto 2017.	2-17

## Abreviaciones y siglas utilizadas

**AMO** = Atlantic Multidecadal Oscillation – Oscilación Multidecadal del Atlántico

**BIAS** = Error Medio Sistemático – Sesgo.

**BMJ** = Esquema de Parametrización Betts-Miller-Janjic para la convección.

**CAPE** = Convective Available Potential Energy - Energía Potencial Disponible para la Convección.

**CI** = Condiciones Iniciales, de un modelo numérico meteorológico.

**CIN** = Convective Inhibition - Parámetro de Inhibición Convectiva.

**CLLJ** = Caribbean Low Level Jet – Chorro de Bajo Nivel del Caribe

**CPM** = Centro de Pronóstico Meteorológico.

**DGOA** = Dirección General de Observatorio Ambiental.

**ENOS** = El Niño, Oscilación del Sur

**G3D** = Esquema de Parametrización Grell-Devenyi para a convección.

**GFS** = Global Forecast System, Modelo de Pronóstico Global.

**KF** = Esquema de Parametrización Kain-Fritsch para la convección.

**MAE** = Error Absoluto Medio.

**MARN** = Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador.

**MSE** = Error Cuadrático Medio.

**PC** = Parametrización de la convección.

**PDO** = Pacific Decadal Oscillation – Oscilación Decadal del Pacífico.

**PNT** = Predicción Numérica del Tiempo.

**RMSE** = Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio.

**SCM** = Sistema Convectivo de Mesoescala.

**SMN** = Servicio Meteorológico Nacional.

**TUTT** = Tropical Upper Tropospheric Trough – Vaguada Tropical de la Troposfera Alta

**WRF** = Weather Research and Forecasting Model - Modelo de investigación y pronóstico.

**ZCIT** = Zona de Convergencia Intertropical.

**TRMM** = Tropical Rainfall Measuring Mission - Misión de Medición de Lluvias Tropicales

## Capítulo 1 Aspectos introductorios

### 1.1 Marco contextual

El Salvador es un país afectado por una variedad de fenómenos naturales que originan frecuentemente situaciones de desastre, perjudicando al territorio y a la población, especialmente, a aquellas familias ubicadas en zonas vulnerables y de alto riesgo, que tienen como factor común niveles de pobreza y escasa capacidad para absorber el impacto de dichos fenómenos.

El 88.7% del territorio salvadoreño se considera zona de riesgo, superficie donde se asienta el 95.4% de la población, convirtiéndolo en uno de los países más vulnerables del mundo (CEPAL, 2010b). La amenaza meteorológica que enfrenta El Salvador es un hecho ambiental de reconocimiento nacional e internacional ya que la organización German Watch, colocó a El Salvador en primer lugar en el índice Global de Riesgo Climático en el año 2009 (Harmeling, 2010)

La vulnerabilidad quedó evidenciada a raíz del impacto que se tuvo en Noviembre de 2009, debido a la influencia de un sistema de baja presión en el Océano Pacífico, asociada a la tormenta tropical Ida que se localizaba en el Caribe; evento en el cual se alcanzó un registro de lluvia acumulada de 355 mm en el Volcán de San Vicente, en un periodo de 5 horas, que generó deslizamientos e inundaciones, con implicaciones de grandes pérdidas humanas y materiales (CEPAL, 2010a).

Ante esta realidad y la amenaza que estos sistemas representan para la sociedad salvadoreña se hace necesario buscar técnicas, herramientas y mecanismos que permitan mejorar los pronósticos meteorológicos, además, de contar con personal capacitado.

Los modelos numéricos son la herramienta principal en la previsión del tiempo y el clima a nivel mundial (León, Eligaza, Carretero y San Ambrosio, 2007). Estos modelos utilizan, aproximaciones matemáticas que son capaces de simular el comportamiento atmosférico al resolver una serie de ecuaciones matemáticas diferenciales a las que se le conoce como "*Ecuaciones Primitivas*". La tecnología y las constantes investigaciones en ciencias



atmosféricas permiten que, con respecto a los inicios de la predicción numérica del tiempo (PNT), se tengan mejoras significativas en la calidad de los pronósticos (Lain, 2016). También gracias a los avances tecnológicos y su accesibilidad en la obtención de datos, es posible que los servicios meteorológicos nacionales (SMN) sean capaces de generar información apropiada con respecto a la PNT, utilizando modelos de mesoescala o modelos regionales de área limitada; tal es el caso del modelo regional de mesoescala WRF “Weather Research and Forecasting Model”, por sus siglas en inglés (Skamarock et al., 2008).

Al correr el WRF es posible determinar configuraciones para el pronóstico en un área específica, utilizando diferentes parametrizaciones o aproximaciones que simulen el comportamiento atmosférico, y representen la realidad local de una región (León et al., 2007).

Actualmente, en el SMN de El Salvador, se corre el modelo atmosférico regional WRF y se plantea la necesidad de verificación de la sensibilidad del modelo, a las diferentes configuraciones operativas, luego de aproximadamente 7 años de estar generando salidas; esto debido a la cada vez más creciente demanda de un buen pronóstico, así como también la necesidad de incursionar en predicciones tipo probabilísticas y basadas en impactos para el país en un futuro.

Por lo tanto, esta investigación permitirá determinar la sensibilidad del modelo WRF/El Salvador en el pronóstico de lluvias, principalmente en su distribución espacial y acumulados. La verificación consiste en realizar simulaciones de un evento puntual de lluvia, experimentando con diferentes parametrizaciones de cúmulos, bajo la influencia de un fenómeno atmosférico muy típico de la época lluviosa, como lo es la influencia de una onda tropical.

Así mismo se prueba una metodología de análisis y comparación para futuros ejercicios del mismo tipo con otros eventos meteorológicos y fenómenos que permitan conocer el comportamiento del modelo al simular las condiciones locales del país.

## 1.2. Alcance del estudio

El principal propósito de esta investigación es determinar cuál de las configuraciones del modelo WRF, genera mejores resultados en el pronóstico de lluvia en El Salvador por el paso de una onda tropical, identificando cuál o cuáles de las parametrizaciones físicas ofrezcan un mejor resultado en el pronóstico al compararlo con las observaciones.

Cabe destacar que las parametrizaciones de cúmulos utilizadas en la investigación coinciden con las que se tienen actualmente en las salidas operativas, pero, en la actualidad cada parametrización se corre a diferentes resoluciones espaciales. En este estudio las simulaciones de cada experimento se realizarán a la misma resolución, en dos dominios anidados; siendo el objetivo principal, validar un pronóstico para El Salvador del dominio con mayor resolución que se centra específicamente dentro de la latitud y longitud que abarca el país.

## 1.3. Justificación y antecedentes.

### 1.3.1. Justificación

La PNT es el motor que impulsa el desarrollo de la meteorología moderna y el uso de modelos numéricos es una parte esencial para la elaboración de las predicciones del tiempo y de las investigaciones meteorológicas (Sáenz Soto, 2017).

En El Salvador el Servicio Meteorológico Nacional forma parte de la Dirección de Observatorio Ambiental y Recursos Naturales (DGOA-MARN de aquí en adelante), y es dentro del mismo, el Centro de Pronósticos Meteorológicos (CPM) el encargado de la elaboración de los pronósticos del tiempo.

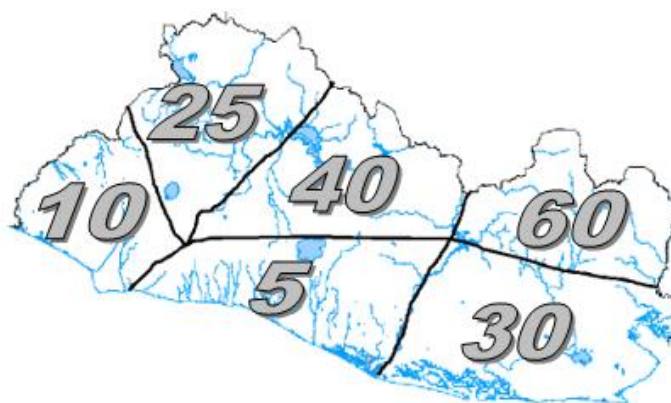


Fig. 1. Formato Actual de pronóstico de cantidades de lluvia acumulada por áreas esperada en 24 horas. Las cantidades son expresadas en milímetros de lluvia.

Actualmente el CPM en horas de la tarde, diariamente y durante la época lluviosa, emite un pronóstico de cantidades de lluvia esperada por zonas o regiones del territorio para un periodo de 24 horas. En la elaboración de dicho pronóstico, El Salvador se divide en 6 áreas (Figura 1) y se le asigna un valor de lluvia acumulada máximo en milímetros esperado en cada área.

Este es un producto de uso interno y sirve de insumo para las gerencias de la DGOA-MARN de Geología e Hidrología en sus pronósticos y proyecciones a corto y muy corto plazo. Se elabora con el fin de evaluar la susceptibilidad a deslizamientos, el aumento en los niveles de ríos y posibles desbordamientos, causados por la lluvia esperada en cada una de las regiones del país.

Dicho mapa es elaborado por el pronosticador meteorológico de turno, utilizando como principal insumo la lluvia pronosticada por el modelo GFS. Además de consultar otros modelos con salida disponibles en Internet, tales como el modelo del Centro Europeo (ECMWF), el modelo desarrollado por el Servicio Meteorológico Alemán (ICON), entre otros modelos meteorológicos globales.

Adicionalmente, se consultan las salidas que actualmente se tienen operativas del WRF/El Salvador. Al examinar estos productos se estima por observación y comparación visual del conjunto de pronósticos de los diferentes modelos, la cantidad de lluvia máxima esperada para cada área del país.

La Topografía de El Salvador cuenta con una amplia variabilidad y diferencias de altitudes entre zonas aledañas (Figura 2), por lo que las Regiones en que actualmente se divide el país para los pronósticos de cantidades de lluvia diariamente, son zonas heterogéneas con diferentes altitudes y comportamientos pluviométricos, cada una de estas regiones se pueden describir de forma muy general de la siguiente manera:

- **Región 1** (Zona Norte-Occidente), **Región 2** (Zona Norte-Centro) y **Región 3** (Zona Norte-Oriente) son regiones del territorio en su mayoría montañosas, ya que dentro de

ellas se ubica la cadena montañas limítrofe con Honduras, además en la Región 1 se encuentran las zonas más altas del territorio alcanzando los 2700 m.s.n.m.

Además de la cadena montañosa se localizan zonas de valles con altitudes que debajo de los 300 m.s.n.m. como por ejemplo en la Región 2 se ubica del Embalse de Cerrón Grande, el cuerpo de agua no natural más grande en el país que se ubica entre los departamentos Chalatenango, Cuscatlán y Cabañas, a una altitud de 270 m.s.n.m.

- **Región 4** (Zona Sur-Occidente), **Región 5** (Zona Sur-Centro) y **Región 6** (Zona Sur-Oriente) son regiones en las que se encuentra concentrada la cordillera volcánica, que atraviesa prácticamente todo el territorio de oeste a este, zonas de montaña y valles interiores incluyendo el área metropolitana de San Salvador (Región 3); así como también en ellas se localiza la franja costera.

La mayor altitud en estas zonas se da en el complejo volcánico occidental (Región 4) con altitudes arriba de los 2000 m.s.n.m. mientras en la Región 6 es donde se localizan las zonas de menor altitud del territorio salvadoreño.

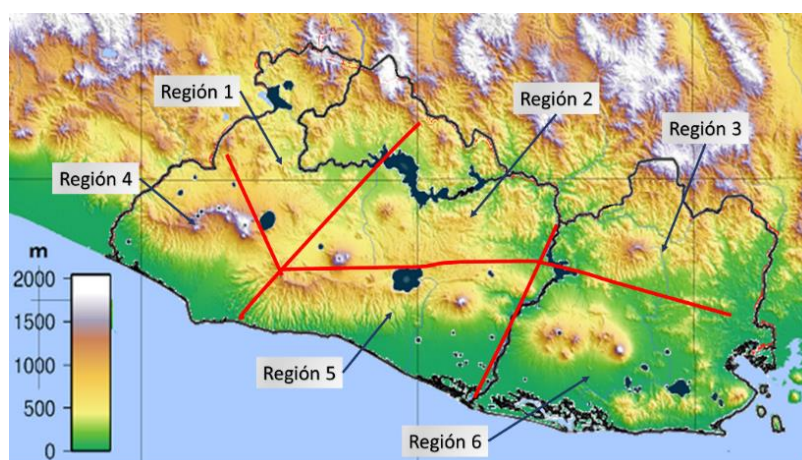


Fig. 2. Mapa de Altitudes de El Salvador y ubicación de regiones de pronóstico.

Debido a la extensión del territorio salvadoreño es factible un mejor pronóstico utilizando modelos regionales, pero es de esencial importancia conocer el comportamiento del

modelo ante ciertos eventos. Es por lo que esta investigación puede servir de base para estipular un método de verificación del rendimiento del WRF en la utilización para los pronósticos de lluvia en el país.

### 1.3.2. Antecedentes

Al inicio de los años 2000 la DGOA-MARN empezó a dar los primeros pasos en correr localmente modelos regionales como el MM5 y el ETA. Pero es desde el año 2010, ante la necesidad de generar un valor agregado a los pronósticos del tiempo que se empieza a incursionar en el tema de la modelación numérica de manera operativa y con recursos propios, utilizando el modelo WRF en servidores de la DGOA-MARN.

En El Salvador, no se han realizado estudios de verificación del modelo anteriormente de manera formal, sin embargo a nivel regional se tienen estudios e investigaciones previos como Rivera y Amador (2008b, 2008a), Sáenz Soto (2017), Maldonado et al. (2018), entre otros, que han servido como precedente y base para la presente investigación.

Se cuenta operativamente con 4 salidas diarias del modelo WRF para el pronóstico del tiempo para un periodo de 72 horas, cada una de ellas cuentan con 2 configuraciones, una con un dominio centrada en el Salvador sin anidamiento y una segunda configuración con dos dominios anidados.

*Tabla 1. Configuraciones distintivas de cada una de las salidas operativas WRF/El Salvador*

Parámetro	Servidor 1	Servidor 2	
	WRF Especial para El Salvador Resolucion a 15 km	Dominio 1 Resolucion a 25km	Dominio 2 Resolucion a 8 km
<b>Microfísica</b>	WSM6	WSM Single Moment 3 class	WSM Single Moment 3 class
<b>Física de Cúmulos</b>	New Kain-Firstch	Betts-Miller-Janjic	Ninguna

La configuración del dominio que se corre en el servidor 1, siendo un dominio especial para El Salvador realiza pronósticos para las 00Z, y 12Z, para un área que abarca el país, entre los 12.6° a 14.8° de latitud norte y entre los 90.7° a 86.9° de longitud oeste.

En el Servidor 2, las salidas se tienen para las 00Z, 06Z, 12Z y 18Z diariamente y se cuenta con dos dominios anidados, en donde el dominio 1 corresponde a un área que cubre Centroamérica y el Caribe ente las coordenadas: 5° a 29° de latitud norte y entre los 100° a 65° de longitud oeste. Por su parte el dominio 2 corresponde a un área de pronóstico únicamente para Centroamérica abarcando de 6° a 20° de latitud norte y entre los 94° a 74° de longitud oeste.

#### 1.4. Hipótesis de la investigación.

Al realizar simulaciones con diferentes parametrizaciones de cúmulos del modelo WRF se verificará la sensibilidad de este en el pronóstico de lluvia para el caso específico del paso de una onda tropical en El Salvador, mediante la comparación de la distribución espacial, temporal y los máximos de lluvia pronosticados en cada simulación. Este ejercicio permitiría generar un análisis objetivo para la elaboración de un pronóstico.

Se trabajó con un caso de estudio específico, y en base a este evento se establecieron las siguientes preguntas de investigación: ¿Qué configuración física del modelo tiene un mejor pronóstico de lluvia para El Salvador durante el paso de la onda tropical? ¿Qué configuración simula mejor la distribución espacial y temporal de la lluvia durante la influencia de dicha onda tropical? ¿Qué configuración es capaz de pronosticar máximos significativos puntuales de lluvia durante este evento? ¿Los pronósticos del WRF ofrecen una mejora en el pronóstico, en comparación con los resultados del modelo global que provee las condiciones iniciales y de frontera?

#### 1.5. Objetivos

##### 1.5.1. Objetivo general

Analizar la sensibilidad del modelo WRF a diferentes parametrizaciones de cúmulos en el pronóstico de lluvias, con el fin de comprender su comportamiento ante la influencia de una onda tropical sobre El Salvador.

### 1.5.2. Objetivos específicos

- Generar diferentes simulaciones de precipitación para El Salvador, utilizando los esquemas de Kain-Fritsch, Betts-Miller-Janjic y Gell-Devenyi- 3D en la física de cúmulos utilizando el modelo WRF.
- Determinar cuál de las parametrizaciones físicas generan mejores resultados para El Salvador en el pronóstico de lluvia para El Salvador, tomando en consideración el caso de estudio específico de una onda tropical.
- Establecer un método de comparación y verificación de los resultados del modelo para futuras investigaciones.

## Capítulo 2 . Marco teórico.

### 2.1. Generalidad del clima de El Salvador

El Salvador se encuentra geográficamente ubicado en el cinturón tropical, en el istmo centroamericano entre las latitudes 13° 10' y 14° 30' de latitud norte y entre 87° 40' y 90° 10' de longitud oeste. Limita al norte con Honduras, al sur con el Océano Pacífico, al oeste con Guatemala y al este con Honduras y El Golfo de Fonseca.

El Salvador por su ubicación y por su pequeña extensión territorial de 21041 km<sup>2</sup> lo hace un país costero en donde la influencia de las corrientes marinas del Océano Pacífico al sur, permiten que la mayoría de los parámetros climáticos no presenten grandes variaciones durante el año como es el caso de toda la región centroamericana (Guzmán, 1971; Amador, Rivera, Mora, Sáenz, y Calderón, 2016b).

En el Salvador, al igual que en la región centroamericana, se identifican dos temporadas de acuerdo con el régimen de lluvias: la “Estación lluviosa” que abarca el periodo de mayo a octubre y la “Estación seca” comprendida entre noviembre y abril (García, 2009).

#### **Régimen de lluvia en El Salvador**

El régimen de lluvia presenta variaciones durante el año, existiendo una época seca y otra lluviosa bien definidas, manifestándose en el mes de julio y agosto un periodo de reducción de lluvia denominado “La Canícula” o “Veranillo”. En esos dos meses, la lluvia disminuye y se concentra más en las horas de la noche, y de forma aislada (García y Fernández, 1996; García, 2009). Entre abril y mayo se presenta la transición de la época seca a la lluviosa y en octubre la transición inversa; la actividad lluviosa en el país comienza en el oeste y termina en el este del territorio (García y Fernández, 1997).

El régimen de las lluvias bimodal que se presenta en Centroamérica y El Salvador se ve muy influenciado por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que actúa intermitentemente en la época de lluvias y en forma acentuada en los meses de junio y septiembre; meses en los cuales se registran los máximos de precipitación (Amador et al., 2016a).



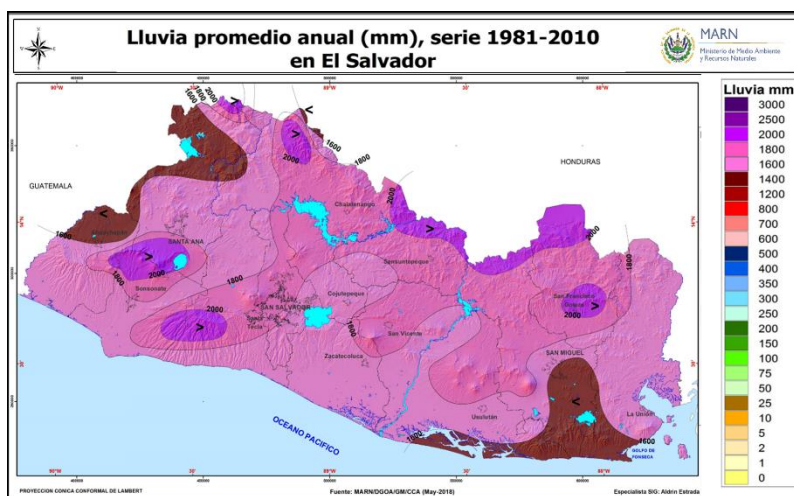


Fig. 3. Mapa de lluvia promedio en El Salvador. Serie 1965-2012

las partes altas de la cordillera del norte y las sierras del suroeste del país, donde se alcanzan promedios de 1863 mm. La costa y el oriente del territorio son las zonas con menor acumulación de lluvia, donde se registran valores alrededor de 1600 mm de precipitación anual. Las sierras y volcanes del suroeste presentan cantidades arriba de los 2400 mm (García, 2009; MARN, 2017).

El 85% del total de la lluvia proviene de chubascos muchas veces acompañados de tormentas eléctricas y el restante 15% es debido a la influencia de temporales (MARN, 2017). Lo que favorece o no la lluvia en El Salvador y en la región es la acción de sistemas tropicales y subtropicales. Entre esos sistemas los más importantes son las perturbaciones en los alisios y la influencia de la ZCIT (Amador et al., 2016a).

Los chubascos (lluvias de corta duración), característicos de la época lluviosa, generalmente tienen un promedio de una hora y 20 minutos, alcanzando intensidades máximas mayores a 2 mm por minuto (SNET, 2008). Los chubascos son producidos por perturbaciones en la corriente del este favorecida por la orografía, y por los sistemas locales de viento o transporte de aire húmedo desde el Pacífico.

La ZCIT beneficia la formación de campos nubosos y acumulación de humedad que pueden cubrir todo el país. Esto da lugar a condiciones meteorológicas conocidas como “temporales”, fenómeno cuyas condiciones atmosféricas favorecen la ocurrencia de precipitaciones continuas y por lo general de baja intensidad, capaces de generar grandes

La Figura 3 muestra el mapa climatológico de lluvia promedio a nivel nacional. Los valores promedios anuales de lluvia oscilan entre 1200 mm en los alrededores de la frontera noroeste con Guatemala, y 2800 mm en

acumulados de lluvia, principalmente en la zona sur del territorio (Fernández, Chacón y Melgaje, 1996; Garcia, 2009).

### 2.1.1. Fenómenos Atmosféricos productores de lluvia en El Salvador.

En el trópico se observan diversos sistemas atmosféricos, los cuales al combinarse con escenarios locales en cada región o país tales como la orografía, son capaces de generar condiciones meteorológicas adversas. Para intereses de esta investigación se describirán de forma general dos sistemas atmosféricos importantes para definición y análisis del caso de estudio, estos son las ondas tropicales y los sistemas convectivos de mesoescala.

#### 2.1.1.1. Ondas tropicales

El término "onda tropical", hace referencia a una perturbación sinóptica en los alisios tropicales. Constituyen un sistema atmosférico de escala sinóptica dominante que afecta las regiones de: África tropical, Atlántico tropical, el Caribe y el Pacífico oriental. Estas ondas nacen en África y se desplazan hacia el oeste; en una imagen satelital se reconocen por la convección asociada la cual forma un patrón nuboso de "V" invertida o en bandas.

Las ondas tropicales u ondas del este son el producto de una perturbación o inestabilidad que altera un flujo que inicialmente estaba en equilibrio. Se forma cuando la fuerza restauradora que actúa para eliminar la perturbación es excesiva. La mayoría de las ondas tropicales tienden a formarse en algún lugar entre 15° E y 30° E, y aunque el mecanismo que da inicio a las ondas tropicales sigue siendo objeto de estudio, claramente la inestabilidad del chorro africano del este es un factor importante (Burpee, 1972).

Se han propuesto dos teorías principales sobre la génesis de las ondas tropicales: a) un mecanismo lineal de inestabilidad barotrópica-baroclínica mixta (Hsieh y Cook, 2005) y b) un forzamiento de amplitud finita corriente arriba de la región de formación de la onda tropical (Simpson, Neil, Shideler y Johnson, 1967).

El estudio de Thorncroft et al. (2006) sugirió que las ondas tropicales se inician por efecto del forzamiento convectivo local cerca de la región de entrada del chorro africano del este; el calentamiento latente crea una vaguada inicial corriente abajo que tarda entre 5 y 7 días en llegar a la costa de África occidental.

Las ondas tropicales son sensibles a la posición de la convección; su iniciación es más eficiente cuando el calentamiento crea circulaciones en la baja troposfera cerca de la región de entrada del chorro africano del este (Charney y Stern, 1962). Por lo tanto, es posible explicar la naturaleza intermitente de las ondas del este observadas en términos de la variabilidad de la actividad convectiva en esta zona, en lugar de considerar exclusivamente la estructura del chorro (Hopsch, Thorncroft y Tyle, 2010).

En ocasiones estos sistemas, se fortalecen de tal forma que llegan a formar ciclones tropicales o logran alcanzar la cuenca del Pacífico nororiental (Avila y Pasch, 1995).

**Estructura de una Onda Tropical** - En términos generales, las ondas tropicales son de núcleo frío, aproximadamente hasta el nivel de 600 hPa y exhiben un núcleo caliente débil a mayor altura. La estructura de la onda evoluciona conforme se desplaza hacia el oeste. La vaguada de la onda suele definirse en términos del punto donde el viento meridional es cero, que corresponde al lugar donde los vientos cambian de rumbo, de sur a norte (Laing y Byrd, 2012).

**Variabilidad Interanual** - Normalmente, la duración de la temporada de ondas tropicales es mayor en años húmedos (años en que las precipitaciones se comportan arriba de la media climatológica), las ondas tienden a ser más intensas en el nivel de 600 hPa. Los años secos (años en que las precipitaciones se comportan por debajo de la media climatológica) de la media están marcados por una menor actividad de ondas tropicales. (Grist, 2002).

Lo anterior se puede relacionar con la influencia del ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) a nivel centroamericano la fase cálida significa la presencia de un año seco y es en esta fase donde los vientos asociados al Chorro de Bajo Nivel del Caribe (CLLJ por sus siglas

en inglés) son más fuertes que lo normal, por lo que las anomalías de precipitación son positivas en el Caribe occidental cerca de Centroamérica y negativas en los Mares Intra Americanos (Amador, 2008).

Se ha sugerido que señales de escala global como ENOS, la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, por sus siglas en inglés) y la Oscilación decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés), junto con cambios en la actividad transitoria en el Caribe como por ejemplo las Ondas del Este y cambios en la intensidad del CLLJ tienen un papel importante en los patrones de lluvia. Sin embargo, la variabilidad del CLLJ en escalas de tiempo sinópticas y más cortas no se ha estudiado completamente. Por lo tanto, su relación con los cambios de precipitación en esas escalas y en el contexto de señales de escala global como ENSO, PDO, AMO, es prácticamente desconocida (Amador et al., 2016b). Esto tiene, de hecho, un impacto adverso en los pronósticos meteorológicos regionales a medio y corto plazo, no solo en la región del Mar Intra americano, sino también en otras regiones como las Grandes Llanuras de Estados Unidos (Mo, Chelliah, Carrera, Higgins, y Ebisuzaki, 2005).

**Variabilidad intra-estacionaria** - Si bien las ondas tropicales pueden formarse en cualquier momento entre mayo y mediados de octubre, alcanzan su máxima intensidad y frecuencia durante los meses de julio, agosto y septiembre. La migración y el pico estacional de las ondas tropicales están vinculados al ciclo del chorro africano del este. Sin embargo, no todas las ondas tropicales del este siguen el ciclo del chorro africano oriental, siendo las más cercanas las que tienen períodos de 3 y de 5 días (Laing y Evans, 2016).

La variabilidad en la estructura e intensidad de las ondas tropicales está relacionada con:

- ✓ La variabilidad en el entorno regional, por ejemplo, la cizalladura y la convergencia; así como también la variabilidad en el acoplamiento de la convección con las diferentes fases de la onda, es decir, las vaguadas, las dorsales y las regiones entre ellas (Laing y Byrd, 2012).

- ✓ Las interacciones con las vaguadas extratropicales y con las ondas ecuatoriales acopladas por convección (Barry y Carleton, 2001).
- ✓ Las interacciones con la oscilación Madden-Julian y las ondas Kelvin. Las cuales modulan la convección sobre África y afectan la actividad de ondas tropicales (Ventrice, Thorncroft y Roundy, 2011)

**Peligros e impactos** - Los impactos más frecuentes de las ondas tropicales son lluvias intensas, y tiempo severo como: fuerte actividad eléctrica, fuertes vientos, granizo entre otros. También contribuyen al transporte de grandes cantidades de polvos minerales (Ventrice et al., 2011) a través del norte de África y, desde allí, hasta el Caribe y las Américas (Jones, Mahowald y Luo, 2004).

#### 2.1.1.2. Sistemas convectivos de mesoescala (SCM).

Las circulaciones y los sistemas de mesoescala se suelen definir en términos de una escala horizontal intermedia entre la escala sinóptica y la microescala, del orden de 10 a 1000 km. En el trópico, los fenómenos de mesoescala son fundamentales, ya que comprende la mayor parte de la convección tropical.

Los sistemas de mesoescala, que no se pueden representar en cartas sinópticas ordinarias, tienen importancia práctica, porque en la mayoría de los casos el tiempo severo está asociado con movimientos en esta escala (Boos, Hurley y Murthy, 2015).

Un SCM es un sistema atmosférico convectivo multicelular organizado que se caracteriza por un extenso escudo nuboso estratiforme en los niveles medios y altos (Cotton, Bryan y Van den Herver, 2011). Describe un espectro continuo de fenómenos que abarca las pequeñas tormentas multicelulares, las líneas de turbonada o conglomerados de nubes tropicales e incluso los ciclones tropicales (Boos, Hurley y Murthy, 2015).

Estos sistemas, que producen lluvias intensas y tiempo severo, son esenciales para el transporte vertical de calor, humedad y momento. Su desarrollo, crecimiento y movimiento

vienen determinados por distintas variables, como la cizalladura en niveles bajos, la estabilidad estática y la distribución de la humedad (Boos et al., 2015).

**Características Generales** - Estos sistemas comienzan siendo cumulonimbos a lo largo de un límite de convergencia en la troposfera inferior que luego se fusionan y se organizan para formar un único sistema nuboso con extensas zonas contiguas productoras de lluvia. Los sistemas convectivos de mesoescala contienen complejas estructuras de corrientes ascendentes y descendentes que reflejan las zonas de precipitaciones convectivas y estratiformes. La región estratiforme del yunque surge a partir del ensanchamiento de las corrientes convectivas ascendentes en la troposfera superior y del ascenso de mesoescala (Boos et al., 2015). A medida que el sistema comienza a disiparse, la intensidad de las células convectivas disminuye y la zona de lluvias estratiformes pasa a ser dominante (Parker y Johnson, 2000).

Los SCM continentales son más intensos que los oceánicos (Boos et al., 2015). Por lo general, la velocidad de las corrientes ascendentes de los sistemas continentales es dos o tres veces mayor que la de los sistemas oceánicos, lo cual conduce a la formación de nubes más altas y de una capa de mezcla de fases más profunda en los SCM. (Parker y Johnson, 2000).

**Ciclo Diurno de los SCM** - El ciclo de vida general de los sistemas convectivos de mesoescala está bajo la influencia del ciclo diurno y depende de los efectos moduladores del terreno elevado, la topografía costera y el entorno de gran escala (Boos et al., 2015). Las estructuras de precipitación convectiva más intensas (definidas por el efecto de dispersión del hielo) alcanzan un máximo alrededor de las 15:00 hora local. No obstante, la mayoría de los sistemas convectivos de mesoescala tropicales alcanzan su intensidad máxima entre medianoche y las 03:00 hora local (Laing y Evans, 2016). En algunas regiones, el ciclo diurno de los SCM coincide con la evolución de un chorro de bajo nivel nocturno que les suministra aire húmedo durante la noche (Boos et al., 2015).

## 2.2. Predicción numérica del tiempo.

Los modelos de predicción numérica son un componente integral y de gran importancia en el proceso moderno del pronóstico del tiempo. La meteorología dinámica, que desarrolla las ecuaciones que describen la evolución de la atmósfera, constituye la base teórica de la PNT. La predicción dinámica emplea aproximaciones numéricas de las ecuaciones dinámicas para pronosticar el estado de la circulación atmosférica en el futuro (Warner, 2010).

Los modelos se inicializan con los datos obtenidos por la red mundial de observación. La resolución espacial y temporal de los fenómenos de interés determina la configuración del modelo. El término resolución se emplea ampliamente para hablar de la distancia entre puntos de la malla, lo que significa que en general si en un modelo los puntos de la malla están separados por una distancia de 20 km, dicho modelo solo podrá representar estructuras mayores a 20 km (Laing y Evans, 2016).

El tipo de modelo, la capacidad de cómputo y la aplicación específica dictan la formulación numérica, la dinámica, las aproximaciones físicas y el procedimiento de asimilación de datos que se utilizarán. Para un modelo operativo, se busca un compromiso entre la eficiencia y la exactitud que permita generar pronósticos oportunos. Sin embargo, la habilidad disminuye rápidamente a más de siete días para las variables de escala sinóptica. La habilidad de predicción de nubes y precipitaciones es considerablemente menor (Jascourt, 2013).

### 2.2.1. Modelos regionales y de área limitada.

Debido a que los modelos globales, cuentan con una estructura de malla gruesa es difícil por no decir imposible el pronóstico de algunos fenómenos atmosféricos de mesoescala. Para solventar esta limitante existen modelos de PNT regionales o de área limitada que proporcionan mayor resolución en la simulación de la atmósfera en un determinado momento.

Los modelos de área limitada o regionales se ejecutan a partir de los modelos globales para uso en entornos operativos y para fines de investigación. Si bien los modelos

regionales brindan una mayor resolución, se ven limitados por las condiciones de fronteras laterales impuestas por el modelo global. Dichas condiciones de fronteras laterales constituyen una fuente de error, ya que las técnicas numéricas empleadas para relacionar la escala de los dos modelos pueden producir errores (Warner, Peterson, y Treadon, 1997). Los modelos de alta resolución representan las estructuras de forma más realista, pero con toda probabilidad esas mismas estructuras serán inexactas en cuanto a su posición y evolución temporal.

#### 2.2.1.1. Fuentes de error de pronósticos del modelo.

Las principales fuentes de error en los pronósticos que presenta un modelo regional atmosférico son:

**Condiciones Iniciales (CI)** - Tiene que ver con las observaciones que alimentan los modelos en el tiempo inicial. Estas observaciones representan errores cuando hay ausencia de datos, o son medidos erróneamente o con instrumentos defectuosos o no calibrados. Además, depende del sistema de asimilación de datos con la que cuenta el modelo.

**Condiciones de frontera** - Se refieren a las condiciones en superficie y de como su nombre lo indica los límites o fronteras de una región dada. Los modelos regionales suelen anidarse en los modelos globales, la calidad del pronóstico puede degradarse debido a las diferencias de resolución horizontal, vertical y temporal (Laing y Evans, 2016).

**Aproximaciones físicas o parametrizaciones** - El modelo no puede representar todos los procesos y las estructuras que ocurren dentro de una celda o caja de la malla. (Gallegos, Durán, y Álvarez, 2017). A veces, los fenómenos son demasiado pequeños o complejos como para resolverlos numéricamente; la parametrización es una manera de agregar el efecto de tales procesos al modelo. Esta es una de las áreas más difíciles y controvertidas del campo de modelado de la atmósfera.

Normalmente, ciertos procesos físicos (como los cambios de fase del agua, la radiación y la turbulencia en la capa límite) se parametrizan y se conocen como la “física” del modelo.



En la mayoría de los modelos, cada proceso se parametriza por separado, sin embargo, la evolución dentro del modelo refleja los efectos conjuntos de la parametrización de los distintos procesos. Es difícil diagnosticar el error del modelo asociado a cada parámetro individual (Skamarock et al., 2008).

El rendimiento del modelo y la organización de los sistemas que producen precipitación son dos aspectos sensibles a la microfísica, que controla las nubes y la precipitación a escala de malla, a través de la distribución del calor latente liberado y los efectos de retroalimentación radiativa (Laing y Evans, 2016).

### 2.2.2. Modelo regional de mesoescala WRF (Weather Research and Forecasting Model).

El modelo de Investigación y Predicción Meteorológica WRF (por sus siglas en inglés) está actualmente en uso operativo en diferentes centros de pronósticos, incluido El Salvador. Este modelo es considerado de última generación, diseñado para ser aplicado tanto en pronósticos operativos del tiempo, como en investigación de fenómenos meteorológicos.

Se trata de un modelo de simulación atmosférica de área limitada, no hidrostático, sensible a las características del terreno y diseñado para predecir la circulación atmosférica a escala sinóptica, mesoescalar y regional (Skamarock et al., 2008). WRF puede generar simulaciones atmosféricas utilizando datos reales o condiciones idealizadas, modelación de la calidad del aire y estudios de interacción océano-atmósfera, mediante el acoplamiento con modelos oceánicos.

#### 2.2.2.1. Opciones físicas

Las opciones físicas del modelo WRF están divididas en 5 categorías, las cuales pueden ser elegidas y modificadas. Estas opciones son:

- **Microfísica:** se refiere a la emulación de los procesos de nubes y precipitación en los modelos que eliminan el exceso de humedad atmosférica producido directamente por los campos de viento, temperatura y humedad pronosticados sobre la base de la

dinámica. Los esquemas de microfísica se conocen también como esquemas de precipitación a escala de malla (Byrd, Bua y Jascourt, 2009).

- **Parametrizaciones de cúmulos:** esquemas ajustados y de flujo de masa al modelado de mesoescala. Este tema se describe con más detalle en la sección 2.2.3.
- **Física de la superficie:** modelo térmico, de vegetación y humedad del suelo.
- **Física de la capa límite planetaria:** predicción de energía cinética y turbulencia.
- **Física de la radiación atmosférica:** esquemas de ondas cortas y largas con bandas multiespectrales. Los efectos de nubes y flujos de la superficie son también incluidos

### 2.2.3. Parametrizaciones de la convección de cúmulos en la predicción numérica del tiempo.

Al hablar de la "física del modelo" se hace referencia a los procesos de los modelos numéricos en la dinámica atmosférica, en procesos de convección y en la microfísica de nubes y precipitación. En última instancia, estos procesos están principalmente vinculados al tratamiento de la radiación solar entrante (de onda corta) y terrestre saliente (de onda larga) en el modelo, tanto en la atmósfera como en la superficie.

**Parametrización de la convección (PC):** es el método mediante el cual los modelos incluyen los efectos convectivos a través de la redistribución de temperatura y humedad en una columna de malla, lo cual reduce la inestabilidad atmosférica. Al reducir la inestabilidad, la PC evita que la microfísica de malla cree una convección a gran escala no realista y una ciclogénesis de bajo nivel excesivamente activa (Byrd, Bua, Jascourt y Petersen, 2009)

El proceso de convección de cúmulos es común en todas las regiones tropicales y el transporte de calor latente por este proceso es el método principal de transferencia de energía desde la superficie hasta la atmósfera (Molinari y Dudek, 1992).

Por lo tanto, es imprescindible representar la convección de cúmulos en los modelos numéricos del tiempo tropical. La convección de cúmulos ocurre a distintas escalas, motivo por el cual resulta imposible predecir una nube individual, y es por eso por lo que en los modelos numéricos se introducen parametrizaciones que representan el efecto de la convección de cúmulos dentro de una celda dada de la malla.

En la naturaleza, la convección no sólo sirve para producir precipitación, sino también para transportar el calor hacia arriba, redistribuir la humedad y además estabilizar la atmósfera (Byrd, Bua y Jascourt, 2009a; Inzunza, 2002).

Aunque la parametrización de cúmulos es una manera de representar con rapidez los efectos de la convección, su uso puede resultar problemático. A veces los esquemas de parametrización generan la convección en el momento equivocado o con mayor o menor intensidad respecto de las observaciones (Arakawa, 2004). La separación de la precipitación entre un esquema de escala de malla y de parametrización de cúmulos en un sistema dado depende del esquema elegido y de la resolución del modelo (Gallus, 1999).

La manera en que los modelos tratan la transición de la parametrización de cúmulos a una microfísica explícita, y cómo se activan y se ponderan los procesos, afecta la distribución del calentamiento en los sistemas convectivos modelados. Los esquemas de parametrización de cúmulos tienen dificultades para simular la propagación de la convección (Davis, Manning, Carbone, Trier y Tuttle, 2003).

La mayoría de los esquemas de parametrización de cúmulos basan su física en una propiedad de las columnas atmosféricas denominada Energía Potencial Convectiva Disponible para la convección (CAPE, por sus siglas en inglés), que corresponde a la máxima energía disponible para una parcela ascendente (Sáenz Soto, 2017).

El parámetro de Inhibición Convectiva (CIN por sus siglas en inglés) es otra propiedad básica a la hora de parametrizar la convección. El CIN es relevante, ya que suprime la convección si su valor es grande, aunque el CAPE sea suficiente para producir

convección. Valores altos del CIN son un indicador de que no existe suficiente energía para que las parcelas elevadas por la mezcla turbulenta en la capa límite puedan alcanzar un nivel libre de convección e iniciar convección profunda cuando los valores de CAPE lo permitan.

Un modelo con una malla de 2 km puede producir actividad convectiva detallada (Weisman, Skamarock y Klemp, 1997), los estudios demuestran que su habilidad de predicción a escalas que permiten discernir tales detalles es muy dudosa (Weiss et al., 2008). Por lo tanto, es probable que el costo computacional que implica la implementación de un modelo operativo de resolución tan alta no se justifique por el momento.

Resulta difícil comparar la calidad de dos esquemas de parametrización de la convección, porque la habilidad de predicción es una función del modelo en su conjunto global, lo cual incluye la interacción entre diferentes parametrizaciones físicas y otras fuentes de error.

A continuación, se describen las características generales de tres esquemas de parametrización de la convección, que son los esquemas utilizados para el caso de estudio de la presente investigación.

#### 2.2.3.1 Betts-Miller-Janjic (BMJ)

Esta parametrización fue desarrollada por Betts-Miller en 1986 y modificada por Janjic en el año de 1994. Es el esquema del modelo Eta operacional.

BMJ ajusta el sondeo del modelo hacia un perfil post-convectivo predeterminado de referencia que se obtiene a partir de la climatología. La convección es activada por un sondeo húmedo con un nivel bajo de CAPE y el hecho de que las nubes alcancen una profundidad dada en exceso de un determinado umbral (Sáenz Soto, 2017).

El esquema BMJ genera convección si:

- Hay disponibilidad de energía potencial convectiva,

- El espesor de las nubes convectivas supera un determinado umbral climatológico de referencia y
- Si los sondeos modelados muestran humedad hasta al menos 700 hectopascales (hPa).

La BMJ usa los perfiles de referencia basados en observaciones climatológicas y estos son fijos, de modo que no permiten flexibilidad para cada situación de pronóstico. Como resultado, pueden causar la eliminación de estructuras verticales importantes o eventos extremos (Betts y Miller, 1986).

#### 2.2.3.2. Esquema Grell-Devenyi (GD).

Se trata de un esquema simplificado de los procesos que ocurren en cumulonimbos, producto de la convección profunda. Este es un esquema de control profundo, o sea, que depende de la generación de CAPE en el ambiente. (Sáenz Soto, 2017)

De acuerdo con lo descrito por Sáenz Soto (2017), este esquema dependiendo de las condiciones, puede generar una población de nubes convectivas en una sola caja del modelo. Todas estas nubes tienen las mismas dimensiones y están caracterizadas por 2 circulaciones, una relacionada al ascenso dentro de la nube y otra al descenso. Ambas circulaciones producen un flujo compensatorio en el ambiente próximo a la nube. La mezcla del aire en la nube con el del ambiente, se da solamente en la base y el tope de la nube, sin mezcla lateral en los límites de la nube.

El origen de las corrientes ascendente y descendente están determinados por el máximo y el mínimo en la energía estática húmeda. A partir de balances de humedad, este esquema calcula los flujos de masa en la base y el tope de la nube.

La activación de este esquema se da cuando la energía estática húmeda del ambiente es suficiente para que parcelas ubicadas a la altura donde esta propiedad es máxima, alcancen el nivel de convección libre.

El cierre del esquema consiste en plantear una representación del flujo de masa de la corriente ascendente en el nivel de origen. Este cierre está basado en la idea de que los procesos convectivos estabilizan el ambiente a la misma velocidad que los procesos de otra naturaleza lo desestabilizan.

El esquema **Grell 3D** (G3D) es una versión mejorada del sistema de GD. Este esquema se basa en la parametrización creada por Grell y Devenyi (2002), sin embargo, utiliza corrientes de aire ascendentes y descendentes explícitas como disparador de la convección, similar a GD, también usa la subsidencia en columnas adyacentes, interconectando cada una de las columnas de convectivas. Esta parametrización tiene retroalimentación de la radiación y de la convección profunda (Grell, 1993).

#### 2.2.3.3. Kain-Fritsch (KF)

Este esquema está diseñado para redistribuir la masa de aire en una columna atmosférica, con el objetivo de disipar la energía potencial disponible. KF genera procesos convectivos si los datos de las condiciones iniciales disponen de CAPE (determinado por el sondeo). Es un Esquema de convección profunda y superficial, esquema de sub-rejilla utilizando un enfoque de flujo de masa con corrientes descendentes y la escala CAPE.

El esquema KF es un esquema más complejo de los esquemas GD y G3D, ya que intenta representar los procesos dinámicos embebidos en la convección. Este esquema calcula los flujos de masa en cada nivel vertical y es un esquema híbrido; se activa por forzamientos en bajo nivel, pero su cierre depende del CAPE en la columna (Sáenz Soto, 2017).

La principal función de este esquema es mezclar la masa entre los niveles donde se genera CAPE para removerlo. Para esto se generan 3 corrientes: 2 húmedas y una seca. De las corrientes húmedas, una es ascendente y la otra descendente, la dirección de la corriente seca es determinada por el flujo neto de masa entre las corrientes húmedas y su función es conservar la masa en cada nivel (Kain, 2004). A diferencia de los esquemas de Grell, KF sí toma en cuenta la mezcla lateral hacia adentro y hacia afuera en los bordes de las nubes.

Sáenz Soto (2017) en su descripción del esquema afirma que la mezcla, tanto hacia adentro como hacia afuera, en las corrientes es uno de los procesos claves de este esquema. Se supone que la tasa de mezcla de aire hacia adentro de la corriente ascendente es igual a la tasa con la que se mezcla aire hacia afuera de ésta.

La masa dentro de una columna atmosférica se redistribuye de modo tal que la CAPE se consume durante el proceso de convección. La convección es activada por la CAPE de una capa de 50 a 100 hPa de espesor en la baja troposfera donde una parcela de aire cálido y húmedo se halla atrapada debajo de una inversión lo suficientemente poco profunda para que una parcela la penetre con una velocidad vertical de unos pocos metros por segundo y cuando la profundidad convectiva de las nubes excede un umbral.

## Capítulo 3 Datos y métodos.

Para el cumplimiento de los objetivos planteados se procedió a realizar una serie de pronósticos retrospectivos, para un mismo evento con 3 parametrizaciones de cúmulos diferentes. Los datos obtenidos en dichas simulaciones fueron analizados y comparados con los datos observados.

### 3.1. Métodos

#### 3.1.1. Caso de estudio.

La investigación de este trabajo se centra en la ejecución de pronósticos de un evento en específico de lluvia con el modelo WRF para la verificación de su rendimiento. Dicho evento fue el paso de una onda tropical sobre El Salvador. Para lo cual se realizan 3 simulaciones las cuales se describen a continuación.

**Descripción general del evento:** Entre el 23 y 24 de agosto de 2017, se presentaron precipitaciones con altos acumulados de lluvia en algunos puntos del territorio salvadoreño, generados por campos nubosos convectivos. La siguiente información se obtuvo de documentos internos del CPM y del Observatorio Ambiental del MARN, reflejada en las bitácoras e informes de monitoreo realizados en los días en cuestión.

Miércoles 23 de agosto: Una perturbación inmersa en el flujo del este (vaguada) al desplazarse sobre territorio salvadoreño favoreció la formación de campos convectivos, que dejó un acumulado máximo de lluvia en las 24 horas de 92.8 mm (Figura 4), el cual se registró en la estación convencional del Volcán de Conchagua. Dicha estación se localiza en el oriente del país al sur del departamento de La Unión; los acumulados de lluvia en el resto del territorio rondaron entre los 50 y 70 mm.

Jueves 24 de agosto: Una onda tropical se desplaza sobre El Salvador y a su paso dejó un acumulado máximo de lluvia (puntual) en 24 horas de 201 mm en la estación automática de Conchagua, al sur del departamento de La Unión (Figura 5), afectando a este sector por segundo día consecutivo.



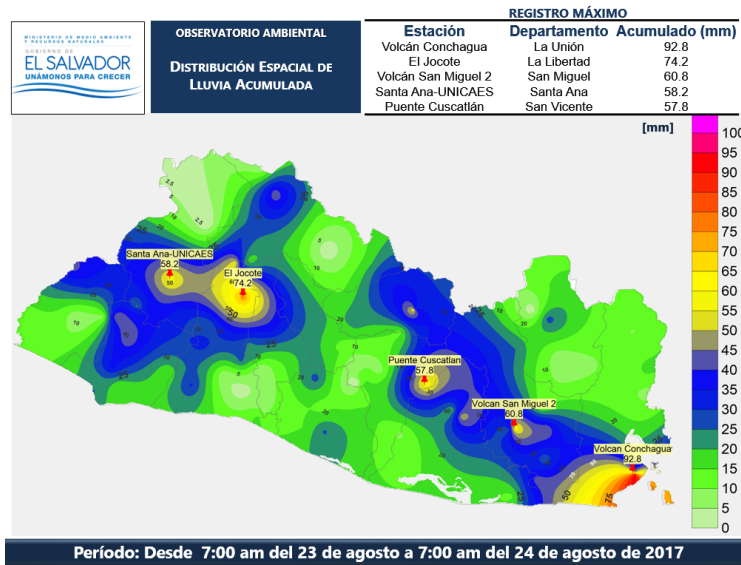
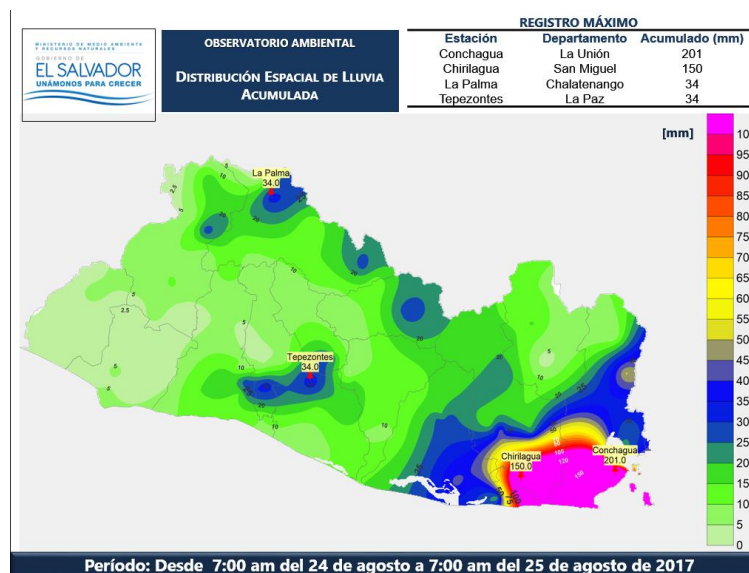


Fig. 4. Registro de lluvia acumulada desde las 7am del miércoles 23 de agosto hasta las 7am del jueves 24 de agosto de 2017. Acumulado de lluvia de 24 horas por influencia de una perturbación en el flujo del este sobre El Salvador y el acercamiento de una onda tropical.

Cabe mencionar que la estación automática y la convencional de Conchagua no están ubicadas en el mismo lugar. La estación convencional está en un terreno más alto (aproximadamente 800 m.s.n.m.) sobre el Volcán de Conchagua, mientras que la estación automática se ubica en el pueblo del mismo nombre en el departamento de la Unión a las faldas del volcán, siendo la variabilidad topográfica en la ubicación de dichas estaciones la razón principal en la diferencia en las mediciones.



---

*Fig. 5. Registro lluvia acumulada desde las 7am del jueves 24 de agosto hasta las 7am del viernes 25 de agosto de 2017. Acumulado de lluvia de 24 horas por influencia de una onda tropical sobre El Salvador.*

### 3.1.1.1. Afectaciones del evento.

Las condiciones meteorológicas, brevemente descritas para el 23 y 24 de agosto de 2017, dieron paso a algunas afectaciones en el territorio las cuales se describen a continuación; cabe destacar que dicha información se obtuvo directamente de las bitácoras de las áreas de Geología-Deslizamientos y del Servicio Hidrológico Nacional, información de carácter interno que no está disponible para consulta al público, únicamente puede ser accedida por el personal de del DGOA-MARN.

Condiciones Hídricas. Incrementos de nivel y afectaciones en los siguientes ríos:

- Río Grande de San Miguel: Estación La Canoa, registró un nivel máximo en el río de 7.31 m (90% del umbral de afectación)
- Río Goascorán: Estación Pasaquina, registró un nivel máximo de 3.97 m (51% del umbral de afectación).
- Desborde de quebrada en Hacienda San Cayetano en La Unión.
- Inundación urbana en Colonia Nueva, Caserío La Cañada, municipio de Conchagua en el departamento de La Unión.

Condiciones Geológicas. Las condiciones de susceptibilidad alta a deslizamientos se presentaron para las siguientes localidades:

- Departamento de La Unión: municipios de Conchagua, El Carmen e Intipucá y en los alrededores del volcán de Conchagua. Departamento de San Miguel: municipio de Chirilagua y sierra de Jucuarán.
- Afectaciones de pequeños derrumbes y árboles caídos sobre carretera panamericana que conduce a La Unión, entre El Carmen y Los Mangos.

- Desprendimientos de tierra sobre carretera Litoral, cantón El Chapulín, Chirilagua en el departamento de San Miguel.

### 3.1.3. Diseño del experimento.

Los modelos de predicción numérica se basan en Modelos de Circulación General, los cuales requieren condiciones iniciales (CI) y de contorno antes de que puedan comenzar a correr sus simulaciones en el tiempo y generar así estimaciones de situaciones futuras (Yang, Uddstrom, y Duncan, 2011), es necesario que estas CI logren un equilibrio con el “Estado Preferido del modelo” es decir su climatología la cual se encuentra dentro de los límites determinados tanto por el forzamiento externo como por la física del modelo interno (Koster y Milly, 1996).

El tiempo de ajuste depende del tipo de modelo y fenómeno atmosférico, incluso si estos utilizan las mismas CI. El tiempo del proceso de ajuste puede ser cuestión de días para modelos regionales y hasta meses o años para modelos oceánicos (Yang, Dickinson, Henderson-Sellers, y Pitman, 1995; Cosgrove et al., 2003), es por esta razón que en la presente investigación se utilizó como condiciones iniciales la salida del GFS del día 22 de agosto para verificación del pronóstico del WRF del día 23 y 24 de agosto de 2017, determinando así un tiempo de ajuste o “*spinup*” de 36 horas.

Se corren un total de tres simulaciones para el evento del acercamiento y paso de la onda tropical sobre El Salvador. Se configuró el modelo con 2 dominios anidados (Figura 6) con las siguientes especificaciones en común:

**CI para correr WRF:** Datos de pronóstico del Modelo Meteorológico Global GFS del 22 de agosto de 2017 de las 00Z, de medio grado de resolución horizontal, y una resolución temporal inicial de tres horas.

**Tiempo de pronóstico en simulaciones:** 90 horas.

**Resolución vertical:** 49 niveles. Con un tope de la atmósfera en 100hPa.

### Resolución horizontal:

- **Dominio 1:** 30 kilómetros, para el Caribe y Centroamérica (Figura 6a). Entre el ecuador hasta los  $23.91^{\circ}$  N de latitud y entre los  $96.2^{\circ}$  W a  $60.1^{\circ}$  W de longitud.
- **Dominio 2:** 10 kilómetros, para El Salvador (Figura 6b). Entre los  $12.1^{\circ}$  N y  $15.3^{\circ}$  N de latitud y entre los  $91.1^{\circ}$  W a  $86.4^{\circ}$  W de longitud.

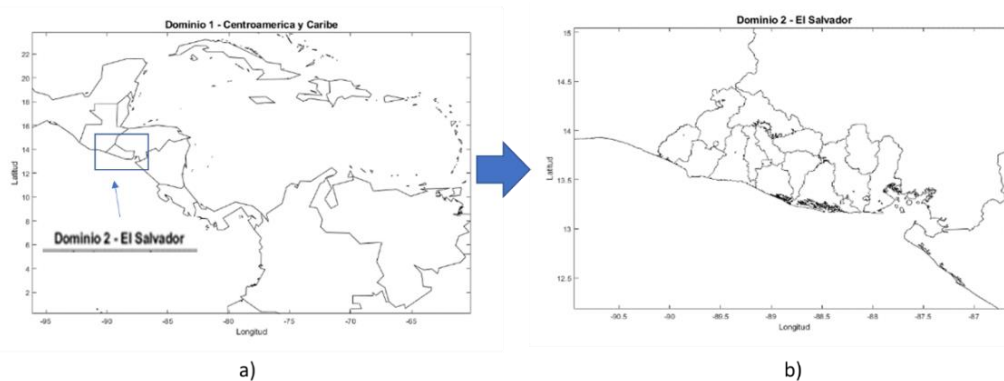


Fig. 6. Dominios configurados para las simulaciones. a) Dominios anidados, dominio 1 abarca Centroamérica y el Caribe a una resolución de 30 kilómetros y b) dominio 2 para El Salvador a una resolución de 10 km.

Para las tres simulaciones se utilizaron los mismos esquemas de microfísica del modelo: WSM de 6 clases, capa límite planetaria usa el esquema de la Universidad de Yonsei, y de la capa superficial 5-capas con difusión térmica. Cada experimento se diferencia del otro por el esquema utilizado en la parametrización de cúmulos, lo cual se detalla en la Tabla 2.

Para el análisis de resultados se determinó que la salida de control será la simulación con parametrización de cúmulos Kain-Fritsch (KF), debido a que es la configuración utilizada de forma operativa en el dominio especial para El Salvador, dominio Especial para El Salvador con una resolución de 15 km, mientras que en el experimento se hará a una resolución de 10km en un dominio anidado, siendo esta la diferencia del pronóstico del experimento con la salida operacional.

*Tabla 2. Parametrizaciones y esquemas utilizados en las simulaciones del caso de estudio de la Onda Tropical del 24 de agosto de 2017 en El Salvador.*

Simulación	Esquema utilizado en Física de Cúmulos
Salida de Control	Kain-Fritsch (KF)
Experimento 1	Betts-Miller-Janic (BMJ)
Experimento 2	Grell 3D (G3D)

### 3.2. Datos observados

De las estaciones automáticas de la red de observación hidrometeorológica de El Salvador, se obtuvieron los datos registrados de lluvia de 25 estaciones (Tabla 3) en las fechas del caso de estudio; con dichos datos, para cada una de las estaciones se elaboraron series de tiempo con acumulados cada 3 horas, para los dos días del evento.

Para la selección de las estaciones se tomaron los siguientes aspectos de control de calidad:

- Entre el conjunto de estaciones estudiadas se encuentre la estación con el máximo registrados en las 24 horas de los días del evento.
- Las estaciones registrarán lluvia al menos en uno de los dos días del caso de estudio, donde no se descarta la posibilidad del caso de “no lluvia” o de cantidades muy pequeñas en uno de los dos días del evento en estudio.
- Contar con al menos una estación por cada departamento del país.
- Que las estaciones no tengan fallos en la recepción de datos, por lo tanto, se cuente con un registro homogéneo de los mismos.

Tabla 3. Estaciones automáticas utilizadas para el análisis.

#	Nombre de la Estacion	Departamento	Zona	Ubicación - latitud/longitud
1	Boquerón	La Libertad	Centro	13.74 / 89.267
2	Chirilagua	San Miguel	Oriente	13.256 / -88.197
3	Ciudad Barrios	San Miguel	Oriente	13.725 / -88.273
4	Cojutepeque	Cuzcatlan	Centro	13.721 / -88.926
5	Comasagua	La Libertad	Centro	13.635 / -89.349
6	Concepción de Oriente	La Union	Oriente	13.797 / -88.710
7	Conchagua	La Union	Oriente	13.276 / -87.834
8	El Imposible	Ahuachapan	Occidente	13.827 / -89.947
9	El Jocote	La Libertad	Centro	13.913 / -89.276
10	Guacotecti	Cabañas	Centro	13.871 / -88.645
11	Ilopango	San Salvador	Centro	13.689 / -89.118
12	Las Flores	Chalatenango	Centro	14.043 / 88.809
13	Las Pilas	Chalatenango	Centro	14.371 / -89.096
14	Los Naranjos	Santa Ana	Occidente	13.876 / -89.674
15	Melara	La Libertad	Centro	13.480 / -89.221
16	Metapán	Santa Ana	Occidente	14.360 / -89.545
17	Perquín	Morazán	Oriente	13.961 / -88.158
18	Santa Ana	Santa Ana	Occidente	13.982 / -89.548
19	Santa Beatriz	Sonsonate	Occidente	13.592 / -89.736
20	Santiago de María	Usulután	Oriente	13.480 / -88.472
21	Tamarindo	Chalatenango	Centro	14.097 / -89.525
22	Tepezontes	La Paz	Centro	13.620 / -89.010
23	Volcán de San Miguel	San Miguel	Oriente	13.443 / -88.278
24	Verapaz	San Vicente	Centro	13.657 / -88.861
25	Zacatecoluca	La Paz	Centro	13.508 / -88.558

### 3.3. Metodología de análisis de resultados.

#### 3.3.1. Verificación

La verificación es la valoración y cuantificación de la relación y la coincidencia que existe entre el conjuntos de pronósticos y observaciones (Gallegos et al., 2017). Las actividades de verificación son útiles si conducen a toma de decisiones en relación con el producto verificado. Esta decisión debe generar cambios en la forma de cómo se elaboran los pronósticos o conducir a una decisión de “No hacer nada” y se considera que el producto es satisfactorio. Por cuanto se asume que las observaciones son una representación precisa de la realidad, se puede considerar que un punto de observación representa adecuadamente a los eventos dentro un área determinada

### 3.3.1.1. Propósitos de la verificación

Los propósitos de la verificación en esta investigación son principalmente el conocer el desempeño del modelo WRF a través de análisis de estadísticos, verificando si sus resultados en las predicciones se acercan a la realidad observada, y determinar cuál de los experimentos tiene un mejor resultado, si es que alguno de ellos así lo presenta.

Además, es importante la determinación de acciones a tomar para mejorar la calidad del pronóstico, es decir, suministrar información para la investigación y el desarrollo.

Cabe destacar que el período analizado de dos días y un solo evento, es tiempo e información insuficiente para realizar una validación precisa del modelo; por lo que es necesario realizar nuevos experimentos del mismo tipo, y las conclusiones de este trabajo son en base al evento estudiado y no al modelo en general.

### 3.3.2. Proceso de verificación

Para poder realizar el análisis de resultados, se definió un “Rango Aceptable” en la diferencia de los valores entre la lluvia observada y la simulada. Los pronósticos dentro de este rango se consideran “acertados”. Para la determinación de este rango se han tomado en cuenta los siguientes aspectos:

1. **Fenómeno Atmosférico:** las ondas tropicales son capaces de generar acumulados de precipitación en forma de tormentas, chubascos, por lo general con una duración entre los 30 a 45 minutos de lluvia, con intensidades variables (García, 1996).
2. **Época del Año:** el caso de estudio seleccionado tuvo lugar en el mes de agosto, en donde la saturación del suelo por lo general es de moderada a alta y los niveles de los ríos sobre todo los de rápido crecimiento pueden generar problemas, aún en periodos cortos de lluvias si estas son muy intensas causando crecidas de ríos y susceptibilidad a deslizamientos alta.

Con esta información y al conocer directamente por medio de entrevistas a meteorólogos, hidrólogos y geólogos se define para esta investigación que las diferencias entre los máximos de lluvia observada y la lluvia simulada estarán dentro de un rango aceptable cuando la diferencia de lluvia pronosticada y observada sea  $\pm 10$  mm, para acumulados en las 24 horas.

Con los resultados obtenidos en las simulaciones y las series de tiempo de las estaciones, se procede a la comparación de los datos observados contra los datos simulados. Las comparaciones se realizaron tanto de forma cualitativa y cuantitativa.

#### 3.3.2.1 Comparación cualitativa.

La comparación cualitativa se realizó de forma visual identificando la calidad del pronóstico en el aspecto de la distribución espacial de la lluvia en un periodo de 24 horas, se verifica principalmente la distribución de lluvia y la ubicación de máximos de lluvia en 24 horas en el país en cada experimento. También se analiza la estimación de intensidad de lluvia pronosticada y la capacidad del modelo WRF de pronosticar nubosidad convectiva.

Además, es importante conocer la dinámica del modelo, para lo cual se hace un análisis y comparación de los campos de viento en 850hPa y 200hPa, tanto para el modelo GFS y para cada una de las salidas del WRF, con el fin de verificar si el modelo es capaz de simular el paso de la Onda Tropical u otros sistemas que favorezcan la convección.

Para la realización del análisis cualitativo utilizan los siguientes productos de comparación:

- Imágenes de Satélite GOES16 en un dominio centroamericano.
- Imágenes de la red de radares banda X de El Salvador pertenecientes a la red de observación de la GDOA-MARN.
- Pronósticos respectivos de cada simulación del WRF para El Salvador.



- Pronósticos de lluvia acumulada en 24 horas con el dominio 1 y 2.
- Pronósticos de Reflectividad de cada simulación del WRF con el dominio 2 para análisis de intensidades de lluvia, los cuales serán comparados con las imágenes de la red de radares de El Salvador.
- Pronósticos de temperatura de topes nubosos de cada simulación del WRF con el dominio 2, para análisis de pronóstico de convección (posibles SCM), los cuales serán contrastados con imágenes de satélite del GOES16.
- Cartas de viento en 850 y 200 hPa, con el dominio 1.
- El pronóstico del modelo global (GFS) para los días respectivos, con el objetivo de identificar una posible mejora en los pronósticos con el WRF, salidas de:
  - Acumulados de lluvia en 24 horas a nivel regional y para El Salvador.
  - Cartas de viento en 850 y 200 hPa.
- Mapas de lluvia acumulada elaborados con los datos de estimación de precipitaciones proporcionados por el satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), estos serán comparados con los pronósticos de lluvia respectivos del WRF y el GFS, tomados como datos observados.

TRMM, es uno de los satélites más antiguos que registra precipitación, sus registros son base para evaluar sequías, inundaciones y efectos del cambio climático. (Marks y Stewart, 2001). Se trata de un satélite lanzado en 1997 y es una misión compartida entre las agencias espaciales de Estados Unidos (NASA) y del Japón (JAXA).

El objetivo del TRMM se basa en proporcionar datos para la comprensión de las precipitaciones tropicales mediante el desarrollo de la climatología de lluvia y metodologías de validación de pronósticos de los modelos (TRMM, 2011). Los datos del

TRMM son muy prácticos para conocer la dinámica de la precipitación temporal y espacial, además de la correlación entre la precipitación y otras variables del medio ambiente (Marks y Stewart, 2001; TRMM, 2011).

#### 3.3.2.2. Comparación cuantitativa

Se efectúa un análisis de comparación estadística por regiones, en donde las 25 estaciones escogidas para el análisis que se determinaron en la sección 3.2, se agrupan como se indica en la Tabla 4. Dichas regiones son las correspondientes a la división del territorio salvadoreño para el pronóstico de cantidades de lluvia que se elabora actualmente en el Centro de Pronóstico Meteorológico diariamente.

Con los datos observados (reales) obtenidos de las estaciones, se elaboran series de tiempo de acumulados de lluvia cada 3 horas en cada estación y a partir de estas series individuales se obtiene una serie de tiempo de acumulados promedio cada 3 horas para cada región en la que se divide el país utilizando las estaciones que la comprenden. Estas series de tiempo son comparadas estadísticamente con las series de tiempo de los datos pronosticados o simulados correspondientes.

Para los datos simulados se procede de igual manera, se elaboran series de tiempo individuales en 25 puntos de malla del WRF de cada simulación, estos puntos ubicados lo más cercano posible a la ubicación geográfica real de las estaciones en tierra, y con las series individuales se procede a elaborar las series de tiempo de acumulados promedios por región con los puntos de malla que la componen.

Tablas 4. Estaciones meteorológicas por región para análisis cualitativo

Region 1			Region 4		
Estación	Departamento	Zona	Estación	Departamento	Zona
Las Pilas	Chalatenango	Centro	El Imposible	Ahuachapan	Occidente
Metapán	Santa Ana	Occidente	Los Naranjos	Santa Ana	Occidente
Santa Ana	Santa Ana	Occidente	Santa Beatriz	Sonsonate	Occidente

Region 2			Region 5		
Estación	Departamento	Zona	Estación	Departamento	Zona
El Jocote	La Libertad	Centro	Boquerón	La Libertad	Centro
Guacotecti	Cabañas	Centro	Cojutepeque	Cuzcatlan	Centro
Las Flores	Chalatenango	Centro	Comasagua	La Libertad	Centro
Tamarindo	Chalatenango	Centro	Ilopango	San Salvador	Centro
Tepezontes	La Paz	Centro	Melara	La Libertad	Centro
			Verapaz	San Vicente	Centro
			Zacatecoluca	La Paz	Centro

Region 3			Region 6		
Estación	Departamento	Zona	Estación	Departamento	Zona
Ciudad Barrios	San Miguel	Oriente	Chirilagua	San Miguel	Oriente
Concepción de Oriente	La Union	Oriente	Conchagua	La Union	Oriente
Perquín	Morazán	Oriente	Santiago de María	Usulután	Oriente
			Volcán de San Miguel	San Miguel	Oriente

El análisis estadístico se realizará mediante el cálculo de los siguientes estadísticos los cuales se les denominará como **“Atributos del Desempeño de Pronóstico”** los cuales son:

1. **Acumulado Total.** Se comparará la lluvia acumulada total en las 24 horas pronosticadas y observadas en cada región, con el fin de determinar en cuál de ellas pronostica los máximos (distribución espacial).
2. **Coefficiente de Correlación de Pearson (r).** Es una medida de la relación lineal entre dos variables. Se puede definir como un índice que puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables, siempre y cuando ambas sean cuantitativas. El valor del índice de correlación varía en el intervalo [-1,1].

Cuando  $r = 0$ , no existe una correlación lineal entre los datos. A partir de ahí pueden presentar una correlación positiva o negativa. Si es  $r = \pm 1$ , existe una correlación positiva o negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa: cuando una de ellas aumenta, la otra también

lo hace en proporción constante en el caso de correlación positiva y lo contrario para una correlación negativa.

3. **Coeficiente de Determinación (R2)**. Se debe maximizar la función de determinación, en donde valores cercanos a 1 sugerirán un mejor ajuste entre los datos, o un mejor pronóstico.
4. **Error Medio Sistemático (BIAS o ME)**. El error medio sistemático (sesgo), se calcula mediante la diferencia media entre el pronóstico y las observaciones, donde n es el número total de pronósticos comparados.

$$ME = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (y_i - o_i)$$

El ME no es una medida de precisión, ya que no proporciona información sobre la magnitud de los errores de pronóstico. Una medida sencilla para compensar los posibles errores positivos y negativos que puede generar el ME es mediante el cálculo del MAE.

5. **Error Absoluto Medio (MAE)**. El error absoluto medio es el promedio del valor absoluto de la diferencia entre el pronóstico y la observación, donde n es el número total de comparaciones pronosticadas. Es error absoluto porque tiene en cuenta tanto errores positivos como negativos.

$$MAE = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n |y_i - o_i|$$

El rango del MAE es de cero al infinito y, como en el ME, una puntuación perfecta es igual MAE = 0, y aumenta a medida que las discrepancias entre las predicciones y observaciones se hacen más grandes. Podemos interpretar el MAE como una magnitud típica del error de pronóstico en un conjunto de datos de verificación dado, por tanto, es una medida escalar de precisión de los pronósticos.

6. **Error Cuadrático Medio (MSE)**. El error cuadrático medio, se calcula elevando al cuadrado la diferencia media del pronóstico y las observaciones, donde n es el número total de comparaciones pronosticadas, el RMSE es la raíz cuadrada del MSE la medida de error total. El RMSE incluye los componentes sistemáticos y al azar, los cuales se pueden separar usando medidas para el error sistemático y el error al azar, tales como error de sesgo y desviación estándar; además, el RMSE brinda la desviación en las mismas unidades analizadas de los datos.

$$\text{MSE} = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (y_i - o_i)^2 \qquad \text{RMSE} = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (y_i - o_i)^2}$$

Al igual que con el MAE, su alcance es de cero al infinito, con una puntuación perfecta de  $\text{MSE} = 0$  o  $\text{RMSE} = 0$ . Debido a la segunda potencia, el MSE y RMSE son mucho más sensibles a grandes errores de pronóstico que el MAE. Esto puede ser especialmente perjudicial en la presencia de posibles valores atípicos en los conjuntos de datos y, en consecuencia, al menos con conjuntos de datos pequeños o limitadas se prefiere el uso del MAE.

Finalmente se elaboran gráficos de histogramas comparando las series de tiempo del pronóstico y lo observado, para una verificación en términos de cantidades y en distribución temporal de la lluvia en cada una de las regiones.

## Capítulo 4 Resultados

### 4.1. Análisis cualitativo

Con los resultados de las simulaciones se procedió a la elaboración de mapas con diferentes productos para una comparación en primero lugar regional para luego puntualizar en El Salvador.

#### 4.1.1 Día 23 de agosto 2017

##### 4.1.1.1 Análisis regional

En las Figuras 7 y 8 se tiene la comparación de los mapas de viento de 200 hPa y 850 hPa respectivamente, comparando la salida del modelo global (GFS) como las 3 salidas del WRF en el dominio 1.

Con respecto a los mapas de 200 hPa el modelo global GFS (Figura 7a) muestra una circulación anticiclónica al norte de la Península de Yucatán que favorece a un débil chorro de viento entre Guatemala y El Salvador, con máximos en el Pacífico alrededor de los 20 a 30 KT. Sobre el norte de Centroamérica y El Salvador predomina viento de dirección noreste, asociada a dicha circulación; mientras que desde Nicaragua hasta Panamá se tiene la influencia de una vaguada que se visualiza en todo el Caribe.

El WRF, específicamente en la salida de control KF (Figura 7b), se aprecia una Baja-TUTT (TUTT: Vaguada Troposférica Tropical, por sus siglas en inglés) ubicada al oeste del arco de las Antillas Menores aproximadamente entre los 15°N y 65°W (Señalada con una C roja), orientando la vaguada dentro del Caribe hasta la costa noreste de Nicaragua.

Las salidas del WRF, KF y BMJ (Figura 7c) visualizan el anticiclón al norte de Yucatán y el chorro sobre Guatemala y El Salvador, observándose de mayor magnitud alcanzando magnitudes incluso arriba de los 40 KT y más cercano a las costas de El Salvador para el caso de BMJ (Figura 7c).

BMJ pronostica una circulación anticiclónica en el interior del Caribe, al sur de Jamaica, aproximadamente entre los 15° N y 79° W generando ventilación para el desarrollo nuboso principalmente para Nicaragua, Costa Rica y Panamá.

En G3D (Figura 7d) no es posible ubicar en el área de pronóstico una circulación cerrada definida.

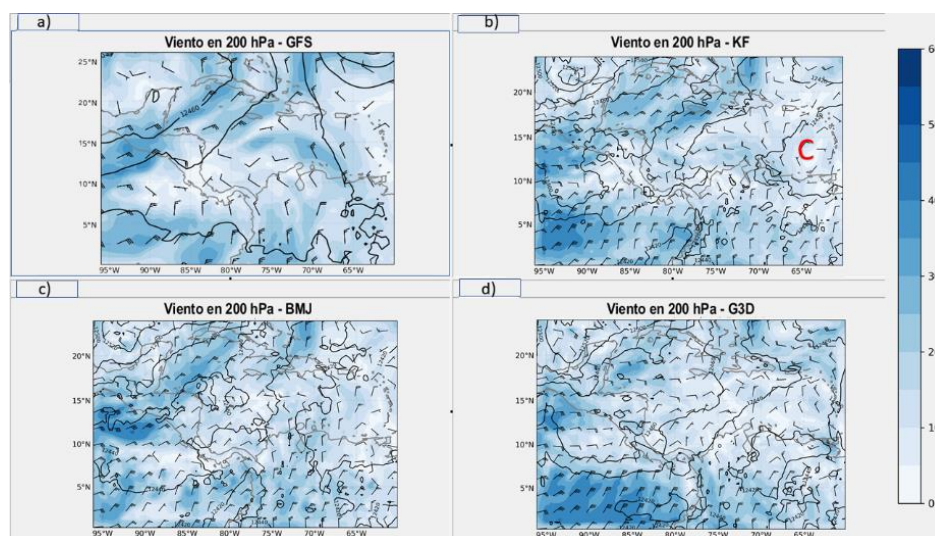


Fig. 7. Mapas de viento en 200 hPa, válidos para el 23 de agosto 2017 a las 6pm (hora local). a) GFS, pronósticos b) KF, b) BMJ, c) G3D.

En el caso de la figura 8 que corresponde a los mapas de viento de 850 hPa, el modelo global GFS (Figura 8a), de acuerdo al cambio de la dirección de viento que se observa al norte de Panamá y con el análisis en 700 hPa (mapas no presentados), es posible ubicar el eje de la Onda Tropical entre los 78° W y 80° W, además, de una vaguada al norte de Centroamérica sobre el Golfo de Honduras y Belice que se asocia al Baja Presión (1006 hPa) al sur del Golfo de México y una circulación ciclónica sobre Panamá.

Con respecto a las salidas del WRF en la salida de control KF (Figura 8b) y G3D (Figura 8d), se observa que pronostica dos centros de circulación ciclónica frente a ambas costas de Costa Rica (al norte), condición que en la salida del GFS solamente se visualiza una única circulación al sur del oeste de Panamá. Estas circulaciones asociadas a la ZCIT, (los centros definidos de las circulaciones ciclónica son marcadas por una C roja en los mapas).

La Onda Tropical se puede ubicar de mejor manera por el cambio de dirección de vientos alrededor de los 78°W en la salida BMJ (Figura 8c). En las otras salidas es posible ubicarla, pero interactuando con la circulación en la Caribe Costarricense.

BMJ (Figura 8c) presenta un escenario similar al GFS, pero pronosticando una baja presión (1010 hPa). Con este análisis se puede visualizar la presencia de un campo de baja presión en la región y principalmente en el Pacífico de Guatemala, El Salvador y Nicaragua, favoreciendo a la inestabilidad en la zona.

Únicamente en GFS es posible visualizar el eje de vaguada extiende de desde Honduras hasta Belice, sistema que favoreció las precipitaciones en territorio salvadoreño, acorde al pronóstico realizado por el CPM de la DGOA-MARM.

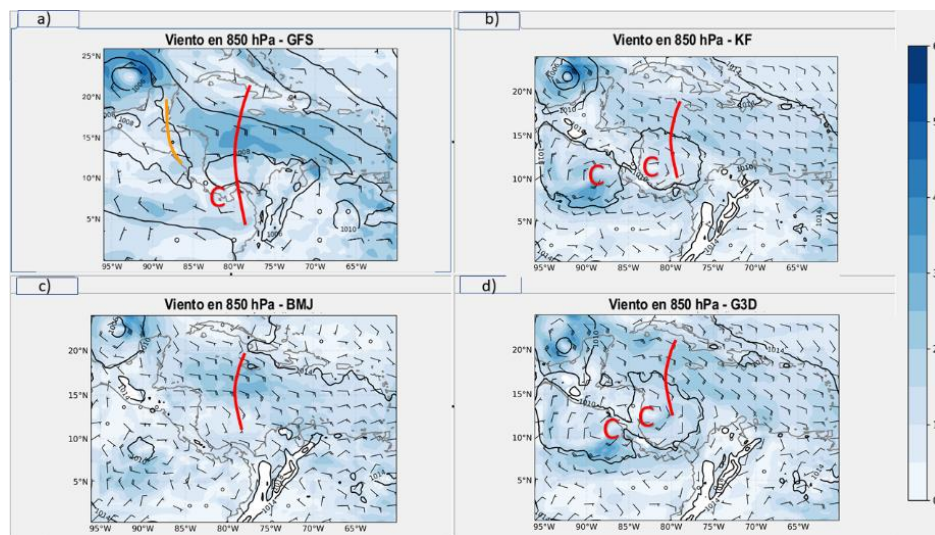


Fig. 8. Mapas de viento en 850 hPa, válidos para el 23 de agosto 2017 a las 6pm (hora local). a) GFS, pronósticos b) KF, b) BMJ, c) G3D.

Se elaboraron mapas de pronóstico de la temperatura de tope de nubes en el dominio 1 pronosticada por el WRF y se compara con las imágenes de satélite de GOES16 (Figuras 9 y 10), con el fin de verificar el comportamiento del modelo en el pronóstico de la convección, dichos mapas son comparados con las imágenes de satélite correspondientes a la hora de mayor convección entrando al territorio.



En la Figura 9a se observa la imagen satelital del GOES16 de las 8:45pm del 23 de agosto 2017 (hora local), mientras que en las figuras 9b, 9c y 9d se muestra el pronóstico de la temperatura de topos de nubes a las 9pm (hora local) correspondientes a cada parametrización estudiada.

En estas imágenes se observa que:

- De acuerdo con la imagen satelital (figura 9a) se observan, SCM con topos muy fríos alrededor de los  $-80^{\circ}\text{C}$  (colores del rojo al negro) sobre el Golfo de Fonseca y otro en las costas pacificas de Costa Rica y el sur de Nicaragua, otros campos convectivos de menor intensidad en sus topos nubosos se observan sobre la Península de Yucatán y Al sur de las costas del Istmo de Tehuantepec.
- En el pronóstico de KF (Figura 9b) que es la salida de control que pronostica menos nubosidad sobre Centroamérica el Pacífico y el Caribe, verificando relativamente mejor en cobertura nubosa que las otras parametrizaciones.
- BMJ (Figura 9c) localiza la ITCZ con topos fríos marcados alrededor de los  $-60$  a  $-70$  a lo largo de la latitud  $6^{\circ}\text{N}$  sobre el Pacífico, que se pueden asociar a la ZCIT, pero, en la imagen satelital no es posible identificar la ZCIT muy activa como lo pronostica BMJ. Además, se observan SCM con topos alrededor de los  $-70^{\circ}$  al norte de Panamá y Costa Rica, pero no es capaz de modelar los SCM sobre el Golfo de Fonseca y el sur de Costa Rica.
- En el pronóstico de G3D (Figura 9d), no es posible identificar SCM, marcados.
- En la Figura 10 se analiza la convección a la media noche del 23 de agosto 2017 (hora local con el uso de la imagen satelital del GOES16 (Figura 9a) y los pronósticos de topos de nubes correspondientes del WRF en las Figuras 9b, 9c y 9d

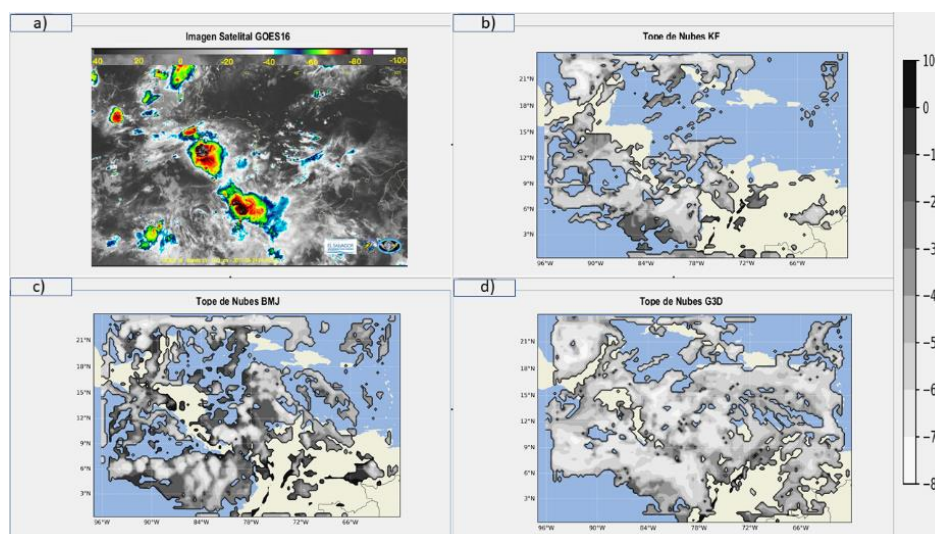


Fig. 9. Comparación de pronóstico de convección correspondiente para las 9:00pm del 23 de agosto 2017 (hora local). a) Imagen de satélite GOES16 correspondiente a las 8:45pm del 23 de agosto 2017 (hora local), pronóstico de temperatura en el tope de las nubes b) KF, c) BMJ, d) G3D.

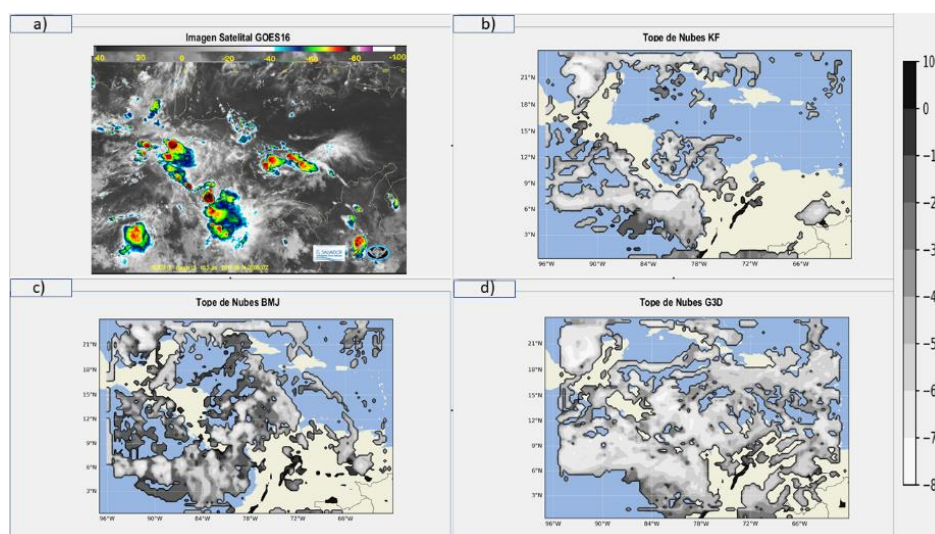


Fig. 10. Comparación de pronóstico de convección correspondiente para las 12 de la media noche del 23 de agosto 2017 (hora local). a) Imagen de satélite GOES16, pronóstico de temperatura en el tope de las nubes b) KF, c) BMJ, d) G3D.

Para este caso se observa:

- En la imagen satelital (Figura 10a) con respecto a la anterior que el campo nuboso 3 horas después se ha desplazado un poco al oeste observándose topes más fríos sobre el Pacífico al oeste de Costa Rica y un SCM sobre El Salvador y la zona sur de Honduras, y otros núcleos convectivos en el interior del Caribe.

- De los pronósticos obtenidos por el WRF, nuevamente es KF (Figura 10b) el que simuló mejor la cobertura nubosa, registrada por el satélite GOES16.
- Nuevamente BMJ (Figura 10c) junto con KF son las parametrizaciones que simulan la ZCIT activa alrededor de la latitud 6° N siendo BMJ la que lo pronóstica de una manera más marcada.
- Nuevamente con el G3D (Figura 10d), no es posible observar topes nubosos bien marcados sobre la zona de pronóstico.

Con respecto a la distribución de lluvia a nivel regional en la Figura 11a correspondiente a la estimación del satélite TRMM, se observan lluvias sobre el Pacífico asociadas a la ZCIT, así como también abundante lluvia distribuida de forma paralela a lo largo de las costas pacificas de Centroamérica, observándose máximos al sur de Costa Rica.

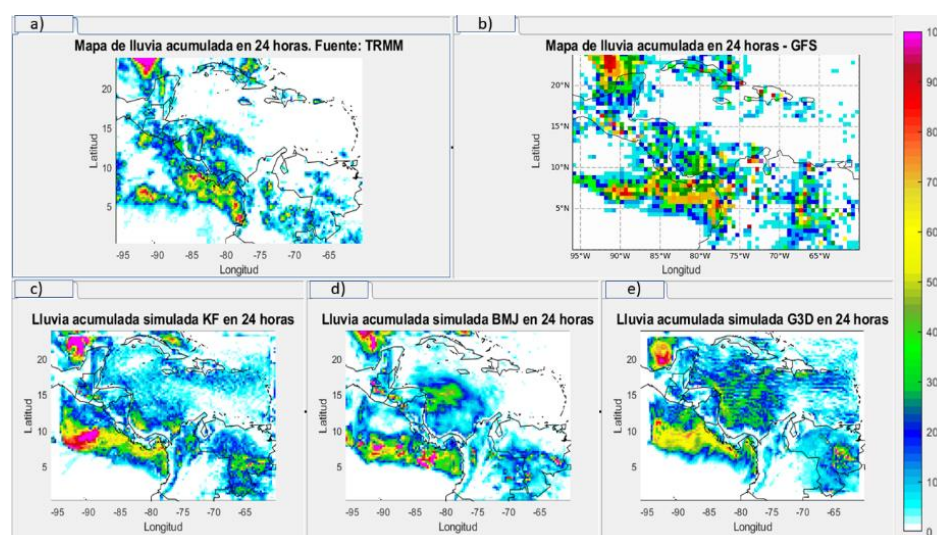


Fig. 11. Comparación de distribución de lluvia a nivel regional en 24 horas para el 23 de agosto de 2017. a) Estimación de lluvia por satélite TRMM, mapas de lluvia pronosticada b) GFS, c) KF, d) BMJ, e) G3D.

De acuerdo con los mapas de viento se tiene que la Onda Tropical el 23 de agosto 2017 ubicaba al sursuroeste de Jamaica, por lo que TRMM refleja que la lluvia asociada a la misma se concentró en el caribe y al sur de la Región favoreciendo que la ZCIT se ubicara cercana a las costas de Panamá y Costa Rica.

El modelo GFS (Figura 11b) en general simula en términos de distribución de lluvia muy bien las precipitaciones sobre el sur de Centroamérica y la lluvia en el Pacífico asociada a la ZCIT.

Por su parte los pronósticos del WRF de igual forma simulan bien la lluvia de la ZCIT en las tres parametrizaciones, al interior del Caribe, en la zona de mayor influencia de la Onda Tropical difieren uno con respecto a al otro, BMJ (Figura 11d) presenta el escenario de lluvias más hacia el norte con la onda tropical pudiendo diferenciar la lluvia de la onda con la asociada a la ZCIT.

KF (Figura 11c) presenta menor cantidad de lluvia en el interior del caribe y mayor cantidad de lluvia asociada en a la ZCIT en el Pacífico. G3D (Figura 11e), la simula de forma más dispersa las lluvias en el caribe en el Caribe.

Sobre territorio KF y BMJ simulan una línea de tormentas que se extiende desde Guatemala al norte de El Salvador y la frontera de Nicaragua y Honduras al norte del Golfo de Fonseca, que GFS también la logra simular entre Guatemala y El Salvador, con cantidades arriba de los 70 - 80mm de forma puntual, pero esta condición no se observa en TRMM mientras que el resto de Centroamérica en promedio de observan cantidades pronosticadas abajo de los 25 mm.

#### 4.1.1.2 Análisis para El Salvador

Debido a que el objetivo de la investigación es el pronóstico de lluvia para El Salvador y a la pequeña extensión territorial del mismo se realiza un análisis de los mapas de pronóstico de lluvia en dominio 2 del WRF centrado en El Salvador, comparándolo con la salida del GFS, y la salida de TRMM con un zoom sobre el país, con el fin de identificar una posible mejora en el aumento de resolución del WRF.

En la Figura 12 se observa que:

- Al realizar un zoom en los datos de TRMM sobre El Salvador (Figura 12a) se observa que la lluvia se concentró en el occidente y centro del territorio con acumulados entre

los 30 y 40 mm; acumulados similares se tienen en la zona costera oriental del país, sector en el cual las estaciones de la red de observación de El Salvador mencionados en la sección 3.1.1 fue donde se registró un máximo local alrededor de los 90 mm.

- GFS (Figura 12b) concentra la lluvia sobre todo en el oriente del país, pronosticando un máximo alrededor de los 100mm en el nororiente. Se observa otro máximo en el departamento de Usulután (zona oriental) alrededor de los 50mm.
- Tomando en consideración la diferencia de resolución de las imágenes del WRF con TRMM y GFS, se observa que en las tres salidas del WRF pronostica acumulación de precipitaciones en la zona central y occidental, coincidiendo con TRMM en efectos de distribución. Al hablar de cantidades pronosticadas una mejor aproximación se observa con G3D (Figura 12e) con cantidades un poco mayores que KF y BMJ (figuras 12c y 12d respectivamente), más cercanas a lo observado por TRMM, con un punto de malla pronosticado de 70 mm, pero en los alrededores cantidades entre los 30 y 40mm.

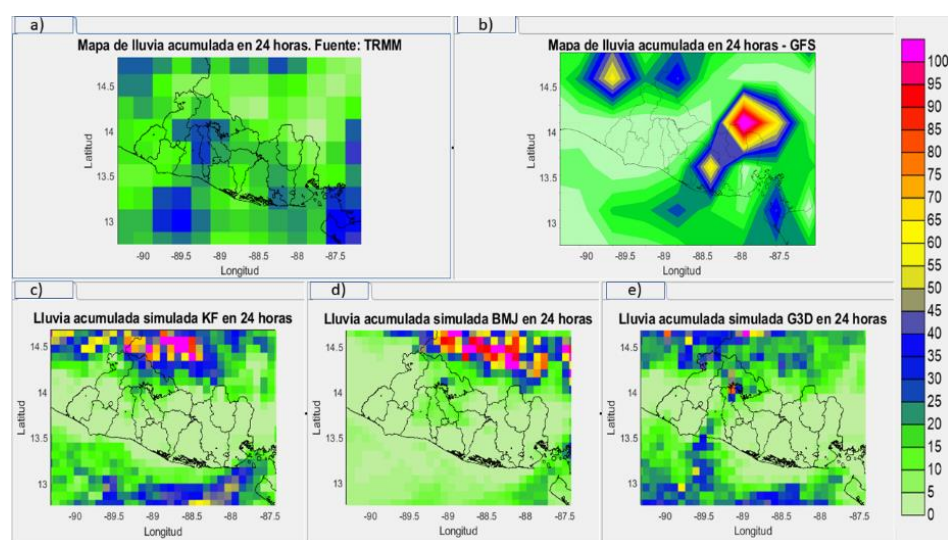


Fig. 12. Comparación lluvia acumulada en 24 horas expresadas en milímetros. Correspondientes al día 23 de agosto de 2017. a) Estimación de precipitaciones por TRMM, Pronósticos de los modelos b) GFS, c) KF, d) BMJ, y e) G3D.

- Los pronósticos del WRF, presentan una mejora relativa con respecto al pronóstico del GFS, observándose mejor aproximación debido a las cantidades pronosticadas con

G3D, en las zonas de mayor acumulación de lluvia; sin embargo, en términos de distribución de lluvia se obtiene un mejor pronóstico con WRF ante el que ofrece el modelo global.

Para un análisis de intensidad de lluvia es importante tomar en cuenta las imágenes proporcionadas por los radares banda X de la red de observación de El Salvador, que muestran una escala de estimación de la intensidad de lluvia basada en los datos de reflectividad medidos por los radares, dichos datos son adaptados a una escala que categorizan las lluvias de muy leves a intensas (Pacheco y Lemus, 2014) en valores ascendentes de reflectividad.

Con el WRF se obtienen pronósticos de reflectividad, en donde los colores de dicho pronóstico se asocian al tipo de lluvia, es decir a las características de la cortina de lluvia que se pronostica, asociando de esta manera valores altos de reflectividad a una cortina de lluvias más densa y por ende podemos asociarla a una lluvia intensa (UCAR, 2015).

A continuación, se hace una comparación de las imágenes de la red de radares de El Salvador con el pronóstico de reflectividad del WRF que nos dan una idea de la intensidad de lluvia que pronostica.

La imagen de radar (Figura 13a) corresponde a la lluvia que tenía lugar a 8:45pm (hora local) observado una pequeña línea de precipitaciones débiles a moderadas entrando al territorio salvadoreño en la zona oriental, la cual acorde a la imagen satelital del GOES en la figura 9a, corresponde a la entrada y el desplazamiento de este a oeste del SCM en El Salvador.

En su desplazamiento dio lugar a núcleos de lluvia intensa, en algunos puntos de la zona central y occidental del país como se puede observar en la figura 14a correspondiente a la imagen del radar a la media noche del día 23 de agosto.

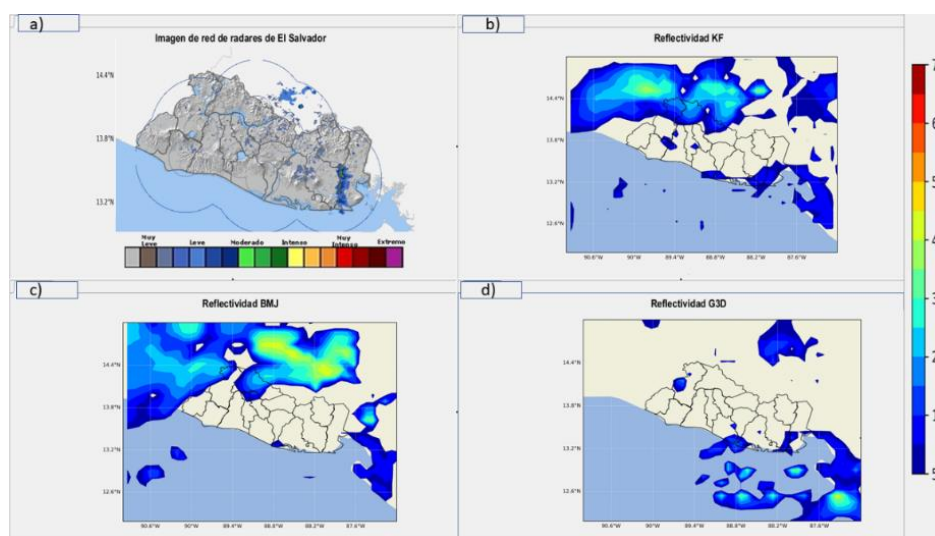


Fig. 13. Comparación de pronóstico de intensidad de lluvia para las 9pm del 23 de agosto 2017 (hora local).  
 a) Imagen de Radar Meteorológico Salvadoreño correspondiente a las 8:45pm del 23 de agosto 2017,  
 Pronósticos de reflectividad b) KF, c) BMJ y d) G3D.

Los pronósticos de WRF, donde a mayor valor de reflectividad se puede pronosticar mayor intensidad de lluvia se observa que a las 9pm KF (Figura 13b) y BMJ (Figura 13c) pronostican lluvias entre débiles y moderadas en la zona noroccidental, zona en donde el WRF sobreestimo la lluvia de acuerdo con el análisis de acumulados, adonde además para la hora de pronóstico no se tuvo registro de precipitaciones. KF y G3D (Figura 13d) con las únicas que pronostican de acuerdo con la reflectividad probabilidad de lluvias de baja intensidad, cercano a la zona donde el radar las registró al suroriente del país. En este caso un mejor pronóstico se visualiza en términos generales con G3D.

Para la media noche en los pronósticos WRF se observa que únicamente BMJ (Figura 14c) es la parametrización que pronostica lluvia con probabilidad de ser débil a moderada en la zona central del país coincidente a la zona donde el radar registraba lluvia a esa hora, KF (Figura 14a) predice lluvias de baja intensidad únicamente al occidente del país. Las tres parametrizaciones simulan lluvia en la zona oriental, KF y G3D (Figura 14d) concentradas al sur cercana al Golfo de Fonseca, mientras que BMJ pronostica más lluvias extendiéndose a territorio de Honduras y con intensidades mayores.

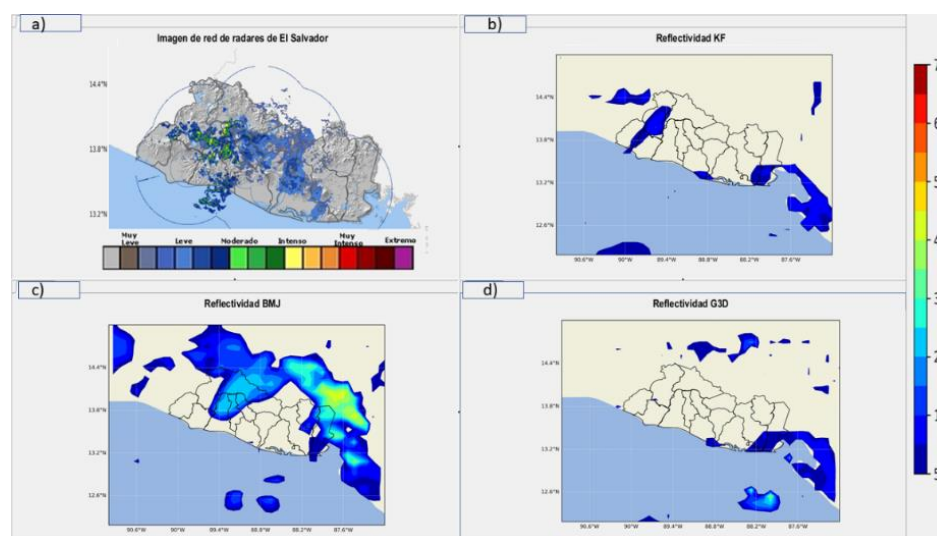


Fig. 14. Comparación de pronóstico de intensidad de lluvia para la 12 de la media noche del 23 de agosto 2017 (hora local). a) Imagen de Radar Meteorológico Salvadoreño correspondiente a las 23:30pm del 23 de agosto 2017, Pronósticos de reflectividad b) KF, c) BMJ y d) G3D.

Acorde a los resultados de las comparaciones realizadas los máximos locales registrados por las estaciones de monitoreo de la red de observación de El Salvador al suroriente del territorio alrededor de los 90 mm en Conchagua se pueden atribuir a condiciones locales ya que tampoco TRMM fue capaz de registrarlas. Siendo a nivel de mesoescala favorecidos por la formación del SCM sobre el Golfo de Fonseca y la influencia del sistema ciclónicos alrededor en la región centroamericana, que mantienen inestabilidad y formación de ejes de vaguada acumulando humedad, además de las condiciones favorables en niveles altos (200 hPa).

#### 4.1.2 Día 24 de agosto 2017

De igual forma se realiza en primer lugar un análisis Regional para luego puntualizar en un análisis de los resultados en El Salvador, tomando para cada caso de comparación los aspectos mencionadas en la sección anterior.

##### 4.1.2.1 Análisis regional

Al analizar el viento en 200 hPa en la Figura 15, se tiene que el modelo global GFS (Figura 15a) simula una circulación ciclónica al oeste de las Antillas Menores (TUTT) entre



los 15° N y 65° W, además es posible ubicar un segundo centro ciclónico al sur de Jamaica, el cual favorece a un flujo del este sobre el norte de Centroamérica.

KF (Figura 15b) y BMJ (Figura 15c), de igual forma visualizan la TUTT al oeste de las Antillas Menores, pero no visualizan el segundo centro que el GFS pronostica en el interior del Caribe, KF continúa orientando la vaguada hasta las costas de Nicaragua. G3D (Figura 15d), ubica la TUTT en diferente posición al noroeste de Puerto Rico.

El viento 850 hPa que se muestra en la Figura 16, se observa que GFS (Figura 16a) junto con el análisis de 700 hPa (mapa no mostrado) es posible ubicar el eje de la Onda Tropical entre el Gofo de Fonseca pasando por el Gofo de Honduras hasta las costas de Belice.

En las salidas del WRF, es BMJ (Figura 16c) en la que es posible una mejor ubicación del eje de la onda e independiente de circulaciones ciclónicas en los alrededores, pero lo hace más hacia el este de lo que lo pronostica GFS, ubicándola al este de Honduras extendiéndose en el interior del Caribe.

Las tres salidas del WRF simulan circulaciones ciclónicas al sur del Golfo de Fonseca y frene a las costas de El Salvador en el Pacífico, además, KF (Figura 16b) pronostica una baja presión (1004 hPa) frente a las costas salvadoreñas interactuando con la Onda Tropical que es posible ubicarla de forma similar al GFS.

En G3D no es posible una ubicación del eje de la Onda Tropical ya que en el pronóstico predominan las circulaciones ciclónicas que ubica una al sur del Golfo de Fonseca y otra en la frontera del Noreste de Nicaragua y Honduras.

Al realizar este análisis se concluye que continúa un campo de baja presión sobre la Región que activa la ZCIT y favorece a la formación de circulaciones ciclónicas que interactúan con la Onda Tropical que tuvo su desplazamiento sobre El Salvador intensificando su actividad al sureste del país al interactuar con una circulación ciclónica al sur del Golfo de Fonseca.

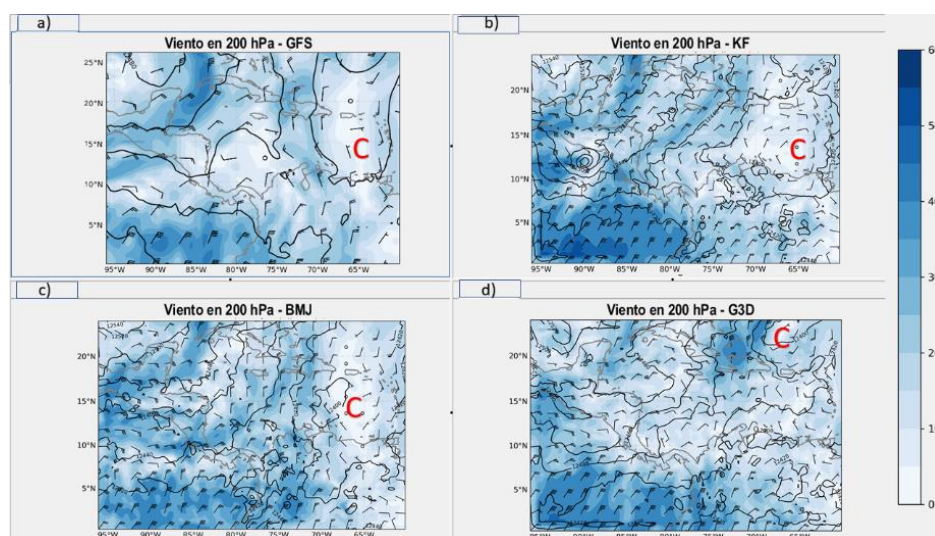


Fig. 15. Mapas de viento en 200 hPa, válidos para el 24 de agosto 2017 a las 6pm (hora local). a) GFS, pronósticos b) KF, b) BMJ, c) G3D.

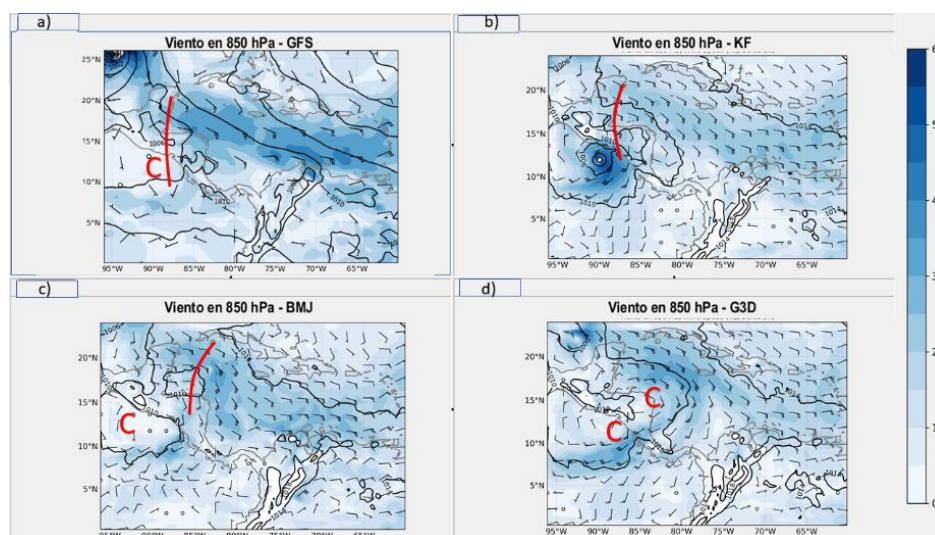


Fig. 16. Mapas de viento en 850 hPa, válidos para el 24 de agosto 2017 a las 6pm (hora local). a) GFS, pronósticos b) KF, b) BMJ, c) G3D.

El pronóstico del WRF en términos de convección en la temperatura de toques nubosos al compararlo con las imágenes de satélite de GOES16 en la Figura 18 correspondiente a la media noche del día 24 de agosto de 2017 (hora local), así mismo en la Figura 19 correspondiente a las 4am de la madrugada del 25 de agosto 2017 se observa que:

A la media noche la imagen satelital (Figura 18a) muestra nubosidad dispersa en la región centroamericana con núcleos convectivos sobre el Salvador y al norte de las costas de

Nicaragua, así como otros núcleos en el interior del Caribe en el borde del chorro de bajo nivel que se observó en el flujo de viento en 850.

Al observar la imagen satelital se puede localizar el eje de la onda tropical o la base de la vaguada invertida correspondiente, en el Caribe de Honduras. Es difícil localizar un centro de circulación ciclónica, pero gracias al análisis de viento podemos adjudicar además de la onda tropical a dicha circulación los campos convectivos mencionados anteriormente.

La parametrización en la que se observa una mejor aproximación a lo que muestra en presencia de nubosidad GOES16 es KF (Figura 18b) en el aspecto de pronóstico de nubosidad de desarrollo vertical ya que BMJ (Figura 18c) y G3D (Figura 18d) muestran mayor presencia de nubosidad. BMJ pronostica claramente topes nubosos importantes asociadas a la ZCIT entre 6 y 12°N de latitud y a los sistemas que se ubican en dicha zona.

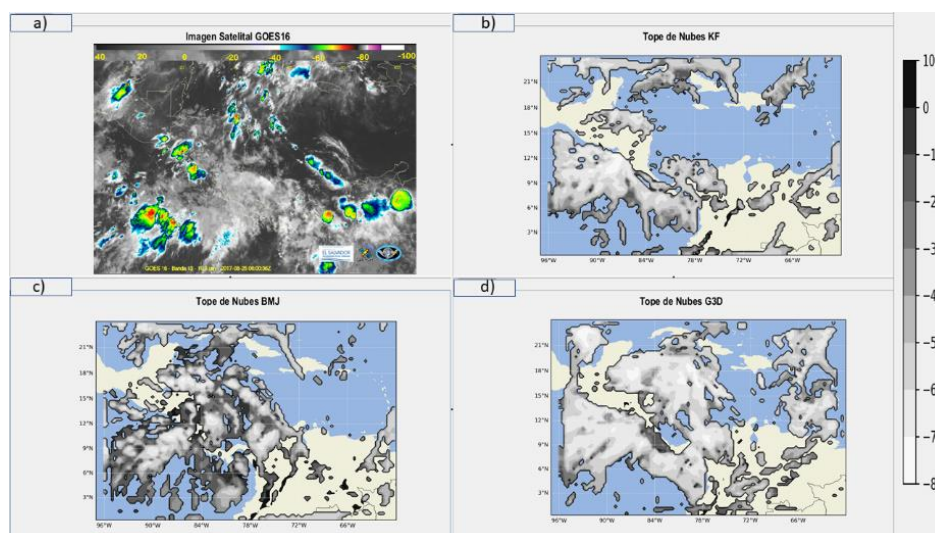


Fig. 17. Comparación de pronóstico de convección correspondiente para las 12 de la media noche del 24 de agosto 2017 (hora local). a) Imagen de satélite GOES16, pronóstico de temperatura en el tope de las nubes b) KF, c) BMJ, d) G3D.

Más tarde en la Figura 19a la imagen satelital de la media noche del 24 de agosto se observa nubosidad convectiva sobre el salvador y al noreste de Nicaragua, en este caso la mejor aproximación se obtiene con BMJ (Figura 19c) que pronostica topes nubosos

entre los  $-50^{\circ}$  y  $-60^{\circ}$  en el país, pero nuevamente es KF (Figura 19b) que pronostica nubosidad de desarrollo vertical más cercano a lo que vio el satélite GOES16.

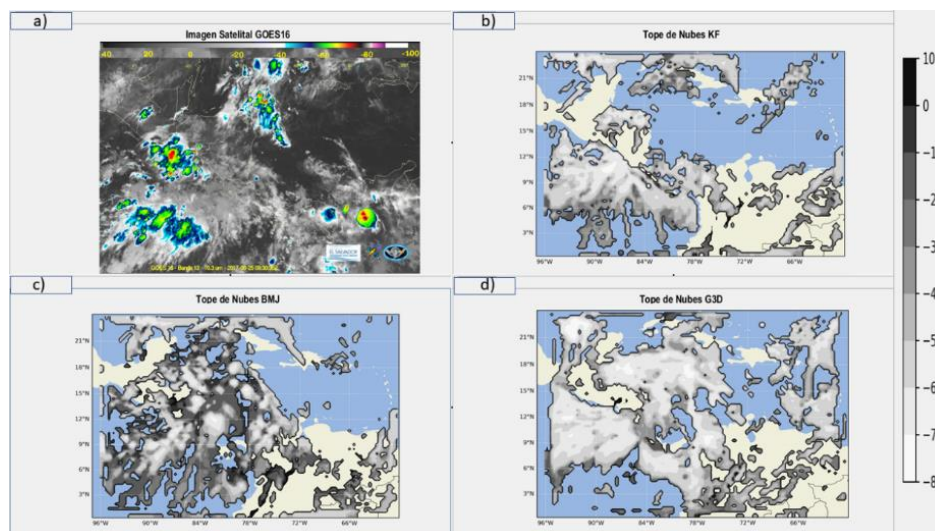


Fig. 18. Comparación de pronóstico de convección correspondiente para las 3:00am del 25 de agosto 2017 (hora local). a) Imagen de satélite GOES16 correspondiente a las 3:30am del 25 de agosto 2017 (hora local), pronóstico de temperatura en el tope de las nubes b) KF, c) BMJ, d) G3D.

Al comparar la distribución de precipitación a nivel regional se puede apreciar en la Figura 20 que tanto GFS (Figura 20b) y las tres salidas del WRF presentan un pronóstico con acumulados de lluvia sobreestimados al compararlo con la lluvia que registra el satélite TRMM (Figura 20a), siendo KF (Figura 20c), el pronóstico con mayores acumulados.

TRMM observa un núcleo de precipitaciones alrededor de los 30 a 40 mm frente a las costas de El Salvador, KF maximiza este escenario con un amplio núcleo acumulados alrededor de los 100mm.

Sobre Centroamérica TRMM tiene acumulados abajo de los 20mm. Por su lado GFS pronostica cantidades mayores en puntos sobre Nicaragua, Guatemala y principalmente en Costa Rica y Panamá. La lluvia que pronostica G3D (Figura 20e), sobre territorio en Centroamérica se acerca más a la estimada por TRMM.

BMJ (Figura 20d) mantiene una línea de altas precipitaciones puntales alcanzando los 100mm sobre Guatemala y Honduras, KF (Figura 20c) también pronostica un pequeño núcleo de fuertes precipitaciones entre la frontera de Guatemala y Honduras, mientras que G3D su pronóstico en estas zonas está muy por debajo.

Las precipitaciones asociadas a la ZCIT se observan principalmente al sur de Panamá y sobre el Pacífico y la lluvia asociada a la onda tropical y a la circulación ciclónica que se identificó en el análisis de viento en 850 hPa, WRF la simula al norte de Centroamérica en el caribe hondureño y frente a las costas de Nicaragua.

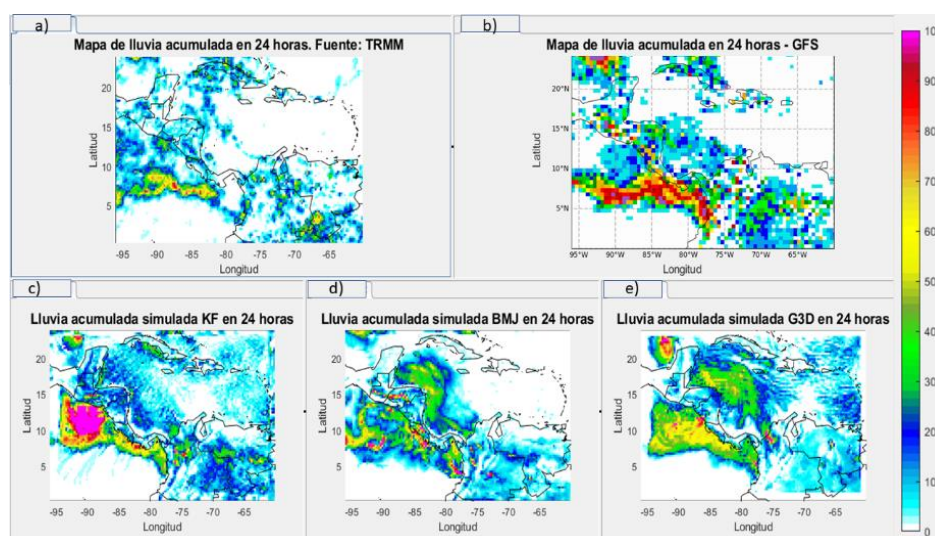


Fig. 19. Comparación de distribución de lluvia a nivel regional en 24 horas para el 24 de agosto de 2017. a) Estimación de lluvia por satélite TRMM, mapas de lluvia pronosticada b) GFS, c) KF, d) BMJ, e) G3D.

#### 4.1.2.2 Análisis para El Salvador

Al centrar el análisis sobre El Salvador en términos de acumulados de lluvia en la figura 21 TRMM (Figura 21a) estima acumulados alrededor de los 25 a 40 mm frente a las costas de El Salvador localizando acumulados de la misma magnitud en la costa y zona oriental del territorio.

Nuevamente los acumulados de 200 y 150 mm que se registraron en las estaciones telemétricas en Conchagua y el Volcán de San Miguel respectivamente que se ubican en la zona sur oriental que mostraron en la sección 3.1.1, el satélite no fue capaz de

visualizarlas y registrarlas, por lo que se verifica que los máximos registrados en dichas estaciones son producto de condiciones puntuales. TRMM muestra sobre El Salvador acumulados en general abajo de los 30mm, con mayor presencia en la zona oriental del país y la franja costera.

GFS (Figura 21b) concentro la lluvia en la zona oriental del territorio pronosticando acumulados alrededor de los 60 mm en los alrededores del Volcán de San Miguel y arriba de los 80 mm en la zona nororiente fronterizo con Honduras, además, localiza un núcleo alrededor de los 40 mm sobre el Golfo de Fonseca,

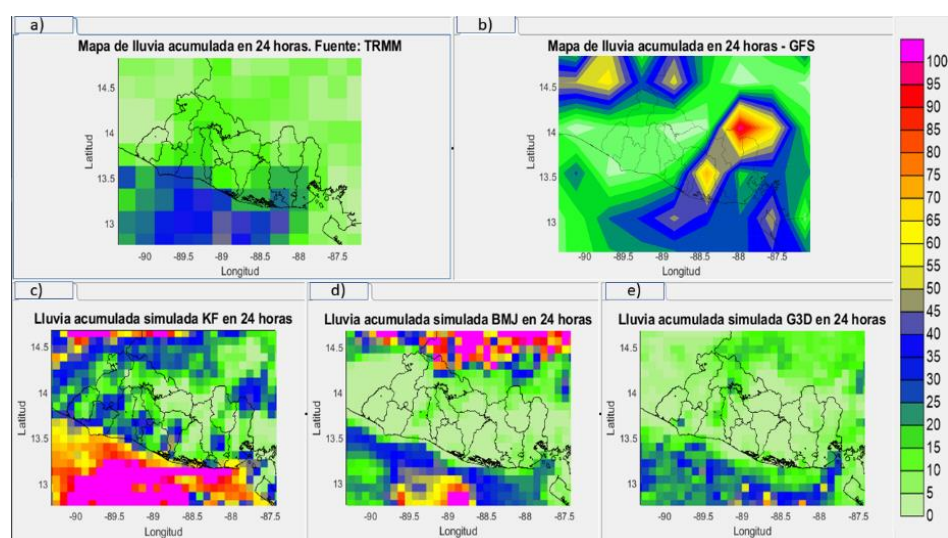


Fig. 20. Comparación lluvia acumulada en 24 horas expresadas en milímetros. Correspondientes al día 24 de agosto de 2017. a) Estimación de precipitaciones por TRMM, Pronósticos de los modelos b) GFS, c) KF, d) BMJ, y e) G3D.

KF (Figura 21c) presenta el escenario más húmedo sobre El Salvador concentrando la lluvia desde la cordillera volcánica hacia el sur del territorio, es la única parametrización que pronostica un punto con cantidades alrededor de los 60mm en la zona sur-oriental del país donde en las estaciones se registró el máximo alrededor de los 90mm, por lo tanto, es KF el que en este caso presenta en términos generales un mejor pronóstico.

KF y BMJ (Figura 21d) pronostican máximos puntuales arriba de los 50 mm en la zona noroccidental de El Salvador mientras que GFS este núcleo lo ubica sobre Honduras y Guatemala, G3D (Figura 21e) presenta el pronóstico de menor cantidades en esa zona.

Al igual que el primer día, WRF el día 24 de agosto presenta una mejoría relativa sobre todo en el pronóstico KF con respecto a lo que pronostica GFS en términos cualitativos.

Cuando se realiza la comparación del pronóstico del WRF de intensidad de lluvia por medio de reflectividad y las imágenes de la red de radares de El Salvador se pueden observar en las Figuras 22 y 23 se obtiene que para la imagen correspondiente a la media noche del radar (Figura 22a) se registraba lluvia intensa en la zona occidental de El Salvador y núcleos de lluvia de baja intensidad en la zona costera occidental y en la zona oriental del país.

BMJ (Figura 22c) por la reflectividad pronosticada se podría estimar precipitaciones de baja intensidad en el occidente, pero más concentradas sobre territorio de Guatemala, KF (Figura 22a) también pronostica un pequeño núcleo, pero lo ubica las al noroccidente del país y siempre de baja intensidad.

Los tres pronósticos WRF estiman precipitaciones de baja intensidad en la zona suroriental del país, coincidiendo de forma relativa con los núcleos aislados que visualiza el radar.

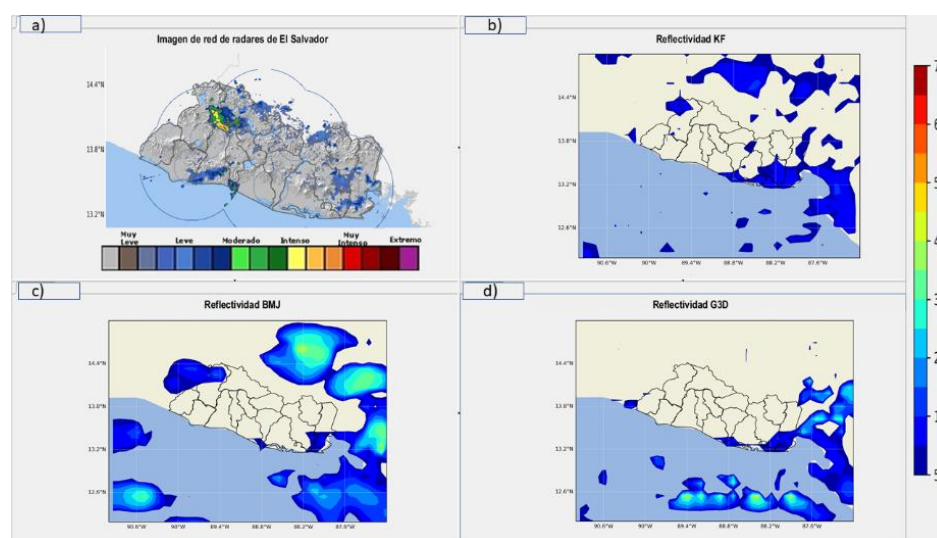


Fig. 21. Comparación de pronóstico de intensidad de lluvia para la 12 de la media noche del 24 de agosto 2017 (hora local). a) Imagen de Radar Meteorológico Salvadoreño correspondiente a las 00:45am del 25 de agosto 2017, Pronósticos de reflectividad b) KF, c) BMJ y d) G3D.

En la figura 23 se tiene la imagen de radar (Figura 23a) correspondiente a las 3:45am de la madrugada del 25 de agosto y muestra una línea de tormentas y lluvias moderadas a intensas en principalmente en la zona central y oriental del país, solamente KF (Figura 23b) en el pronóstico de reflectividad tiene probabilidad de lluvia de baja intensidad en la zona, pero de forma más aislada.

Las tres parametrizaciones del WRF muestran reflectividad baja que podría asociarse con precipitaciones de baja intensidad en la zona suroriental, pero el radar registra precipitaciones muy aisladas en dicho sector.

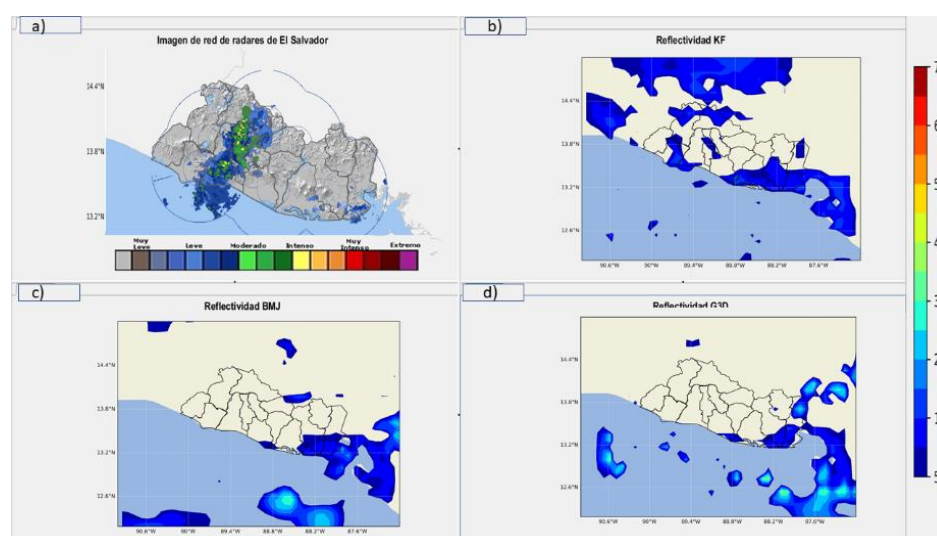


Fig. 22. Comparación de pronóstico de intensidad de lluvia para las 3am del 25 de agosto 2017 (hora local).  
 a) Imagen de Radar Meteorológico Salvadoreño correspondiente a las 03:45am del 25 de agosto 2017,  
 Pronósticos de reflectividad b) KF, c) BMJ y d) G3D.

## 4.2. Análisis cuantitativo.

La heterogeneidad de las regiones influye en la variabilidad espacial, en el comportamiento de la lluvia, por lo que se puede esperar marcadas diferencias en los acumulados promedios de lluvia de cada región dependiendo de los sistemas.

Para el caso de estudio se trata del paso de una onda tropical, en donde típicamente los campos nubosos convectivos recorren de este a oeste o del noreste al suroeste del país (Guzmán, 1971; Garcia, 2009), produciendo la lluvia acorde al tamaño, desarrollo y desplazamiento relativo de los núcleos convectivos individuales, por lo tanto es importante



tener en cuenta dicha heterogeneidad de las regiones al trabajar en promedios diarios de precipitación en cada una de ellas.

#### 4.2.1 Día 23 de agosto 2017

Las series de tiempo se elaboraron estación por estación y en 25 puntos del modelo en el punto de malla ubicado más cerca a la ubicación real de las estaciones para su comparación, las series de tiempo se elaboraron en acumulados de cada 3 horas. Para la obtención de los datos por región se agruparon las estaciones correspondientes y se obtuvo una serie promedio de acumulados cada 3 horas para cada una de las regiones, estas series se pueden observar en la Tabla 5 donde dichas series comparadas con lo observado.

- Los datos en las estaciones (observados) muestran con respecto a los acumulados que el máximo se tiene en la Región 6 con un acumulado promedio de 42.5 mm, mientras que el menor registro se tiene en la Región 5 con 12 mm de acumulado promedio en las 24 horas.
- En las simulaciones del pronóstico WRF, se tiene que el máximo para KF (27.8mm) y G3D (16.4 mm) se obtienen en la Región 1 en las 24 horas, mientras que en BMJ (7 mm) el acumulado promedio mayor se registra en la región 6.
- En la Tabla 5 en rojo se destacan aquellas diferencias dentro del “Rango Aceptable” teniendo un menor porcentaje de acierto la simulación de BMJ con solo la región 5 dentro de este rango que corresponde a un 16%. Mientras que KF y G3D tienen un mayor porcentaje (33%) de acierto con dos regiones en rango (Región 1 y 5).

Tabla 5. Comparación de los acumulados totales entre las estimaciones del WRF y lo observado por región para el día 23 de agosto 2017.

Región	Lluvia Promedio Acumulada observada	Lluvia Promedio Acumulada Pronosticada KF	Diferencia (WFR - OBS)	Lluvia Promedio Acumulada Pronosticada BMJ	Diferencia (WFR - OBS)	Lluvia Promedio Acumulada Pronosticada G3D	Diferencia (WFR - OBS)
Región 1	26.53	27.75	1.22	5.37	-21.16	16.38	-10.15
Región 2	34.16	10.61	-23.55	4.53	-29.63	9.37	-24.79
Región 3	18.20	0.29	-17.91	3.91	-14.29	4.50	-13.70
Región 4	16.80	0.36	-16.44	0.00	-16.80	0.34	-16.46
Región 5	12.71	2.15	-10.57	4.76	-7.95	4.17	-8.55
Región 6	42.56	8.31	-34.25	7.03	-35.53	0.64	-41.92

Cabe destacar que dichas series de tiempo son elaboradas para el día hidrológico o pluviométrico que inicia a las 7am a 7am del siguiente día. Las series promedio de acumulados (completas) de cada una de las regiones se pueden consultar en la sección de anexos.

En la Tabla 6 se pueden observar el resumen de los “Atributos de Desempeño del Pronóstico” y la Figura 23 de forma gráfica se puede observar el comportamiento del RMSE y del sesgo.

Tabla 6. Resumen de los atributos de desempeño en el pronóstico del 23 de agosto 2017.

Región	KF				BMJ				G3D			
	r	R2	Sesgo	RSME	r	R2	Sesgo	RSME	r	R2	Sesgo	RSME
Región 1	-0.14	0.02	0.15	0.43	-0.15	0.02	-2.65	7.48	-0.08	0.01	-1.27	3.59
Región 2	-0.15	0.02	-2.94	8.33	-0.32	0.10	-3.70	10.48	-0.25	0.06	-3.10	8.77
Región 3	-0.07	0.00	-2.24	6.33	0.67	0.45	-1.79	5.05	0.84	0.70	-1.71	4.84
Región 4	-0.09	0.01	-2.05	5.81	0.00	0.00	-2.10	5.94	0.43	0.19	-2.06	5.82
Región 5	-0.40	0.16	-1.32	3.74	-0.21	0.05	-0.99	2.81	-0.37	0.14	-1.07	3.02
Región 6	-0.11	0.01	-4.28	12.11	-0.16	0.03	-4.44	12.56	-0.23	0.05	-5.24	14.82

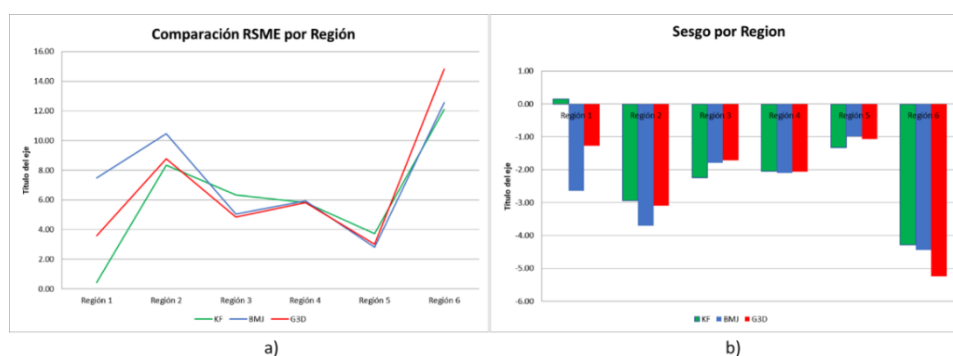


Fig. 23. Comparación de Atributos de Desempeño por Región para el 23 de agosto 2017. a) Comparación del RSME y b) Comparación del Sesgo.

Los resultados que se obtienen son los siguientes:

- KF salida de control únicamente tiene un buen resultado con respecto al valor del RMSE en las regiones 1 y 2 y 6, en las otras zonas es la parametrización que mayor error presenta. Siendo en la Región 1 donde se obtiene el menor valor de RSME de 0.43.
- El segundo mejor valor de RMSE se obtiene en la Región 5 con un valor de 3.02 y se obtiene con el pronóstico G3D, el cual tiene mejor comportamiento en las regiones 3, 4 y 5.
- BMJ es el pronóstico que presenta los peores resultados en sus atributos de desempeño, por lo que es la parametrización con más bajo rendimiento en este caso.
- El sesgo en la Figura 23b se observa que en todos los casos a excepción de KF en la región 1 es negativo, clara tendencia del modelo a subestimar las cantidades de lluvia pronosticadas en el caso de estudio. El mayor sesgo en se observa en la región 6, producto de los máximos locales registrados en dicha zona.

#### 4.2.2 Día 24 de agosto

Para el día 24, los resultados de los acumulados promedios por región se tienen en la Tabla 7 resaltando en rojo aquellas diferencias dentro del “Rango Aceptable”, el resumen de los resultados estadísticos se muestra en la Tabla 8, y la comparación por regiones del RMSE y del sesgo se muestran en la Figura 24. Para el segundo día del caso de estudio se tiene que:

- Los datos observados ubican nuevamente le máximo acumulado en Región 6 con un promedio de 85.8 mm acumulado en las 24 horas en la Región.

- Los máximos pronosticados por le WRF se ubican para BMJ (26.8 mm) y G3D (7.5 mm) en la Región 1 y para el caso de KF el máximo se obtiene en la Región 4 con 35.1 mm.
- Con respecto al porcentaje de acierto nuevamente BMJ tiene el menor porcentaje con 2 regiones (33%) dentro del “Rango Acéptale”, mientras que KF y G3D cuentan con un 50% de acerito con 3 regiones en rango.
- Para este caso KF fue el que presentó un mejor pronóstico con un RSME menor con respeto a BMJ y G3D, en 4 regiones (Regiones 1, 2, 5 y 6), lo cual se puede corroborar de mejor manera en la figura 24a.
- BMJ cuenta con mejor pronóstico basado en el valor del RSME en las Regiones 3 y 4; por lo tanto, G3D no tuvo un buen rendimiento en el pronóstico para este día en ninguna de las regiones.
- El sesgo nuevamente presenta una tendencia a valores negativos es decir a subestimar el pronóstico de lluvia, con ciertas excepciones, para el caso de KF en las regiones 1, 4 y 5 presenta valores positivos, BMJ lo hace en la región 1.

*Tabla 7. Comparación de los acumulados totales entre las estimaciones del WRF y lo observado por región para el día 24 de agosto 2017.*

Región	Lluvia Promedio Acumulada observada	Lluvia Promedio Acumulada Pronosticada KF	Diferencia (WFR - OBS)	Lluvia Promedio Acumulada Pronosticada BMJ	Diferencia (WFR - OBS)	Lluvia Promedio Acumulada Pronosticada G3D	Diferencia (WFR - OBS)
Región 1	13.00	17.28	4.28	26.78	13.78	7.53	-5.47
Región 2	21.00	10.91	-10.09	2.40	-18.60	3.13	-17.87
Región 3	25.07	0.96	-24.11	4.93	-20.13	1.23	-23.83
Región 4	1.40	35.12	33.72	0.10	-1.30	2.82	1.42
Región 5	12.71	18.00	5.28	3.06	-9.65	3.78	-8.94
Región 6	85.76	24.42	-61.34	9.09	-76.67	6.38	-79.38

Tabla 8. Resumen de los atributos de desempeño en el pronóstico del 24 de agosto 2017

Región	KF				BMJ				G3D			
	r	R2	Sesgo	RSME	r	R2	Sesgo	RSME	r	R2	Sesgo	RSME
Región 1	-0.38	0.14	0.54	1.51	-0.31	0.10	1.72	4.87	-0.30	0.09	-0.68	1.93
Región 2	0.04	0.00	-1.26	3.57	-0.21	0.04	-2.33	6.58	-0.37	0.14	-2.23	6.32
Región 3	0.43	0.19	-3.01	8.52	-0.33	0.11	-2.52	7.12	-0.27	0.07	-2.98	8.43
Región 4	0.86	0.74	4.21	11.92	0.85	0.73	-0.16	0.46	-0.25	0.07	0.18	0.50
Región 5	0.82	0.67	0.66	1.87	-0.32	0.10	-1.21	3.41	-0.34	0.11	-1.12	3.16
Región 6	0.37	0.14	-7.67	21.69	-0.32	0.11	-9.58	27.11	-0.24	0.06	-9.92	28.07

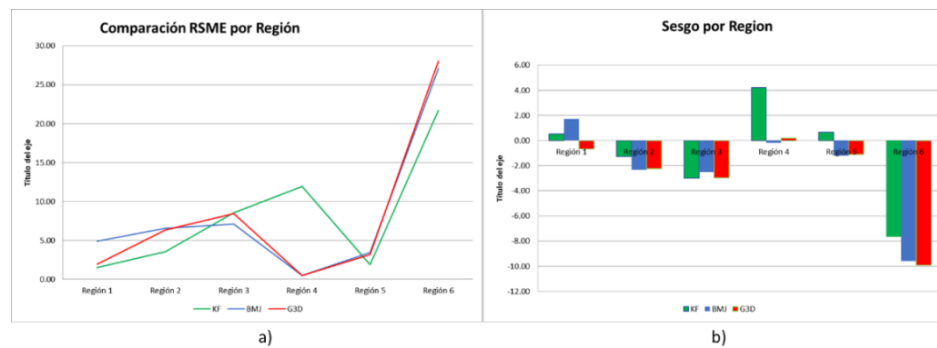


Fig. 24. Comparación de Atributos de Desempeño por Región para el 24 de agosto 2017. a) Comparación de RSME y b) Comparación del Sesgo

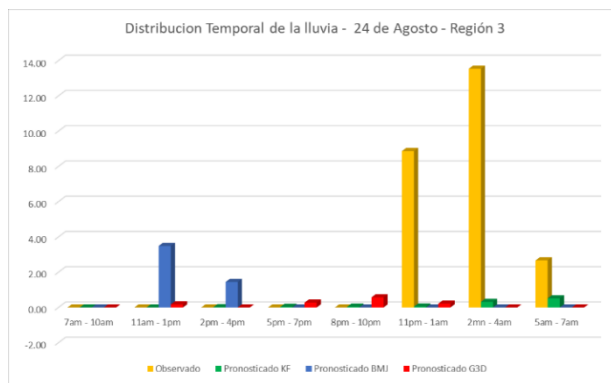


Fig. 25. Comparación de Series de Tiempo pronosticadas y Observadas para la Región 3 del día 24 de agosto.

capaz simular.

En términos generales para el día 24 se observan y dejando fuera la Región 6, las magnitudes del sesgo rondan los -2 a -3 mm, cantidades menores a las presenta el pronóstico del día 23, con excepción de la Región 6 la cual presenta un error medio (sesgo) mayor, debido el máximo puntual que alcanzó los 200 mm y que ningún modelo fue

Es importante hacer notar que, al estudiar las series de tiempo, se puede observar que en la mayoría de los casos hay un desfase en el pronóstico de lluvia en cuanto a la hora en que se registraron como se puede apreciar en la Figura 25, correspondiente a la comparación de las series de tiempo de la Región 3 del día 24 de agosto.

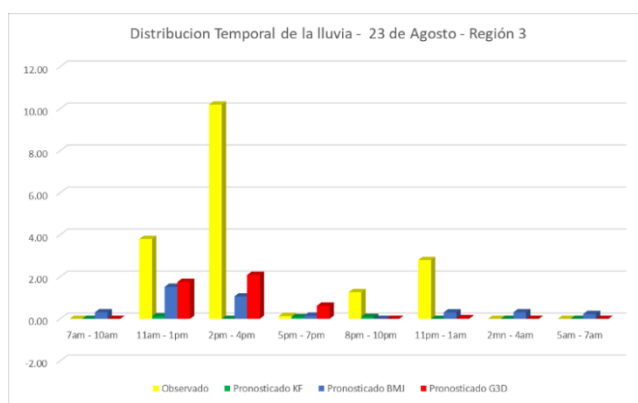


Fig. 26. Comparación de Series de Tiempo pronosticadas y Observadas para la Región 3 del día 23 de agosto.

El desfase en las horas del pronóstico con lluvia con respecto a lo observado es más acentuado para las zonas costeras, regiones 4, 5 y 6, por lo que se puede decir que el modelo presentó problemas con el pronóstico de la entrada de la brisa marina y el desarrollo convectivo en dichas zonas.

En algunas regiones el pronóstico con lo observado se coincide de forma parcial como se observa en la Figura 26 que pertenece a la Región 3 del día 23 de agosto. En la sección de anexos se muestran el resto de los gráficos comparativos de las series de tiempo.

Los resultados obtenidos en el segundo día de pronóstico presentan una mejora relativa a los obtenidos para el primer día, lo que en este caso deja en evidencia la importancia de considerar el *spinup* o el proceso de ajuste del modelo el cual puede sesgar severamente los resultados en la modelación de la superficie terrestre al no tomarlo en cuenta.

## Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

Conforme a los objetivos y a las preguntas que se plantearon para la realización de la investigación, se realizaron diferentes comparaciones en dos tipos de análisis uno cualitativo y otro cuantitativo para ambos días que abarcan el caso de estudio presentado.

En el análisis cualitativo además de comparar lo pronosticado por el WRF se hizo un análisis y comparación no solo de lo observado con lo pronosticado por el WRF en las 3 simulaciones realizadas, además, se incluye la comparación del modelo global, con el fin de determinar una mejora en los pronósticos regionales del WRF

Para el análisis cualitativo se estipularon “Atributos de Desempeño del Pronóstico” que consiste en el cálculo de estadísticos en series de tiempo, las cuales se obtuvieron por región con acumulados promedios en cada una de ellas.

Se obtuvo como resultado diferentes comportamientos entre las salidas ofrecidas en los pronósticos del WRF, pero con la información que este arrojó, a nivel regional es posible concluir de forma más detallada la causa de las lluvias en El Salvador.

Las lluvias se pueden asociar además del paso de la onda tropical, a la formación de circulaciones ciclónicas, asociadas a la ZCIT, en el pacífico y de la presencia de un campo de baja presión sobre el Pacífico centroamericano.

Sistemas de Baja Presión y áreas inestables al sur del Golfo de Fonseca favorecieron la formación de un SCM que al entrar a territorio salvadoreño dio lugar a tormentas y lluvias importantes, las cuales se concentraron sobre todo en la zona suroriental.

Sin embargo, se tiene que las condiciones locales en Conchagua y sus alrededores maximizaron las condiciones atmosféricas que dieron paso a los máximos de lluvia acumulados en dicha zona cercana al Golfo de Fonseca, que difícilmente en modelos globales son detectables ya que tampoco con la resolución del TRMM se logró registrar, los máximos registrados en las estaciones locales.

En términos generales se concluye que el modelo meso-escalar WRF presenta una mejora en el pronóstico de forma relativa. Además, en los análisis realizados de forma cualitativa se pudo concluir que el modelo no produce lluvias en las horas en que estas fueron registradas, lo que muestra un carácter aleatorio de las mismas, lo cual se identifica especialmente en BMJ.

Con los resultados obtenidos se procede a responder y concluir con las preguntas de investigación planteadas:

- *¿Qué configuración física del modelo tiene un mejor pronóstico de lluvia para El Salvador durante el paso de la onda tropical?*

Al realizar los diferentes análisis tanto cualitativo y cuantitativo, se obtienen diferentes resultados, pero se puede hacer una distinción por día en el rendimiento que presenta:

- Para el primer día (23 de agosto) la parametrización de G3D es la que presenta una mejor verificación en su pronóstico, al tener una distribución de lluvia un poco más homogénea sobre el territorio y relativamente más cercana a la distribución de lluvia registrada, aunque con tendencia a subestimar en cantidades. Además, los “Atributos de Desempeño” y porcentajes de acierto muestra que G3D junto con KF son las parametrizaciones con mejor desempeño.
  - Para el segundo día, tanto en análisis cualitativo y cuantitativo es KF la parametrización con mejor rendimiento, a pesar de presentar tendencia a sobreestimar en algunas regiones.
  - En los pronósticos del WRF se observa en todos los casos, para los eventos estudiados una subestimación en la Región 6, resultado esperado debido a los máximos de lluvia puntuales que tuvieron lugar y que ningún pronóstico lo logro simular.
- *¿Qué parametrización presenta mejor pronóstico con respecto a distribución temporal y espacial de la lluvia durante la influencia de dicha onda tropical?*



Al comparar el comportamiento de las lluvias por medio de imágenes de radar, y con las series de tiempo de los pronósticos de lluvia, el WRF cuenta con una aproximación pobre en la distribución temporal y espacial registrada en el caso de estudio escogido, para las tres parametrizaciones estudiadas.

El modelo WRF pronostica las precipitaciones en las últimas horas de la mañana y durante la tarde, cuando en el caso de estudio las lluvias tuvieron lugar para ambos días principalmente en horas de la noche y madrugada.

- *¿Qué parametrización es capaz de pronosticar máximos significativos puntuales de lluvia durante este evento?*

Los pronósticos realizados por los 3 esquemas en la parametrización de física de cúmulos presentan tendencia en forma general a subestimar la lluvia, es capaz de pronosticar máximos, pero lo hace sobre todo en la franja norte del país, es decir en zonas montañosas del territorio, por lo que en este caso de estudio se detecta un problema en el pronóstico en los valles y zonas costeras.

Únicamente KF fue capaz de pronosticar un máximo puntual en la zona suroriental del territorio en el segundo día de pronóstico, sector en donde se obtuvo un registro de 200 mm observados en la estación de Conchagua, sin embargo, el pronóstico se quedó muy por debajo a ese valor.

- *¿El WRF ofrece una mejora en el pronóstico, en comparación con los resultados del modelo global que provee las condiciones iniciales y de frontera?*

Para el caso de estudio escogido, en términos de distribución existe una mejora relativa para ambos días, obteniendo una mejora en G3D para el primer día y KF para el segundo.

Con el análisis detallado que se realizó a nivel regional se puede identificar una mejora en el pronóstico para el caso de identificación de sistemas ciclónicos que el modelo global no fue capaz de simular correctamente, sistemas que se considera

fueron de gran influencia en las condiciones locales que se registraron en la zona suroriental del territorio.

En el pronóstico de nubosidad de forma general se observó que KF pronostica en cierta forma mejor con respecto a los otros esquemas estudiados, pero con BMJ, es posible la identificación de topes más fríos y visualizar la ITCZ activa en el sur del Pacífico centroamericano, sin embargo, no pronostica bien los campos nubosos al norte de Centroamérica que se formaron entre Nicaragua, Honduras y El Salvador, para el caso de estudio.

Los resultados obtenidos en esta investigación no distan mucho de resultados previos encontrados en otras investigaciones realizadas a nivel regional.

Los resultados obtenidos reflejan que KF es la parametrización con escenarios más húmedos, condición más evidente en zonas de montaña en la zona noroccidental de El Salvador, tal y como lo mostraron los pronósticos en el dominio 2. Resultado similar que se encontró en el estudio de Maldonado et al. (2018) en donde sus experimentos para el estudio de la precipitación regional en Centroamérica utilizando el WRF con física de cúmulos KF y GD, determinó que el esquema de KF calcula más precipitación que GD, asociando a la capacidad del sistema de GD para reproducir las precipitaciones irregulares que pueden ser intensas.

Maldonado también se concluye que es necesario más trabajos de evaluación del desempeño de los modelos de área limitada en la reproducción de las características climáticas complejas en América Central, que se ven afectados por procesos remotos como El Niño, Oscilación del Sur y la Oscilación del Atlántico Norte y los procesos locales debido a la topografía compleja, el uso del suelo y las costas.

Por su parte Sáenz Soto (2017), en su estudio de las características del ciclo diurno en Centroamérica utilizando parametrizaciones KF y GD, encontró que los pronósticos de GD representan de mejor forma la distribución espacial, coincidentemente con el resultado observado en el día 1 del caso de estudio escogido para El Salvador en esta investigación.

## 5.2. Recomendaciones

Los resultados obtenidos no pueden ser completamente concluyentes ante el comportamiento del modelo debido a que solamente se ha analizado un evento convectivo, con pronóstico para dos días, por lo tanto, se recomienda replicar el ejercicio para:

- Otros eventos de precipitaciones por onda tropical con el fin de evaluar si los resultados son contundentes y pueden ser generalizados para el fenómeno producido por estos sistemas atmosféricos.
- Eventos en los que se haya observado lluvias importantes, por influencia de otros sistemas e intensos que dieron lugar a lluvias convectivas como lo pueden ser: Vaguadas en niveles Altos, Influencia de la Vaguada Troposférica (TUTT, por sus siglas en inglés).
- Eventos de lluvias no convectivas con acumulados significativos; como por ejemplo situaciones de temporal.
- Realizar este tipo de verificación por lo menos en un periodo no menor a 6 meses para poder tener resultados más confiables que permitan tener conclusiones con un mayor fundamento acerca del rendimiento de un modelo u otro.

Como se mencionó el SMN se elabora un mapa de lluvia esperada, se recomienda utilizar los datos puntuales pronosticados de las corridas del modelo WRF para la estimación de lluvia por región y no solamente determinar el valor esperado en un promedio eminentemente subjetivo.

- Para la elaboración del mapa de pronóstico de cantidades de lluvia se recomienda reevaluar las regiones en las que se divide el país ya que son zonas muy heterogéneas, con comportamiento pluviométrico diferentes que puede ver afectado en los promedios obtenidos en cada una de ellas.

- De ser posible se recomienda replicar el ejercicio de verificación utilizando el WRF, pero con datos iniciales de otro modelo global.
- De ser posible, a la vez se recomienda la automatización del proceso de verificación.
- Realizar estudios complementarios para la elaboración de un ensamble meteorológico con el mismo WRF o combinado con salidas de otros modelos
- Que La DOGA registre impactos originados por los eventos meteorológicos con lluvias intensas o prolongadas, la cual contribuya a caracterizar los fenómenos.
- Incrementar el monitoreo y/o registro de datos meteorológicos por medio de más estaciones en las ciudades, donde están ocurriendo con mayor frecuencia inundaciones.

## Referencias

- Amador, J. A. (2008). The Intra-Americas Sea Low-level Jet Overview and Future Research, 188, 153-188. <https://doi.org/10.1196/annals.1446.012>
- Amador, J. A., Rivera, E., Mora, G., Sáenz, F., y Calderón, B. (2016a). The easternmost tropical Pacific . Part I : A climate review, 64(June 2006), 1-22.
- Amador, J. A., Rivera, E., Mora, G., Sáenz, F., y Calderón, B. (2016b). The easternmost tropical Pacific . Part II : Seasonal and intraseasonal modes of atmospheric variability, 64(February).
- Arakawa, A. (2004). The cumulus parameterization problem: Past, present, and future. American Meteorological Society.
- Avila, L. A., y Pasch, R. J. (1995). Atlantic Tropical Systems of 1993. Monthly Weather Review. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1995\)123<0887:ATSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123<0887:ATSO>2.0.CO;2)
- Barry, R. G., y Carleton, A. M. (2001). Synoptic and dynamic climatology. Progress in Physical Geography (Vol. 4). <https://doi.org/10.1177/030913338000400106>
- Betts, A. K., y Miller, M. J. (1986). A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and Arctic air-mass data sets. Royal Meteorological Society.
- Boos, W. R., Hurley, J. V., y Murthy, V. S. (2015, abril). Introducción a la meteorología tropical, Capítulo 7: Sistemas Sinpticos y de Mesoescala. <https://doi.org/10.1002/qj.2454>
- Burpee, R. W. (1972). The origin and structure of easterly waves in the lower troposphere of north Africa.
- Byrd, G., Bua, W., y Jascourt, S. (2009a). ¿Cómo producen los modelos la precipitación y las nubes? Versión 2. Recuperado 2 de abril de 2018, de [http://www.meted.ucar.edu/nwp/model\\_precipandclouds\\_es/index.htm](http://www.meted.ucar.edu/nwp/model_precipandclouds_es/index.htm)
- Byrd, G., Bua, W., y Jascourt, S. (2009b). Impacto de la física del modelo en los pronósticos numéricos, versión 2. Recuperado 2 de abril de 2018, de [https://www.meted.ucar.edu/nwp/model\\_physics\\_es/index.htm](https://www.meted.ucar.edu/nwp/model_physics_es/index.htm)
- CEPAL. (2010a). El Salvador: Impacto Socioeconmico, ambiental y de riesgo por la Baja Presion asociada a la Tormenta Tropical IDA en noviembre de 2009.
- CEPAL. (2010b). Evaluación de daños y pérdidas en El Salvador ocasionados por la tormenta tropical Agatha: Resumen preliminar, 10 p. Recuperado de [http://www.eclac.org/noticias/paginas/4/35494/resumen\\_evaluacionrev\\_1.pdf](http://www.eclac.org/noticias/paginas/4/35494/resumen_evaluacionrev_1.pdf)
- Charney, J., y Stern, M. (1962). On the Stability of Internal Baroclinic Jets in a Rotating Atmosphere. Journal of the Atmospheric Sciences. <https://doi.org/10.1175/1520->

0469(1962)019<0159:OTSOIB>2.0.CO;2

- Cosgrove, B. A., Lohmann, D., Mitchell, K. E., Houser, P. R., Wood, E. F., Schaake, J. C., ... Tarpley, J. D. (2003). Land surface model spin-up behavior in the North American Land Data Assimilation System ( NLDAS ). *Journal of Geophysical Research*, 108. <https://doi.org/10.1029/2002JD003316>
- Cotton, W. R., Bryan, G. H., y Van den Herver, S. C. (2011). *Storm and Cloud Dynamics*.
- Davis, C. A., Manning, K. W., Carbone, R. E., Trier, S. B., y Tuttle, J. D. (2003). Coherence of warm-season continental rainfall in numerical weather prediction models. *American Meteorological Society*.
- Fernández, W., Chacón, R., y Melgajejo, J. W. (1996). On the rainfall distribution with altitude over Costa Rica.pdf. *Revista Geofísica*, 44,57-72.
- Gallegos, E. N., Durán, L. J. C., y Álvarez, J. A. C. (2017). “ Aplicación Del Modelo Mesoescalar Wrf ( Weather Research Forecast Model ) En La Modelación Hidrológica De La Cuenca Del Río Sucio ”. Universidad de El Salvador.
- Gallus, W. A. J. (1999). Eta simulations of three extreme precipitation events: Sensitivity to resolution and convective parameterization. *American Meteorological Society*.
- Garcia, L. A. (1996). Distribucion de la Lluvia con la Altitud en la Region Occidental de El Salvador.
- Garcia, L. A. (2009). Regimen de lluvia y caudales en El Salvador, se relacion con la variabilidad climatica (forzantes Oceanicos-Atmosfericos) para la construccion de mapas de amenazas por deficit o exceso de lluvias. Universidad de Costa Rica.
- Garcia, L. A., y Fernández, W. (1997). Un Análisis de la Lluvia Diaria en EL Salvador: La Canícula y el Comienzo y el Final de la Estación Lluviosa. *Revista Geofísica*.
- García, L., y Fernandez, W. (1996). Distribución Estacional e Interanual de la Lluvia en El Salvador. *Revista Geofísica*.
- Grell, G. A. (1993). Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *American Meteorological Society*.
- Grell, G. A., y Devenyi, D. (2002). A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, 29(14), 10-13.
- Grist, J. P. (2002). Easterly waves over Africa. Part I: The seasonal cycle and contrasts between wet and dry years.
- Guzmán, G. (1971). Publicacion tecnica n°10. Meteorología Sinoptica y Climatología de Centroamerica, especialmetne de El Salvador. Servicio Meterologio de El Salvador, 1-14.
- Harmeling, S. (2010). *Global Climate Risk Index 2011*. Who suffers most from extreme

- weather events? Weather-related loss Eventos in 2009 and 1990 to 2009.
- Hopsch, S. B., Thorncroft, C. D., y Tyle, K. R. (2010). Analysis of African Easterly Wave Structures and Their Role in Influencing Tropical Cyclogenesis. *Monthly Weather Review*, 138(4), 1399-1419. <https://doi.org/10.1175/2009MWR2760.1>
- Hsieh, J.-S., y Cook, K. H. (2005). Generation of African Easterly Wave Disturbances: Relationship to the African Easterly Jet. *Monthly Weather Review*, 133(5), 1311-1327. <https://doi.org/10.1175/MWR2916.1>
- Inzunza, J. (2002). Escalas de los movimientos atmosféricos. *Meteorología Descriptiva*.
- Jascourt, D. S. (2013). Uso Efectivo de Modelos de Alta Resolucion. Recuperado de [http://www.meted.ucar.edu/nwp/hires\\_es/print.htm](http://www.meted.ucar.edu/nwp/hires_es/print.htm)
- Jones, C., Mahowald, N., y Luo, C. (2004). Observational evidence of African desert dust intensification of easterly waves.
- Kain, J. S. (2004). The Kain–Fritsch convective parameterization: An update.
- Koster, T., y Milly, D. (1996). The interplay between transpiration and runoff formulations in land surface schemes used with atmospheric models. *Journal of Climate - American Meteorological Society*.
- Lain, A. (2016). Introducción a la Meteorología Tropical. Recuperado de [https://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook\\_2nd\\_edition\\_es/index.htm](https://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook_2nd_edition_es/index.htm)
- Laing, A., y Byrd, G. (2012). Ondas tropicales del este. Recuperado 14 de abril de 2018, de [https://www.meted.ucar.edu/tropical/synoptic/Afr\\_E\\_Waves\\_es/index.htm](https://www.meted.ucar.edu/tropical/synoptic/Afr_E_Waves_es/index.htm)
- Laing, A., y Evans, J.-L. (2016). Introducción a la meteorología tropical. Segunda Edición Capítulo 9: Observación, análisis y predicción. Recuperado 2 de abril de 2018, de [http://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook\\_2nd\\_edition\\_es/print\\_9.htm#page\\_4.0.0](http://www.meted.ucar.edu/tropical/textbook_2nd_edition_es/print_9.htm#page_4.0.0)
- León, F., Eligaza, F., Carretero, O., y San Ambrosio, I. (2007). Diagnóstico y predicción de la convección profunda. Nota Técnica STAP N.35. (M. de M. A. N. de Meteorología, Ed.).
- Maldonado, T., Alfaro, E., Amador, J., y Rutgersson, A. (2018). Regional precipitation estimations in Central America using the Weather Research and Forecast model. *Revista Biología Tropical*, (May). <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i1.33303>
- Marks, F., y Stewart, S. (2001). TRMM Satellite Data - Applications to Tropical Cyclone analysis and forecasting.
- MARN. (2017). Informe Nacional del Estado de los Riesgos y Vulnerabilidad 2017.pdf. Recuperado de [http://www.marn.gob.sv/descarga/informe-nacional-del-estado-de-los-riesgos-y-vulnerabilidad\\_2017/?wpdmdl=37390&yind=UiHFzBqmlccEcsnEkB\\_98a8lsxnthf4uBjZ ZlqtKKNKG9NRZM2-z\\_WGmB1UKvsZ5FV73Ru8ac4H\\_iFTnFZmQi3acSvvCdNCJBywCcjulxR0Vac6j3ntR](http://www.marn.gob.sv/descarga/informe-nacional-del-estado-de-los-riesgos-y-vulnerabilidad_2017/?wpdmdl=37390&yind=UiHFzBqmlccEcsnEkB_98a8lsxnthf4uBjZ ZlqtKKNKG9NRZM2-z_WGmB1UKvsZ5FV73Ru8ac4H_iFTnFZmQi3acSvvCdNCJBywCcjulxR0Vac6j3ntR)

p8idUa8W1eqF\_

- Mo, K. C., Chelliah, M., Carrera, M. L., Higgins, R. W., y Ebisuzaki, W. (2005). Atmospheric Moisture Transport over the United States and Mexico as Evaluated in the NCEP Regional Reanalysis. *Journal of Hydrometeorology*, 6(5), 710-728. <https://doi.org/10.1175/JHM452.1>
- Molinari, J., y Dudek, M. (1992). Parameterization of convective precipitation in mesoscale numerical models: a critical review. American Meteorological Society.
- Pacheco, M., y Lemus, A. (2014). Diseño de un Sistema de Alerta Temprana y estimación de intensidad de lluvia utilizando Radares de Banda X del sistema LAWR de El Salvador. Univerisdad de El Salvador.
- Parker, M. D., y Johnson, R. H. (2000). Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems.
- Rivera, E. R., y Amador, J. A. (2008a). Predicción Estacional del Clima en Centroamerica mediante la reduccion de escala dinamica. Parte 1. Evaluacion de los modelos de Circulacion General CCM3.6 y ECHAM4.5. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 16(1), 76-104.
- Rivera, E. R., y Amador, J. A. (2008b). Predicción Estacional del Clima en Centroamerica mediante la reduccion de escala dinamica. Parte 2: Aplicacion del modelo MM5v3. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 15(2), 131-173.
- Sáenz Soto, F. (2017). Reducción de escala dinámica con el modelo de Clima Regional REGCM4.5 aplicada a la Region Centroamericana y mares aledaños. Univerisdad de Costa Rica.
- Simpson, R. H., Neil, F., Shideler, D., y Johnson, H. M. (1967). Atlantic tropical disturbances.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Wang, W., y Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3, (June).
- SNET. (2008). Umbrales de intensidad de lluvia para la generacion de un sistema de Alerta Tempran contra inundadicones en el Area Metrolopolitana de San Salvador. Servicio Nacioal de Estudios Territoriales (SNET).
- Thorncroft, C. D., Hall, N. M. J., y Kiladis, G. N. (2006). Three-Dimensional Structure and Dynamics of African Easterly Waves. Part II: Dynamical Modes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 63(9), 2231-2245. <https://doi.org/10.1175/JAS3742.1>
- TRMM. (2011). Tropical Rainfall Measuring Mission. Senior Review Proposal. Recuperado de [https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document\\_files/TRMMSenRevProp\\_v1.2.pdf](https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/TRMMSenRevProp_v1.2.pdf)
- UCAR. (2015). WRF ARW Online Tutorial. Recuperado de



[http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Graphics/NCL/Examples/DIAGNOSTICS/wrf\\_dbz.htm](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Graphics/NCL/Examples/DIAGNOSTICS/wrf_dbz.htm)

- Ventrice, M. J., Thorncroft, C. D., y Roundy, P. E. (2011). The Madden Julian Oscillation's influence on African easterly waves and downstream tropical cyclogenesis.
- Warner, T. T. (2010). Numerical Weather and Climate Prediction.
- Warner, T. T., Peterson, R. A., y Treadon, R. E. (1997). A Tutorial on Lateral Boundary Conditions as a Basic and Potentially Serious Limitation to Regional Numerical Weather Prediction. American Meteorological Society.
- Weisman, M. L., Skamarock, W. C., y Klemp, J. B. (1997). The resolution dependence of explicitly modeled convective systems. American Meteorological Society.
- Weiss, S. J., Kain, J. S., Bright, D. R., Baldwin, M. E., Levit, J., Carbin, G. W., ... Thomas, K. W. (2008). Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP. American Meteorological Society.
- Yang, Z., Dickinson, R., Henderson-Sellers, A., y Pitman, A. (1995). Preliminary study of spin-up processes in land surface models with the first stage data of Project for Intercomparison of Land Surface Parameterization Schemes Phase. Journal of Geophysical Research.
- Yang, Z., Uddstrom, M., y Duncan, M. (2011). Effects of short spin-up periods on soil moisture simulation and the causes over New Zealand. Journal of Geophysical Research, (April 2015). <https://doi.org/10.1029/2011JD016121>

# Anexos

## Anexo 1. Tablas de atributos de desempeño por región.

Tabla 9. Región 1. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 23 de agosto 2017.

## Promedio KF

Hora	Hora local	Observado	Pronosticado KF	(Pronostico - OBS)
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.05	0.05
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	2.97	2.97
6 a 9 horas	2pm - 4pm	6.27	7.85	1.59
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.47	16.82	16.36
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.27	0.01	-0.26
15 a 18 horas	11pm - 1am	3.13	0.00	-3.13
18 a 21 horas	2mn - 4am	16.40	0.02	-16.38
21 a 24 horas	5am - 7am	0.00	0.02	0.02
Total		26.53	27.75	1.22

Estadísticos	Valor
Desviación Standard ( $\sigma$ )	5.52
Coefficiente de Correlación de Pearson (r)	-0.14
Coefficiente de Determinación (R2)	0.02
Error Medio Sistemático Medio (ME)	0.15
Error Absoluto (MAE)	0.15
Error Cuadrático Medio (MSE)	0.19
Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	0.43

## Promedio BMJ

Hora	Hora local	Observado	Pronosticado BMJ	(Pronostico - OBS)
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.00	0.00
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	0.00	0.00
6 a 9 horas	2pm - 4pm	6.27	1.30	-4.97
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.47	3.55	3.09
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.27	0.46	0.20
15 a 18 horas	11pm - 1am	3.13	0.05	-3.08
18 a 21 horas	2mn - 4am	16.40	0.00	-16.40
21 a 24 horas	5am - 7am	0.00	0.00	0.00
Total		26.53	5.37	-21.16

Estadísticos	Valor
Desviación Standard ( $\sigma$ )	5.52
Coefficiente de Correlación de Pearson (r)	-0.15
Coefficiente de Determinación (R2)	0.02
Error Medio Sistemático Medio (ME)	-2.65
Error Absoluto (MAE)	2.65
Error Cuadrático Medio (MSE)	55.99
Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	7.48

## Promedio G3D

Hora	Hora local	Observado	Pronosticado G3D	(Pronostico - OBS)
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.00	0.00
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	1.42	1.42
6 a 9 horas	2pm - 4pm	6.27	6.24	-0.03
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.47	8.45	7.99
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.27	0.27	0.00
15 a 18 horas	11pm - 1am	3.13	0.00	-3.13
18 a 21 horas	2mn - 4am	16.40	0.00	-16.40
21 a 24 horas	5am - 7am	0.00	0.00	0.00
Total		26.53	16.38	-10.15

Estadísticos	Valor
Desviación Standard ( $\sigma$ )	5.52
Coefficiente de Correlación de Pearson (r)	-0.08
Coefficiente de Determinación (R2)	0.01
Error Medio Sistemático Medio (ME)	-1.27
Error Absoluto (MAE)	1.27
Error Cuadrático Medio (MSE)	12.88
Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	3.59

Tabla 10. Región 1. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 24 de agosto 2017.

## Promedio KF

Hora	Hora local	Observado	Pronosticado KF	(Pronostico - OBS)
0 - 3 horas	7am - 10am	0.07	0.01	-0.06
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	3.42	3.42
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.00	5.43	5.43
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.00	3.56	3.56
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.54	0.54
15 a 18 horas	11pm - 1am	10.27	0.54	-9.73
18 a 21 horas	2mn - 4am	0.93	2.05	1.11
21 a 24 horas	5am - 7am	1.73	1.74	0.00
Total		13.00	17.28	4.28

Estadísticos	Valor
Desviación Standard ( $\sigma$ )	2.67
Coefficiente de Correlación de Pearson (r)	-0.38
Coefficiente de Determinación (R2)	0.14
Error Medio Sistemático Medio (ME)	0.54
Error Absoluto (MAE)	0.54
Error Cuadrático Medio (MSE)	2.29
Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	1.51

## Promedio BMJ

Hora	Hora local	Observado	Pronosticado BMJ	(Pronostico - OBS)
0 - 3 horas	7am - 10am	0.07	0.00	-0.07
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	1.18	1.18
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.00	1.57	1.57
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.00	14.58	14.58
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	9.40	9.40
15 a 18 horas	11pm - 1am	10.27	0.01	-10.25
18 a 21 horas	2mn - 4am	0.93	0.01	-0.92
21 a 24 horas	5am - 7am	1.73	0.03	-1.71
Total		13.00	26.78	13.78

Estadísticos	Valor
Desviación Standard ( $\sigma$ )	2.67
Coefficiente de Correlación de Pearson (r)	-0.31
Coefficiente de Determinación (R2)	0.10
Error Medio Sistemático Medio (ME)	1.72
Error Absoluto (MAE)	1.72
Error Cuadrático Medio (MSE)	23.75
Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	4.87

## Promedio G3D

Hora	Hora local	Observado	Pronosticado G3D	(Pronostico - OBS)
0 - 3 horas	7am - 10am	0.07	0.00	-0.07
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	0.24	0.24
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.00	1.81	1.81
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.00	4.47	4.47
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.93	0.93
15 a 18 horas	11pm - 1am	10.27	0.04	-10.23
18 a 21 horas	2mn - 4am	0.93	0.04	-0.89
21 a 24 horas	5am - 7am	1.73	0.00	-1.73
Total		13.00	7.53	-5.47

Estadísticos	Valor
Desviación Standard ( $\sigma$ )	2.67
Coefficiente de Correlación de Pearson (r)	-0.30
Coefficiente de Determinación (R2)	0.09
Error Medio Sistemático Medio (ME)	-0.68
Error Absoluto (MAE)	0.68
Error Cuadrático Medio (MSE)	3.74
Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	1.93

Tabla 11. Región 2. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 23 de agosto 2017.

Promedio KF					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado KF	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.00	0.00	Desviación Standard ( $\sigma$ )	5.52
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	0.00	0.00	Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	-0.15
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.00	2.86	2.86	Coefficiente de Determinación (R2)	0.02
9 a 12 horas	5pm - 7pm	2.36	7.48	5.12	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-2.94
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.26	0.26	Error Absoluto (MAE)	2.94
15 a 18 horas	11pm - 1am	28.24	0.00	-28.24	Error Cuadrático Medio (MSE)	69.34
18 a 21 horas	2mn - 4am	3.56	0.00	-3.56	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	8.33
21 a 24 horas	5am - 7am	0.00	0.00	0.00		
Total		34.16	10.61	-23.55		

Promedio BMJ					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado BMJ	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.36	0.36	Desviación Standard ( $\sigma$ )	5.52
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	0.93	0.93	Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	-0.32
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.00	2.36	2.36	Coefficiente de Determinación (R2)	0.10
9 a 12 horas	5pm - 7pm	2.36	0.76	-1.60	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-3.70
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.11	0.11	Error Absoluto (MAE)	3.70
15 a 18 horas	11pm - 1am	28.24	0.00	-28.24	Error Cuadrático Medio (MSE)	109.73
18 a 21 horas	2mn - 4am	3.56	0.00	-3.56	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	10.48
21 a 24 horas	5am - 7am	0.00	0.00	0.00		
Total		34.16	4.53	-29.63		

Promedio G3D					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado G3D	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.36	0.36	Desviación Standard ( $\sigma$ )	5.52
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	0.85	0.85	Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	-0.25
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.00	3.73	3.73	Coefficiente de Determinación (R2)	0.06
9 a 12 horas	5pm - 7pm	2.36	4.29	1.93	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-3.10
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.15	0.15	Error Absoluto (MAE)	3.10
15 a 18 horas	11pm - 1am	28.24	0.00	-28.24	Error Cuadrático Medio (MSE)	76.83
18 a 21 horas	2mn - 4am	3.56	0.00	-3.56	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	8.77
21 a 24 horas	5am - 7am	0.00	0.00	0.00		
Total		34.16	9.37	-24.79		

Tabla 12. Región 2. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 24 de agosto 2017.

Promedio KF					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado KF	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.13	0.13	Desviación Standard ( $\sigma$ )	2.67
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	1.66	1.66	Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	0.04
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.64	3.85	3.21	Coefficiente de Determinación (R2)	0.00
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.00	1.26	1.26	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-1.26
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.33	0.33	Error Absoluto (MAE)	1.26
15 a 18 horas	11pm - 1am	3.04	0.68	-2.36	Error Cuadrático Medio (MSE)	12.74
18 a 21 horas	2mn - 4am	12.76	1.45	-11.31	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	3.57
21 a 24 horas	5am - 7am	4.56	1.55	-3.01		
Total		21.00	10.91	-10.09		

Promedio BMJ					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado BMJ	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.01	0.01	Desviación Standard ( $\sigma$ )	2.67
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	0.12	0.12	Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	-0.21
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.64	2.19	1.55	Coefficiente de Determinación (R2)	0.04
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.00	0.07	0.07	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-2.33
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.00	0.00	Error Absoluto (MAE)	2.33
15 a 18 horas	11pm - 1am	3.04	0.00	-3.04	Error Cuadrático Medio (MSE)	43.25
18 a 21 horas	2mn - 4am	12.76	0.00	-12.76	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	6.58
21 a 24 horas	5am - 7am	4.56	0.00	-4.56		
Total		21.00	2.40	-18.60		

Promedio G3D					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado G3D	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.01	0.01	Desviación Standard ( $\sigma$ )	2.67
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	0.03	0.03	Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	-0.37
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.64	0.00	-0.64	Coefficiente de Determinación (R2)	0.14
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.00	1.45	1.45	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-2.23
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	1.62	1.62	Error Absoluto (MAE)	2.23
15 a 18 horas	11pm - 1am	3.04	0.02	-3.02	Error Cuadrático Medio (MSE)	39.91
18 a 21 horas	2mn - 4am	12.76	0.00	-12.76	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	6.32
21 a 24 horas	5am - 7am	4.56	0.00	-4.56		
Total		21.00	3.13	-17.87		

Tabla 13. Región 3. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 23 de agosto 2017.

**Promedio KF**

Hora	Hora local	Observado	Pronosticado KF	(Pronostico - OBS)
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.00	0.00
3 - 6 horas	11am - 1pm	3.80	0.12	-3.68
6 a 9 horas	2pm - 4pm	10.20	0.00	-10.20
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.13	0.08	-0.05
12 a 15 horas	8pm - 10pm	1.27	0.09	-1.18
15 a 18 horas	11pm - 1am	2.80	0.00	-2.80
18 a 21 horas	2mn - 4am	0.00	0.00	0.00
21 a 24 horas	5am - 7am	0.00	0.00	0.00
Total		18.20	0.29	-17.91

Estadísticos	Valor
Desviación Standard ( $\sigma$ )	5.52
Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	-0.07
Coefficiente de Determinación (R2)	0.00
Error Medio Sistemático Medio (ME)	-2.24
Error Absoluto (MAE)	2.24
Error Cuadrático Medio (MSE)	40.09
Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	6.33

**Promedio BMJ**

Hora	Hora local	Observado	Pronosticado BMJ	(Pronostico - OBS)
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.31	0.31
3 - 6 horas	11am - 1pm	3.80	1.52	-2.28
6 a 9 horas	2pm - 4pm	10.20	1.07	-9.13
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.13	0.15	0.02
12 a 15 horas	8pm - 10pm	1.27	0.00	-1.27
15 a 18 horas	11pm - 1am	2.80	0.31	-2.49
18 a 21 horas	2mn - 4am	0.00	0.31	0.31
21 a 24 horas	5am - 7am	0.00	0.23	0.23
Total		18.20	3.91	-14.29

Estadísticos	Valor
Desviación Standard ( $\sigma$ )	5.52
Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	0.67
Coefficiente de Determinación (R2)	0.45
Error Medio Sistemático Medio (ME)	-1.79
Error Absoluto (MAE)	1.79
Error Cuadrático Medio (MSE)	25.54
Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	5.05

**Promedio G3D**

Hora	Hora local	Observado	Pronosticado G3D	(Pronostico - OBS)
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.00	0.00
3 - 6 horas	11am - 1pm	3.80	1.76	-2.04
6 a 9 horas	2pm - 4pm	10.20	2.09	-8.11
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.13	0.62	0.49
12 a 15 horas	8pm - 10pm	1.27	0.00	-1.27
15 a 18 horas	11pm - 1am	2.80	0.03	-2.77
18 a 21 horas	2mn - 4am	0.00	0.00	0.00
21 a 24 horas	5am - 7am	0.00	0.00	0.00
Total		18.20	4.50	-13.70

Estadísticos	Valor
Desviación Standard ( $\sigma$ )	5.52
Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	0.84
Coefficiente de Determinación (R2)	0.70
Error Medio Sistemático Medio (ME)	-1.71
Error Absoluto (MAE)	1.71
Error Cuadrático Medio (MSE)	23.47
Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	4.84

Tabla 14. Región 3. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 24 de agosto 2017.

**Promedio KF**

Hora	Hora local	Observado	Pronosticado KF	(Pronostico - OBS)
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.00	0.00
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	0.00	0.00
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.00	0.01	0.01
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.00	0.03	0.03
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.04	0.04
15 a 18 horas	11pm - 1am	8.87	0.05	-8.82
18 a 21 horas	2mn - 4am	13.53	0.31	-13.22
21 a 24 horas	5am - 7am	2.67	0.52	-2.15
Total		25.07	0.96	-24.11

Estadísticos	Valor
Desviación Standard ( $\sigma$ )	2.67
Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	0.43
Coefficiente de Determinación (R2)	0.19
Error Medio Sistemático Medio (ME)	-3.01
Error Absoluto (MAE)	3.01
Error Cuadrático Medio (MSE)	72.66
Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	8.52

**Promedio BMJ**

Hora	Hora local	Observado	Pronosticado BMJ	(Pronostico - OBS)
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.00	0.00
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	3.49	3.49
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.00	1.44	1.44
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.00	0.00	0.00
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.00	0.00
15 a 18 horas	11pm - 1am	8.87	0.00	-8.87
18 a 21 horas	2mn - 4am	13.53	0.00	-13.53
21 a 24 horas	5am - 7am	2.67	0.00	-2.67
Total		25.07	4.93	-20.13

Estadísticos	Valor
Desviación Standard ( $\sigma$ )	2.67
Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	-0.33
Coefficiente de Determinación (R2)	0.11
Error Medio Sistemático Medio (ME)	-2.52
Error Absoluto (MAE)	2.52
Error Cuadrático Medio (MSE)	50.66
Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	7.12

**Promedio G3D**

Hora	Hora local	Observado	Pronosticado G3D	(Pronostico - OBS)
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.00	0.00
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	0.18	0.18
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.00	0.00	0.00
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.00	0.27	0.27
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.57	0.57
15 a 18 horas	11pm - 1am	8.87	0.21	-8.65
18 a 21 horas	2mn - 4am	13.53	0.00	-13.53
21 a 24 horas	5am - 7am	2.67	0.00	-2.67
Total		25.07	1.23	-23.83

Estadísticos	Valor
Desviación Standard ( $\sigma$ )	2.67
Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	-0.27
Coefficiente de Determinación (R2)	0.07
Error Medio Sistemático Medio (ME)	-2.98
Error Absoluto (MAE)	2.98
Error Cuadrático Medio (MSE)	71.00
Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	8.43

Tabla 15. Región 4. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 23 de agosto 2017.

Promedio KF					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado KF	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.00	0.00	Desviación Standard ( $\sigma$ )	5.52
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	0.00	0.00	Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	-0.09
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.93	0.00	-0.93	Coefficiente de Determinación (R2)	0.01
9 a 12 horas	5pm - 7pm	4.47	0.01	-4.46	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-2.05
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.18	0.18	Error Absoluto (MAE)	2.05
15 a 18 horas	11pm - 1am	0.00	0.01	0.01	Error Cuadrático Medio (MSE)	33.78
18 a 21 horas	2mn - 4am	11.07	0.05	-11.02	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	5.81
21 a 24 horas	5am - 7am	0.33	0.12	-0.22		
Total		16.80	0.36	-16.44		

Promedio BMJ					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado BMJ	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.00	0.00	Desviación Standard ( $\sigma$ )	5.52
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	0.00	0.00	Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	0.00
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.93	0.00	-0.93	Coefficiente de Determinación (R2)	0.00
9 a 12 horas	5pm - 7pm	4.47	0.00	-4.47	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-2.10
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.00	0.00	Error Absoluto (MAE)	2.10
15 a 18 horas	11pm - 1am	0.00	0.00	0.00	Error Cuadrático Medio (MSE)	35.28
18 a 21 horas	2mn - 4am	11.07	0.00	-11.07	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	5.94
21 a 24 horas	5am - 7am	0.33	0.00	-0.33		
Total		16.80	0.00	-16.80		

Promedio G3D					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado G3D	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.01	0.01	Desviación Standard ( $\sigma$ )	5.52
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	0.00	0.00	Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	0.43
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.93	0.02	-0.92	Coefficiente de Determinación (R2)	0.19
9 a 12 horas	5pm - 7pm	4.47	0.00	-4.46	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-2.06
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.05	0.05	Error Absoluto (MAE)	2.06
15 a 18 horas	11pm - 1am	0.00	0.06	0.06	Error Cuadrático Medio (MSE)	33.85
18 a 21 horas	2mn - 4am	11.07	0.10	-10.96	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	5.82
21 a 24 horas	5am - 7am	0.33	0.10	-0.24		
Total		16.80	0.34	-16.46		

Tabla 16. Región 4. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 24 de agosto 2017.

Promedio KF					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado KF	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.03	0.03	Desviación Standard ( $\sigma$ )	2.67
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	0.00	0.00	Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	0.86
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.00	0.00	0.00	Coefficiente de Determinación (R2)	0.74
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.00	0.00	0.00	Error Medio Sistemático Medio (ME)	4.21
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.21	0.21	Error Absoluto (MAE)	4.21
15 a 18 horas	11pm - 1am	0.20	1.05	0.85	Error Cuadrático Medio (MSE)	142.12
18 a 21 horas	2mn - 4am	0.13	13.33	13.20	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	11.92
21 a 24 horas	5am - 7am	1.07	20.49	19.42		
Total		1.40	35.12	33.72		

Promedio BMJ					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado BMJ	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.00	0.00	Desviación Standard ( $\sigma$ )	2.67
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	0.00	0.00	Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	0.85
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.00	0.00	0.00	Coefficiente de Determinación (R2)	0.73
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.00	0.00	0.00	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-0.16
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.00	0.00	Error Absoluto (MAE)	0.16
15 a 18 horas	11pm - 1am	0.20	0.01	-0.19	Error Cuadrático Medio (MSE)	0.21
18 a 21 horas	2mn - 4am	0.13	0.04	-0.10	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	0.46
21 a 24 horas	5am - 7am	1.07	0.05	-1.02		
Total		1.40	0.10	-1.30		

Promedio G3D					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado G3D	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.01	0.01	Desviación Standard ( $\sigma$ )	2.67
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	0.00	0.00	Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	-0.25
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.00	0.00	0.00	Coefficiente de Determinación (R2)	0.07
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.00	0.76	0.76	Error Medio Sistemático Medio (ME)	0.18
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	1.94	1.94	Error Absoluto (MAE)	0.18
15 a 18 horas	11pm - 1am	0.20	0.05	-0.15	Error Cuadrático Medio (MSE)	0.25
18 a 21 horas	2mn - 4am	0.13	0.04	-0.09	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	0.50
21 a 24 horas	5am - 7am	1.07	0.02	-1.04		
Total		1.40	2.82	1.42		

Tabla 17. Región 5. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 23 de agosto 2017.

Promedio KF					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado KF	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.00	0.00	Desviación Standard ( $\sigma$ )	5.52
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	1.05	1.05	Coefficiente de Correlación de Pearson ( $r$ )	-0.40
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.09	0.60	0.51	Coefficiente de Determinación (R2)	0.16
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.43	0.50	0.07	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-1.32
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.00	0.00	Error Absoluto (MAE)	1.32
15 a 18 horas	11pm - 1am	6.66	0.00	-6.66	Error Cuadrático Medio (MSE)	13.96
18 a 21 horas	2mn - 4am	5.51	0.00	-5.51	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	3.74
21 a 24 horas	5am - 7am	0.03	0.00	-0.03		
Total		12.71	2.15	-10.57		

Promedio BMJ					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado BMJ	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.58	0.58	Desviación Standard ( $\sigma$ )	5.52
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	3.41	3.41	Coefficiente de Correlación de Pearson ( $r$ )	-0.21
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.09	0.37	0.28	Coefficiente de Determinación (R2)	0.05
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.43	0.00	-0.43	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-0.99
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.01	0.01	Error Absoluto (MAE)	0.99
15 a 18 horas	11pm - 1am	6.66	0.40	-6.25	Error Cuadrático Medio (MSE)	7.90
18 a 21 horas	2mn - 4am	5.51	0.00	-5.51	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	2.81
21 a 24 horas	5am - 7am	0.03	0.00	-0.03		
Total		12.71	4.76	-7.95		

Promedio G3D					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado G3D	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.41	0.41	Desviación Standard ( $\sigma$ )	5.52
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	2.59	2.59	Coefficiente de Correlación de Pearson ( $r$ )	-0.37
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.09	0.58	0.50	Coefficiente de Determinación (R2)	0.14
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.43	0.58	0.15	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-1.07
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.00	0.00	Error Absoluto (MAE)	1.07
15 a 18 horas	11pm - 1am	6.66	0.00	-6.66	Error Cuadrático Medio (MSE)	9.13
18 a 21 horas	2mn - 4am	5.51	0.00	-5.51	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	3.02
21 a 24 horas	5am - 7am	0.03	0.00	-0.03		
Total		12.71	4.17	-8.55		

Tabla 18. Región 5. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 24 de agosto 2017.

Promedio KF					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado KF	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.03	0.03	Desviación Standard ( $\sigma$ )	2.67
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	2.67	2.67	Coefficiente de Correlación de Pearson ( $r$ )	0.82
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.00	0.30	0.30	Coefficiente de Determinación (R2)	0.67
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.00	0.00	0.00	Error Medio Sistemático Medio (ME)	0.66
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.02	0.02	Error Absoluto (MAE)	0.66
15 a 18 horas	11pm - 1am	1.89	1.16	-0.73	Error Cuadrático Medio (MSE)	3.49
18 a 21 horas	2mn - 4am	6.11	4.84	-1.27	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	1.87
21 a 24 horas	5am - 7am	4.71	8.98	4.26		
Total		12.71	18.00	5.28		

Promedio BMJ					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado BMJ	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.02	0.02	Desviación Standard ( $\sigma$ )	2.67
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	2.25	2.25	Coefficiente de Correlación de Pearson ( $r$ )	-0.32
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.00	0.71	0.71	Coefficiente de Determinación (R2)	0.10
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.00	0.00	0.00	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-1.21
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	0.00	0.00	Error Absoluto (MAE)	1.21
15 a 18 horas	11pm - 1am	1.89	0.00	-1.89	Error Cuadrático Medio (MSE)	11.64
18 a 21 horas	2mn - 4am	6.11	0.08	-6.04	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	3.41
21 a 24 horas	5am - 7am	4.71	0.00	-4.71		
Total		12.71	3.06	-9.65		

Promedio G3D					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado G3D	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.00	0.00	Desviación Standard ( $\sigma$ )	2.67
3 - 6 horas	11am - 1pm	0.00	0.42	0.42	Coefficiente de Correlación de Pearson ( $r$ )	-0.34
6 a 9 horas	2pm - 4pm	0.00	0.21	0.21	Coefficiente de Determinación (R2)	0.11
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.00	0.13	0.13	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-1.12
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	2.93	2.93	Error Absoluto (MAE)	1.12
15 a 18 horas	11pm - 1am	1.89	0.09	-1.79	Error Cuadrático Medio (MSE)	9.98
18 a 21 horas	2mn - 4am	6.11	0.00	-6.11	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	3.16
21 a 24 horas	5am - 7am	4.71	0.00	-4.71		
Total		12.71	3.78	-8.94		

Tabla 19. Región 6. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 23 de agosto 2017.

Promedio KF					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado KF	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.00	0.00	Desviación Standard ( $\sigma$ )	5.52
3 - 6 horas	11am - 01pm	0.52	0.01	-0.51	Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	-0.11
6 a 9 horas	02pm -4pm	3.88	1.64	-2.24	Coefficiente de Determinación (R2)	0.01
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.08	5.72	5.64	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-4.28
12 a 15 horas	8pm - 10pm	29.84	0.72	-29.12	Error Absoluto (MAE)	4.28
15 a 18 horas	11pm - 01am	8.12	0.05	-8.07	Error Cuadrático Medio (MSE)	146.64
18 a 21 horas	02mn - 04am	0.12	0.07	-0.05	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	12.11
21 a 24 horas	5am - 7am	0.00	0.09	0.09		
Total		42.56	8.31	-34.25		

Promedio BMJ					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado BMJ	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.00	0.00	Desviación Standard ( $\sigma$ )	5.52
3 - 6 horas	11am - 01pm	0.52	0.00	-0.52	Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	-0.16
6 a 9 horas	02pm -4pm	3.88	0.17	-3.71	Coefficiente de Determinación (R2)	0.03
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.08	5.72	5.64	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-4.44
12 a 15 horas	8pm - 10pm	29.84	0.30	-29.54	Error Absoluto (MAE)	4.44
15 a 18 horas	11pm - 01am	8.12	0.50	-7.62	Error Cuadrático Medio (MSE)	157.82
18 a 21 horas	02mn - 04am	0.12	0.10	-0.02	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	12.56
21 a 24 horas	5am - 7am	0.00	0.24	0.24		
Total		42.56	7.03	-35.53		

Promedio G3D					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado G3D	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.00	0.00	Desviación Standard ( $\sigma$ )	5.52
3 - 6 horas	11am - 01pm	0.52	0.00	-0.52	Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	-0.23
6 a 9 horas	02pm -4pm	3.88	0.00	-3.88	Coefficiente de Determinación (R2)	0.05
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.08	0.02	-0.06	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-5.24
12 a 15 horas	8pm - 10pm	29.84	0.01	-29.83	Error Absoluto (MAE)	5.24
15 a 18 horas	11pm - 01am	8.12	0.02	-8.10	Error Cuadrático Medio (MSE)	219.70
18 a 21 horas	02mn - 04am	0.12	0.05	-0.07	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	14.82
21 a 24 horas	5am - 7am	0.00	0.53	0.53		
Total		42.56	0.64	-41.92		

Tabla 20. Región 6. – Atributos de Desempeño y Series de tiempo, día 24 de agosto 2017.

Promedio KF					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado KF	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.04	0.04	Desviación Standard ( $\sigma$ )	2.67
3 - 6 horas	11am - 01pm	0.00	0.03	0.03	Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	0.37
6 a 9 horas	02pm -4pm	0.48	0.43	-0.05	Coefficiente de Determinación (R2)	0.14
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.00	10.14	10.14	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-7.67
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	1.53	1.53	Error Absoluto (MAE)	7.67
15 a 18 horas	11pm - 01am	13.32	0.88	-12.44	Error Cuadrático Medio (MSE)	470.37
18 a 21 horas	02mn - 04am	33.52	6.10	-27.42	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	21.69
21 a 24 horas	5am - 7am	38.44	5.26	-33.18		
Total		85.76	24.42	-61.34		

Promedio BMJ					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado BMJ	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.19	0.19	Desviación Standard ( $\sigma$ )	2.67
3 - 6 horas	11am - 01pm	0.00	0.08	0.08	Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	-0.32
6 a 9 horas	02pm -4pm	0.48	0.40	-0.08	Coefficiente de Determinación (R2)	0.11
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.00	3.86	3.86	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-9.58
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	2.49	2.49	Error Absoluto (MAE)	9.58
15 a 18 horas	11pm - 01am	13.32	1.15	-12.17	Error Cuadrático Medio (MSE)	734.85
18 a 21 horas	02mn - 04am	33.52	0.60	-32.92	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	27.11
21 a 24 horas	5am - 7am	38.44	0.31	-38.13		
Total		85.76	9.09	-76.67		

Promedio G3D					Estadísticos	
Hora	Hora local	Observado	Pronosticado G3D	(Pronostico - OBS)		Valor
0 - 3 horas	7am - 10am	0.00	0.03	0.03	Desviación Standard ( $\sigma$ )	2.67
3 - 6 horas	11am - 01pm	0.00	0.01	0.01	Coefficiente de Correlación de Pearson (r )	-0.24
6 a 9 horas	02pm -4pm	0.48	0.00	-0.48	Coefficiente de Determinación (R2)	0.06
9 a 12 horas	5pm - 7pm	0.00	2.21	2.21	Error Medio Sistemático Medio (ME)	-9.92
12 a 15 horas	8pm - 10pm	0.00	2.26	2.26	Error Absoluto (MAE)	9.92
15 a 18 horas	11pm - 01am	13.32	1.02	-12.30	Error Cuadrático Medio (MSE)	787.74
18 a 21 horas	02mn - 04am	33.52	0.76	-32.76	Raíz Cuadrada del MSE (RMSE)	28.07
21 a 24 horas	5am - 7am	38.44	0.08	-38.36		
Total		85.76	6.38	-79.38		



## Anexo 2. Histogramas comparativos de las series de tiempo por región.

### Región 1.

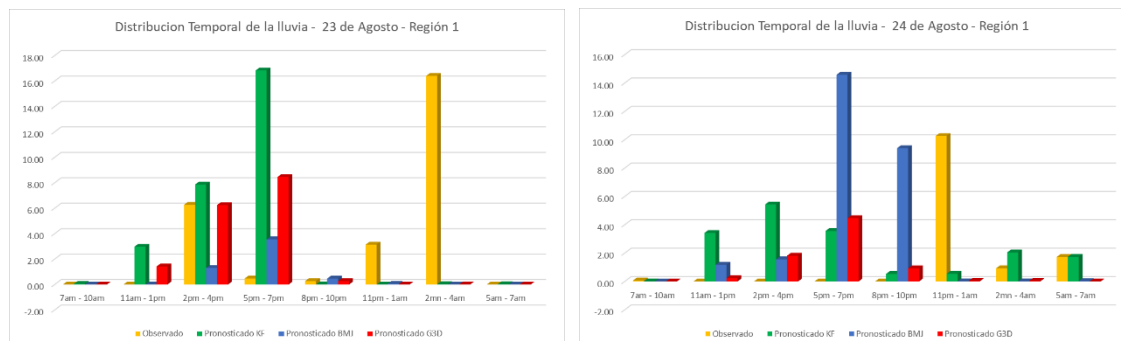


Fig. 27. Región 1. – Histogramas de series de tiempo, día 23 (izquierda) y 24 (derecha) de agosto 2017.

### Región 2.

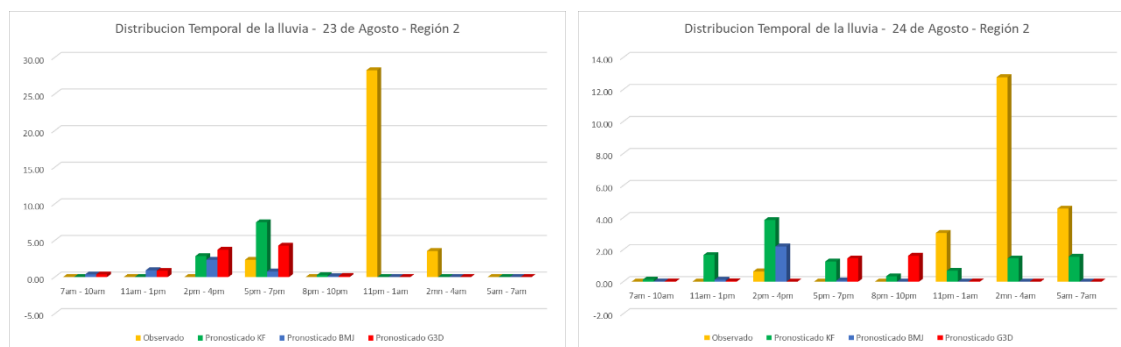


Fig. 28. Región 2. – Histogramas de series de tiempo, día 23 (izquierda) y 24 (derecha) de agosto 2017.

### Región 4.

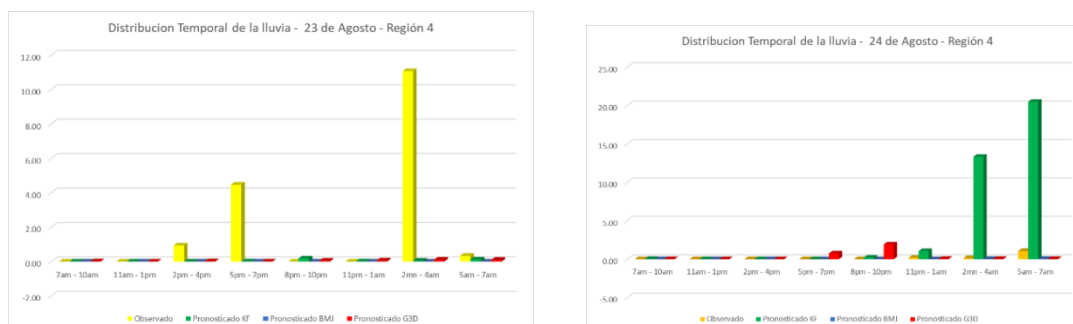


Fig. 29. Región 4. – Histogramas de series de tiempo, día 23 (izquierda) y 24 (derecha) de agosto 2017.

**Región 5.**



Fig. 30. Región 6. – Histogramas de series de tiempo, día 23 (izquierda) y 24 (derecha) de agosto 2017.

**Región 6.**

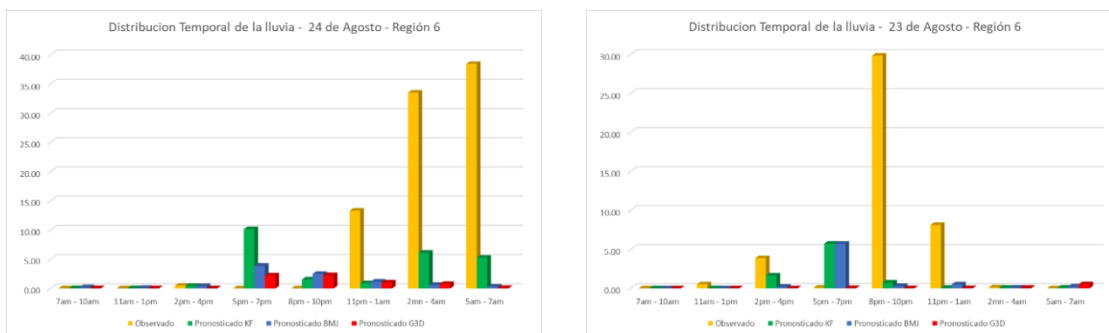


Fig. 31. Región 6. – Histogramas de series de tiempo, día 23 (izquierda) y 24 (derecha) de agosto 2017. Observaciones y pronóstico a) KF, b) BMJ, c) G3D

