UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Desempeño del modelo WRF en la simulación de la precipitación en una ciudad de media montaña: Caso de estudio Manizales.

Sergio Andres Gutierrez Zarate

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos
Manizales, Colombia
2021

Desempeño del modelo WRF en la simulación de la precipitación en una ciudad de media montaña: Caso de estudio Manizales.

Sergio Andres Gutierrez Zarate

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Directora:

M.Sc., I.C., JOAN NATHALIE SUÁREZ HINCAPIÉ

Grupo de Investigación:

Grupo de trabajo académico en ingeniería hidráulica y ambiental

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Departamento de Ingeniería Civil

Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Manizales, Colombia

2021

“- Dios, ayúdame a recordar que quise decir en este párrafo – Un mes después, al retomar la redacción del documento”

A Andrea y Alejandro, gracias por estar ahí para mí

A mis padres, por su apoyo constante.

A mi hermana Camila, por la bicicleta.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia, especialmente al Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental por su apoyo en la construcción de ideas para el desarrollo de este trabajo. Al grupo de trabajo del Sistema de Indicadores Ambientales de Caldas (SIMAC) por su apoyo en la gestión de la información de estaciones meteorológicas.

A Joan Nathalie Suarez Hincapié, mi directora, por la paciencia y entrega en el desarrollo de este trabajo.

Al ingeniero Carlos Mario Gonzales Duque, que en el inicio de este proceso aportó su experiencia en el manejo del modelo WRF.

A los ingenieros y profesores Jeannette Zambrano Najera y Jorge Julián Vélez Upegui por brindarme su enorme experiencia y conocimiento que contribuyeron a la construcción de este documento y a asentar las bases metodológicas para el desarrollo de esta investigación.

Esta tesis fue apoyada por el fondo de becas para maestría Manizales mas Innovadora.

A todas las personas que en algún momento me prestaron su atención y colaboración.

Resumen

Esta investigación se centró en la utilización del modelo WRF (Weather Research and Forecasting) en la simulación de la precipitación, para determinar su capacidad de representación y predicción de eventos de lluvia.

El modelo WRF se configuró con una serie de esquemas, cada uno con parámetros específicos, aprovechando la flexibilidad en las opciones de puesta a punto buscando el óptimo para las condiciones de la zona de estudio. También se tomaron como datos de referencia y comparación los registrados por 14 estaciones meteorológicas distribuidas por la zona urbana de la ciudad de Manizales. Para cada una de las simulaciones se escogieron periodos de tiempo que estuvieran enmarcados dentro de los ciclos climáticos globales que tienen influencia sobre las condiciones locales como son la Zona de Confluencia Intertropical y el fenómeno de El Niño – Oscilación del Sur. Los resultados obtenidos fueron confrontados a través de pruebas estadísticas como medidas de correlación, dispersión y sesgo. Otra técnica de comparación utilizada fue la de tablas de contingencia para variables categóricas.

Producto del trabajo de comparación se logró identificar los esquemas más adecuados para la representación y predicción a corto plazo de eventos de precipitación. Adicionalmente se deja la puerta abierta a trabajos que lleven a una implementación operativa del modelo como herramienta de apoyo en los procesos de alerta temprana y evaluación de escenarios climáticos futuros.

Palabras Clave: Modelos climáticos, Modelación de la precipitación, Parametrización, Modelos de área limitada (LAM), El Niño – Oscilación del Sur, Zona de Confluencia Intertropical, Desempeño de modelos climáticos, Mesoescala.

Abstract

PERFORMANCE OF THE WRF MODEL IN SIMULATING PRECIPITATION IN A MID-MOUNTAIN CITY: MANIZALES CASE STUDY.

This research focused on the use of the WRF (Weather Research and Forecasting) model in the simulation of precipitation, to determine its ability to represent and predict rainfall events.

The WRF model was configured with a series of schemes, each one with specific parameters, taking advantage of the flexibility in the set-up options, seeking the optimum for the conditions of the study area. Data recorded by 14 meteorological stations distributed throughout the urban area of the city of Manizales were also taken as reference and comparison data. For each of the simulations, time periods were chosen that were framed within the global climatic cycles that influence local conditions such as the Intertropical Confluence Zone and the El Niño-Southern Oscillation phenomenon. The results obtained were confronted through statistical tests such as measures of correlation, dispersion and bias. Another comparison technique used was that of contingency tables for categorical variables.

As a result of the comparison work, it was possible to identify the most suitable schemes for the representation and short-term prediction of precipitation events. Additionally, the door is left open to work that leads to an operational implementation of the model as a support tool in early warning processes and evaluation of future climate scenarios.

Keywords: Climate models, Precipitation modeling, Parameterization, Limited Area Models (LAM), El Niño – Southern Oscillation, Intertropical Confluence Zone, Climate model performance, Mesoscale.

Contenido

Pág.

Resumen ..... **IX**

Abstract ..... **X**

Lista de figuras ..... **XIII**

Lista de tablas ..... **XVI**

Lista de Abreviaturas ..... **XVII**

INTRODUCCIÓN **1**

1. CONTEXTO **4**
1.1 Antecedentes 4
1.2 Justificación 8
1.3 Objetivos 9
1.3.1 Objetivo general 9
1.3.2 Objetivos específicos 10
1.4 Alcance 10
1.5 Marco teórico 11
1.5.1 Modelación numérica 11
1.5.2 Modelos climáticos 13
1.5.3 Escalas de trabajo 16
1.5.3.1 Modelos globales 17
1.5.3.2 Modelos regionales o de área limitada 19
1.5.4 Anidamiento y Downscaling 20
1.5.5 Parametrización de procesos físicos 21
1.5.6 Modelo WRF (Weather Research and Forecasting model) 22
1.5.6.1 Parametrizaciones en WRF 24
1.5.7 La precipitación 28
1.5.7.1 Medición de la precipitación 29
1.5.7.2 Modelación de la precipitación 30

2. MATERIALES Y MÉTODOS **31**
2.1 Descripción del área de estudio 31
2.2 Definición de dominios y resolución de trabajo 33
2.3 Información hidroclimatológica 34
2.3.1 Ubicación de estaciones de control 35
2.3.2 Preprocesamiento de datos 35
2.4 Definición de periodos temporales para modelación 37
2.4.1 Descripción de los periodos temporales de modelación 38
2.4.1.1 Fase LA NIÑA - ENOS 38
2.4.1.2 Fase EL NIÑO - ENOS 40
2.4.1.3 Fase NORMAL - ENOS 42
2.5 Configuración del modelo WRF 45
2.5.1 Condiciones iniciales y de frontera 45
2.5.2 Parametrizaciones 46

2.5.3 Datos de salida 47
2.6 Análisis estadístico de series 50
2.7 Procesos para la evaluación del desempeño del modelo numérico frente a los datos observados 51
2.7.1 Comparación de series a través coeficientes de relación y eficacia 51
2.7.2 Comparación por tablas de contingencia 53

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS 57
3.1.1 Resultados de simulación fase de LA NIÑA 57
3.1.2 Análisis categórico 65
3.1.3 Resultados de simulación periodo fase de EL NIÑO 68
3.1.4 Análisis categórico 76
3.1.5 Resultados de simulación fase NORMAL 79
3.1.6 Análisis categórico 87
3.2 Análisis de la macroescala vs microescala 90

4. CONCLUSIONES 98

5. REFERENCIAS 102

Lista de figuras

Pág.

Figura 1. Ciclo del proceso de modelación. 11
Figura 2. Representación de un dominio computacional 12
Figura 3. Representación de una malla múltiple. 13
Figura 4. Esquema de un modelo climático. 14
Figura 5. Escalas meteorológicas según sus extensiones y duración. 16
Figura 6. Resultados de un modelo global en la representación de la temperatura del océano y la concentración de hielo marino. 17
Figura 7. Comparación entre un modelo global y un modelo de área limitada. 19
Figura 8. Procesos físicos que son parametrizados dentro de un modelo. 22
Figura 9. Componentes del modelo WRF. 24
Figura 10. Calles de la ciudad de Manizales en un día de lluvia. 31
Figura 11. Localización de la ciudad de Manizales, Caldas - Colombia. 32
Figura 12. Vista panorámica de la ciudad de Manizales. 32
Figura 13. Mapa que muestra la disposición de los dominios de trabajo. 34
Figura 14. Mapa de ubicación de las estaciones de control. 35
Figura 15. Series de precipitación para el periodo de estudio. Fase La Niña - ENOS. ... 38
Figura 16. Series de Temperatura, Humedad Relativa, Velocidad del Viento y Presión Atmosférica en el periodo de estudio. Fase La Niña - ENOS. 39
Figura 17. Series de precipitación para el periodo de estudio. Fase El Niño - ENOS. 41
Figura 18. Series de Temperatura, Humedad Relativa, Velocidad del Viento y Presión Atmosférica en el periodo de estudio. Fase El Niño - ENOS. 41
Figura 19. Series de precipitación para el periodo de estudio. Fase Normal - ENOS. 43
Figura 20. Series de Temperatura, Humedad Relativa, Velocidad del Viento y Presión Atmosférica en el periodo de estudio. Fase Normal - ENOS. 44
Figura 21. Ejemplo de un Diagrama de Taylor. 53
Figura 22. Esquema para la elaboración de las tablas de contingencia. 54
Figura 23. Resumen de estadísticos básicos. Fase La Niña - ENOS. 57
Figura 24. Desempeño de las diferentes configuraciones para las estaciones de referencia. 58
Figura 25. Desempeño de la temperatura simulada para las estaciones de referencia. Fase La Niña – ENOS. 63

Figura 26. Desempeño de la Humedad Relativa para las estaciones de referencia. Fase La Niña - ENOS. 63
Figura 27. Desempeño de la Velocidad del Viento simulada para las estaciones de referencia. Fase La Niña - ENOS. 63
Figura 28. Desempeño de la Presión Atmosférica en las estaciones de referencia. 64
Figura 29. Resumen de estadísticos básicos. Fase El Niño - ENOS. 69
Figura 30. Desempeño de las diferentes configuraciones para las estaciones de referencia. 70
Figura 31. Desempeño de la temperatura simulada para las estaciones de referencia. Fase El Niño – ENOS. 74
Figura 32. Desempeño de la Humedad Relativa para las estaciones de referencia. Fase El Niño - ENOS. 74
Figura 33. Desempeño de la Velocidad del Viento simulada para las estaciones de referencia. Fase El Niño - ENOS. 74
Figura 34. Desempeño de la Presión Atmosférica en las estaciones de referencia. 75
Figura 35. Resumen de estadísticos básicos. Fase Normal - ENOS. 79
Figura 36. Desempeño de las diferentes configuraciones para las estaciones de referencia. 80
Figura 37. Desempeño de la temperatura simulada para las estaciones de referencia. Fase Normal – ENOS. 85
Figura 38. Desempeño de la Humedad Relativa para las estaciones de referencia. Fase Normal - ENOS. 85
Figura 39. Desempeño de la Velocidad del Viento simulada para las estaciones de referencia. Fase Normal - ENOS. 85
Figura 40. Desempeño de la Presión Atmosférica en las estaciones de referencia. 85
Figura 41. Comparación entre los datos de Precipitación. 90
Figura 42. Comparación entre los datos de Temperatura. 91
Figura 43. Comparación entre los datos de Presión Atmosférica. 91
Figura 44. Comparación entre los datos de Velocidad del Viento. 91
Figura 45. Comparación entre los datos de Precipitación. 92
Figura 46. Comparación entre los datos de Temperatura. 93
Figura 47. Comparación entre los datos de Presión Atmosférica. 93
Figura 48. Comparación entre los datos de Velocidad del Viento. 93
Figura 49. Comparación entre los datos de Precipitación. 94
Figura 50. Comparación entre los datos de Temperatura. 94
Figura 51. Comparación entre los datos de Presión Atmosférica. 95
Figura 52. Comparación entre los datos de Velocidad del Viento. 95
Figura 53. Comparación de datos de Precipitación en el Dominio Madre para las diferentes fases del ENOS. 96
Figura 54. Comparación de datos de Temperatura en el Dominio Madre para las diferentes fases del ENOS. 96
Figura 55. Comparación de datos de Presión Atmosférica en el Dominio Madre para las diferentes fases del ENOS. 96

Figura 56. Comparación de datos de Velocidad del Viento en el Dominio Madre para las diferentes fases del ENOS. 97

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Clasificación zonal basada en precipitación acumulada. 29
Tabla 2. Periodos de simulación. 37
Tabla 3. Características de los modelos globales usados en el desarrollo de este trabajo. 45
Tabla 4. Esquemas de configuración y juegos de parametrizaciones utilizados en el modelo. 46
Tabla 5. Codificación de los esquemas de configuración. 47
Tabla 6. Estadísticos Básicos 50
Tabla 7. Significado de los elementos en el esquema de elaboración de tablas de contingencia. 54
Tabla 8. Resultados para el indicador PC. Fase La Niña – ENOS. 65
Tabla 9. Resultados para el indicador H. Fase La Niña – ENOS. 66
Tabla 10. Resultados para el indicador FAR. Fase La Niña – ENOS. 67
Tabla 11. Resultados para el indicador CSI. Fase La Niña – ENOS. 68
Tabla 12. Resultados para el indicador PC. Fase El Niño – ENOS. 76
Tabla 13. Resultados para el indicador H. Fase El Niño – ENOS. 77
Tabla 14. Resultados para el indicador FAR. Fase El Niño – ENOS. 78
Tabla 15. Resultados para el indicador CSI. Fase El Niño – ENOS. 78
Tabla 16. Resultados para el indicador PC. Fase Normal – ENOS. 87
Tabla 17. Resultados para el indicador H. Fase Normal – ENOS. 88
Tabla 18. Resultados para el indicador FAR. Fase Normal – ENOS. 89
Tabla 19. Resultados para el indicador TS. Fase Normal – ENOS. 89

Lista de Abreviaturas

Abreviatura	Término
AFWA	Association of Fish and Wildlife Agencies
AR	Modelo autorregresivo de primer orden
ARIMA	Modelo integrado de medias móviles
ARMA	Modelo estacionario autorregresivo de medias móviles
CDIAC	Centro de Indicadores Ambientales de Caldas
CFRS	Climate Forecast Reanalysis System
CFS	Climate Forecast System
CHEC	Central Hidroelectrica de Caldas
EDP	Ecuaciones en derivadas parciales
EMAS	Empresa Metropolitana de Aseo
ENOS	El Niño – Oscilación del Sur
FAA	Federal Aviation Administration
FSL	Forecast Systems Laboratory
GCM	Global Circulation Model
GDAS	Global Data Assimilation System
GFS	Global Forecast System
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IDV	Integrated Data Viewer
LAM	Limited Area Model
MM5	Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NCL	NCAR Command Language
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PM10	Particulas suspendidas en el aire de menos de 10 mm
PNT	Predicción Numérica del Tiempo
PSU	Penn State University
RAMS	Colorado State University Regional Atmospheric Modelling System
RRTM	Rapid Radiative Transfer Model
SGC	Servicio Geológico Colombiano

Abreviatura	Término
SIMAC	Sistema de Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas
UNAL	Universidad Nacional de Colombia
USGS	U.S. Geological Survey
WRF	Weather Research and Forecasting
ZCIT	Zona de Confluencia Intertropical

INTRODUCCIÓN

> *Los modelos atmosféricos integrales se encuentran entre los logros más importantes de la meteorología en el siglo XX. Estos modelos se perfeccionan y amplían constantemente, y cada vez son más sofisticados y exhaustivos. Los modelos, ahora denominados "modelos del sistema terrestre", se aplican a la predicción meteorológica y también al estudio de la variabilidad climática y del impacto de la humanidad sobre el clima* (Lynch, 2010).

En el marco del proyecto de "Caracterización, identificación y modelamiento matemático de variables climáticas en la ciudad de manizales y parque nacional natural de los nevados mediante técnicas de minería de datos e inteligencia artificial" se inicia un estudio sobre la implementación de un modelo climático numérico de base computacional para la simulación de la dinámica de dispersión de contaminantes en el aire, con foco en el territorio urbano de la ciudad de Manizales. Es en este escenario, que se propone la ampliación del uso de este tipo de modelos en la simulación de variables relacionadas con el clima y que son fundamentales en la comprensión de este como lo son: la precipitación, la temperatura, la humedad relativa, las relacionadas con el movimiento del viento, la capa de mezcla, entre otras.

Es en otro proyecto denominado "Análisis de fenómenos macroclimáticos y su incidencia en la variabilidad climática de una ciudad de media montaña andina a través de simulación numérica: caso de estudio manizales", en el que se define el alcance de esta investigación centrándose en la simulación de la precipitación como variable principal para determinar las capacidades de representación y predicción de eventos de lluvia de un modelo climático computacional.

Las herramientas de modelización y predicción climática son especialmente valoradas en entornos o zonas donde las variables meteorológicas son determinantes en el desarrollo de escenarios de amenaza natural para las comunidades. Muchas ciudades andinas, en

particular la ciudad de Manizales, como caso de estudio, han desarrollado su estructura urbana en las zonas montañosas donde las condiciones topográficas están caracterizadas por las altas pendientes, con una conformación proclive a eventos de deslizamiento. Según Ercole, Hardy & Metzger (2009) las ciudades de los países andinos que se encuentran ubicadas sobre las montañas desafían cada día un gran número de riesgos que se van incrementado, ya que se enfrentan a una urbanización mal controlada en un contexto geodinámico y climático desfavorable. La ciudad de Manizales presenta tasas de precipitación muy significativas (en promedio, el 70% de los días del año llueve), ya que se encuentra en la Zona de Confluencia Intertropical, ZCIT" (Pachón G., 2011). Por tanto, la combinación de estos factores incrementan los procesos de desestabilización de laderas con manifestaciones como desprendimientos de las capas superficiales de terreno, avalanchas o fenómenos asociados a cauces como inundaciones, afectando la población y la infraestructura (Vélez U. et al., 2012).

Es en este contexto, en el que se han venido desarrollando esfuerzos para lograr la mejor comprensión del clima de la región, ofreciendo variadas metodologías de observación, simulación y predicción. Un tema muy relevante que se ha investigado es el de variabilidad climática, entendida como los cambios que tiene el clima a nivel regional por incidencia de factores externos derivados de su dinámica a nivel global (véase los trabajos de: Felipe & Montoya, 2016; IDEAM - UNAL, 2018; Ogallo et al., 2008; Turbay et al., 2014; Universidad de Chile, 2006; Yepes, 2012)

Por otro lado, el desarrollo en la computación y su gran accesibilidad, aunado a los esfuerzo en el estudio de la dinámica y la física de la atmosfera y su implementación en los modelos climáticos, mejoraron significativamente su resolución y por tanto, su capacidad predictiva (Garuma, 2018). Esta situación, sirve de insumo a nuevas investigaciones, ya que ante la complejidad del problema, una observación del comportamiento de las variables en un entorno controlado, permite incrementar la comprensión de las condiciones locales. La asequibilidad de las simulaciones climáticas de alta resolución, con representaciones de la superficie terrestre heterogéneas pero realistas que pueden reproducir las interacciones de esta con la atmosfera con relativa precisión, crea una oportunidad para recrear entornos como los de las ciudades andinas, mejorando las condiciones en la predicción del clima y los procesos climáticos relacionados

en temas como la calidad del aire, la contaminación y el impacto del cambio climático (Garuma, 2018).

Este trabajo es un paso inicial en la implementación de un modelo numérico de investigación y predicción del tiempo en una ciudad de media montaña como Manizales, a través de una evaluación de su desempeño empleando diferentes tipos de configuración y datos de entrada. Actualmente, este tipo de modelos se utilizan en el contexto nacional con escalas espaciales con un tamaño de celda mínimo de 25 x 25 km y temporales con un intervalo de entrega de resultados de mínimo 6 horas, que pueden ser demasiado grandes, lo que limita la descripción de la meteorología a escalas regionales o locales. La construcción de escenarios enfocados a escalas de mayor resolución genera gran interés, ya que permite la incorporación de características climáticas particulares a zonas concretas como las ciudades, con variables relacionadas como la topografía, la ubicación geoespacial, los usos del suelo entre otras.

Este documento está organizado en 4 capítulos iniciando por un contexto donde se muestra unos antecedentes, la justificación del trabajo seguido por sus objetivos, definiendo su alcance y su marco teórico. En el capítulo 2 se muestran los materiales y métodos, haciendo una descripción del área de estudio, la fuente de los datos y su procesamiento, culminando con la descripción del modelo utilizado y su configuración. En el capítulo 3, se muestran los resultados y un análisis a detalle de estos. El documento concluye con un cuarto capítulo reservado para las conclusiones y recomendaciones.

1. CONTEXTO

1.1 Antecedentes

La implementación de computadores en la investigación y predicción meteorológica ha supuesto una verdadera revolución en esta ciencia, demostrando su valor y validez en la comprensión de los cambios del tiempo y el clima, que en sus casos más extremos, supone la protección de muchas vidas y la salvaguarda de los bienes materiales.

Los modelos meteorológicos de base computacional suponen la integración de diferentes componentes que inciden en los fenómenos atmosféricos como: la actividad solar, la radiación terrestre, la convección y la turbulencia a pequeña escala (Lynch, 2010). Estos modelos fueron desarrollados a principios del siglo XX, pero su implementación no tomo popularidad en el mundo académico, sino hasta que se logró un mayor desarrollo en los computadores. La preparación y programación de estos modelos se ha apoyado en los constantes avances en el análisis numérico que permite el diseño de algoritmos cada vez más estables (Lynch, 2010), logrando la implementación de cálculos cada vez más complejos derivados de la teoría de los sistemas dinámicos, la mecánica de fluidos y la resolución de ecuaciones diferenciales parciales.

Actualmente se encuentran en construcción o desarrollo variados modelos numéricos de evaluación y pronóstico de variables atmosféricas o del tiempo (predicción numérica del tiempo PNT), dentro de los cuales se puede mencionar:

> PSU/NCAR MM5 (Modelo Mesoescalar de Quinta Generación de la Universidad Estatal de Penn y el Centro de Investigación Atmosférica de los Estados Unidos): Es un modelo diseñado para simular o predecir los efectos de la circulación atmosférica en frentes de 2 a 2000 km (Nivel de Mesoescala).

WRF (Weather Research and Forecasting Model): Es un modelo desarrollado por múltiples instituciones de Estados Unidos con colaboración de los usuarios ya que su código es abierto. Fue diseñado como un modelo de siguiente generación para la investigación de la atmosfera y la predicción operativa.

GFS (Global Forecast System), el modelo RAMS (Colorado State University Regional Atmospheric Modelling System), entre otros.

Todos los modelos numéricos para la evaluación y predicción de las condiciones atmosféricas parten de datos obtenidos en radiosondeos, satélites meteorológicos, instrumentos y observaciones en superficie o datos de otros modelos los cuales son base para realizar los diferentes cálculos. Cada modelo lleva implementado un paquete de parametrizaciones que permiten evaluar procesos específicos, como la formación de nubes o la radiación solar lo que permite la delimitación de las características de una zona en particular.

Es fundamental para la preparación y programación de los diferentes modelos, entender la atmósfera como un sistema dinámico, que se describe a través de ecuaciones diferenciales parciales y la teoría de la mecánica de fluidos. También se debe tener en cuenta la naturaleza caótica en el comportamiento de la atmósfera, es decir, todo aquellos procesos en los qué pequeños cambios en las condiciones iniciales, representan grandes diferencias en las respuestas futuras.

El modelo WRF ha sido ampliamente utilizado en investigaciones con diversos objetivos como la comprensión en la dinámica de una variable climática en particular, entender la distribución de sustancias que pueden alterar la calidad del aire de una ciudad, hasta la comprobación de nuevas expresiones matemáticas que permitan explicar con ayuda de la modelación fenómenos asociados al clima. En este sentido, se encuentra que muchas de estas investigaciones se centran en áreas limitadas, de allí el concepto de Modelos de Área Limitada (LAM por sus siglas en inglés, Limited Area Model), ya que el interés actual es la construcción de modelos y escenarios enfocados en las regiones, permitiendo la incorporación de sus características particulares como lo es su clima característico, la topografía, la ubicación geoespacial, los usos del suelo, entre otras.

A nivel internacional se puede observar el esfuerzo que hacen diversas agencias para la entrega de productos asociados al estudio y pronóstico del clima. De acuerdo a Klemp (2006), existen numerosas aplicaciones de este modelo en Estados Unidos, para la predicción de huracanes o mejorar la resolución en la entrega de resultados; también indica que centros operativos de Corea del Sur, India, Israel, Taiwán y Grecia están implementando nuevos sistemas de pronóstico basados en el modelo WRF.

En Europa, España es uno de los países que ha implementado el WRF con buenos resultados. Una de las aplicaciones más importantes que se le ha dado al WRF es el acoplamiento con modelos de la calidad del aire, en estos casos, el modelo climático permite obtener las condiciones iniciales de variables como temperatura, velocidad, dirección del viento y una capa de la atmosfera conocida como capa límite, que es donde se registran las interacciones químicas que afectan la calidad del aire.

En su trabajo, García Díez (2010) evalúa la sensibilidad de un modelo de tipo regional al uso de diferentes esquemas de capa límite e información superficial en un dominio que cubre toda Europa. En este trabajo se simulan tres meses: octubre, noviembre y diciembre de 2001, esto con el fin de abarcar diferentes regímenes meteorológicos. Se llevaron a cabo 3 casos de estudio: Un caso de capa límite convectiva en el desierto de Argelia, un caso de fuerte advección marítima inestable en Santander, y otro de fuerte inversión térmica en Zaragoza, durante la ola de frío de diciembre. A causa de la falta de datos, el trabajo se centra más en la comparación de las simulaciones entre sí, que en validar con observaciones (García Díez, 2010).

También se encuentra el trabajo de Argüeso et al.(2011) enfocado en la evaluación de los resultados del WRF, variando la configuración de los esquemas de parametrización de cúmulos, microfísica y capa límite planetaria sobre una región con complejidad en su topografía como es la región de Andalucía. Se encontró que las configuraciones de capa límite y cúmulos son las que más influyen en la representación de la precipitación y que el modelo WRF, produce un valor agregado en la información utilizada en estudios climáticos.

En referencia a la región de Sudamérica y el Caribe, se han realizado variados esfuerzos en la implementación del modelo WRF, como modelo base para la predicción del estado del tiempo. En general, los países centroamericanos se han comprometido en la búsqueda

de una configuración adecuada del modelo que les permita evaluar las condiciones de las diferentes variables climáticas, con un alto grado de certeza en sus resultados. Así Suastegui et al. (2013) relaciona que el trabajo desarrollado con el modelo WRF permite satisfacer las necesidades de información de pronósticos del tiempo de las regiones agrícolas de México y mitigar los impactos de estos eventos adversos o de desastre.

En el contexto del Caribe, Cuba se presenta como una región azolada constantemente por los embates de la naturaleza materializados en tormentas tropicales y en su versión más agresiva, los huracanes. Los incrementos en la precipitación y la velocidad del viento entre otros, son características de la meteorología asociadas a estos fenómenos, el trabajo de Moya & Ortega (2015) se centra en la capacidad de pronóstico que tiene el modelo WRF de un período lluvioso registrado sobre la isla, concluyendo que el modelo subestima la cantidad de precipitación registrada, pero es efectivo en la detección de los eventos de lluvia lo que es de utilidad para el desarrollo de sistemas de pronóstico.

En el caso sudamericano Ruiz et al, (2010) han probado el modelo WRF en dos regiones de Sudamérica como son el sur de Brasil y el norte de Argentina, con diferentes configuraciones para identificar las mejores estimaciones de las variables que se registran en la superficie. En este caso, fueron utilizados los datos del Sistema de Asimilación de Datos Globales (GDAS) del Centro Nacional para Predicción Ambiental (NCEP por sus siglas en inglés, National Centers for Environmental Prediction), como datos de entrada y se han examinado errores sistemáticos, no sistemáticos y totales para pronósticos de 48 horas.

Otro ejemplo de uso del modelo WRF en escenarios regionales se encuentra en el trabajo de Saavedra Murrugarra, (2016) donde se hace una caracterización climática de variables meteorológicas, centrando su estudio en el valle de Cajamarca (Región de Cajamarca, Perú), encontrando buenos resultados al comparar los datos del modelo y datos recogidos en superficie, para los meses de marzo y agosto. Se encontró un buen desempeño en reproducción del ciclo diario de temperaturas y la circulación local del viento en el día. También encuentra algunas estimaciones erróneas en temperaturas y magnitud de la precipitación en las partes más elevadas del terreno en estudio.

Para el caso Colombiano, el IDEAM ha implementado el modelo para hacer más robusta la capacidad de pronóstico del estado del tiempo en el territorio nacional. En el trabajo de Ruiz et al., (2013) se muestra una verificación del desempeño que tiene el modelo a nivel nacional, encontrando que no hay mucha variación en los estadísticos entre los días de pronóstico y los modelos corridos. También se pudo establecer que el comportamiento del modelo al pronosticar las lluvias no es homogéneo en el territorio. Esta misma característica se traslada a otra variable como la temperatura, donde el desempeño del modelo muestra diferencias significativas entre ciudades.

El WRF en Colombia, también se ha utilizado para investigar fenómenos atmosféricos a nivel regional, como el trabajo de Arango & Ruiz, (2011) que centra sus esfuerzos en validar el WRF para la Sabana de Bogotá, empleando para ello diferentes fuentes de información topográfica y de usos de suelo, llegando a una conclusión general donde el modelo subestima la magnitud en los valores de las dos variables estudiadas, como son la precipitación y la temperatura.

Además de comprobar su efectividad en el pronóstico, el modelo ha sido utilizado de forma regular en proyectos de investigación relacionados con los problemas de calidad del aire, una muestra de esto es el trabajo de Rincón de Hoyos (2012) que se centra en el análisis de resultados al acoplar un modelo meteorológico como el WRF y un modelo de dispersión de contaminantes como el Calpuff, obteniendo resultados prometedores en el pronóstico de zonas contaminadas, aunque con valores por fuera de rango en los niveles de concentración de parámetros de referencia como el PM10 (partículas de menos de 10 mm).

Lo anterior muestra como el modelo WRF es ampliamente usado a nivel mundial en diversos contextos, tanto para investigación de la meteorología y el clima de una región como aplicaciones con enfoques más ambientales como la calidad del aire, la propagación de contaminantes o el acompañamiento a los sistemas de producción agrícola.

1.2 Justificación

El desarrollo de este trabajo se centra en dar continuidad a los trabajos que sobre la meteorología de Manizales se han desarrollado por diferentes investigadores

pertenecientes al Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental y otros, además de explorar nuevas metodologías para la comprensión de la dinámica que presenta las diferentes variables meteorológicas y en particular la precipitación.

Los enfoques de esos trabajos han sido diversos, como los tradicionales modelos construidos a partir de la hidrología y la estadística, hasta los relacionados con el manejo de datos a través las metodologías por clusters, el Big Data, entre otros (véase los trabajos de: Cortés C., 2010; Hernandez L. et al., 2016; Ramírez C., 2017; Solórzano T., 2016). Este trabajo presenta un enfoque alternativo mediante la utilización de un modelo mesoescalar de última generación, con base física, para investigación de la meteorología y el clima como el WRF, ampliamente utilizado a nivel mundial en predicción e investigación.

Se propone una evaluación de la capacidad que tiene el modelo para simular la precipitación para diferentes períodos de tiempo y también validarlo por eventos. A nivel nacional, el IDEAM ha implementado el modelo WRF con una configuración apropiada para el estudio del clima en una escala espacial adecuada para el territorio nacional, pero que es muy amplia para dar respuestas a regiones específicas y más aún en resoluciones lo suficientemente altas que permitan la observación del clima a niveles locales.

Esta propuesta también sigue las tendencias actuales de investigación, que hacen evaluaciones de las condiciones meteorológicas con resoluciones cada vez más altas, ya que temas como el cambio climático y la gestión del riesgo imponen este tipo de metodologías, donde la información sea lo suficientemente cercana, para que los “tomadores de decisiones” puedan adoptar medidas, ya sea de mitigación o prevención de eventos de desastre para la población y la infraestructura presentes en determinada región.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el desempeño del modelo WRF en la simulación de la precipitación para la ciudad de Manizales, a través de análisis cuantitativos y cualitativos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar el comportamiento de variables medidas y registradas en superficie por la red de estaciones meteorológicas de la ciudad como son: la humedad relativa, la temperatura, la velocidad y dirección del viento, entre otras en eventos de lluvia particulares asociados a emergencias o con características especiales como: intensidad, magnitud, duración o distribución espacial.

- Determinar el comportamiento del modelo para diferentes zonas de la ciudad, evaluando diferentes variables meteorológicas pero dando especial atención a la precipitación.

- Determinar el grado de correlación entre condiciones meteorológicas y de precipitación global, frente a estas mismas a nivel local basado en los resultados simulados y validados en el modelo.

1.4 Alcance

Al utilizar una herramienta de modelación numérica, los alcances de este trabajo están limitados por la infraestructura computacional con que se ha contado para realizar las simulaciones y por el tiempo que estos procesos llevan. Al intervenir tantas variables dentro de la dinámica atmosférica y el pronóstico de lluvia, la metodología de trabajo ha tenido que ser delimitada en varios aspectos:

- Utilizar un solo modelo de elevación superficial (topografía) de baja resolución.
- Utilizar un solo modelo de usos del suelo.
- Evaluar el comportamiento del modelo desde el cambio de los esquemas de parametrización, sin cambiar configuraciones adicionales dentro él.
- Restringir las simulaciones a períodos cortos en un margen de 5 a 10 días.
- Comprobar el comportamiento del modelo aplicando las condiciones de frontera de solo dos modelos de circulación general.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Modelación numérica

La modelación es un proceso en el cual se hace una construcción simbólica o gráfica de un problema que se da en la realidad (Blum & Borromeo Ferri, 2009).

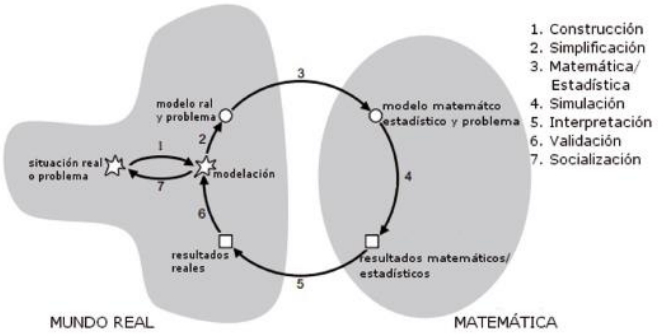


Figura 1. Ciclo del proceso de modelación.
Tomado de Blum & Borromeo Ferri, 2009

Existen muchos fenómenos que se modelan matemáticamente para entender su comportamiento. De los más estudiados a través de este método son los que están relacionados con la mecánica y dinámica de fluidos. En este caso las metodologías de análisis y diseño se basan en la experimentación o el cálculo matemático. Es así, que en experimentación se construyen modelos físicos que son probados en instalaciones con ambientes controlados, mientras que el cálculo matemático emplea ecuaciones diferenciales de forma analítica o computacional para acercarse a la solución del problema (Çengel & Cimbala, 2006).

Según (Çengel & Cimbala, 2006) el proceso de modelación computacional, conlleva una serie de pasos:

a) Se elige un dominio computacional que corresponde a la imagen virtual del área de estudio real que se pretende estudiar (la superficie de un material, la sección de un rio, la superficie de una ciudad). Sobre este dominio, se genera una malla (conocida como red de nodos), lo que genera una serie de elementos discretos llamados celdas. Cuando el dominio es de dos dimensiones (2D) las celdas son áreas, mientras en dominios de tres dimensiones (3D), las celdas son volúmenes. Cada celda se convierte en un elemento de control, donde se pueden resolver de forma independiente las ecuaciones de conservación y de transporte. En la Figura 2, se

muestra las representaciones de: (a) el dominio de una región bidimensional y (b) el dominio de una región tridimensional.

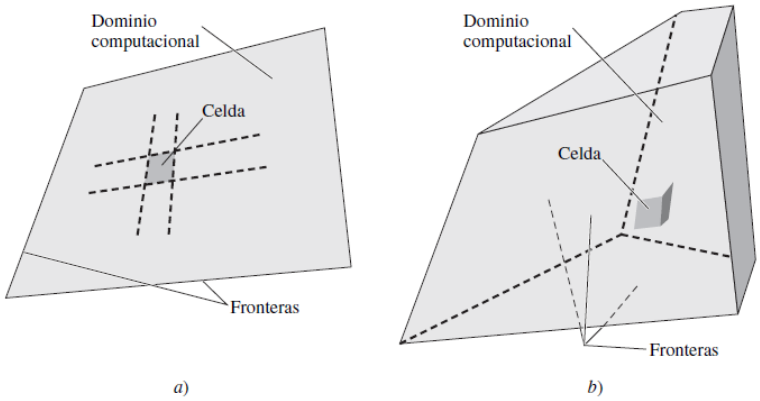


Figura 2. Representación de un dominio computacional
Tomado de Çengel & Cimbala, 2006

b) Se especifican unas condiciones de frontera para cada dominio: en los lados de la superficie en el caso bidimensional (2D) y en las caras del volumen en el caso tridimensional (3D).
c) Se especifica las condiciones del fluido que se va a simular con todas sus propiedades (densidad, temperatura, viscosidad, entre otros).
d) Se seleccionan los parámetros numéricos y los algoritmos de solución. Dependiendo del fenómeno simulado, algunos parámetros son generados a través de expresiones experimentales de tipo determinista que acompañan a algunos paquetes de software.
e) Se especifican los valores iniciales de aproximación a la solución para cada celda. Algunos de estos valores pueden ser imprecisos pero deben incluirse para que el proceso de cálculo iterativo pueda ejecutarse. Cuando se estudian flujos no estacionarios, como los relacionados con la dinámica atmosférica, los modelos requieren de un tiempo de simulación conocido como “spin-up” que les permite a las variables calculadas alcanzar el equilibrio físico y generar su propia variabilidad interna independiente de los valores iniciales.
f) Se procede a tabular y graficar los resultados finales a través de una operación llamada posprocesamiento de datos, esto se hace cuando se da convergencia en los resultados ya sea logrando un acercamiento a un valor de error establecido o culminando una serie limitada de iteraciones. Generalmente el posproceso implica

la conversión de los datos en gráficos lineales, la elaboración de mapas, la búsqueda de relaciones algebraicas entre diferentes campos del flujo, entre otras actividades.

De otro lado, los modelos numéricos requieren el empleo de grandes recursos computacionales, por este motivo se emplean algunos “trucos” para reducir el tiempo de cálculo como la malla múltiple, en la que las variables de campo de flujo se calculan primero en una malla de celdas amplias con la finalidad de establecer con rapidez las características aproximadas del flujo. Esa solución se interpola después a mallas cada vez más finas. La malla final es la que especifica el usuario (Figura 3).

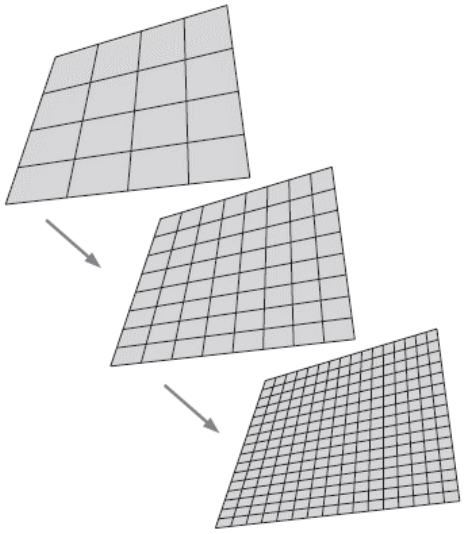


Figura 3. Representación de una malla múltiple.
Tomado de Çengel & Cimbala, 2006

1.5.2 Modelos climáticos

Hacia finales del siglo XIX, el meteorólogo Cleveland Abbe ya reconocía que la meteorología y el estudio de la atmosfera era la aplicación de campos de la física de fluidos como la hidrodinámica y termodinámica (Lynch, 2010). La atmosfera se compone por una serie de gases como son el nitrógeno, el oxígeno, el vapor de agua, el dióxido de carbono, etc., esto la convierte en un fluido complejo y heterogéneo, de allí que para resolver el problema de su evolución en el tiempo es necesario la utilización de ecuaciones fundamentales de dinámica de fluidos. Dichas ecuaciones son conocidas como ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (EDP) que no poseen solución exacta o analítica y deben resolverse bajo métodos aproximados. Con el desarrollo de los métodos numéricos

y el avance en computación, la modelación de la dinámica atmosférica fue posible logrando acoplar los diferentes componentes que afectan el comportamiento del clima. Muchos trabajos estuvieron pensados en darle un sentido matemático a los diferentes procesos atmosféricos como la influencia de la temperatura, la interacción de elementos como superficie del suelo o del agua en las grandes extensiones continentales u oceánicas, el efecto de los seres vivos, entre otros, lo cual se convierte en un desafío en la elaboración de algoritmos estables y eficaces. En la Figura 4 se muestra un esquema de los componentes de un modelo climático, desde la configuración de las malla de cálculo hasta los procesos modelados.

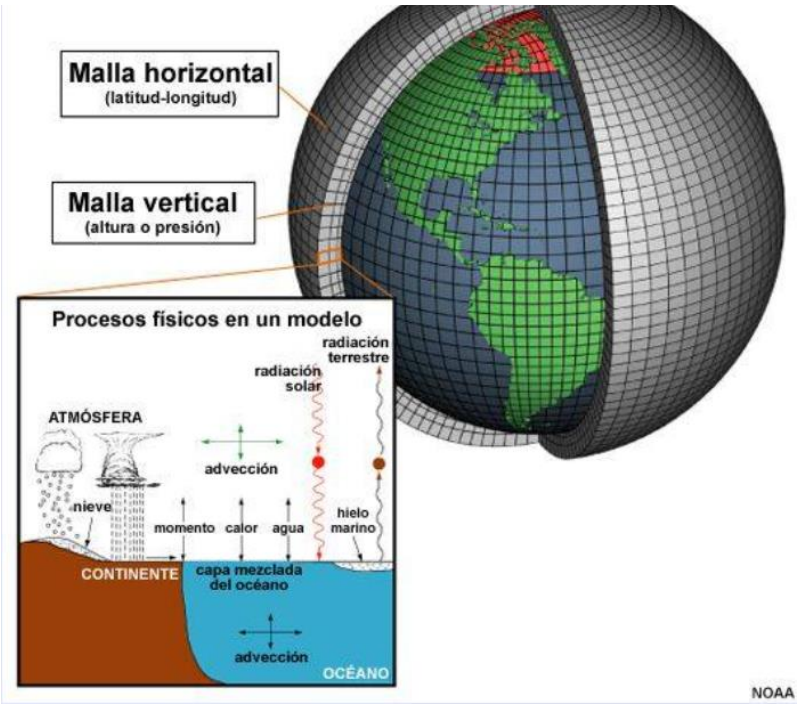


Figura 4. Esquema de un modelo climático.
Tomada de AEMET, 2018b

Los modelos climáticos han tenido una gran evolución desde principios del siglo XX, pero su implementación no tomo popularidad, sino hasta el instante que tuvo un mayor desarrollo el mundo de los computadores como se dijo antes. El desarrollo de nuevos componentes de hardware y de software, fueron necesarios para lograr un verdadero avance en los cálculos y la resolución de las EDP, manteniendo la estabilidad del sistema y logrando resultados confiables.

En los modelos atmosféricos se resuelven básicamente cuatro ecuaciones relacionadas con leyes fundamentales y una adicional relacionada con la mezcla de vapor de agua, a saber:

- Conservación de momento lineal:

$$\frac{d\mathrm{v}}{dt} = -\alpha\nabla p - 2\Omega \times \mathrm{v} - \nabla\phi + F \tag{1}$$

- Conservación de la masa:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho\mathrm{v}) \tag{2}$$

- Estado de los gases:

$$p\alpha = RT \tag{3}$$

- Conservación de energía:

$$\partial Q = C_p\frac{dT}{dt} - \alpha\frac{dp}{dt} \tag{4}$$

- Conservación vapor de H_2O:

$$\frac{\partial pq}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho\mathrm{v}q) + \rho(E - C) \tag{5}$$

Donde $\mathrm{v} = (u, v, w)$ denota el campo de velocidades, T la temperatura, p es la presión, ρ es la densidad del aire, α el volumen específico, inverso de la densidad, y q es la proporción en masa de vapor de agua en una parcela de aire, $\nabla\varphi$ es un término relacionado a la gravedad aparente que está en función de las variables del sistema y la fuerza de gravedad. Se encuentra dentro del grupo de expresiones cantidades constantes como: R la constante del aire seco, C_p el coeficiente de calor específico a presión constante y Ω que representa la velocidad angular; δQ es la tasa de calor por unidad de masa aplicada a una parcela de aire, E es la evaporación, C es la condensación y F es la fuerza de rozamiento (Sordo, 2006).

Como se dijo anteriormente, la simulación de la atmósfera implica un problema de valores iniciales y su evolución es controlada por comportamientos propios de sistemas caóticos, por tanto, la calidad de los resultados y las predicciones es limitada (Calvo Sánchez, 2018). La principal recomendación después de obtener resultados de un modelo de este tipo es

su interpretación por parte de predictores o investigadores calificados que conozcan sus características y limitaciones. Adicionalmente, el uso de técnicas estadísticas para la corrección de errores y el uso de métodos que permitan estimar la capacidad de predicción o predictibilidad de la atmosfera (Calvo Sánchez, 2018), son actividades fundamentales para un aprovechamiento completo de estas herramientas.

1.5.3 Escalas de trabajo

Los resultados de los modelos climáticos son valorados según la resolución espacial y temporal para la cual están aplicados, ya que los efectos de los fenómenos derivados de la dinámica atmosférica pueden ser observados obedeciendo a estas dos variables. Dependiendo de la escala, hay fenómenos como las fluctuaciones en grandes sistemas de presión que se pueden desarrollar en espacios de miles de kilómetros y con períodos de desarrollo de semanas y fenómenos turbulentos de microescala con desarrollos de unos pocos metros en períodos de minutos (Sordo, 2006). En la Figura 5 se muestra como varía los campos de observación y los tipos de fenómenos asociados a cada uno.

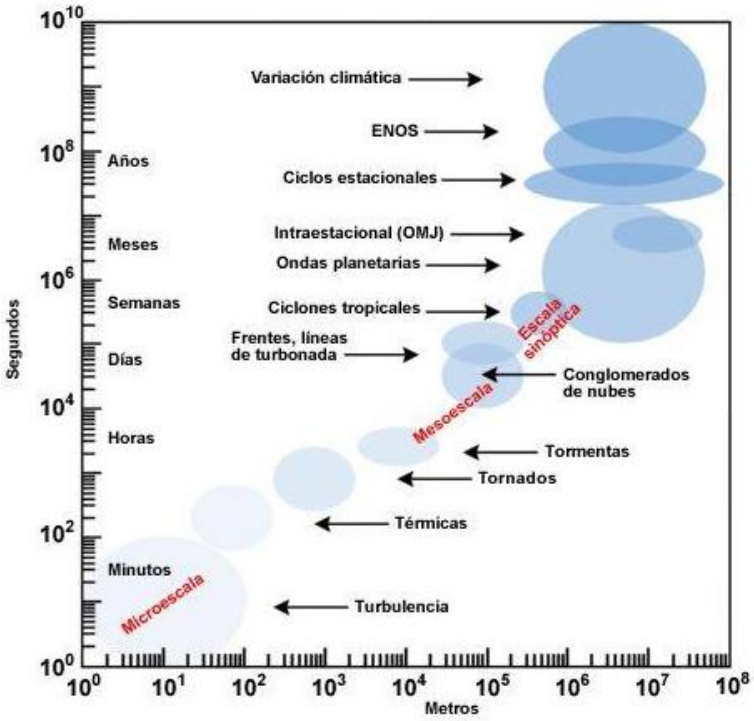


Figura 5. Escalas meteorológicas según sus extensiones y duración.
Tomada de AEMET, 2018a

De acuerdo a lo anterior, el acercamiento a los fenómenos atmosféricos se hace a través de dos grupos de modelos atmosféricos: Los modelos globales y los modelos regionales.

1.5.3.1 Modelos globales

Los modelos globales están diseñados para incluir la atmosfera de todo el planeta. Sus esquemas de mallado se hacen con referencia a coordenadas esféricas. Su resolución espacial es muy escasa, por tanto se utiliza una aproximación hidroestática de la atmósfera capturando su dinámica solo a nivel sinóptico. Usualmente los modelos atmosféricos globales son acoplados con modelos oceánicos, para tener en cuenta los cambios de temperatura en el agua. Características como la orografía, los usos del suelo, entre otras se simulan de forma grosera o se parametrizan, por tanto, solo se puede observar grandes rasgos de estas características a nivel planetario dentro de los mapas resultado de cada simulación. En la Figura 6 se puede observar un ejemplo de salida de un modelo global, en este caso de la modelación de los cambios de la temperatura del mar y la concentración de hielo marino.

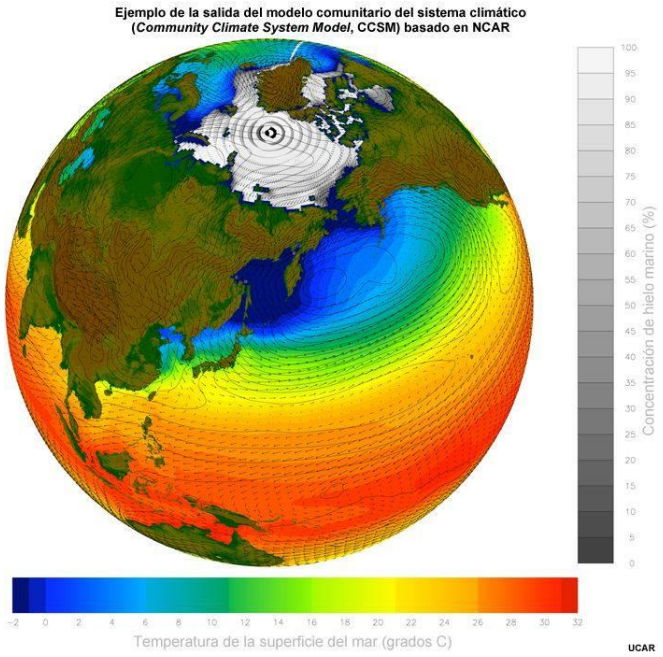


Figura 6. Resultados de un modelo global en la representación de la temperatura del océano y la concentración de hielo marino.
Tomada de AEMET, 2018c

Fue Smagorinsky (1963) quién mostró por primera vez los resultados de integrar en todo el planeta un sistema de ecuaciones derivado de la dinámica de fluidos. Este podría

considerarse el primer Modelo de Circulación Global (Global Circulation Model, GCM) (García-Díez, 2014).

En la actualidad, las versiones operativas de algunos modelos pueden llegar hasta 9 km de resolución horizontal (Calvo Sánchez, 2018); generalmente son desarrollados e implementados por grandes centros de meteorología ya que se requiere de una gran infraestructura computacional para la demanda de cálculo requerido y extensas bases de datos con observaciones globales. Dentro de este tipo de modelos encontramos el denominado GFS (Global Forecast System) y el denominado CFS (Climate Forecast System) en su versión de reanálisis, que son los modelos utilizados en este trabajo para establecer las condiciones iniciales del modelo mesoescalar WRF. Algunas características de estos modelos son las siguientes:

- **GFS (Global Forecast System).**
  Es un modelo desarrollado por los Centros Nacionales para la Predicción Ambiental (NCEP) por sus siglas en ingles. El modelo GFS acopla 4 componentes: un modelo atmosférico, un modelo oceánico, un modelo suelo/subsuelo y un modelo de hielo marino. Tiene una cobertura a nivel global, con una resolución horizontal de 18 millas (28 kilómetros aproximadamente), entre puntos de grilla y se utiliza en análisis operativos de hasta 16 días de predicción.

- **CFS (Climate Forecast System).**
  Al igual que el modelo GFS, el modelo CFS fue desarrollado por la NCEP. Es modelo de cubrimiento global que pretende representar la interacción entre océano, atmósfera y tierra. El CFS tiene la capacidad de generar datos cada hora con una resolución horizontal aproximada de 56 kilómetros. El modelo CFS, posee un enfoque adicional que es el de reanálisis (CFRS), donde se busca hacer un ajuste constante del modelo con observaciones en superficie, lo que permite que su sistema de predicción logre mejores resultados. Este modelo recibió una actualización conocida como CFSv2, donde se incluyen más variables de estudio y utiliza los datos del reanalisis como datos de comparación.

1.5.3.2 Modelos regionales o de área limitada

La resolución de un modelo se puede incrementar sin aumentar el coste computacional, aplicando una solución que considera la limitación de zonas geográficas a través de rejillas formuladas en coordenadas cartesianas (Sordo, 2006). Los modelos cuyo objetivo es cubrir un área limitada (Limited Area Models, LAM por sus siglas en ingles), se desarrollaron para superar las limitaciones en resolución que poseían los GCM's debido a las condiciones de los recursos computacionales. En la Figura 7 se puede observar una comparación entre las áreas abarcadas por un modelo global y un modelo de área limitada.

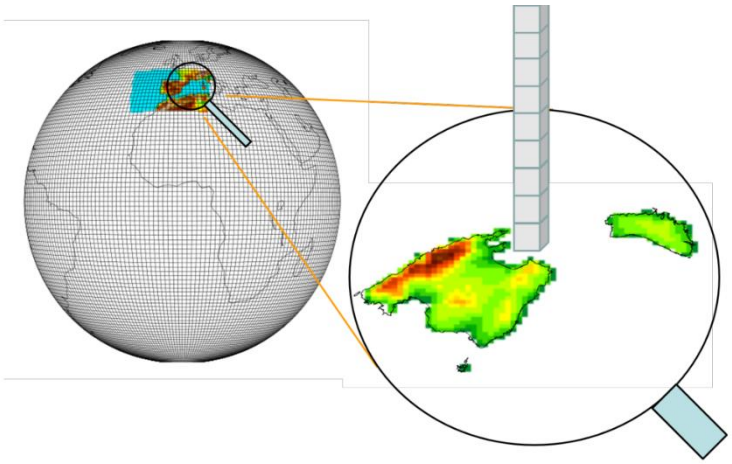


Figura 7. Comparación entre un modelo global y un modelo de área limitada.
Tomada de Calvo Sánchez, 2018.

Con los modelos regionales o LAM, se presenta un proceso de asimilación de datos a partir de observaciones de estaciones en superficie, datos de radar o datos de un modelo de baja resolución GCM, que permite establecer las condiciones iniciales para la resolución de las ecuaciones fundamentales sobre una región a un nivel más detallado. En este contexto, los modelos regionales cuando inician sus procesos de cálculo generando un forzamiento de las condiciones de frontera, asimilándolas y llevándolas hacia el dominio interno hasta lograr un equilibrio físico y a partir de allí construir una variabilidad que se pueda acercar a las condiciones de la región estudiada.

Para que esa variabilidad interna se haga consistente con las condiciones iniciales, muchos modelos implementan en la formulación de sus dominios o áreas de cálculo, zonas

de relajación que permiten solventar este problema. Otro problema en el arranque de la simulación con un LAM es el periodo de calentamiento o spin-up, ya que este permite conseguir ese equilibrio físico que mencionaba antes y no está del todo determinado porque depende del sistema modelado y de los resultados esperados. El modelo WRF, que se describe más adelante, es un ejemplo de modelo regional con importantes resultados en variadas investigaciones llevadas a cabo en diferentes zonas alrededor del mundo.

1.5.4 Anidamiento y Downscaling

El anidamiento es una técnica que consiste en tomar los datos de un modelo global como condiciones iniciales y de contorno y se integran a un modelo de área limitada, en este caso se dice que el modelo de área limitada esta anidado en el modelo global (Calvo Sánchez, 2018). El anidamiento también se puede realizar dentro de un mismo modelo regional o LAM, logrando la reducción de escala llevando dominios generales hacia zonas particulares que requieren un mayor detalle en sus resultados. Cuando se realiza e anidamiento, el modelo anidado realiza un proceso de asimilación y análisis a partir de las condiciones iniciales suministradas por el modelo de mayor escala ya sea el mismo LAM con menor resolución o un GCM (Calvo Sánchez, 2018).

Cuando se define el anidamiento de un modelo dentro de otro se procede a la implementación de las técnicas de downscaling. Es así, que cuando el modelo anidado toma de forma directa las condiciones iniciales del modelo de mayor escala sin establecer relaciones de tipo estadístico o relaciones causa-efecto entre ambos modelos, se habla de la utilización de un downscaling dinámico. En términos prácticos, el modelo anidado hace un inicio “en frío”, lo que significa que es importante saber de antemano cual es el modelo global que mejor se acomoda a las condiciones regionales que se pretenden simular.

De otra parte, cuando se utilizan relaciones estadísticas para inferir los efectos del clima global sobre el clima regional, sus variables y características, se habla de la utilización de un downscaling estadístico. En este método se utilizan técnicas de predicción del comportamiento futuro de una variable de tipo estocástico como los modelos autoregresivos AR, ARMA, ARIMA, entre otros (Sordo, 2006).

Cuando se hace downscaling dinámico algunos procesos atmosféricos no se pueden resolver de forma directa, es en este contexto que se utilizan parametrizaciones de procesos físico que son ajustadas a las características de las zonas de estudio. Al aplicar el mejoramiento de resolución se adicionan varias fuentes de incertidumbre a los resultados como puede ser la calidad de las valores iniciales o la elección correcta de parametrizaciones, lo que hace que esta técnica deba ser revisada constantemente y para algunos casos puede ser más óptimo decantarse por la segunda técnica de corte estadístico.

1.5.5 Parametrización de procesos físicos

Existen diversos procesos atmosféricos como la evaporación, la condensación o la transferencia de calor, que se vuelven importantes a nivel de mesosescala (del orden de las decenas de km), que no se pueden resolver fácilmente a través del sistema de grilla con que se discretiza el área de estudio para su resolución numérica. Para solventar este problema se suelen utilizar esquemas numéricos empíricos o semi-empíricos, que ayudan a calcular el aporte de estas variables sobre el sistema (Sordo, 2006).

Parametrizar es estimar los efectos de algunas variables que tienen lugar a pequeña escala y son relevantes dentro de la dinámica atmosférica a escalas más grandes como los mostrados en la Figura 8. A través de una reformulación empírica, se relaciona en cada punto de una grilla las variables y alguna constante con los procesos a pequeña escala (Sordo, 2006). Una de las dificultades que se da con esta técnica es que no se tiene certeza con la magnitud de la escala a la cual el proceso parametrizado es realmente importante y tiene un efecto relevante sobre los resultados finales. Hay procesos como la circulación de la brisa que no se modelan en resoluciones por encima de los 50 km, pero no se descartan totalmente, en estos casos el proceso de parametrización se vuelve dos veces más difícil (Sordo, 2006).

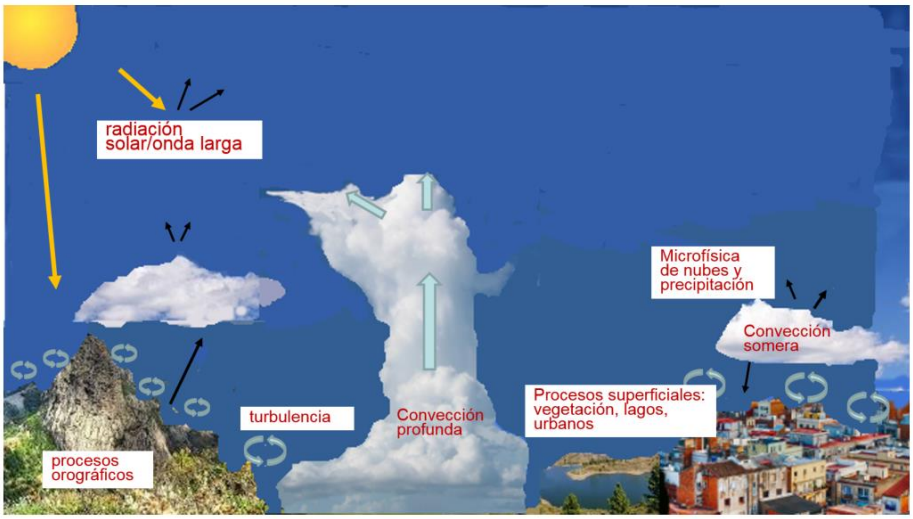


Figura 8. Procesos físicos que son parametrizados dentro de un modelo.
Tomada de Calvo Sánchez, 2018.

1.5.6 Modelo WRF (Weather Research and Forecasting model)

WRF (W. C. (NCAR/UCAR) Skamarock et al., 2008), es un modelo de predicción numérica del tiempo (PNT o NWP, por sus siglas en inglés). El modelo está diseñado para aplicaciones tanto investigativas como operativas, con múltiples opciones de configuración y de implementación. El modelo WRF, se ha convertido en una herramienta popular a nivel académico y práctico, sirviendo tanto a universidades como agencias meteorológicas en su trabajo diario.

Se ha desarrollado a partir del modelo MM5 (Modelo Mesoescalar de 5ta Generación). El trabajo en WRF comenzó en la última parte de la década de 1990 y ha sido un esfuerzo colaborativo impulsado por el Centro Nacional para la Investigación Atmosférica (NCAR), Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano (NOAA), Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP), Laboratorio de Sistemas de Predicción (FSL), Agencia para el Clima de la Fuerza Aérea (AFWA), Laboratorio de Investigación Naval, Universidad de Oklahoma y la Administración Federal de Aviación (FAA) (W. C. (NCAR/UCAR) Skamarock et al., 2008), todas instituciones de los Estados Unidos.

Algunas de las características más importantes del modelo son:

- Permite una la modelación en tres dimensiones (3D) con aproximación no hidrostática.

- Esta implementado en el lenguaje computacional Fortran 90, bajo una metodología modular
- Permite la reducción de escala e interacciones entre escalas regionales y microescalas.
- Contiene un gran número de parametrizaciones de procesos físicos disponibles
- Se puede hacer el cálculo de operaciones matemáticas en paralelo, es decir, utilizando múltiples núcleos de un procesador al mismo tiempo.
- Es de código abierto y cualquier miembro de la comunidad puede sugerir cambios o compartir nuevos módulos para mejorar las prestaciones.

Una simulación con el WRF consta de tres etapas fundamentales (Figura 9):

- Pre-proceso: el modelo contiene una modulo para la realización del preproceso denominada WPS (WRF Pre-Processing System). Este módulo contiene los programas geogrid, ungrib y metgrid, los cuales realizan diferentes funciones en la etapa inicial de modelación. Inicialmente, se carga la información geográfica, topográfica y de uso de suelos, que se procesa a través del programa geogrid.exe, este proceso determina la ubicación espacial definida por los dominios y el trazo del mallado de cálculo. Posteriormente se carga la información de las condiciones iniciales, derivada de los modelos climáticos de circulación global como el GFS o el CFS, que se procesa a través del programa ungrib.exe lo que permite una recodificación de la información a un formato compatible con el modelo WRF. Finalmente, se realiza un acople entre la información geográfica y la información de las condiciones iniciales a través del programa metgrid.exe, el cual posiciona los valores iniciales en cada celda dentro del mallado de los dominios de trabajo.

- Proceso de simulación: para esta etapa, el programa real.exe realiza un proceso de inicialización numérica del modelo, creando unos valores de integración iniciales. Después del proceso de inicialización o arranque, el programa wrf.exe se encarga de los procesos de cálculo continuo dentro de un intervalo dado y la construcción de resultados.

- Post-proceso: Los resultados que arroja el modelo WRF son de tipo bidimensional (variables con sus diferentes valores que son distribuidos en un mismo plano horizontal y paralelo a la superficie del terreno) y tridimensional (variables con sus

valores distribuidos a en dos planos uno horizontal y otro vertical). El análisis de resultados generados por WRF se hace a través de programas externos o lenguajes de programación diseñados para ello, ya que el modelo genera las salidas en formato netcdf, un formato autodescriptivo con uso generalizado en aplicaciones meteorológicas. Para este trabajo se han generado diversos scripts en los lenguajes de programación NCL (NCAR Command Languaje) y Python. Para la realización de mapas se ha escogido el programa IDV (Integrated Data Viewer).

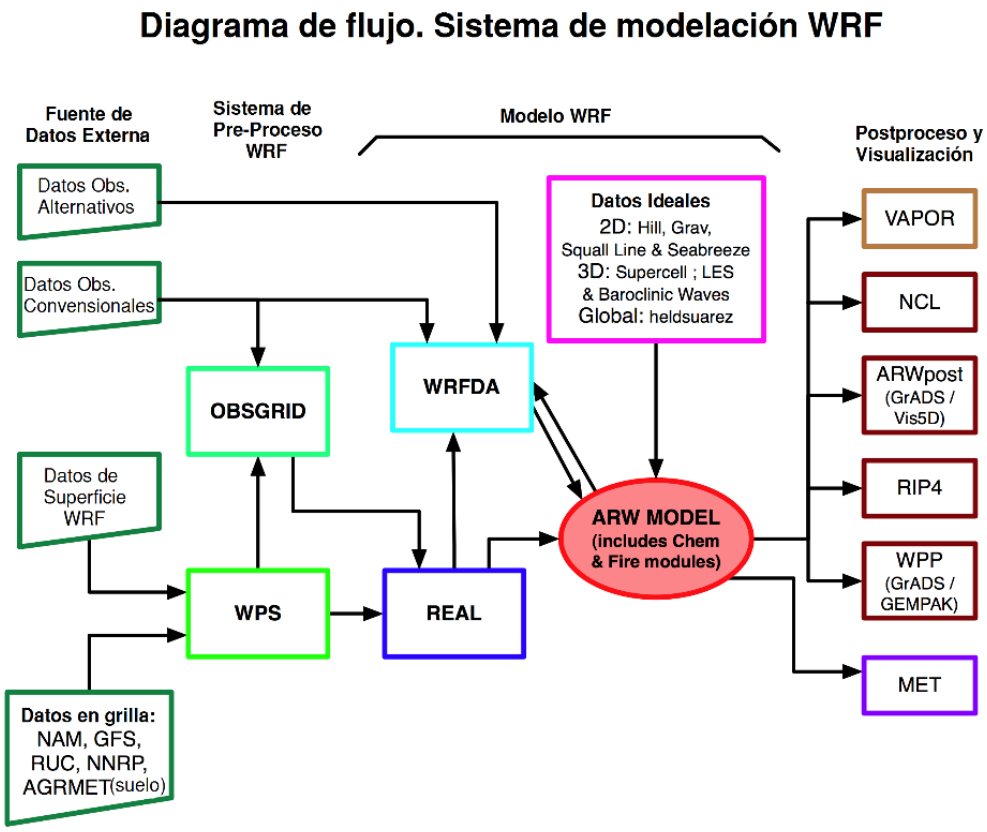


Figura 9. Componentes del modelo WRF.
Tomada de W. C. Skamarock et al., 2021

1.5.6.1 Parametrizaciones en WRF

Como se vio previamente, las parametrizaciones son formulaciones matemáticas que permiten establecer el estado de procesos físicos con escalas menores a la malla de trabajo. WRF tiene integrado dentro de su programación un número importante de parametrizaciones para diferentes procesos y de las cuales a continuación se hace una exposición somera centrada en las utilizadas dentro de este trabajo:

- **Superficie urbana:** Las diferentes formulaciones para este caso permiten simular las condiciones meteorológicas de las zonas urbanizadas, es decir, su influencia sobre variables como el flujo del viento, la temperatura, entre otras. Para este trabajo se ha utilizado exclusivamente el esquema UCM:
  - **Urban Canopy Model (UCM):** Para una cuadricula dada en WRF el UCM representa el comportamiento de procesos asociados al intercambio de calor, su flujo y la producción de vapor de agua en ambientes urbanos (M.Tewari et al., 2007)

- **Suelos:** En este caso las formulaciones representan las condiciones generales de la superficie terrestre: flujo de temperatura en el suelo, flujo de agua superficial y sub-superficial, entre otras. Para este trabajo se ha utilizado el esquema Noah-LSM, que se explica a continuación:
  - **Noah Land Surface Model (LSM):** Esta parametrización permite la representación de la física del suelo congelado o nevado, conductividad termal del suelo modificado por procesos de urbanización, albedo de la superficie del suelo dependiendo la época del año, etc. También puede estimar el estado de la humedad en el suelo urbanizado asumiendo que está conformado por cuatro capas a diferente profundidad (F. Chen, 2007).

- **Capa superficial:** Esta opción determina la interacción entre la superficie y la atmosfera. La elección adecuada de una formulación específica es esencial para lograr una evolución de la atmosfera ajustada a las condiciones reales. En este trabajo se ha utilizado el esquema MM5-MO:
  - **Revised MM5 Scheme:** Este esquema es una versión modificada del descrito por Chen y Dudhia (2000). El MM5 es un modelo de temperatura y humedad del suelo, que asume una conformación provista de 4 capas con dosel, humedad y cubierta de nieve. Incluye las zonas con raíces y otros efectos de la vegetación, el drenaje del agua sub-superficial y la escorrentía. Proporciona la representación de flujos de calor sensible y latente bajo esquemas de capa límite. En el MM5 modificado, se sustituyen las funciones de similitud propuestas por Fairall et al. (1996) y Cheng and Brutsaert (2005) para proporcionar al esquema un marco más apropiado para condiciones fuertemente estables o fuertemente inestables.

- **Microfísica:** La microfísica está encargada de simular las condiciones físicas de las partículas acuosas. La formación de agua en sus tres estados y las condiciones en que esto sucede es el trabajo de cálculo que realizan los esquemas dentro de esta opción. Se utilizaron principalmente dos esquemas para este trabajo que se explican a continuación:
  - **Purdue Lin Scheme:** En este esquema son incluidos seis clases de meteoros acuosos: vapor de agua, nube de agua, nube de hielo, lluvia, nieve y granizo.

  - **WRF Single–moment 6–class Scheme (WSM6):** El pronóstico de las variables referidas al agua en este esquema incluye el porcentaje de mezcla de vapor de agua, nube de agua, nube de hielo, nieve, lluvia y granizo.

- **Cúmulos:** La opción de cúmulos está encargada de representar la física de formación de las nubes y los procesos convectivos. Se han utilizado tres esquemas a saber:
  - **Kain-Fritsch Scheme (KF):** El esquema KF es una parametrización que representa el flujo de la masa de aire. Utiliza el método de parcela lagrangiana y se incluye la dinámica del momento vertical, para estimar si existe inestabilidad, si alguna inestabilidad existente estará disponible para el crecimiento de las nubes y cuáles son las propiedades de cualquier nube convectiva (Kain, 2004).
  - **Grell–Devenyi (GD) Ensemble Scheme:** Es un esquema sencillo que se basa en una parametrización convectiva desarrollada por Grell (1993). Esta parametrización es usada para determinar las propiedades de las nubes, describiendo la modulación de la convección por el ambiente, la retroalimentación y el control estático (Grell & Dévényi, 2002a).
  - **Grell-3D Ensemble Scheme:** Es un esquema que utiliza un análisis espectral sobre la parametrización de la formación de cúmulos que incluye corrientes descendentes húmedas dentro de un modelo de mesoescala tridimensional (Grell, 1993).

- **Capa límite:** La opción de capa límite permite modelar la parte inferior de la troposfera (capa límite planetaria (PBL, por sus siglas en inglés)) la cual responde

a las condiciones de la superficie terrestre influenciada por la turbulencia en el flujo de aire, los gradientes de temperatura y el flujo de humedad (Calvo Sánchez, 2018). El esquema utilizado en este trabajo fue el YSU, que se explica a continuación:

- **Yonsei University Scheme (YSU)**: El YSU es un esquema que permite estimar los procesos de difusión vertical, con un coeficiente de mezcla turbulenta no local, en la capa de límite planetaria (PBL). El esquema YSU aumenta la capa de mezcla en el régimen térmico inducido por convección libre y disminuye en el régimen de convección forzada, que alivia los problemas bien conocidos en las predicciones de rango medio (Hong et al., 2006).

- **Radiación de onda corta:** Esta opción evalúa los efectos de la radiación solar incidente. La radiación solar al llegar a la atmósfera es absorbida o dispersa de forma parcial por los gases que la componen. En otro momento, cuando esa misma radiación llega a la superficie terrestre una parte es absorbida y otra es reflejada, son estas características las que tratan de representar los diferentes esquemas. En este trabajo se utilizaron dos opciones a saber:
  - **Dudhia Shortwave Scheme:** Este esquema formulado por Dudhia (1989) fue implementado inicialmente en el modelo MM5 y llevado posteriormente al WRF. Es una formulación simple del flujo de radiación solar incidente que calcula la tasa de dispersión del aire limpio, la capacidad de absorción que posee el vapor de agua (Lacis y Hansen 1974) la tasa de reflexión o albedo de las nubes y su capacidad de absorción. Usa tablas de consulta definidas por Stephens (1978) para describir diferentes efectos de la radiación producidos en las nubes.
  - **Goddard Shortwave Scheme:** Este esquema formulado por Chou & Suarez (1994) presenta una parametrización que toma en cuenta los efectos de los principales absorbentes de radiación, como son: el vapor de agua, el dióxido de carbono y el ozono. También calcula los flujos de aire limpio, las tasas de enfriamiento por intercambio térmico desde la superficie terrestre y la distribución vertical de la nubosidad.

- **Radiación de onda larga:** En este caso los esquemas se emplean para representar el comportamiento de la parte de la radiación solar que es reflejada por la superficie de la tierra o algún componente de la atmosfera. La emisión de radiación de onda larga es función de la temperatura y de la capacidad reflectante

(emisividad) de cada elemento. Para el proceso de modelación se utilizó el esquema RRTM, que se explica a continuación:

- **RRTM Longwave Scheme:** Este esquema formulado por Mlawer et al., (1997) fue implementado inicialmente en el modelo MM5 y llevado posteriormente al WRF. Permite la modelación de transferencia radiativa utilizando el método de correlación-k. La versión actual de RRTM permite calcular las tasas de flujo y reposo para la región espectral de onda larga (Mlawer et al., 1997). Utiliza tablas preestablecidas para representar fielmente los efectos de la radiación de onda larga sobre especies moleculares como el vapor de agua, el ozono, el dióxido de carbono y gases de traza (si existen), además de realizar una estimación del tamaño de las nubes, un dato requerido en su algoritmo.

1.5.7 La precipitación

La precipitación es un fenómeno asociado principalmente al agua que cae desde la atmósfera en forma sólida como nieve o granizo, en forma líquida como lluvia o rocío y en forma coloidal como neblina. La formación de vapor de agua es un mecanismo fundamental en la aparición de la precipitación, este mecanismo se puede percibir como un contenido de humedad en el ambiente: grandes masas de aire húmedo y caliente ascienden a capas cada vez más altas de la atmósfera, un movimiento generado por gradientes de temperatura entre la superficie del suelo y la atmósfera, o por barreras orográficas (ver más en Linsley, Kolher, & Paulus, 1977), al llegar al límite de saturación, las gotas logran el tamaño suficiente para caer y el agua se precipita. Según Monsalve Sáenz (1999) para que se formen gotas de lluvia existen dos mecanismos:

- Coalescencia: cuando las gotas de agua aumentan de tamaño al entrar en contacto con otras.
- Difusión de vapor: cuando el vapor de agua después de condensarse, entra en un proceso de difusión o transporte, que va atrapando gotas pequeñas que en el proceso aumentan de tamaño.

Las lluvias pueden ser clasificadas, de acuerdo al mecanismo de ascenso o movimiento vertical de aire en: lluvias convectivas, lluvias orográficas o lluvias por convergencia. En el caso de la zona de estudio, las más comunes son las de los tipos convectivas y orográficas. En las lluvias convectivas, el calentamiento heterogéneo del suelo produce parcelas de

aire con diferente densidad generando un equilibrio inestable que al romperse desencadena un ascenso rápido y brusco de esas parcelas lo cual produce finalmente la lluvia. En las lluvias orográficas, el ascenso de las masas de aire se da cuando estas encuentran la barrera montañosa, produciendo lluvia en las regiones más altas, en este caso una ciudad como Manizales, que se encuentra a 2100 m.s.n.m. en promedio.

1.5.7.1 Medición de la precipitación

Para el estudio hidrológico es fundamental comprender el comportamiento de los patrones de precipitación, la cual puede ser descrita en los términos de intensidad, duración, profundidad, frecuencia, distribución temporal y espacial (Ponce, 1989).

La cantidad total de precipitación que llega al suelo en un determinado período de tiempo se expresa en términos de profundidad vertical de agua para la cual cubre una proyección horizontal de la superficie de la tierra (Ogallo et al., 2008); las unidades son mm, que equivalen a 1 l/m^2.

El conocimiento de la distribución de la precipitación permite conocer la disponibilidad de agua de una región y mejorar la planificación agrícola; es, además, fundamental para el diseño de obras hidráulicas y para la gestión del riesgo. Las características climáticas de una región pueden definirse según la precipitación total anual (Ogallo et al., 2008):

Tabla 1. Clasificación zonal basada en precipitación acumulada.

Clasificación	Magnitud
Poca:	< 200 mm/año
Escasa:	200 – 500 mm/año
Normal:	500 – 1000 mm/año
Abundante:	1000 – 2000 mm/año
Muy abundante:	> 2000 mm

Para Colombia, el promedio de precipitación media anual es de 3.000 mm. En la zona Andina colombiana, la precipitación está determinada por los sistema de nubosidad, condicionados por la altitud, la orientación de las montañas y la actividad convectiva del lugar (Jaramillo Robledo, 2005). La región Andina posee una gran diversidad pluviométrica, con lluvias (hasta 2.000 mm) a lo largo de la cordillera Oriental y en los valles del alto Magdalena y ato Cauca y núcleos máximos (de 3.000 a 5.000 mm) en las cuencas del Magdalena Medio y Cauca (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios

Ambientales IDEAM, 2005). La distribución intra-anual de la precipitación es bimodal, con dos temporadas secas en enero - febrero y julio – agosto, mientras que los meses de exceso hídrico son abril-mayo y octubre-noviembre (Jaramillo Robledo, 2005).

1.5.7.2 Modelación de la precipitación

La precipitación como variable meteorológica presenta una gran variabilidad espacial y temporal lo que determina una gran dificultad en su modelación y aún más en su predicibilidad lo que la hace “uno de los caballos de batalla del mundo de la predicción del tiempo”(Santos Burguete, 2018). En el WRF, la precipitación líquida, es decir la lluvia, se modela a través de dos procesos de parametrización: el primero tiene que ver con la microfísica de las partículas acuosas (hidrometeoros), allí se tiene en cuenta fenómenos como las partículas en suspensión, cambios de estado o fase, deposición, agregación y acreción; la microfísica determina la cantidad de lluvia producida por procesos no convectivos.

Y el segundo proceso está relacionado con la simulación de procesos convectivos, la formación de nubes tipo cúmulo y la interacción de procesos de gran escala como el movimiento de nubes, la transferencia de calor y la precipitación en sí misma. Cuando se realiza el análisis de resultados al final de un proceso de simulación, se debe poner especial atención a los resultados derivados de ambos procesos ya que se deben acumular, en este trabajo se hace de esta forma, dependiendo de la zona de estudio.

De forma adicional, WRF cuenta con configuraciones donde se puede tener en cuenta la precipitación en fase sólida, es decir la nieve. Este caso tiene aplicaciones prácticas en zonas estacionales ubicadas en latitudes medias y altas. En las zonas tropicales, usualmente no se tienen en cuenta, encontrando unas pocas excepciones cuando son utilizadas en zonas de gran altitud (picos nevados por encima de los 5000 m.s.n.m. generalmente).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción del área de estudio

La ciudad de Manizales se ha caracterizado por tener un tiempo muy variable con valores de precipitación elevados; es denominada en el argot popular con la expresión “cielo roto”, para referirse a su cielo que amenaza lluvia de forma constante (Pachón G., 2011).

Figura 10. Calles de la ciudad de Manizales en un día de lluvia.
Tomada de Correa Cadavid & Ospina Giraldo, 2021

La ciudad de Manizales es un municipio que se encuentra ubicado en el departamento de Caldas que a su vez se localiza en la zona centro occidente de Colombia (coordenadas geográficas 5° 3′ 58″ de latitud norte y 75° 29′ 5″ de longitud oeste). Cuenta con un área total de 571,84 km^2 de los cuales 13,6 km^2 son ocupados por su zona urbana.

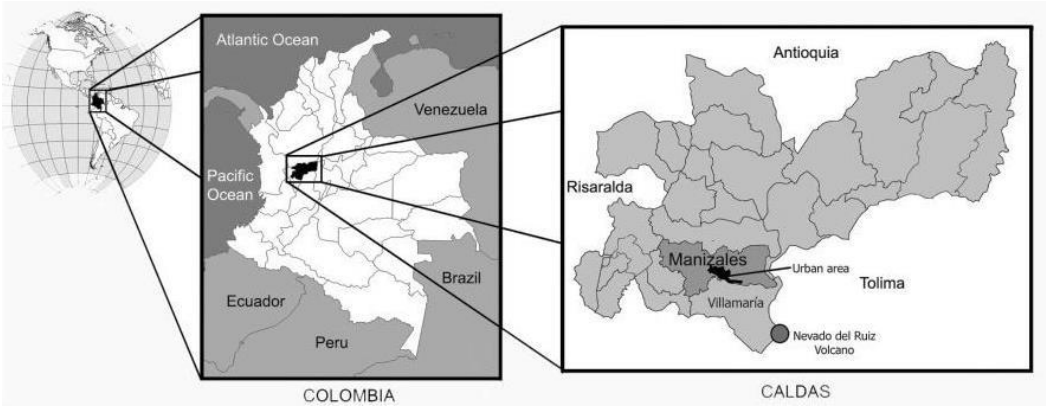


Figura 11. Localización de la ciudad de Manizales, Caldas - Colombia.
Elaboración propia

La ubicación espacial de la ciudad de Manizales coincide con una de las zonas más amenazadas del país, en donde se tiene un alto nivel de riesgo que es ocasionado principalmente por terremotos, erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra, avalanchas e inundaciones (Carreño et al., 2007; Vélez-Upegui et al., 2012).

Cabe mencionar que la ciudad está construida en su totalidad sobre terrenos de fuertes pendientes con un rango entre 25% y 45%, un rasgo que aunado a la dinámica de la precipitación, lo convierte en uno de los principales factores detonantes de los mencionados fenómenos de deslizamientos, flujos de lodos, inundaciones, entre otros. Debido a esto, se han generado numerosos esfuerzos para comprender la dinámica de la lluvia con diversos enfoques como el hidrológico, el climático, el ambiental, entre otros.

Figura 12. Vista panorámica de la ciudad de Manizales.
Tomada de Garcia, 2015

La ciudad de Manizales presenta un clima ecuatorial de montaña característico de la zona central andina colombiana. Con un régimen de lluvias de comportamiento bimodal influenciado por la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), con máximos entre los meses de marzo a mayo para la primera temporada y de septiembre a noviembre para la segunda temporada, siendo las tasas de precipitación muy significativas, dando como resultado que aproximadamente el 70% de los días del año llueve (Pachón G., 2011), marcando un promedio anual de precipitación acumulada de 2000 mm (Cortés Cortés, 2010). Adicionalmente, el clima de Manizales se ve influenciado por la presencia de fenómenos macroclimáticos como El Niño - Oscilación del Sur (ENOS), que históricamente ha causado impactos de gran magnitud tanto en su fase cálida como en su fase fría (Poveda, 2004).

2.2 Definición de dominios y resolución de trabajo

Para el desarrollo de la modelación se optó por utilizar una metodología de anidamientos sucesivos que permitiera obtener resultados de alta resolución espacial con un costo computacional aceptable. De acuerdo a lo anterior se definieron un dominio base y dos anidamientos sucesivos, así:

- El dominio base abarca la costa del pacífico colombiano y parte de la región central incluyendo la cordillera occidental y central, en un área aproximada de 143.775 km², este dominio cuenta con una grilla de 71 por 81 celdas de 25 km por 25 km cada una.
- El primer dominio anidado abarca una parte de los departamentos de Antioquia, Caldas, Risaralda y Choco con un área de observación de 88.330 km², con una grilla de 121 por 146 celdas de 5 km por 5 km cada una.
- El segundo dominio anidado cuenta con un área de 11.616 km², que abarca los municipios del sur oriente de caldas, con una grilla de 121 por 96 celdas de 1 km por 1km cada una. En la Figura 13 siguiente se puede observar la ubicación y aspecto de los dominios de simulación.

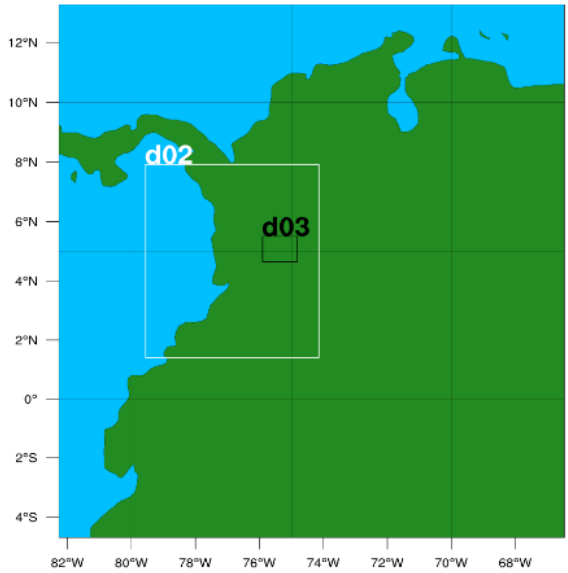


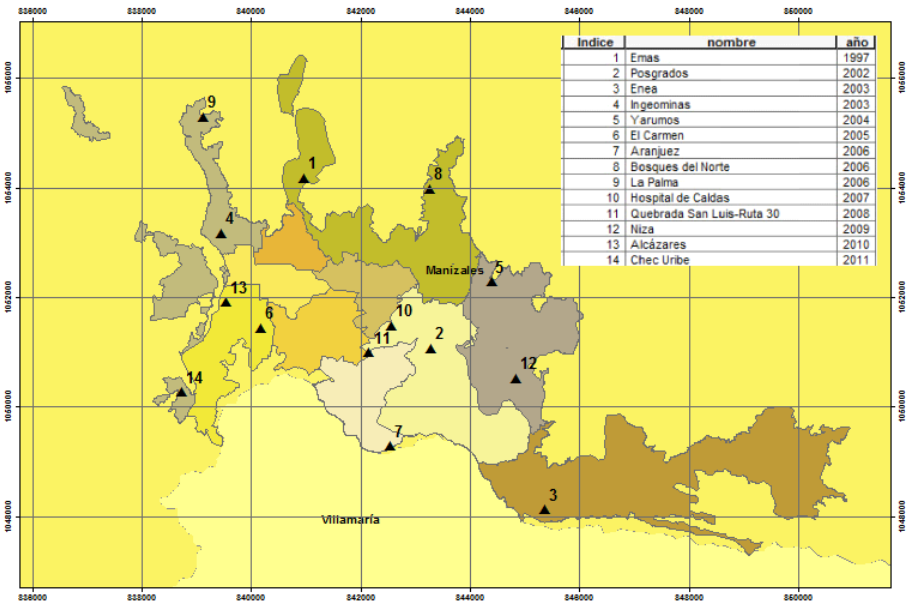
Figura 13. Mapa que muestra la disposición de los dominios de trabajo. Elaboración propia

2.3 Información hidroclimatológica

Para la evaluación del desempeño del modelo se utilizó la información generada por el proyecto de monitoreo hidrometeorológico de Manizales y el departamento de Caldas, liderado y administrado por el Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas (SIMAC). El monitoreo hidrometeorológico comenzó en Manizales hace más de veinte años y actualmente cuenta con más de 45 estaciones automáticas, las cuales se dividen en dos categorías como son las estaciones meteorológicas y las estaciones hidrometeorológicas. Según (Mejía Fernández, 2008) las estaciones meteorológicas tienen la posibilidad de recoger la información de variables climáticas a saber: precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, dirección del viento, evapotranspiración y presión atmosférica. Por otro lado, las estaciones hidrometeorológicas registran variables como: la temperatura del aire, la precipitación y principalmente el nivel y caudal en las diferentes corrientes de agua (Vélez-upegui et al., 2012). Todas las estaciones se encuentran estratégicamente ubicadas en la ciudad y transmiten datos cada cinco (5) minutos a través de sistemas de comunicaciones radial tipo VHF a un centro de acopio donde se almacenan, se validan y se catalogan para ser entregada al público a través del Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas (CDIAC) (Universidad Nacional de Colombia. & CORPOCALDAS., 2015).

2.3.1 Ubicación de estaciones de control

Se utilizaron las series de datos medidas en 14 estaciones meteorológicas ubicadas en varios sectores de Manizales (Figura 14): el barrio Alcázares, el barrio Aranjuez, el barrio Bosques del Norte, las instalaciones de la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) ubicadas en el sector de la Estación Uribe, el barrio El Carmen, las instalaciones de la Empresa Metropolitana de Aseo (EMAS), el barrio La Enea, las instalaciones del Hospital de Caldas, las instalaciones de Servicio Geológico Colombiano (SGC), el barrio La Palma, el barrio Niza, el edificio de Posgrados de la Universidad Nacional, en las inmediaciones del cauce de la Quebrada San Luis y las instalaciones del ecoparque Los Yarumos.



Indice	nombre	año
1	Emas	1997
2	Posgrados	2002
3	Enea	2003
4	Ingeominas	2003
5	Yarumos	2004
6	El Carmen	2005
7	Aranjuez	2006
8	Bosques del Norte	2006
9	La Palma	2006
10	Hospital de Caldas	2007
11	Quebrada San Luis-Ruta 30	2008
12	Niza	2009
13	Alcázares	2010
14	Chec Uribe	2011

Figura 14. Mapa de ubicación de las estaciones de control.
Elaboración propia

2.3.2 Preprocesamiento de datos

Como primera medida, los registros meteorológicos descargados fueron evaluados para detectar y corregir los datos erróneos, atípicos o fuera de rango, ya que en todo sistema de acopio de datos meteorológicos se pueden encontrar algunos errores como datos

faltantes o fuera de rango. La depuración de los registros se realizó con un sistema de filtros previamente diseñado para cada variable meteorológica e implementada dentro de la bodega de datos del CDIAC (UNAL & CORPOCALDAS., 2015) (ver: Duque et al., 2010). Una vez realizado este proceso se decidió utilizar dentro de este trabajo 5 de las variables reportadas por las estaciones, ya que mostraron mejores condiciones de calidad y continuidad dentro de sus series de datos. Las variables escogidas fueron: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, presión atmosférica y como variable principal de análisis la precipitación. Adicionalmente, se encontró que de las 14 estaciones analizadas algunas presentaban inconsistencia de información dependiendo del periodo temporal que se estaba observando, por tanto, el número de estaciones cambia dentro de cada uno de ellos, como se muestra en la descripción de los periodos de tiempo elegidos para este trabajo.

Para evaluar el desempeño del modelo numérico y las comparaciones estadísticas posteriores se inició una conversión en la periodicidad de los datos, pasando de cinco minutos temporalidad en que se recogen y almacenan, a períodos de una hora ya que la entrega de resultados del modelo WRF es con una periodicidad cuyo límite mínimo es este intervalo de tiempo, siguiendo la siguiente metodología:

- Temperatura: con unidad de medida los grados Celsius. Para esta la conversión de esta variable se realizó el promedio horario de los datos almacenados cada cinco minutos.
- Humedad relativa: esta variable se estima en porcentaje. Para su conversión se realizó un promedio horario.
- Velocidad del viento: con unidad de medida en metros sobre segundo. Para su conversión se hizo un promedio horario.
- Presión atmosférica: con unidad de medida en milímetros de mercurio. Para su conversión se realizó el promedio de los datos medidos cada hora.
- Precipitación: con unidad de medida los milímetros. Para su conversión se hizo una acumulación horaria de los datos cinco tomados cada minuto.

En los casos en los que se presentaban vacíos en las mediciones, se hizo la misma operación explicada anteriormente para cada variable, pero sin tener en cuenta esos faltantes en las series. En ocasiones, no hay ningún dato medido por hora, generando un dato faltante en las series horarias, las cuales se debieron excluir del análisis.

2.4 Definición de periodos temporales para modelación

Los periodos de tiempo para analizar dentro del modelo fueron escogidos siguiendo los siguientes criterios:

a) Que cada periodo de tiempo estuviera enmarcado dentro de una de las fases del El Niñó – Oscilación del Sur (ENOS) según el índice ONI de la NOAA.
b) Que las series de datos de precipitación obtenidas de las estaciones en superficie necesarias para el proceso de comparación estuvieran completas.
c) Que las series de precipitación dentro de los periodos escogidos mostraran picos de lluvia en alguna de las estaciones dentro de la fase ENOS en la cual se encontraba enmarcado.
d) Que los periodos de simulación no superaran más de 10 días en cada caso.
e) Que para cada periodo de simulación se tuviera por lo menos un 1 día de spin up (fase de estabilización del modelo).
f) Que la configuración de paso de tiempo en los modelos atmosféricos generalmente se configura dentro del estándar internacional de Tiempo Universal Coordinado (UTC, por sus siglas en ingles Coordinated Universal Time), por tanto para asimilar los datos simulados con los datos obtenidos en superficie se debe hacer una conversión restando 5 horas a los resultados que da el modelo.

Siguiendo lo anterior en la Tabla 2 se muestra los periodos escogidos para el desarrollo de simulaciones y análisis de resultados.

Tabla 2. Periodos de simulación.

Periodo de simulación		Periodo para análisis de resultados		Fase del ENOS	Observaciones
Inicio	Final	Inicio	Final		
12-10-2011	20-10-2011	13-10-2011	19-10-2011	LA NIÑA	Las lluvias de este período generaron deslizamientos lo cual produjo una gran emergencia en la ciudad de Manizales
02-03-2010	10-03-2010	03-03-2010	09-03-2010	EL NIÑO	Fue uno de los períodos con mayores temperaturas reportados desde que se hace seguimiento a las variables meteorológicas
13-10-2014	21-10-2014	14-10-2014	20-10-2014	NORMAL	Fue un periodo donde se registraron eventos de lluvia con intensidades por encima de la media.

Elaboración propia.

2.4.1 Descripción de los periodos temporales de modelación

2.4.1.1 Fase LA NIÑA - ENOS

El período de tiempo en la fase La Niña analizado aquí fue especialmente desastroso para la ciudad, ya que en este se dio un evento de lluvia que originó múltiples emergencias y la pérdida de una parte de la infraestructura de conducción de agua potable que surte la zona urbana. Hay que mencionar que se encontraron algunas inconsistencias en los registros de este año, por esto las estaciones de referencia se redujeron de 14 como se presupuestó inicialmente a 12, dentro de las que se encuentran: Alcázares, Aranjuez, Bosques del Norte, Estación Uribe (CHEC), El Carmen, La Enea, Hospital de Caldas, SGC, La Palma, Niza, Posgrados y Yarumos.

El evento de lluvia para la fase LA NIÑA del ENOS, se compone de 4 etapas con precipitación continua con picos bien definidos (Figura 15).

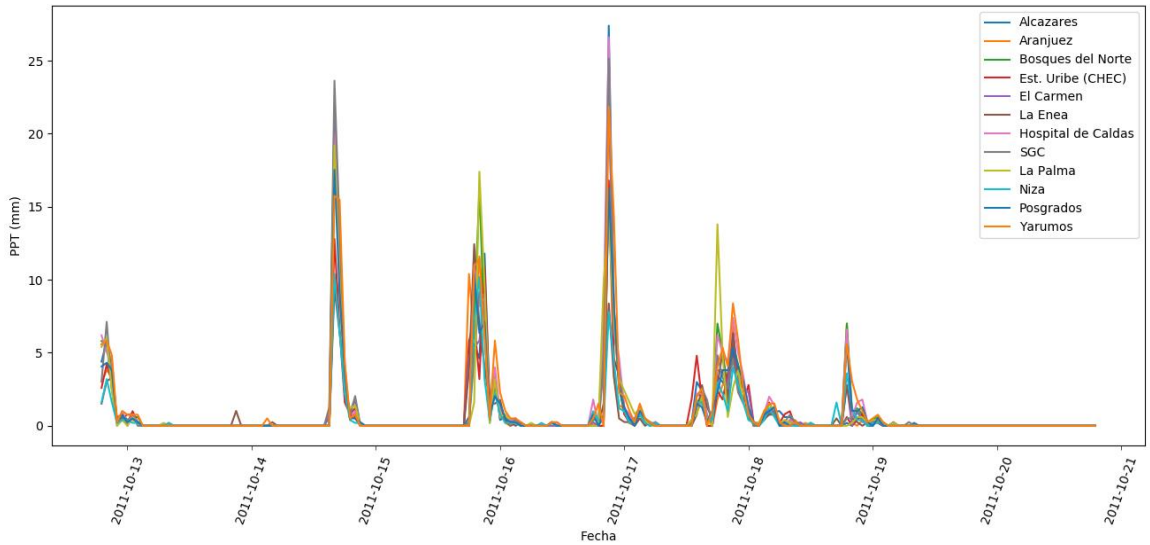


Figura 15. Series de precipitación para el periodo de estudio. Fase La Niña - ENOS. Elaboración propia

El primer periodo comprende un intervalo de 5 horas entre las 16:00 horas y las 21:00 horas del 14 de octubre de 2011 con registro permanente de lluvia con un pico máximo horario de 17.53 mm y un total acumulado de 31.50 mm de lluvia. El segundo período, se registró en un intervalo de 9 horas entre las 19:00 horas del 15 de octubre y las 3:00 horas del 16 de octubre con un pico máximo horario de 10.41 mm y un total acumulado de 29.21

mm de lluvia. El tercer período, abarca un intervalo de 6 horas entre las 20:00 horas del 16 de octubre a las 1:00 horas de 17 de octubre con un pico de 16.26 mm y un total acumulado de 29.48 mm de precipitación registrada. El cuarto período de lluvia, comprende 12 horas de registro de precipitación, entre las 14:00 horas del 17 de octubre y las 1:00 horas del 18 de octubre con un pico horario de 5.33 mm precisamente a las 21:00.

El total acumulado de lluvia para un periodo de 9 días, fue en promedio de 156 mm aproximadamente, que representa un 7.75 % de la lluvia anual acumulada en promedio, es decir, se registró para este caso la lluvia que debió distribuirse en 28 días aproximadamente.

El comportamiento de las otras variables analizadas se muestra a continuación:

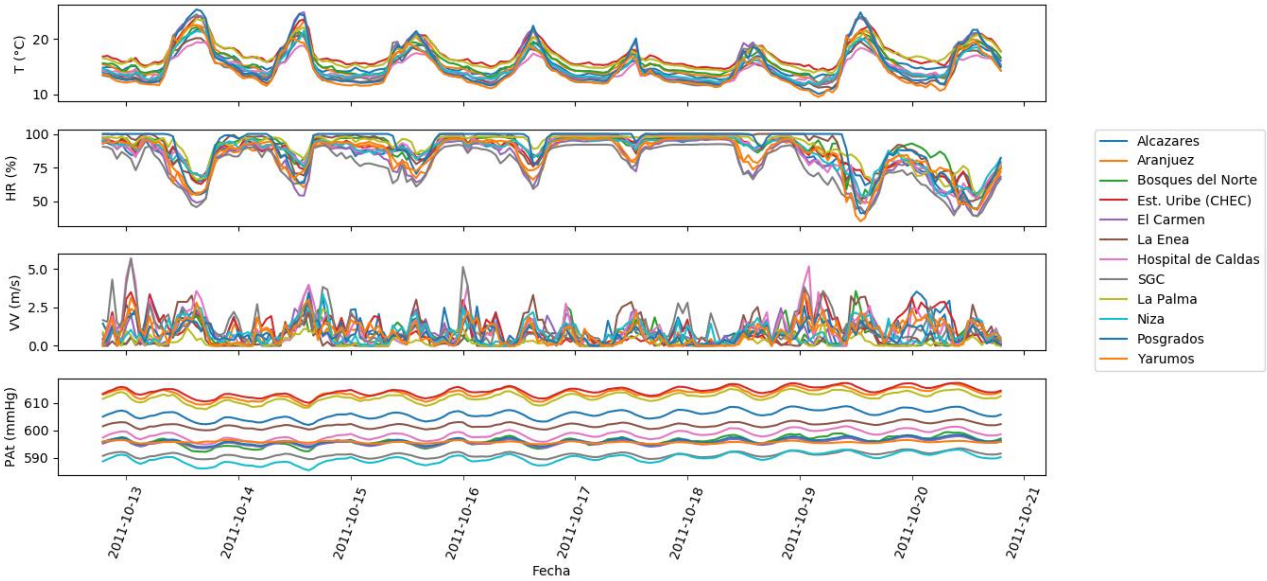


Figura 16. Series de Temperatura, Humedad Relativa, Velocidad del Viento y Presión Atmosférica en el periodo de estudio. Fase La Niña - ENOS.
Elaboración propia

En cuanto a la temperatura la serie muestra una oscilación propia de los ciclos diurno y nocturno, con máximas de 25.3°C y mínimas de 9.5°C. En los intervalos con lluvia, se puede observar que las temperaturas muestran un máximo local que es seguido por un descenso sobre el cual se registra el pico de lluvia. Las máximas temperaturas se registraron antes de los tres picos de lluvia más importantes y justo después de ellas, hacia el final de la serie se observa que la temperatura tiende a seguir la media.

La serie de humedad relativa sigue el comportamiento de la serie de temperatura en forma inversa, es decir en los máximos de temperatura se registran los mínimos de humedad relativa, en este sentido nos encontramos con mínimos entre el 35% y el 45% y máximos de un 100% en algunas estaciones, en general fue un periodo de observación especialmente húmedo con una media del 85%.

En cuanto a la serie de velocidad y dirección del viento, se puede observar que no sigue tendencias claras y no se observa una relación directa con la serie de lluvia.

En la serie de presión se puede observar estabilidad local de esta variable con algunas fluctuaciones a lo largo siguiendo el ciclo diurno y nocturno.

2.4.1.2 Fase EL NIÑO - ENOS.

En este caso, se utilizó la información del periodo comprendido entre el 2 de marzo de 2010 y el 10 de marzo del mismo año. Al igual que en la fase de La Niña, para este periodo se encontraron algunas inconsistencias en los registros, por esto las estaciones de referencia se redujeron de 12 en el periodo anterior a 9 en este, encontrando las siguientes: Aranjuez, Bosques del Norte, El Carmen, La Enea, Hospital de Caldas, SGC, La Palma, Niza y Posgrados.

El Niño observado aquí, comenzó a mediados del año 2009 y se extendió hasta el mes de mayo de 2010, que según IDEAM (2014) fue un fenómeno que capto muy bien su señal típica en las regiones Andina y Caribe. Adicionalmente, se registraron varias anomalías en la temperatura con los registros más altos obtenidos hasta ese momento en varias ciudades del país y el descenso en embalses hasta por debajo del 50% de su capacidad.

La influencia de El Niño se puede observar en la serie que se muestra en la Figura 17, en esta la serie de datos muestra un periodo predominantemente seco con la presencia de un solo evento de lluvia de importancia, que se manifiesta con un pico muy claro en las horas de la noche del día 6 de marzo, el resto del tiempo se registraron algunas precipitaciones aisladas de poca magnitud.

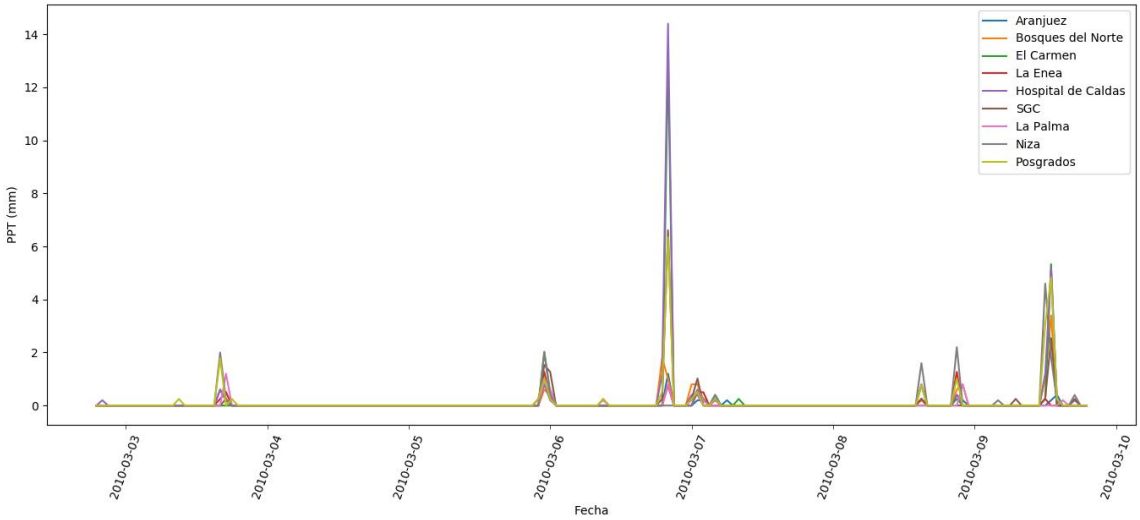


Figura 17. Series de precipitación para el periodo de estudio. Fase El Niño - ENOS. Elaboración propia.

El evento de lluvia antes mencionado comprende 2 horas entre las 19:00 y las 21:00 del 6 de marzo, en este intervalo de tiempo se registró un pico máximo horario de 14.4 mm y un acumulado de 15.6 mm de lluvia en la estación Hospital de Caldas. Para los 8 días de la serie y en las estaciones analizadas se registró un promedio de 14,7 mm de lluvia acumulada que representa un 0.74% de la lluvia anual acumulada promedio, es decir, se registró para este caso la lluvia que debió distribuirse en 2.68 días.

Para las otras variables analizadas se encontró el siguiente comportamiento (Figura 18):

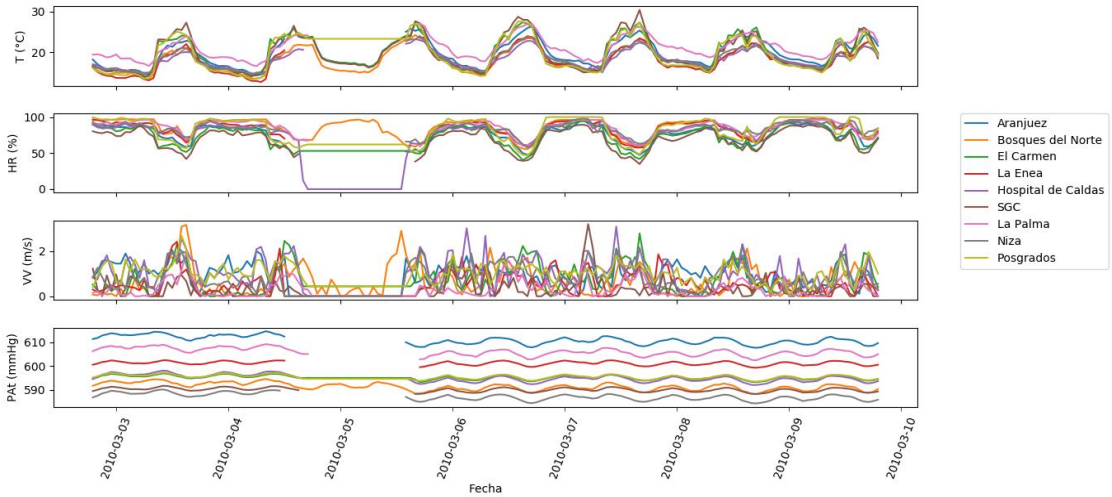


Figura 18. Series de Temperatura, Humedad Relativa, Velocidad del Viento y Presión Atmosférica en el periodo de estudio. Fase El Niño - ENOS. Elaboración propia

En cuanto a la temperatura, la serie muestra una oscilación propia de los ciclos diurno y nocturno con máximas de 30.4°C y mínimas de 12.6°C, en general esta fase de El Niño se caracterizó por altas temperaturas en todo el país y en algunas ciudades se llegó en su momento a temperaturas máximas diarias record, lo que suscito perdidas momentáneas del servicio de energía que es generada en hidroelectricas. La serie de humedad relativa sigue el comportamiento de la serie de temperatura en forma inversa, es decir en los máximos de temperatura se registran los mínimos de humedad relativa, en este sentido nos encontramos con mínimos del 44% y máximos de un 97%, en general fue un periodo de observación con una humedad convencional para la ciudad de Manizales, con una media del 78%. La serie de velocidad del viento no presenta una correlación clara con la serie de precipitación, aunque esta variable puede controlar la dirección de las lluvias y la concentración de la humedad en ciertos sectores de la ciudad, la información no revela lo suficiente para llegar a conclusiones claras en este aspecto. La serie de presión presenta estabilidad en cada punto de medición con algunas fluctuaciones siguiendo el ciclo diurno y nocturno.

2.4.1.3 Fase NORMAL - ENOS

Para simular las condiciones de normalidad en la meteorología dentro del ciclo del ENOS, se utilizó la información del periodo comprendido entre el 13 de octubre de 2014 y el 23 de octubre de 2014. Para este caso, se eligieron un total de 12 estaciones dentro de las que se encuentran: Alcazares, Aranjuez, Bosques del Norte, Estación Uribe (CHEC), El Carmen, La Enea, Hospital de Caldas, SGC, La Palma, Niza, Posgrados, Yarumos. Adicionalmente se encontraron pequeñas inconsistencias en la información en las variables que acompañan la precipitación como la temperatura, humedad relativa, etc. Se puede observar en la Figura 20 que por un periodo de 2 horas hubo fallas en la recolección de datos.

La fase Normal del ENOS analizada aquí inicio en abril de 2012 y termino en octubre de 2014, donde el índice ONI reporta normalidad en las estadísticas de temperatura del océano Pacifico las cuales determinan las alertas sobre el inicio de una de las fases del fenómeno de EL NIÑO, por tanto el clima en Colombia se vio más influido por otro tipo de

fenómenos de macroescala como la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) o la oscilación Madden-Julian.

La serie de precipitación (Figura 19) muestra un comportamiento con variabilidad a lo largo del periodo. Se tiene un primer evento de lluvia representado por un pico en las primeras horas seguido por un periodo seco de aproximadamente 48 horas. Posteriormente encontramos una fase con 3 picos de lluvia importantes mediados por eventos de lluvia de menor magnitud, esta fase húmeda tiene una duración aproximada de 5 días. Después encontramos un periodo seco que finaliza con un evento de lluvia de poca magnitud.

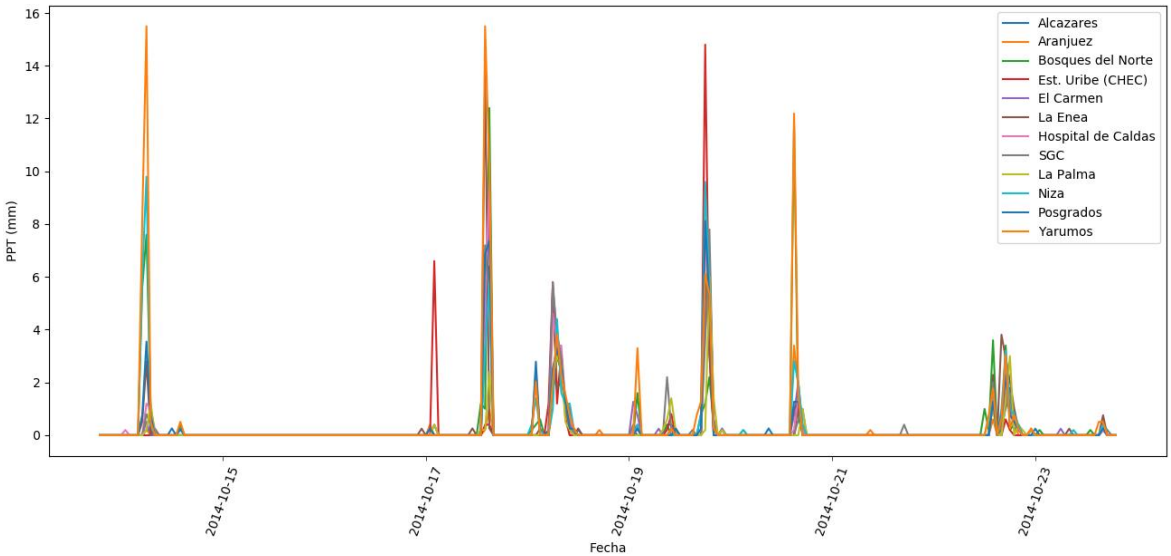


Figura 19. Series de precipitación para el periodo de estudio. Fase Normal - ENOS. Elaboración propia

El primer evento de lluvia se registró entre las 6:00 y las 8:00 horas del día 13 de octubre, en este evento se registró el pico de lluvia máximo en la estación Yarumos con una magnitud de 15.50 mm en una hora. En la siguiente fase de lluvia de nuevo se presentó el registro de 15.50 mm en una hora y sobre la misma estación Yarumos, siendo estos los picos de lluvia máximos durante el periodo de análisis. En general para los 10 días de registro se logró un acumulado promedio en todas las estaciones de 55.2 mm, lo que representa 2.76% de la lluvia anual acumulada, lo que se traduce en que la lluvia caída debió distribuirse en un total de 10 días aproximadamente, lo que denota el comportamiento de una fase neutra en la influencia del Niño sobre el clima del territorio. Para este periodo, se encontró un dato especial, ya que la estación Yarumos, que registro

los picos más altos de lluvia, también registró los máximos valores de lluvias acumuladas, los cuales superan el doble del promedio, ya que su resultado es de 102.7 mm para el periodo de análisis, mostrando una tendencia de las lluvias a acentuarse sobre esa zona de la ciudad. En el caso de la estación Yarumos, sus registros corresponden al 5.13% de la lluvia anual acumulada, lo que significa que las lluvias debieron distribuirse en un total de 19 días aproximadamente.

Para las otras variables analizadas se encontró el siguiente comportamiento:

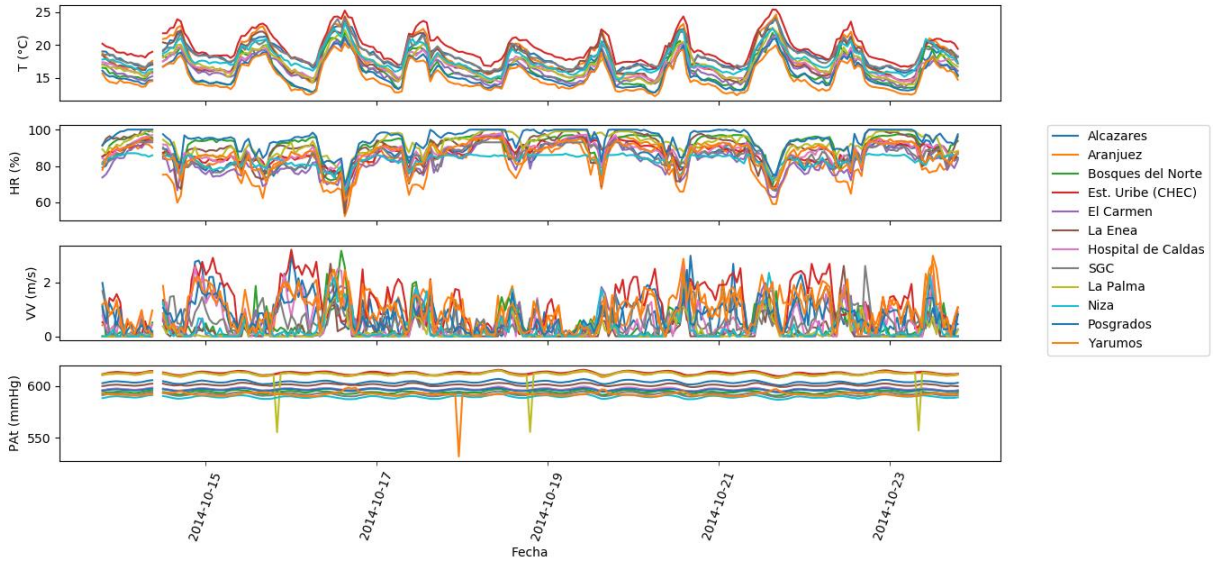


Figura 20. Series de Temperatura, Humedad Relativa, Velocidad del Viento y Presión Atmosférica en el periodo de estudio. Fase Normal - ENOS.
Elaboración propia

Los registros de temperatura para todas las estaciones presentan un rango entre 12.2 y 25.4 °C, con una media de 17.3 °C lo que es usual para la época del año, en el que octubre se encuentra durante etapa la húmeda que es determinada por la situación de la ZCIT en ese momento.

La serie muestra una oscilación propia de los ciclos diurno y nocturno. La serie de humedad relativa como se vio en los análisis de los otros periodos va en contramano de la de temperatura, de tal forma que se encuentran mínimos del 52.3% y máximos de un 100%, en general este fue un periodo con humedad por encima de lo normal, con una media del 87.2%, aunque como se dijo, las condiciones están mediadas por la situación del territorio colombiano dentro de la ZCIT.

Las series de velocidad y dirección del viento no presentan una correlación clara con la serie de precipitación, aunque la serie de dirección del viento muestra un comportamiento que se ha detectado para la ciudad y es que en el día los vientos tienden a tomar la dirección oeste-este y en las noches se revierte su dirección y fluye de este a oeste. La serie de presión presenta estabilidad en cada punto de medición con algunas fluctuaciones siguiendo el ciclo diurno y nocturno, aclarando que se pueden observar algunos picos, que se explican por errores en el sensor.

2.5 Configuración del modelo WRF

2.5.1 Condiciones iniciales y de frontera

Además de definir la configuración de dominios, anidamientos y periodos de simulación, dentro del modelo se deben establecer una serie de parámetros básicos que permiten el inicio de todos los procesos de cálculo como son la topografía, las condiciones del suelo (usos y humedad principalmente) y la información climática base.

- Topografía: la información topográfica fue obtenida de la base de mapas de la USGS, con una resolución de 30” de arco (0.0083 grados aprox.).
- Condición del suelo: los usos de suelo y condiciones de humedad superficial se obtuvo de las imágenes y datos del proyecto MODIS con resolución de 30” de arco.
- Datos de variables climáticas: la condición inicial de la atmósfera se obtuvo a partir de dos modelos de circulación global como son el modelo GFS y el modelo CFS descritos anteriormente. La información adquirida se resume en la Tabla 3:

Tabla 3. Características de los modelos globales usados en el desarrollo de este trabajo.

Modelo de circulación global	Resolución Horizontal	Resolución Vertical	Variables de entrada al modelo
GFS	1.0 grados	Porción atmosférica dividida en 32 niveles. Rango de altura 1000 m	86 variables entre las que se encuentran: Temperatura superficial del mar, Presión atmosférica, fracción de nubosidad, todas aquellas relacionadas con la formación y producción de lluvia
CFS (versión de reanálisis CFRS)	0.5 grados	Porción atmosférica dividida en 42 niveles. Rango de altura 5000 m	109 variables entre las que se encuentran: Temperatura superficial del mar, Presión atmosférica, fracción de nubosidad, todas aquellas relacionadas con la formación y producción de lluvia

Elaboración propia

2.5.2 Parametrizaciones

Como se mostró antes los modelos de área limitada cuenta con una serie de esquemas que permiten la simulación de diferentes procesos atmosféricos específicos. Se muestra en la Tabla 4 los juegos de parametrizaciones y la organización de estas dentro de los esquemas de configuración utilizados en el desarrollo de este trabajo:

Tabla 4. Esquemas de configuración y juegos de parametrizaciones utilizados en el modelo.

PROCESO MODELADO	ESQUEMA DE CONFIGURACIÓN			
	C_01	C_02	C_03	C_04
MICROFISICA	Purdue Lin Scheme (a)	WRF Single–moment 6–class Scheme (i)	WRF Single–moment 6–class Scheme	WRF Single–moment 6–class Scheme
CAPA LÍMITE PLANETARIA	Yonsei University Scheme (b)	Yonsei University Scheme	Yonsei University Scheme	Yonsei University Scheme
FORMACIÓN DE NUBES (CÚMULOS)	Grell-3D Ensemble Scheme (c)	Grell–Devenyi (GD) Ensemble Scheme (j)	Grell-3D Ensemble Scheme	Kain-Fritsch Scheme (l)
RADIACIÓN DE ONDA CORTA	Goddard Shortwave Scheme (d)	Dudhia Shortwave Scheme (k)	Dudhia Shortwave Scheme	Dudhia Shortwave Scheme
RADIACIÓN DE ONDA LARGA	RRTM Longwave Scheme (e)	RRTM Longwave Scheme	RRTM Longwave Scheme	RRTM Longwave Scheme
CONDICIONES DEL SUELO	Unified Noah Land Surface Model (f)	Unified Noah Land Surface Model	Unified Noah Land Surface Model	Unified Noah Land Surface Model
CAPA SUPERFICIAL	Revised MM5 Scheme (g)	Revised MM5 Scheme	Revised MM5 Scheme	Urban Canopy Model
CAPA URBANA	Urban Canopy Model (h)	Urban Canopy Model	Revised MM5 Scheme	Urban Canopy Model

(a) (S. H. Chen & Sun, 2002)
(b) (Hong et al., 2006)
(c) (Grell & Dévényi, 2002b)
(d) (Matsui et al., 2018)
(e) (Mlawer et al., 1997)
(f) (M Tewari et al., 2004)
(g) (Jiménez et al., 2012)
(h) (F. Chen et al., 2011)
(i) (Hong & Lim, 2006)
(j) (Grell & Dévényi, 2002b)
(k) (Dudhia, 1989)
(l) (Kain, 2004)

Elaboración propia

Después de asignar cada juego de parametrizaciones a un esquema de configuración se procedió a codificar los casos de simulación y de este modo tener un grupo de resultados organizado. Para cada periodo se utilizó uno de los dos modelos globales y uno de cuatro esquemas de configuración, quedando ordenado de como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Codificación de los esquemas de configuración.

Esquema de configuración	Modelo de circulación general	Código
C_01	GFS	GFS_Confi_01_t_xx
C_02	GFS	GFS_Confi_02_t_xx
C_03	GFS	GFS_Confi_03_t_xx
C_04	GFS	GFS_Confi_04_t_xx
C_01	CFRS	CFRS_Confi_01_t_xx
C_02	CFRS	CFRS_Confi_02_t_xx
C_03	CFRS	CFRS_Confi_03_t_xx
C_04	CFRS	CFRS_Confi_04_t_xx

Elaboración propia

En la Tabla 5. Codificación de los esquemas de configuración.t_xx depende del periodo simulado (t_normal, t_niña, t_niño) y se muestra que para este trabajo se hicieron un total de 24 simulaciones que son analizadas más adelante, abarcando diferentes configuraciones y periodos de tiempo lo que permitió observar y analizar diferentes escenarios en la estimación de las capacidades del modelo WRF para simular la precipitación, objetivo principal de este trabajo.

2.5.3 Datos de salida

La simulación del clima por medio del modelo WRF-ARW, genera una serie de salidas que deben ser observadas, analizadas y procesadas para obtener variables climáticas con las cuales se puede desarrollar procesos de análisis estadístico, comparación, entre otros. A continuación se enuncia la metodología con la cual se obtuvieron ocho variables meteorológicas, las cuales se escogieron por su utilización en las mediciones de campo, con las estaciones seleccionadas para la evaluación del modelo:

- Temperatura**:** el modelo genera un valor denominado T2 que se refiere a esta variable medida 2 m de altura, sus unidades de medida son en grados Kelvin por tanto se realiza la conversión a grados centígrados que es como se reporta en los datos de comparación.

- Humedad Relativa: la humedad relativa se calcula a partir de dos valores de salida del modelo que son la presión real de vapor y la presión de saturación de vapor siguiendo la siguiente expresión:

$$HR = \frac{e_a}{e_0(T)} \times 100 \quad (6)$$

Donde:

HR: Humedad relativa (%)

e_a: Presión real de vapor (cantidad efectiva de agua en la masa de aire)

e_0: Presión de saturación de vapor (cantidad de agua de la masa de aire saturada) a una misma temperatura

La humedad relativa al igual que la temperatura se toma a 2 metros sobre la superficie del terreno.

- Viento: el viento como variable meteorológica se caracteriza por su velocidad y dirección. El modelo genera un valor de velocidad del viento medido a 10 metros, separado en dos componentes paralelas a la superficie del terreno, una en dirección norte-sur (V) y otra en dirección occidente-oriente (U). Para el desarrollo del presente análisis, se requiere la medida de la variable de manera similar a las anteriores, a 2 metros de altura sobre la superficie. Para ello, se tomaron las componentes de la velocidad del viento y por suma vectorial se halló la velocidad resultante a 10 metros, con la siguiente expresión:

$$Vel_{10\ metros} = \sqrt{U_{10}^2 + V_{10}^2} \quad (7)$$

Donde:

$Vel_{10\ metros}$: Velocidad del viento a 10 metros (m/s)

U_{10}: Componente de la velocidad del viento dirección occidente-oriente (m/s)

V_{10}: Componente de la velocidad del viento dirección norte-sur (m/s)

Para hallar esa misma resultante pero a 2 metros, se recurrió una expresión logarítmica que expresa la tasa de cambio de la velocidad con la altura:

$$Vel_{2\ metros} = Vel_z \times \frac{4.87}{\ln(67{,}8z + 5{,}42)} \quad (8)$$

Donde:

$Vel_{2\ metros}$: Velocidad del viento a 2 metros (m/s)

Vel_z: Velocidad del viento a una altura determinada (m/s)

z: Altura sobre la superficie del terreno en la cual se midió la velocidad del viento inicial (m)

Para la obtener la dirección del viento se usa como insumo las componentes del viento (U_2, V_2) y se genera un valor angular de dirección entre 0 y 360°, siguiendo la siguiente expresión:

$$Dir = 90° - \frac{360}{2\pi} \tan^{-1}\left[\frac{V_2}{U_2}\right] + \alpha_0 \qquad (9)$$

Donde:

$\alpha_0 = \begin{Bmatrix} 0° \text{ para } u < 0 \\ 180° \text{ para } u \geq 0 \end{Bmatrix}$

Dir: Dirección del viento (grados)

U_2: Componente de la velocidad del viento dirección occidente-oriente (m/s)

V_2: Componente de la velocidad del viento dirección norte-sur (m/s)

- Presión Atmosférica: el modelo WRF posee un valor de salida que de forma directa calcula la magnitud de la presión atmosférica sobre un punto de la superficie llamada PSFC. La unidad de medida para la presión que arroja el modelo es el Pascal, por tanto se hace la conversión de los valores a mmHg que es la unidad de medida en que se registran los datos en las estaciones de referencia.

- Precipitación: la precipitación se calcula a partir de dos valores de salida del modelo que representan dos procesos de producción de lluvia: en el primero denominado RAINNC se obtiene los valores de lluvia generados de forma difusa o por procesos no convectivos, en el segundo denominado RAINC se obtiene los valores de lluvia producidos por procesos concentrados o convectivos. La cantidad de lluvia total se logra siguiendo la expresión:

$$PPT_{total} = PPT_{nc} + PPT_c \qquad (10)$$

Donde:

PPT_{total}: Precipitación total (mm)

PPT_{nc}: Fracción de precipitación no convectiva (mm)

PPT_{c}: Fracción de precipitación convectiva (mm)

2.6 Análisis estadístico de series

Tanto a las series de datos de precipitación medidas en superficie como a las series que resultaron del proceso de modelación en WRF se les aplicaron las siguientes medidas estadísticas (Tabla 6):

Tabla 6. Estadísticos Básicos

Operación	Expresión
Media aritmética	$Media(X) = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{N} X_i}{N}$ (11)
Acumulado	$Acumulado = \sum_{i=1}^{n} x_i$ (12)
Desviación Estándar (SD)	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{N}}$ (13)
Varianza	$\sigma^2 = \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{N}$ (14)
Diferencia de medias entre datos observados y simulados (%)	$Dif.media(\%) = \frac{\lvert\bar{x}-\bar{y}\rvert}{\bar{x}} * 100\%$ (15)

Elaboración propia

Con las medidas estadísticas se pretendió encontrar las primeras diferencias entre datos observados y simulados para sacar algunas conclusiones previas sobre el desempeño del modelo, antes de operar una metodología más robusta de comparación como se muestra más adelante.

2.7 Procesos para la evaluación del desempeño del modelo numérico frente a los datos observados

Como medidas de comparación y desempeño de los resultados del modelo numérico frente a los datos observados se utilizaron dos tipos de procesos. En el primer proceso se utilizó una comparación directa de las series para las variables escogidas a través del coeficiente de correlación de Pearson, el RMSE y se resumieron en forma gráfica con un diagrama de Taylor. En el segundo proceso solo intervinieron las series de precipitación ya que se trató esta variable de forma categórica y se realizó la comparación a través de tablas de contingencia como se explica más adelante.

2.7.1 Comparación de series a través coeficientes de relación y eficacia

- **Coeficiente de correlación de Pearson:** El coeficiente de correlación entre dos series de datos, es usado para determinar la relación lineal que existe entre las series comparadas. Este coeficiente se puede hallar mediante la siguiente formula:

$$\rho(X,Y) = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \quad (16)$$

Donde:

x: Es el dato de la serie X en la posición i.

y: Es el dato de la serie Y en la posición i.

$\bar{x}$: Media de la serie X.

$\bar{y}$: Media de la serie Y.

Para el caso de estudio se utilizó para analizar la relación entre las series de datos arrojadas por las con las diferentes configuraciones en el modelo WRF, con las series de variables observadas.

- **Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE):** El RMSE es utilizado para evaluar el desempeño de modelo de pronóstico. Como su nombre lo dice, es la raíz cuadrada del error cuadrático medio, que es una manera de hallar la diferencia de una estimación, con el valor verdadero, es decir, para este caso sería encontrar la diferencia del valor observado, con el dado por el modelo. El error cuadrático medio se calcula como el promedio de los errores al cuadrado:

$$ECM = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2 \qquad (17)$$

Donde:

x_i: Valor observado.

y_i: Valor simulado por el modelo.

n: Numero de datos.

Obtenido el error cuadrático medio, se puede hallar la raíz del error cuadrático medio como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - y_i)^2} \qquad (18)$$

- **Diagrama de Taylor:** Es un diagrama ideado para proporcionar un resumen estadístico conciso al evaluar la coincidencia entre series de datos (vinculando series relacionadas entre sí) en términos de su correlación, su RMSE y la proporción de sus varianzas (Taylor, 2001). Aunque la forma de este diagrama es general, es especialmente útil para evaluar modelos complejos, como los que se usan para estudiar fenómenos geofísicos (Taylor, 2001).

A continuación, se muestra un ejemplo de un diagrama de Taylor donde se comparan los resultados de un modelo para distintas estaciones al simular una serie de tiempo con datos de temperatura.

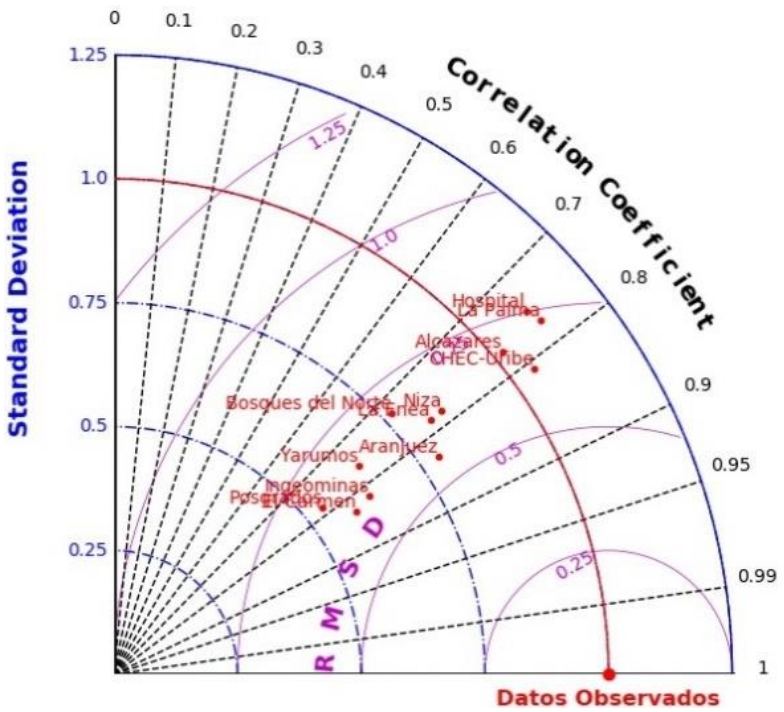


Figura 21. Ejemplo de un Diagrama de Taylor.
Elaboración propia.

En esta representación, el eje X e Y muestran la desviación estándar, la línea roja paralela al límite de la sección de circunferencia determina la referencia de los datos observados, las líneas radiales punteadas determinan los valores de correlación y las líneas curvas en púrpura representan el RMSE. En este ejemplo, los mejores resultados se dieron para la estación CHEC-Uribe. Para este trabajo se utilizó una versión modificada del cálculo de Desviación Estándar, dividiendo la desviación estándar de los datos observados consigo misma y aplicando esto a las desviaciones estándar de los datos simulados, con el fin de que la línea de datos observados se ajuste a la unidad en los ejes coordenados.

2.7.2 Comparación por tablas de contingencia

La precipitación se puede tomar como una variable categórica, es decir, los datos observados y también los resultados del modelo se pueden evaluar en términos de dos estados (hay lluvia – no hay lluvia), esto hace posible complementar la verificación de la calidad que tienen los resultados de una simulación dentro de unos parámetros dados, por

tanto se utilizó la metodología propuesta por (J. F. Ruiz et al., 2013) con una tabla de contingencia de 2x2. Una tabla de contingencia es una herramienta visual, que permite advertir la relación que existe entre dos o más variables categóricas (J. F. Ruiz et al., 2013), siguiendo el esquema que se muestra en la Figura 22:

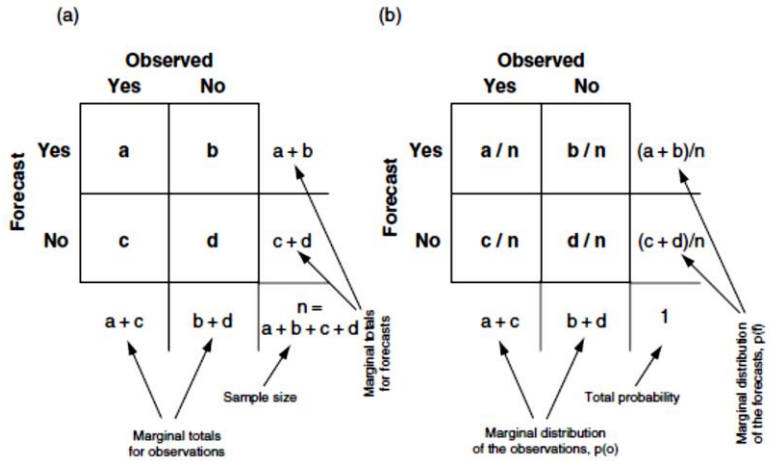


Figura 22. Esquema para la elaboración de las tablas de contingencia.
Tomada de Wilks, 2019.

La gráfica (a) toma en cuenta los datos totales tanto pronosticados como observados, la gráfica (b) se construye en función de la probabilidad de ocurrencia de cada una de las opciones.

En la gráfica (Tal (a)), las letras denotan lo siguiente:

Tabla 7. Significado de los elementos en el esquema de elaboración de tablas de contingencia.

Letra	Concepto
a (Aciertos)	Evento que se pronosticó y ocurrió
b (Falsas Alarmas)	Evento que se pronosticó y no ocurrió
c (Fracasos)	Evento que no se pronosticó y ocurrió
d (No hubo evento - Correcto)	Evento que no se pronosticó y no ocurrió
n (Tamaño de Muestra)	Número total de eventos

Elaboración propia

Con la realización de las tablas de contingencia, se puede calcular índices estadísticos adicionales, como:

- **Sesgo (Bias, B):** Con el sesgo, se calcula la subestimación o sobrestimación del pronóstico. Su cálculo se realiza con la siguiente expresión:

$$BIAS = \frac{Total\ de\ eventos\ pronosticados}{Total\ de\ eventos\ observados}$$

$$Bias = \frac{a+b}{a+c} \tag{19}$$

- **Proporción Correcta (Proportion Correct, PC):** El PC indica la proporción de pronósticos correctos, varía de 0 a 1, donde 0 indica que ningún evento ha sido pronosticado y 1 que todos los eventos han sido pronosticados. Se calcula como sigue:

$$PC = \frac{Eventos\ pronosticados\ correctamente}{Número\ total\ de\ eventos}$$

$$PC = \frac{a+d}{n} \tag{20}$$

- **Tasa de aciertos (HIT RATE, H) o (Probability of Detection, POD):** La tase de aciertos denota la proporción entre eventos que fueron pronosticados y acertaron, y los eventos que fueron observados. Este índice varía entre 0 que indica un mal pronóstico de eventos observados y 1 una eficiencia total en el pronóstico de eventos observados. Su cálculo se realiza con la siguiente expresión:

$$H = POD = \frac{Aciertos}{Número\ total\ de\ eventos\ observados}$$

$$H = POD = \frac{a}{a+c} \tag{21}$$

- **Tasa de Falsas Alarmas (False Alarm Ratio, FAR):** El FAR es una proporción entre eventos que se pronosticaron y no se observaron, no ocurrieron. El FAR contiene valores entre 0 para un buen pronóstico y 1 para un mal pronóstico. Se calcula como sigue:

$$FAR = \frac{Falsas\ Alarmas}{Total\ de\ eventos\ pronosticados}$$

$$FAR = \frac{b}{a+b} \tag{22}$$

- **Índice de Éxito Crítico (Critical Success Index, CSI) o (Threat Score, TS):** El TS combina los valores del Hit Rate y el FAR, en un solo índice que sirve para verificar la capacidad de pronosticar eventos que tienen poca frecuencia. El TS varía entre 0 para un mal pronóstico y 1 para un buen pronóstico. Se calcula como sigue:

$$CSI = \frac{Aciertos}{Aciertos + Falsas\ Alarmas + Fracasos}$$

$$TS = \frac{a}{a+b+c} \tag{23}$$

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1.1 Resultados de simulación fase de LA NIÑA

Como se dijo antes, para la evaluación del desempeño del modelo WRF se buscó una comparación de las series resultado del proceso de modelación con las series de lluvia obtenidas por las diferentes estaciones, en este sentido, la precipitación se tomó como variable principal de comparación y posteriormente se analizó el desempeño de otras variables como temperatura o humedad relativa, teniendo en cuenta el esquema de configuración con mejores resultados. A continuación se muestra de manera gráfica los estadísticos básicos para las diferentes series de datos (Figura 23):

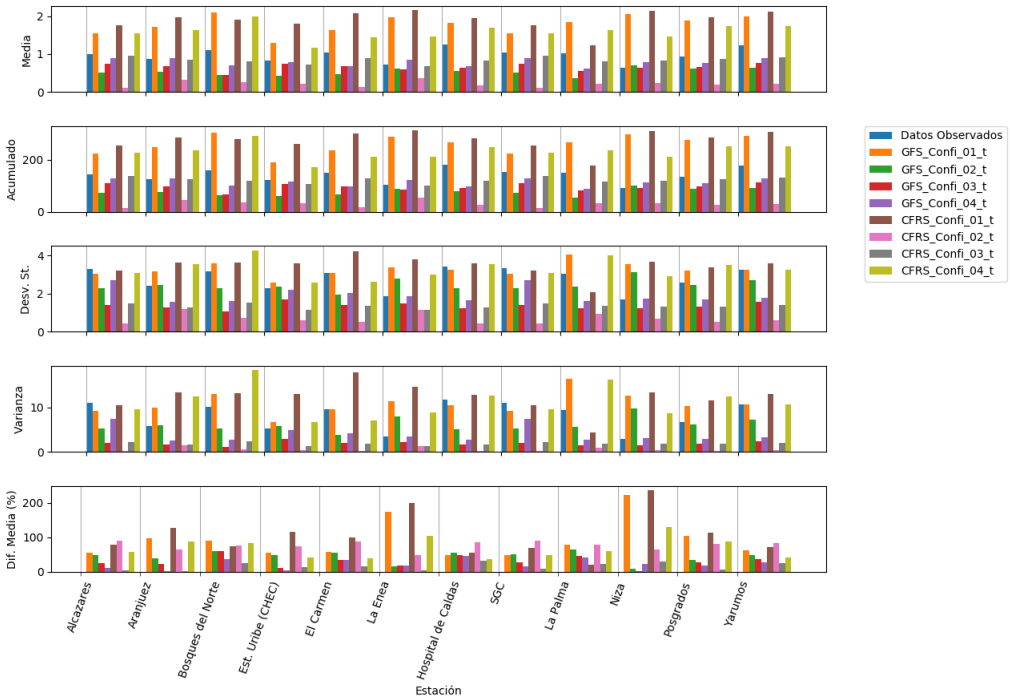
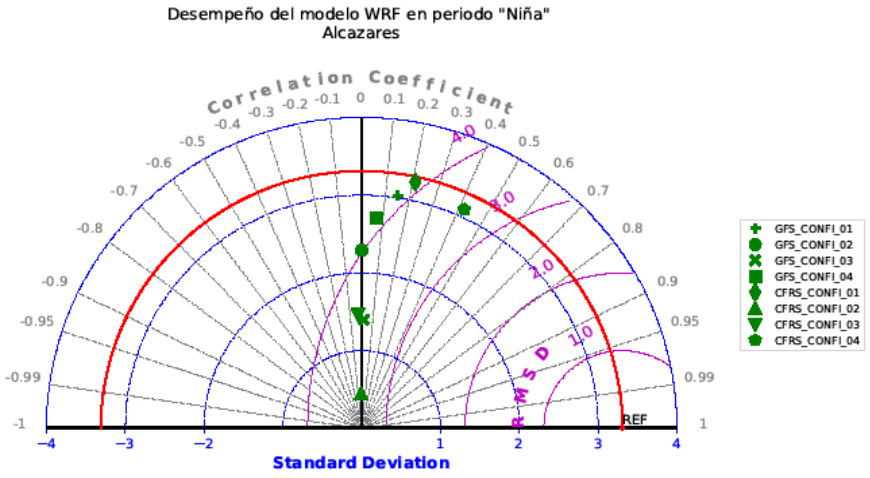


Figura 23. Resumen de estadísticos básicos. Fase La Niña - ENOS.
Elaboración propia

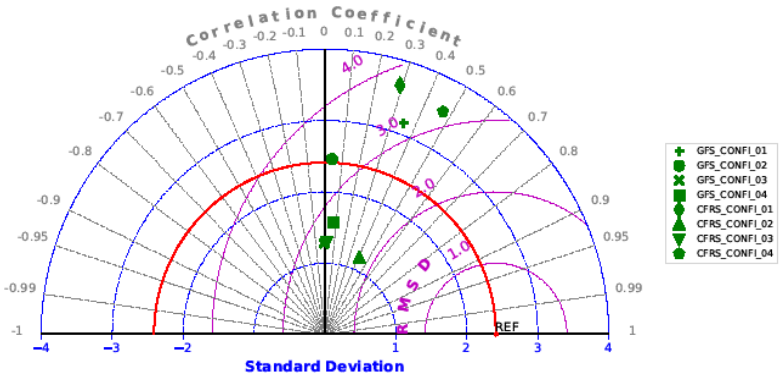
En el espacio de la media y el acumulado se puede encontrar que hay configuraciones donde la precipitación se sobreestima a lo largo del periodo de análisis como son GFS_confi_01_t, CFRS_confi_01_t y CFRS_confi_04_t. Por otro lado la configuración que más subestima la lluvia en general para este periodo es la CFRS_confi_02_t la cual presenta la media más baja. Las demás configuraciones tratan de seguir las cantidades de lluvia de los datos observados encontrando que CFRS_confi_03_t es la configuración más cercana en términos de cantidad de lluvia. Con respecto a las medidas de dispersión con respecto a la media, las configuraciones GFS_confi_01_t y CFRS_confi_04_t son las que más se acercan a los datos medidos en superficie sobre todo en la medida de desviación estandarizada.

A continuación se muestra el desempeño del modelo para el período de simulación en las diferentes estaciones a través de forma gráfica:

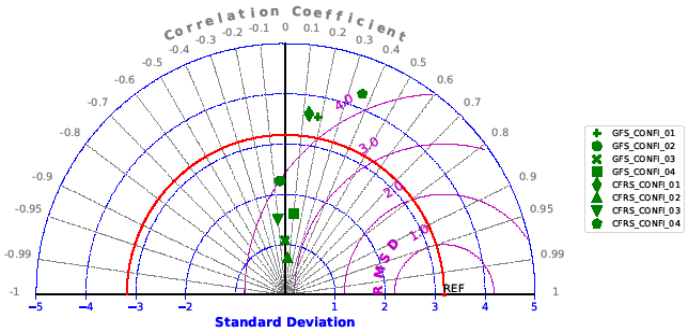
Figura 24. Desempeño de las diferentes configuraciones para las estaciones de referencia. Fase La Niña - ENOS. Elaboración propia.



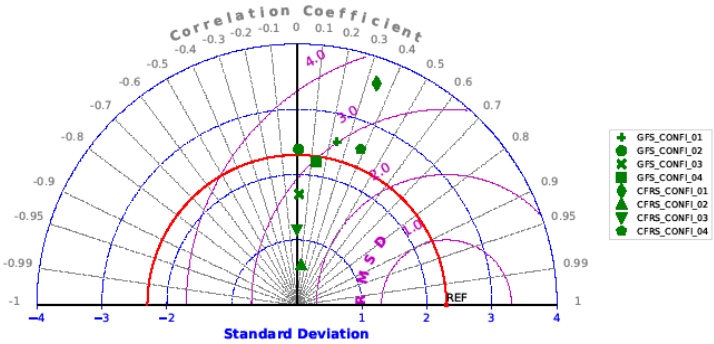
Desempeño del modelo WRF en periodo "Niña"
Aranjuez



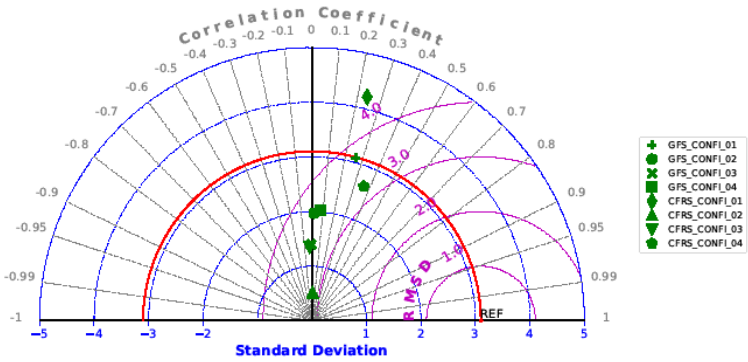
Desempeño del modelo WRF en periodo "Niña"
Bosques del Norte



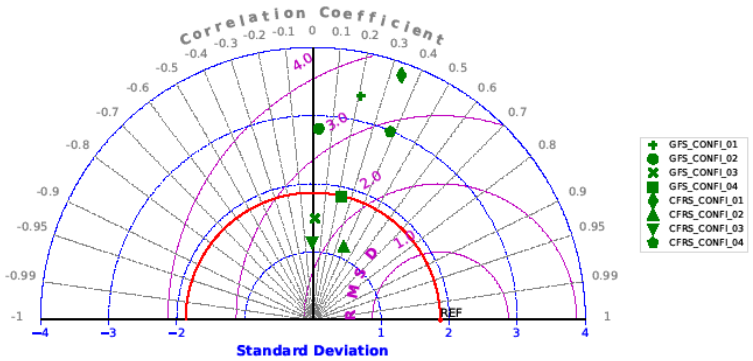
Desempeño del modelo WRF en periodo "Niña"
Est. Uribe (CHEC)



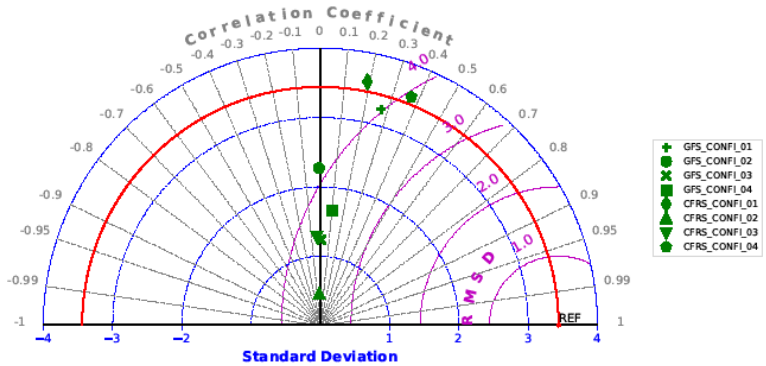
Desempeño del modelo WRF en periodo "Niña"
El Carmen



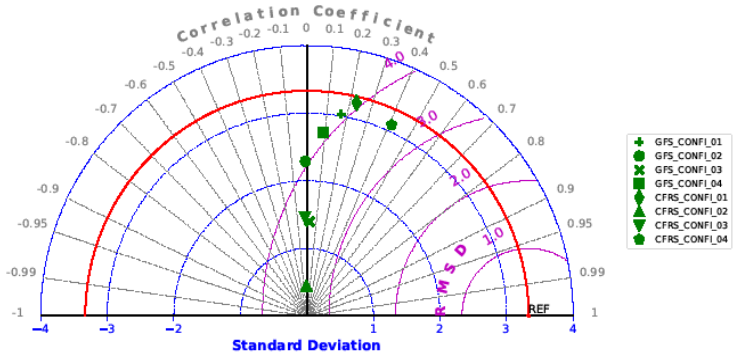
Desempeño del modelo WRF en periodo "Niña"
La Enea



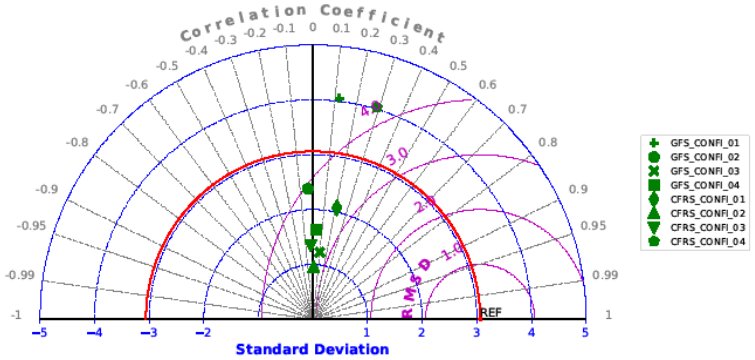
Desempeño del modelo WRF en periodo "Niña"
Hospital

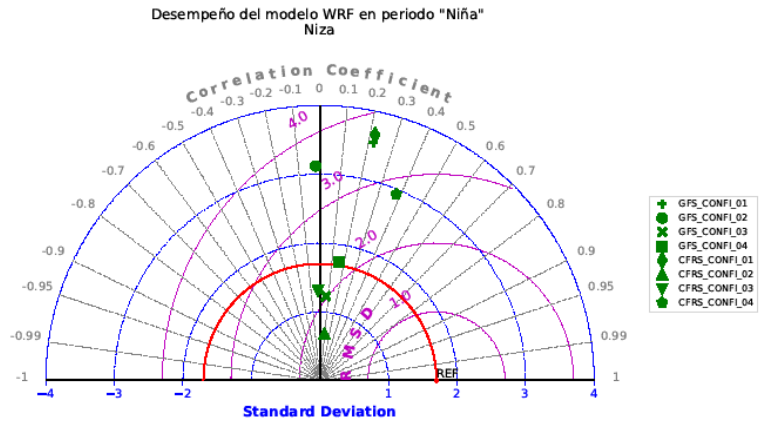


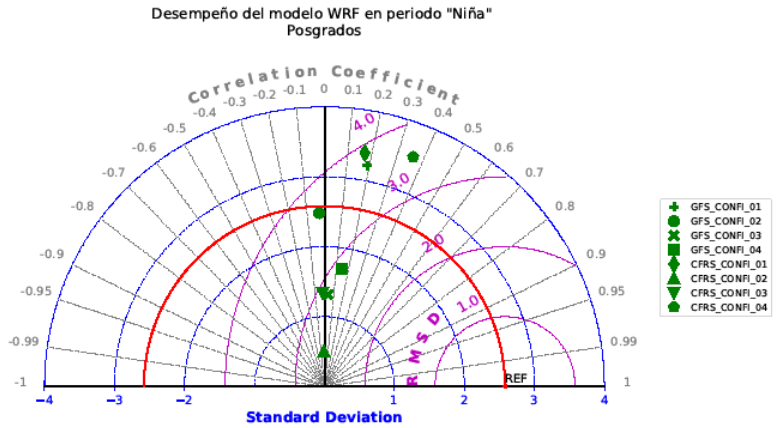
Desempeño del modelo WRF en periodo "Niña"
SGC

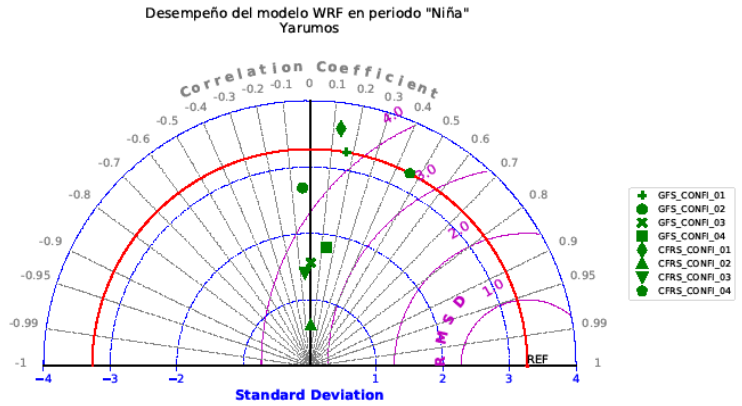


Desempeño del modelo WRF en periodo "Niña"
La Palma









Los diagramas de Taylor revelan que los coeficientes de correlación que presentan las diferentes configuraciones no superan el valor de 0.5, esto se debe a que el modelo aun presenta fallas en la representación de la topografía, que para el caso de Manizales es bastante compleja e influye en la formación de nubes de lluvia orogénica debido a la retención de la humedad que se produce en el valle del río Cauca y el océano Pacífico.

Para este caso la configuración con mejor correlación es la denominada CFRS_Confi_04_t que presenta valores entre 0.4 y 0.45 para la mayoría de estaciones. Estos valores de

correlación son aceptables para las condiciones en que se presenta este ejercicio. Además la descripción del comportamiento y dinámica de la precipitación a través de modelos numéricos presenta una gran complejidad a priori.

Hay que mencionar que los datos simulados presentan una mayor desviación que los datos observados. Esta desviación se puede explicar por la resolución con la que se trabajó el modelo de 1 x 1 km en la horizontal. Con resoluciones como esta es de esperar que los datos simulados muestren rangos de dispersión más altos que los datos observados, adicionalmente en este ejercicio se hace una comparación de un resultado puntual representado por los datos de una estación y un resultado de área que posteriormente se vuelve puntual a través de un ejercicio de interpolación.

El RMSE, en los diferentes diagramas de Taylor, revela que en general el ajuste de los datos simulados presenta diferencias con los datos observados, pero se puede observar que las configuraciones que utilizan el modelo GFS tienen un desempeño más pobre que aquellas que utilizan el modelo CFRS.

En términos de la suma acumulada de datos de precipitación, se nota una clara tendencia del modelo a sobreestimar esta variable. Esto puede explicarse por el intervalo de tiempo en que se leen los datos de entrada que es de 6 horas para llegar a una conversión de 1 hora.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se puede observar que la estructura de configuración CFRS_Confi_04_t, es la más adecuada para las condiciones de clima observadas, por tanto, se realizó una observación más específica sobre esta configuración, determinando su comportamiento en otras variables atmosféricas como la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del viento y la presión atmosférica. A continuación se muestran los diagramas de Taylor, que relacionan la correlación, la desviación estándar y el error cuadrático de las series simuladas con las observadas en las diferentes estaciones:

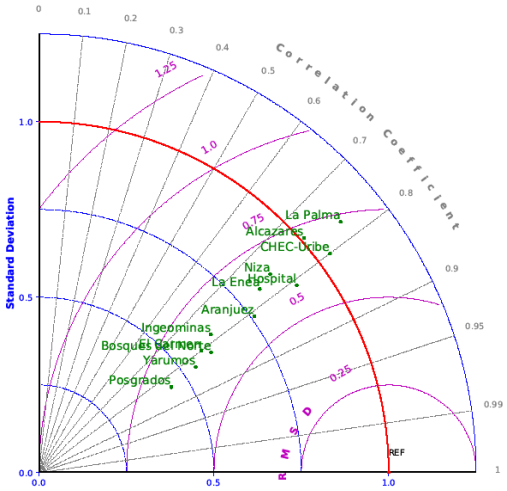


Figura 25. Desempeño de la temperatura simulada para las estaciones de referencia. Fase La Niña – ENOS.
Elaboración propia.

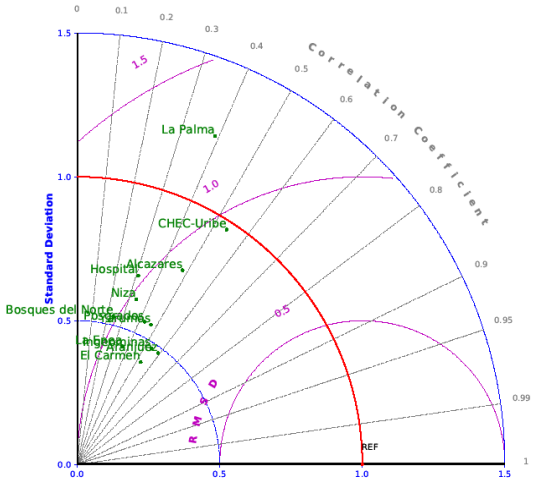


Figura 26. Desempeño de la Humedad Relativa para las estaciones de referencia. Fase La Niña - ENOS.
Elaboración propia.

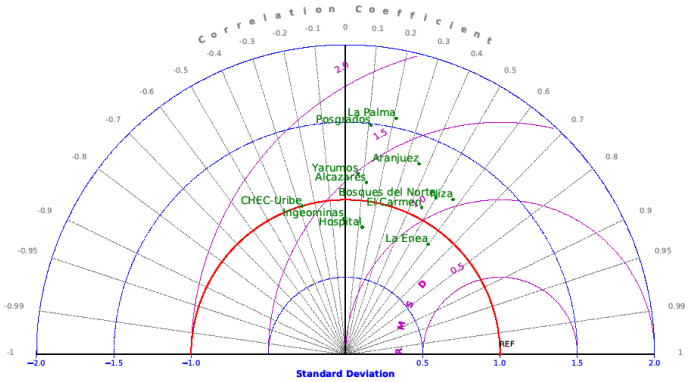


Figura 27. Desempeño de la Velocidad del Viento simulada para las estaciones de referencia. Fase La Niña - ENOS.
Elaboración propia.

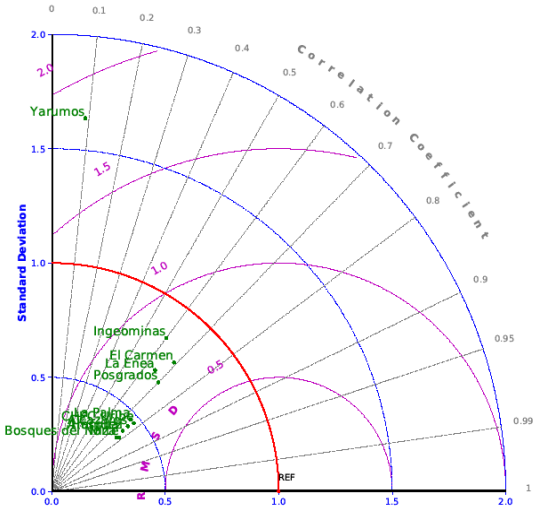


Figura 28. Desempeño de la Presión Atmosférica en las estaciones de referencia.
Fase La Niña - ENOS.
Elaboración propia.

Los diagramas de Taylor muestran, que para las otras variables simuladas, el modelo tuvo un comportamiento variado, en el caso de la temperatura, se registra muy buena correlación en los datos observados en todas las estaciones con valores entre 0.7 y 0.8, pero el RMSE revela que pueden haber errores de entre 1 y 1.5 °C para el campo de datos simulados, lo que es significativo frente a los datos observados. La humedad relativa, es una variable compleja de analizar, ya que el modelo amplifica los efectos de la radiación solar sobre la evaporación de agua, en este caso las correlaciones entre las series están entre el 0.4 y 0.5, pero el RMSE muestra que se pueden registrar errores de entre 7 a 9% de los datos simulados comparados con los observados, teniendo en cuenta que en la zona de estudio se registran valores altos de humedad, lo que supone, al igual que la lluvia, un efecto de sobredimensión.

La velocidad del viento no presenta un buen ajuste y esto se debe a las condiciones focalizadas en las que se hace la medición frente al nivel de resolución del modelo, que es de 1x1 km en tamaño de celda, lo que hace realmente difícil comparar de manera efectiva los resultados, hay que mencionar que las condiciones del viento se ven influenciadas por la temperatura, la presión atmosférica y la forma del terreno circundante al punto de medición, es decir, la infraestructura puede afectar la dirección del viento, creando rutas

preferenciales al flujo y este efecto puede ser similar con las arboledas, el relieve, entre otros.

Finalmente la presión atmosférica, al ser una variable que depende de la elevación del terreno, se convierte al igual que la velocidad del viento, en una variable compleja de modelar correctamente, debido a las condiciones topográficas de la zona analizada y a la baja resolución que tiene el modelo de elevación del terreno de entrada al WRF.

3.1.2 Análisis categórico

- **Proporción Correcta (PC)**

Tabla 8. Resultados para el indicador PC. Fase La Niña – ENOS.

Estaciones	Configuración							
	GFS_confi_01_t	GFS_confi_02_t	GFS_confi_03_t	GFS_confi_04_t	CFRS_confi_01_t	CFRS_confi_02_t	CFRS_confi_03_t	CFRS_confi_04_t
Alcázares	62.76%	65.52%	51.03%	48.28%	60.69%	62.76%	45.52%	54.48%
Aranjuez	65.52%	64.14%	53.79%	51.72%	62.76%	68.97%	46.21%	63.45%
Bosques del Norte	61.38%	60.69%	46.21%	53.10%	66.21%	61.38%	37.93%	58.62%
Est. Uribe (CHEC)	68.28%	69.66%	55.17%	53.79%	64.14%	66.90%	46.90%	61.38%
El Carmen	67.59%	66.21%	54.48%	51.03%	60.69%	64.14%	46.21%	56.55%
Enea	60.00%	62.76%	56.55%	60.69%	62.07%	67.59%	45.52%	66.21%
Hospital Caldas	65.52%	62.07%	51.72%	56.55%	64.14%	64.14%	46.21%	62.07%
SGC	62.07%	66.21%	50.34%	51.72%	60.00%	67.59%	44.83%	53.79%
La Palma	62.76%	61.38%	47.59%	61.38%	64.14%	64.14%	40.69%	68.28%
Niza	62.76%	61.38%	57.93%	51.03%	65.52%	64.83%	48.97%	64.83%
Posgrados	63.45%	64.83%	60.00%	58.62%	64.83%	68.28%	48.97%	64.14%
Yarumos	60.69%	61.38%	56.55%	51.03%	62.07%	64.83%	43.45%	61.38%
Promedio	**63.56%**	**63.85%**	**53.45%**	**54.08%**	**63.10%**	**65.46%**	**45.11%**	**61.26%**

Elaboración propia

Para este estadístico se puede observar en la Tabla 8 que para las configuraciones corridas bajo condiciones iniciales del GFS las configuraciones GFS_Confi_01_t y GFS_Confi_02_t presentan una cierta estabilidad entre todas las estaciones manteniendo un 64% como valor promedio, mientras las configuraciones GFS_Confi_03_t y GFS_Confi_04_t presentan un desempeño más bajo obteniendo valores promedio del 53% y 54% respectivamente. Para las condiciones basadas en el modelo CFS, hay entre tres esquemas de configuración como son CFRS_Confi_01_t, CFRS_Confi_02_t y CFRS_Confi_04_t con valores promedios entre el 61% y el 65%, para la configuración CFRS_Confi_03_t encontramos el

desempeño más bajo de todas las configuraciones con 45% de probabilidad de obtener un pronóstico de precipitación o tiempo seco correcto.

- **Tasa de Aciertos (H)**

Tabla 9. Resultados para el indicador H. Fase La Niña – ENOS.

Estaciones	Configuración							
	GFS_confi_01_t	GFS_confi_02_t	GFS_confi_03_t	GFS_confi_04_t	CFRS_confi_01_t	CFRS_confi_02_t	CFRS_confi_03_t	CFRS_confi_04_t
Alcazares	73.58%	20.75%	33.96%	32.08%	73.58%	20.75%	37.74%	60.38%
Aranjuez	82.00%	20.00%	38.00%	52.00%	80.00%	42.00%	34.00%	78.00%
Bosques del Norte	81.13%	13.21%	22.64%	43.40%	84.91%	30.19%	22.64%	69.81%
Est. Uribe (CHEC)	80.85%	21.28%	34.04%	34.04%	80.85%	29.79%	31.91%	61.70%
El Carmen	83.67%	22.45%	40.82%	36.73%	77.55%	26.53%	36.73%	67.35%
Enea	80.00%	16.00%	40.00%	58.00%	82.00%	38.00%	34.00%	76.00%
Hospital Caldas	80.00%	18.18%	43.64%	47.27%	80.00%	30.91%	32.73%	72.73%
SGC	73.08%	21.15%	32.69%	36.54%	73.08%	26.92%	36.54%	59.62%
La Palma	72.22%	11.11%	18.52%	44.44%	68.52%	20.37%	25.93%	66.67%
Niza	77.78%	16.67%	50.00%	50.00%	83.33%	37.04%	35.19%	75.93%
Posgrados	83.67%	18.37%	48.98%	59.18%	85.71%	36.73%	32.65%	77.55%
Yarumos	77.36%	15.09%	45.28%	56.60%	81.13%	32.08%	28.30%	71.70%
Promedio	**78.78%**	**17.86%**	**37.38%**	**45.86%**	**79.22%**	**30.94%**	**32.36%**	**69.79%**

Elaboración propia

La tasa de aciertos muestra una relación porcentual al igual que la proporción correcta, pero en este caso tiene en cuenta los eventos con lluvia que fueron o no pronosticados por el modelo. En la Tabla 9 se puede observar que para las configuraciones que utilizaron como base el modelo GFS hay una clara disparidad. Para el GFS_Confi_01_t encontramos una tasa de aciertos del 79% en promedio para todas las estaciones de referencia, en cambio la configuración GFS_Confi_02_t muestra una tasa de aciertos del 18% en promedio, mostrando una clara ventaja en la captura de eventos con lluvia. En los casos GFS_Confi_03_t y GFS_Confi_04_t encontramos valores bajos de un 37% y un 46% en promedio respectivamente. Con respecto a las configuraciones bajo CFS encontramos un comportamiento más marcado entre pares de configuraciones, se observa que las configuraciones CFRS_Confi_01_t y CFRS_Confi_04_t poseen tasas de acierto del 79% en el primero y 70% en el segundo, mientras en las denominadas CFRS_Confi_02_t y CFRS_Confi_03_t encontramos tasas de acierto del 31% y 32%, mostrando que estas configuraciones tienden a generar errores de pronóstico en los eventos de lluvia.

- **Falsas Alarmas (FAR)**

Tabla 10. Resultados para el indicador FAR. Fase La Niña – ENOS.

Estaciones	Configuración							
	GFS_confi_01_t	GFS_confi_02_t	GFS_confi_03_t	GFS_confi_04_t	CFRS_confi_01_t	CFRS_confi_02_t	CFRS_confi_03_t	CFRS_confi_04_t
Alcazares	50.63%	42.11%	66.67%	69.64%	52.44%	52.17%	69.70%	58.44%
Aranjuez	50.00%	54.55%	65.45%	63.89%	52.38%	43.24%	72.58%	51.85%
Bosques del Norte	51.69%	61.11%	75.51%	62.30%	47.67%	54.29%	80.33%	54.32%
Est. Uribe (CHEC)	49.33%	41.18%	68.00%	69.23%	53.09%	51.72%	75.00%	56.72%
El Carmen	48.75%	50.00%	64.91%	68.97%	54.76%	55.17%	72.31%	58.75%
Enea	54.55%	60.00%	62.26%	55.38%	52.87%	45.71%	73.02%	49.33%
Hospital Caldas	46.99%	50.00%	61.90%	56.67%	48.24%	45.16%	69.49%	50.00%
SGC	51.90%	42.11%	68.52%	66.07%	53.66%	39.13%	71.21%	59.74%
La Palma	50.00%	57.14%	76.19%	52.00%	48.61%	45.00%	76.67%	43.75%
Niza	50.00%	55.00%	55.74%	61.97%	47.67%	45.95%	67.24%	48.10%
Posgrados	52.33%	55.00%	57.89%	57.97%	51.16%	45.45%	71.93%	51.90%
Yarumos	52.33%	57.89%	58.62%	61.54%	51.14%	46.88%	74.58%	51.90%
Promedio	**50.71%**	**52.17%**	**65.14%**	**62.14%**	**51.14%**	**47.49%**	**72.84%**	**52.90%**

Elaboración propia

Los valores de falsas alarmas muestran la probabilidad de que el modelo pronostique lluvia y no se dé el evento en la realidad, en este sentido, las configuraciones bajo GFS muestran un comportamiento inverso al visto con el proporción correcta (PC), las configuraciones con el PC más alto tienen la probabilidad de generar valores de FAR en proporción más bajos, se observa que GFS_Confi_01_t y GFS_Confi_02_t presentan valores de 51% y 52% respectivamente mientras GFS_Confi_03_t y GFS_Confi_04_t muestran valores de 38% y 41% en promedio en todas las estaciones observadas, dentro de esta perspectiva los porcentajes de falsas alarmas son altos debido a la sobreestimación que tiene el modelo de la lluvia, esto ya se evidencio en el análisis cuantitativo por el RMSE y el porcentaje de error en la media en el periodo de simulación. Con los casos basados en el modelo CFS encontramos que tres de ellos presentan valores de falsas alarmas cercanos como son CFRS_Confi_01_t, CFRS_Confi_02_t y CFRS_Confi_04_t con valores de 51%, 47% y 53% en su orden y la configuración con peor desempeño fue CFRS_Confi_03_t con un porcentaje de falsas alarmas del 73%.

- **Índice de Éxito Crítico (CSI)**

Tabla 11. Resultados para el indicador CSI. Fase La Niña – ENOS.

Estaciones	Configuración							
	GFS_confi_01_t	GFS_confi_02_t	GFS_confi_03_t	GFS_confi_04_t	CFRS_confi_01_t	CFRS_confi_02_t	CFRS_confi_03_t	CFRS_confi_04_t
Alcazares	41.94%	18.03%	20.22%	18.48%	40.63%	16.92%	20.20%	32.65%
Aranjuez	45.05%	16.13%	22.09%	27.08%	42.55%	31.82%	17.89%	42.39%
Bosques del Norte	43.43%	10.94%	13.33%	25.27%	47.87%	22.22%	11.76%	38.14%
Est. Uribe (CHEC)	45.24%	18.52%	19.75%	19.28%	42.22%	22.58%	16.30%	34.12%
El Carmen	46.59%	18.33%	23.26%	20.22%	40.00%	20.00%	18.75%	34.38%
Enea	40.82%	12.90%	24.10%	33.72%	42.71%	28.79%	17.71%	43.68%
Hospital Caldas	46.81%	15.38%	25.53%	29.21%	45.83%	24.64%	18.75%	42.11%
SGC	40.86%	18.33%	19.10%	21.35%	39.58%	22.95%	19.19%	31.63%
La Palma	41.94%	9.68%	11.63%	30.00%	41.57%	17.46%	14.00%	43.90%
Niza	43.75%	13.85%	30.68%	27.55%	47.37%	28.17%	20.43%	44.57%
Posgrados	43.62%	15.00%	29.27%	32.58%	45.16%	28.13%	17.78%	42.22%
Yarumos	41.84%	12.50%	27.59%	29.70%	43.88%	25.00%	15.46%	40.43%
Promedio	**43.49%**	**14.97%**	**22.21%**	**26.20%**	**43.28%**	**24.06%**	**17.35%**	**39.18%**

Elaboración propia

Este estadístico al combinar los aciertos, las falsas alarmas y los fracasos permite determinar la habilidad del modelo en detectar eventos aislados. En las configuraciones bajo GFS se encontró que el caso GFS_Confi_01_t es el que mejor desempeño tiene en este tipo de pronósticos con una media del 43%, después le siguen GFS_Confi_04_t con 41% y GFS_Confi_03_t con 38% para finalizar con el GFS_Confi_02_t como la configuración con peor desempeño con un 11% en la detección de eventos aislados. Por el lado de los casos bajo el modelo CFS se encontró que el caso CFRS_Confi_01_t con 43% y el caso CFRS_Confi_04_t con un 39%, son los que mejor desempeño presentan, mientras CFRS_Confi_02_t con un 24% y CFRS_Confi_03_t con un 17% son las configuraciones con valores más bajos en este índice. Hay que señalar que todos los pronósticos están por debajo del 50% lo que muestra un bajo desempeño del modelo en la captura de eventos aislados de lluvia que son recurrentes en la ciudad y que son determinantes en el proceso para lograr pronósticos completos.

3.1.3 Resultados de simulación periodo fase de EL NIÑO

Para el periodo El Niño se tienen menos estaciones con registros para poder comparar con los resultados del modelo. Otra observación que se debe hacer, es que en general fue un periodo seco lo que determino series con muchos valores cero en la magnitud de la lluvia,

lo cual afecta los análisis a nivel estadístico como se muestra de manera gráfica a continuación (Figura 29):

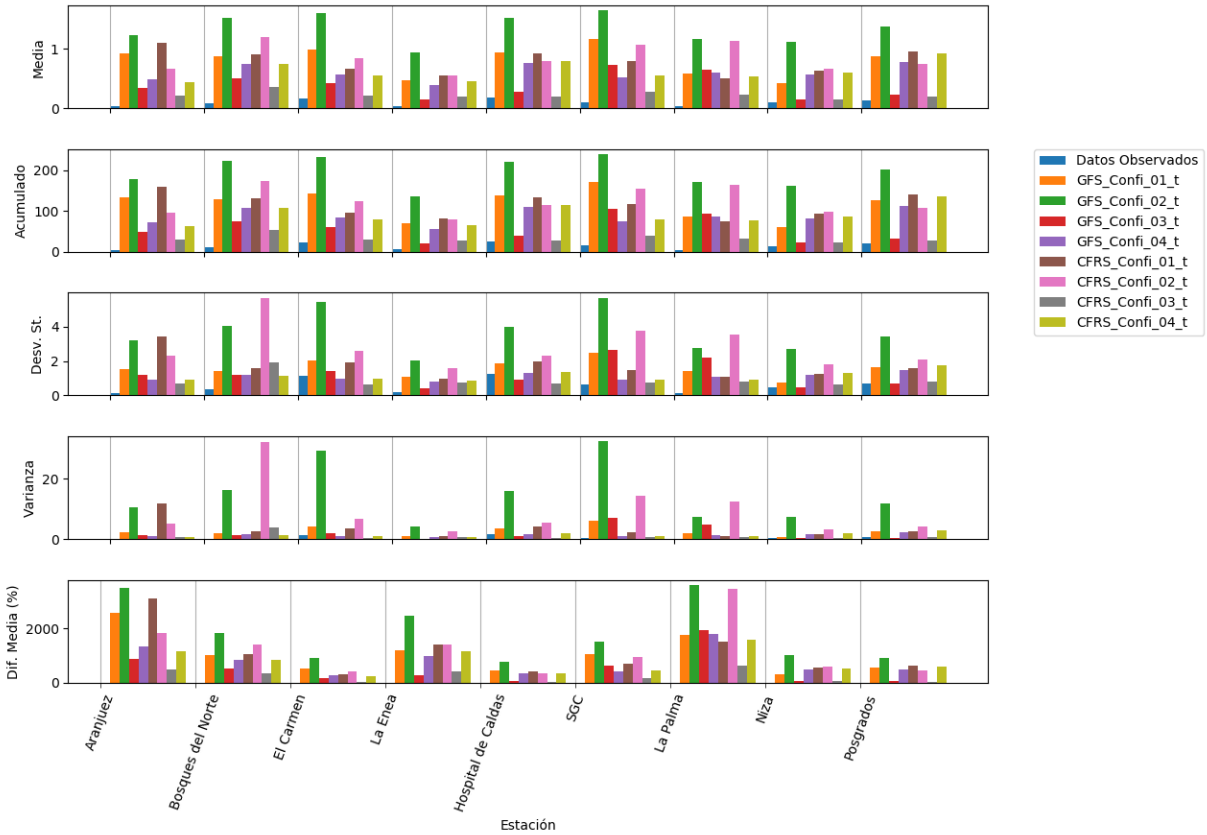


Figura 29. Resumen de estadísticos básicos. Fase El Niño - ENOS. Elaboración propia

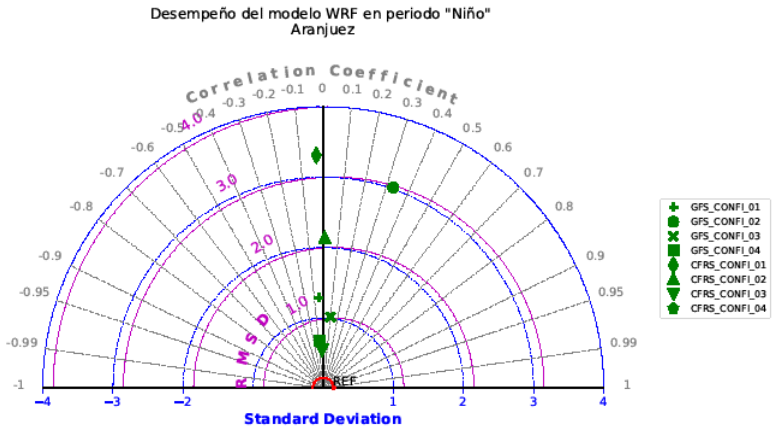
Conforme a la información de la gráfica, la mayoría de las configuraciones muestran una sobreestimación de la lluvia lo cual se puede ver reflejado en los campos de la media y el acumulado. En este caso, las configuraciones GFS_Confi_03_t y CFRS_Confi_03_t son las que más se acercan en términos de cantidad a las magnitudes registradas por las estaciones en superficie. En las medidas de dispersión se observa que las configuraciones GFS_Confi_02_t y CFRS_Confi_02_t son las que tienen mayor dispersión de sus datos con respecto a la media con tasas mayores a 4 desviaciones para algunas estaciones, en las demás configuraciones encontramos un comportamiento más cercano a los datos reales. La diferencia de medias presenta resultados heterogéneos entre las diferentes configuraciones y para cada esquema de configuración el comportamiento entre estaciones también se presenta desigual.

En este análisis, como se mostró para La Niña se evalúa la diferencia de medias en términos de porcentaje, para este caso se están encontrando valores por encima del 1000% para la mayoría de configuraciones, hecho que es relevante para mostrar la sobreestimación que hace el modelo de la lluvia, pero se pueden encontrar algunos matices ya que hay estaciones donde se está presentando más sobreestimación que en otras como son: Aranjuez, Bosques del Norte, La Enea y SGC (Servicio Geológico Colombiano), cuyos porcentajes son los más altos entre todas las estaciones de referencia, en este sentido podemos encontrar una explicación en la propia resolución sobre la cual está planteado el modelo y la incapacidad de representar todos los detalles de la topografía de la ciudad.

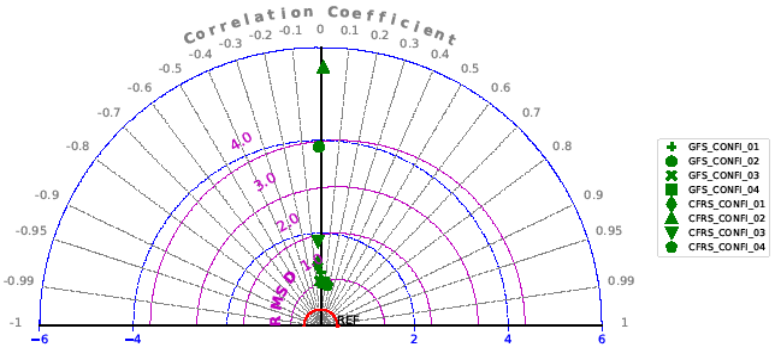
Hay que destacar, que de nuevo la configuración CFRS_Confi_03_t es la de mejor comportamiento y se distancia de las demás en sus porcentajes ya que presenta valores hasta por debajo del 50% sin dejar de lado el comportamiento de sobreestimación que presentan todas las configuraciones sobre las estaciones ya mencionadas, con valores muy inferiores del orden de 200% a 300% por debajo de las demás.

A continuación se muestra el desempeño del modelo para el período de simulación en las diferentes estaciones:

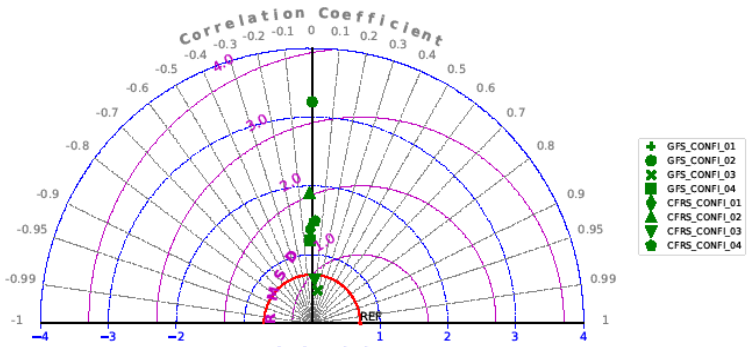
Figura 30. Desempeño de las diferentes configuraciones para las estaciones de referencia. Fase El Niño - ENOS. Elaboración propia.



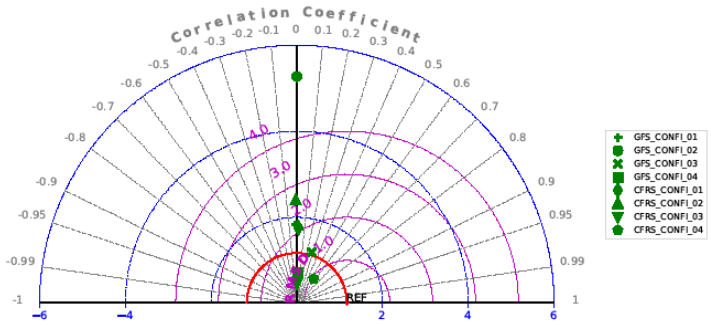
Desempeño del modelo WRF en periodo "Niño"
Bosques del Norte



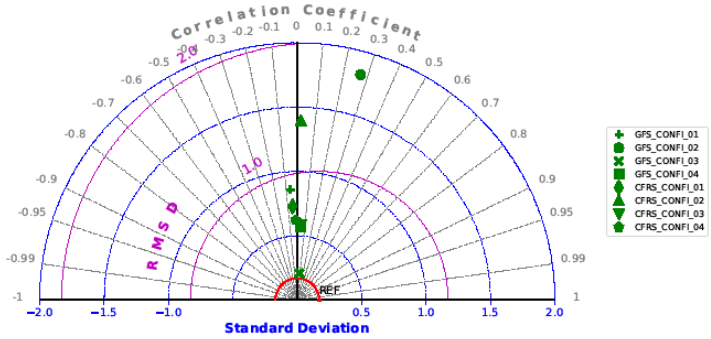
Desempeño del modelo WRF en periodo "Niño"
Posgrados



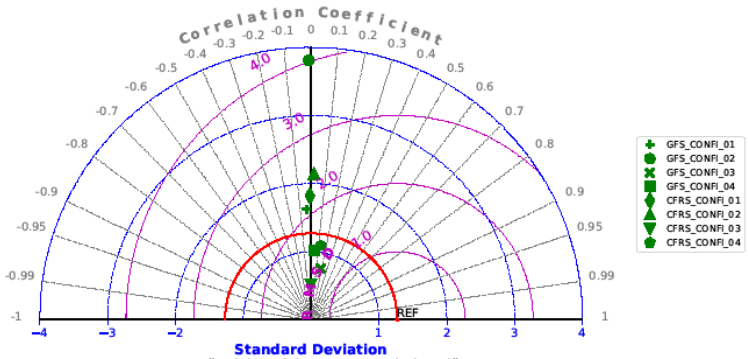
Desempeño del modelo WRF en periodo "Niño"
El Carmen



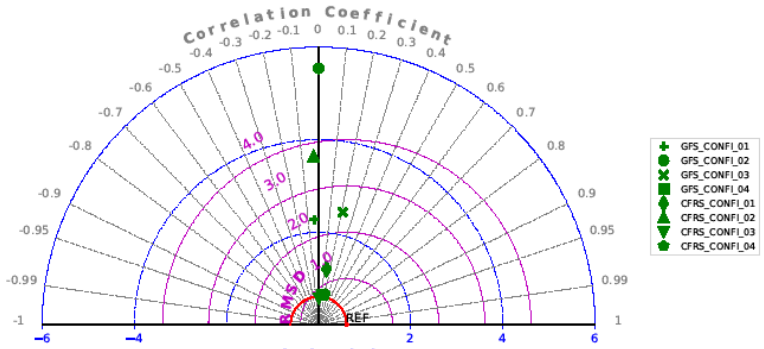
Desempeño del modelo WRF en periodo "Niño"
La Enea



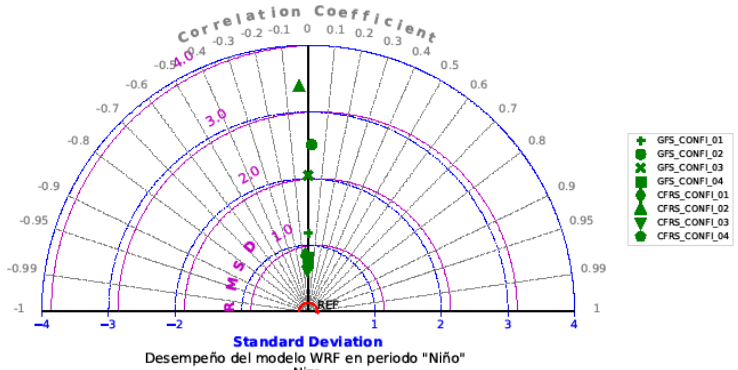
Desempeño del modelo WRF en periodo "Niño"
Hospital



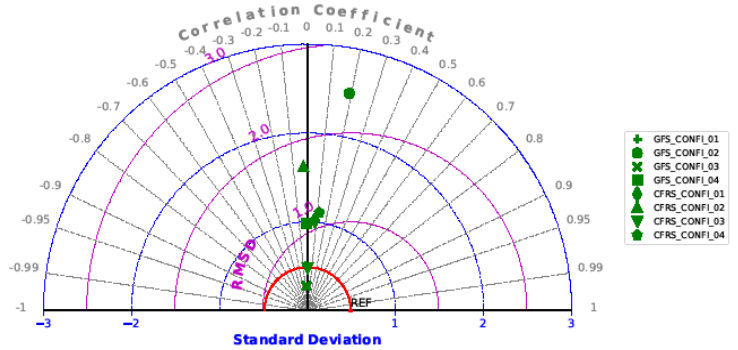
Desempeño del modelo WRF en periodo "Niño"
SGC



Desempeño del modelo WRF en periodo "Niño"
La Palma



Desempeño del modelo WRF en periodo "Niño"
Niza



En términos de correlación para este periodo se encuentran importantes diferencias con el anterior. En algunas configuraciones como GFS_Confi_01_t y CFRS_Confi_01_t se observan correlaciones negativas y en algunas estaciones no se logra superar el valor de 0.1, esto se debe a la cantidad de ceros que muestran las series observadas y a la tendencia que tiene el modelo de sobreestimar la lluvia. Las otras configuraciones muestran correlaciones muy bajas, pero dentro de ellas la que mejor desempeño tiene es GFS_Confi_03_t la cual presenta valores entre 0.22 y 0.29 para cuatro de las estaciones tomadas como referencia.

En los valores de desviación se encuentra que en las series observadas son cercanos a cero, encontrando un máximo de 1.27 mm en la estación Hospital de Caldas, que fue la estación donde se reportó la lluvia máxima para el periodo estudiado, en cuanto a las otras estaciones, en la mayoria de configuraciones encontramos desviaciones entre de 1.5 y 2.5 mm en promedio, salvo la configuración GFS_Confi_02_t que muestra desviaciones por encima de los 5.0 mm que es la de peor desempeño en este estadístico. La configuración CFRS_Confi_03_t es la que se acerca a los valores de desviación que presentan los datos observados.

En términos del RMSE, se encuentra que las configuraciones utilizadas en este trabajo presentan valores de entre 1.5 y 2.0 mm, que para el periodo seco es un estadístico que refleja la sobreestimación en las magnitudes de la lluvia simulada. En este caso, de nuevo la configuración CFRS_Confi_03_t es la que muestra el mejor comportamiento, con un RMSE en promedio de 1.07 mm con valores en seis de las estaciones de referencia por debajo de 1.0 mm.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se puede observar que la estructura de configuración CFRS_Confi_03_t, es la más adecuada para las condiciones de clima observadas, por tanto, se realizó una observación más específica utilizando esta configuración determinando su comportamiento en otras variables del clima como la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del viento y la presión atmosférica. A continuación se muestran los diagramas de Taylor, que relacionan la correlación, la desviación estándar y el error cuadrático de las series simuladas con las observadas en las diferentes estaciones (Figura 31, Figura 32, Figura 33 y Figura 34):

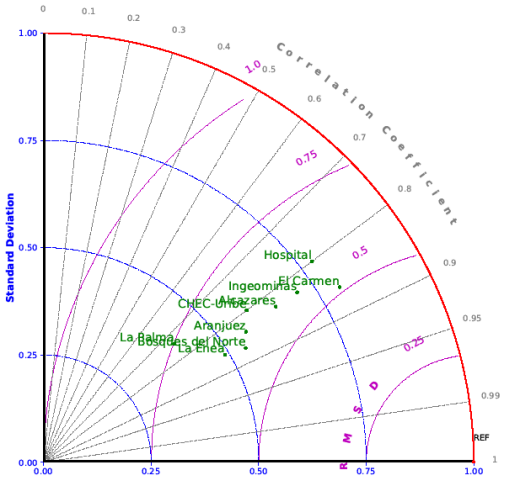


Figura 31. Desempeño de la temperatura simulada para las estaciones de referencia. Fase El Niño – ENOS. Elaboración propia.

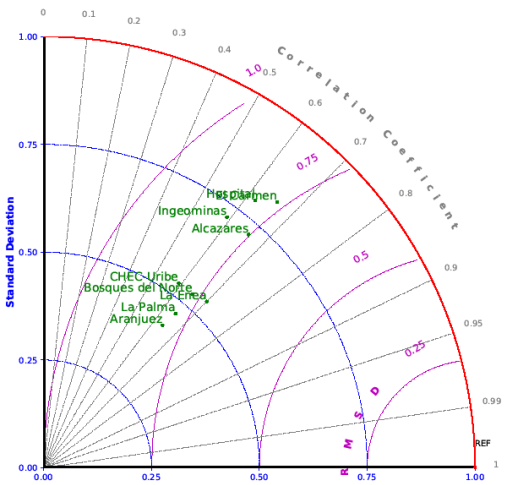


Figura 32. Desempeño de la Humedad Relativa para las estaciones de referencia. Fase El Niño - ENOS. Elaboración propia.

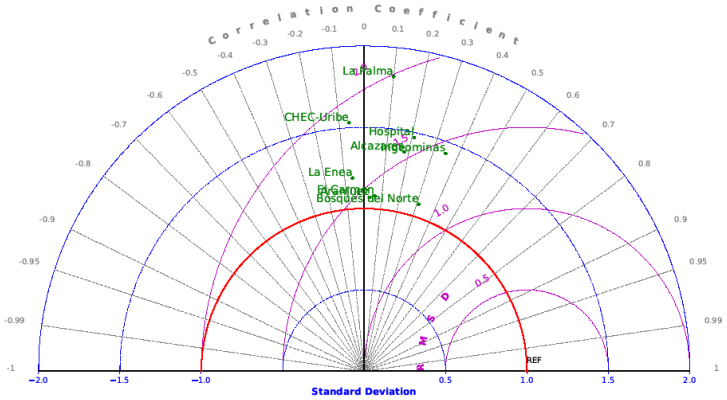


Figura 33. Desempeño de la Velocidad del Viento simulada para las estaciones de referencia. Fase El Niño - ENOS. Elaboración propia.

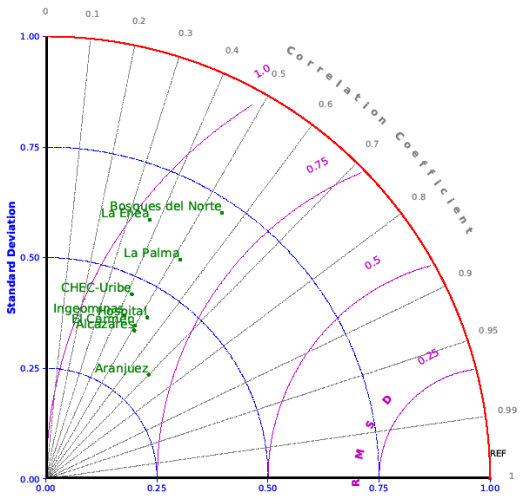


Figura 34. Desempeño de la Presión Atmosférica en las estaciones de referencia.
Fase El Niño - ENOS.
Elaboración propia.

Para la temperatura encontramos valores de correlación por encima del 80% de los datos simulados con respecto a los observados, lo que muestra un comportamiento diferente al de la lluvia. Los datos simulados presentan una dispersión de entre 1.5 y 2.0 °C con respecto a la media, mientras los datos observados muestran valores entre 2.6 y 4.0 °C, en este sentido, el modelo parece mantener una cierta estabilidad en el reporte de la temperatura mientras en la realidad esta variable es mucho más cambiante. En cuanto al RMSE encontramos un valor medio de error de 1.87 °C con un máximo de 3.01 °C en la estación Posgrados, lo que sigue mostrando la tendencia de la fase La Niña en sobredimensionar esta variable.

La humedad relativa en este periodo seco muestra una mejor correlación frente a los datos del periodo con más lluvia, aquí se puede observar que las series simuladas alcanzan valores de correlación del 60% en promedio. En la dispersión de los datos encontramos que los simulados poseen una menor variabilidad con respecto a la media que los observados, para los primeros encontramos valores de entre 6% y 9% de dispersión mientras en los segundos tenemos valores de entre 10% y 15% llegando a picos hasta de 17%, para el RMSE encontramos valores de error de 9.94% en la estimación de la humedad, lo que sigue la tendencia mostrada en el fase de La Niña.

En la velocidad del viento no se llegan a encontrar buenas correlaciones, aunque sobre la estación El Carmen y Niza los valores superan el 30% las otras estaciones no llegan ni al 10% con valores negativos incluso. La dispersión de los datos es similar en los datos observados y simulados con una media de 0.52 m/s para los primeros y 0.60 m/s para los segundos.

En cuanto al error, podemos encontrar datos simulados por encima de los observados con magnitudes de entre 0.6 y 0.8 m/s, lo que es significativo, ya que la zona de estudio no se caracteriza por tener fuertes vientos. En los datos de presión atmosférica se encuentran correlaciones del 50% en promedio. Como se mencionó antes esta variable depende en gran medida de la capacidad del modelo para representar la topografía de la zona de estudio, lo que es una limitante en este caso ya que la resolución es baja para poder detallar todos los quiebres del accidentado paisaje.

3.1.4 Análisis categórico

- **Proporción Correcta (PC)**

Tabla 12. Resultados para el indicador PC. Fase El Niño – ENOS.

Estaciones	Configuración							
	GFS_confi_01_t	GFS_confi_02_t	GFS_confi_03_t	GFS_confi_04_t	CFRS_confi_01_t	CFRS_confi_02_t	CFRS_confi_03_t	CFRS_confi_04_t
Aranjuez	44.14%	64.14%	73.79%	60.69%	52.41%	64.14%	74.48%	58.62%
Bosques del Norte	49.66%	62.76%	60.00%	53.10%	47.59%	55.17%	72.41%	51.72%
El Carmen	51.03%	64.14%	75.86%	60.69%	59.31%	64.83%	73.79%	55.86%
Enea	56.55%	65.52%	73.79%	62.07%	52.41%	62.76%	75.86%	58.62%
Hospital Caldas	53.79%	62.76%	74.48%	60.00%	53.79%	61.38%	75.86%	55.86%
SGC	48.28%	63.45%	68.28%	57.93%	55.86%	62.07%	67.59%	54.48%
La Palma	64.14%	67.59%	67.59%	57.24%	63.45%	61.38%	76.55%	56.55%
Niza	55.17%	63.45%	75.86%	60.00%	55.17%	61.38%	80.00%	58.62%
Posgrados	50.34%	60.69%	77.24%	54.48%	51.03%	59.31%	79.31%	59.31%
Promedio	**52.57%**	**63.83%**	**71.88%**	**58.47%**	**54.56%**	**61.38%**	**75.10%**	**56.63%**

Elaboración propia

En este estadístico encontramos que para todas las configuraciones se consiguen valores por encima del 50% donde la GFS_Confi_03_t es la que muestra el mejor desempeño con valores entre el 68% y el 75%, lo que muestra una buena probabilidad de pronóstico de lluvia para un periodo seco como el relacionado aquí. En el caso de las configuraciones con datos de entrada CFS, los estadísticos también se encuentran por encima del 50% con un ligero incremento frente a las configuraciones GFS, en este caso la configuración CFRS_Confi_03_t es la que

mejor comportamiento presenta con una media del 75% y un máximo en la estación Niza del 80%.

- **Tasa de Aciertos (H)**

Tabla 13. Resultados para el indicador H. Fase El Niño – ENOS.

Estaciones	Configuración							
	GFS_confi_01_t	GFS_confi_02_t	GFS_confi_03_t	GFS_confi_04_t	CFRS_confi_01_t	CFRS_confi_02_t	CFRS_confi_03_t	CFRS_confi_04_t
Aranjuez	54.55%	36.36%	54.55%	36.36%	81.82%	18.18%	27.27%	36.36%
Bosques del Norte	50.00%	75.00%	58.33%	50.00%	66.67%	41.67%	33.33%	41.67%
El Carmen	54.55%	45.45%	54.55%	45.45%	72.73%	27.27%	45.45%	54.55%
Enea	55.56%	66.67%	22.22%	44.44%	100.00%	33.33%	55.56%	33.33%
Hospital Caldas	76.92%	53.85%	46.15%	53.85%	84.62%	30.77%	46.15%	69.23%
SGC	58.33%	50.00%	41.67%	50.00%	66.67%	25.00%	50.00%	58.33%
La Palma	44.44%	66.67%	55.56%	22.22%	88.89%	22.22%	33.33%	33.33%
Niza	63.64%	54.55%	36.36%	45.45%	72.73%	27.27%	36.36%	54.55%
Posgrados	64.29%	50.00%	42.86%	50.00%	85.71%	28.57%	42.86%	71.43%
Promedio	**58.03%**	**55.39%**	**45.80%**	**44.20%**	**79.98%**	**28.25%**	**41.15%**	**50.31%**

Elaboración propia

En la Tabla 13 se puede observar que para las configuraciones que utilizaron como base el modelo GFS se manejan valores en promedio entre el 45% y el 55% mostrando cierta estabilidad en todas las estaciones de referencia. En este caso la configuración GFS_Confi_01_t es la que muestra un mejor desempeño con una tasa de aciertos del 58% en promedio, con un máximo del 77% en la estación Hospital de Caldas donde se registró la lluvia máxima tanto horaria como acumulada para el periodo de estudio.

Para las configuraciones basadas en CFS se encuentran resultados bastante variados, en el caso de la configuración CFRS_Confi_02_t encontramos una tasa de aciertos en promedio del 28% lo que nos indica una perdida notable de eventos de lluvia efectivos y en sentido opuesto la configuración CFRS_Confi_01_t muestra valores en promedio del 80% lo que muestra un buen desempeño al capturar los eventos de lluvia dejando perder muy pocos, para las otras dos configuraciones encontramos valores cercanos al 45% lo que es una tasa relativamente baja de aciertos en el pronóstico de eventos de lluvia.

- **Falsas Alarmas (FAR)**

Tabla 14. Resultados para el indicador FAR. Fase El Niño – ENOS.

Estaciones	Configuración							
	GFS_confi_01_t	GFS_confi_02_t	GFS_confi_03_t	GFS_confi_04_t	CFRS_confi_01_t	CFRS_confi_02_t	CFRS_confi_03_t	CFRS_confi_04_t
Aranjuez	92.68%	91.84%	84.62%	92.59%	88.16%	95.56%	90.63%	92.98%
Bosques del Norte	91.78%	85.00%	88.33%	91.18%	90.00%	92.06%	88.89%	92.65%
El Carmen	91.67%	90.20%	83.33%	91.07%	87.50%	93.48%	86.49%	90.77%
Enea	92.19%	88.68%	93.94%	92.59%	88.46%	94.12%	86.11%	94.74%
Hospital Caldas	86.49%	87.27%	83.33%	88.14%	85.53%	92.16%	82.35%	86.96%
SGC	90.91%	88.68%	88.64%	90.16%	88.24%	93.88%	87.23%	89.71%
La Palma	92.16%	88.00%	89.58%	96.49%	86.67%	96.08%	90.32%	95.00%
Niza	89.71%	88.89%	87.50%	91.23%	88.57%	94.12%	84.62%	90.16%
Posgrados	88.16%	87.72%	80.65%	89.39%	85.19%	92.45%	78.57%	84.62%
Promedio	**90.64%**	**88.47%**	**86.66%**	**91.43%**	**87.59%**	**93.77%**	**86.13%**	**90.84%**

Elaboración propia

De forma general y para todas las configuraciones, tanto las basadas en GFS como las basadas en CFS, se puede observar porcentajes altos de falsas alarmas los cuales oscilan entre el 85% y el 91%, esto muestra claramente la sobreestimación que hace el modelo de la lluvia una característica que ya se había mencionado anteriormente y que en este periodo se hace más evidente.

- **Índice de Éxito Crítico (CSI)**

Tabla 15. Resultados para el indicador CSI. Fase El Niño – ENOS.

Estaciones	Configuración							
	GFS_confi_01_t	GFS_confi_02_t	GFS_confi_03_t	GFS_confi_04_t	CFRS_confi_01_t	CFRS_confi_02_t	CFRS_confi_03_t	CFRS_confi_04_t
Aranjuez	6.90%	7.14%	13.64%	6.56%	11.54%	3.70%	7.50%	6.25%
Bosques del Norte	7.59%	14.29%	10.77%	8.11%	9.52%	7.14%	9.09%	6.67%
El Carmen	7.79%	8.77%	14.63%	8.06%	11.94%	5.56%	11.63%	8.57%
Enea	7.35%	10.71%	5.00%	6.78%	11.54%	5.26%	12.50%	4.76%
Hospital Caldas	12.99%	11.48%	13.95%	10.77%	14.10%	6.67%	14.63%	12.33%
SGC	8.54%	10.17%	9.80%	8.96%	11.11%	5.17%	11.32%	9.59%
La Palma	7.14%	11.32%	9.62%	3.13%	13.11%	3.45%	8.11%	4.55%
Niza	9.72%	10.17%	10.26%	7.94%	10.96%	5.08%	12.12%	9.09%
Posgrados	11.11%	10.94%	15.38%	9.59%	14.46%	6.35%	16.67%	14.49%
Promedio	**8.79%**	**10.55%**	**11.45%**	**7.76%**	**12.03%**	**5.38%**	**11.51%**	**8.48%**

Elaboración propia

Para este caso encontramos un periodo seco con eventos de lluvia aislados, por tanto, sería deseable que el modelo tuviera un porcentaje alto en esta métrica, pero como se vio anteriormente la tendencia de todas las configuraciones es generar un alto porcentaje de falsas alarmas, lo que determina que para el CSI los

desempeños sean bajos con porcentajes entre el 5% y el 12% en promedio. Otra forma de verlo es que el modelo no posee la suficiente capacidad para generar esos intervalos secos que muestren eventos de lluvia aislados y reflejen lo que pasa en una fase de El Niño como la analizada aquí.

3.1.5 Resultados de simulación fase NORMAL

Este periodo tuvo un comportamiento en simulación similar al presentado en la fase La Niña del ENOS, en general los valores en los estadísticos son cercanos a los conseguidos en ese análisis, ya que hay una distribución de los eventos similar y la época del año es igual (Figura 35).

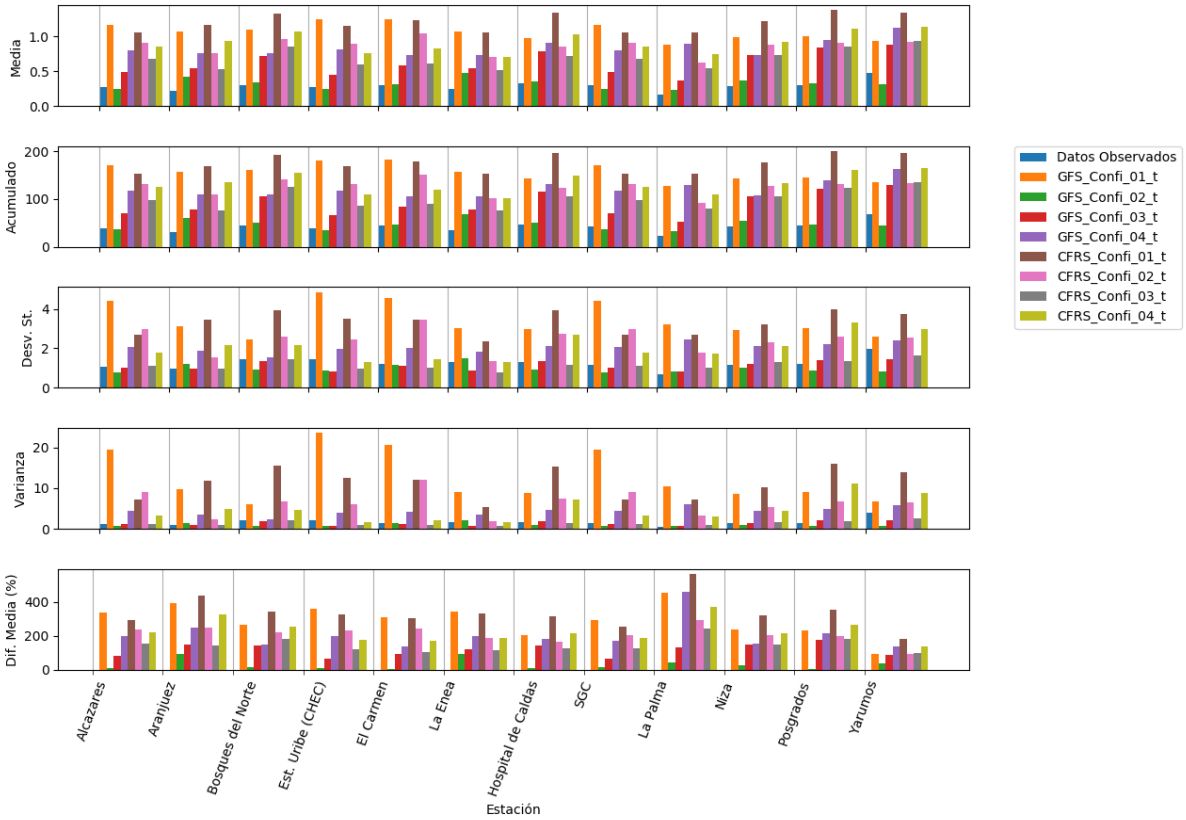


Figura 35. Resumen de estadísticos básicos. Fase Normal - ENOS. Elaboración propia

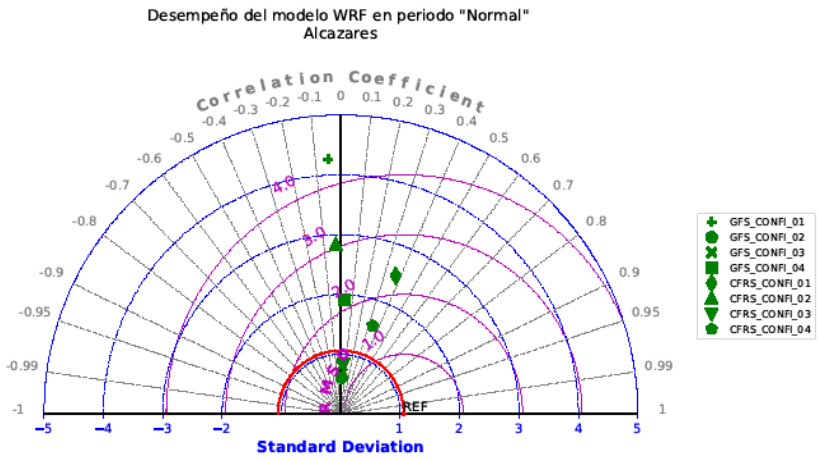
Para este periodo el modelo muestra una tendencia a la sobreestimación de la lluvia aunque la configuración GFS_Confi_02_t es la que más se acerca a los datos de las

estaciones en términos de la media y el acumulado. En términos de la desviación de los datos se encuentra un comportamiento heterogéneo entre las diferentes configuraciones, aunque GFS_Confi_02_t sigue mostrándose como la opción más cercana a los valores reales.

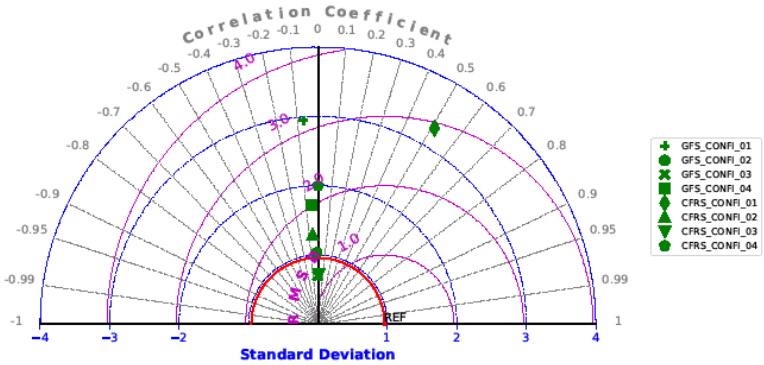
La diferencia de medias confirma la sobreestimación de la lluvia como en el periodo anterior, en una magnitud de 2 a 3 veces superior a la de los datos tomados en superficie. Dentro de los casos basados en GFS se puede destacar la configuración GFS_Confi_02_t que muestra los porcentajes de diferencia de medias más bajos, pero con un comportamiento variado en las diferentes estaciones, mientras en la estación El Carmen se reporta un valor del 4.66% en la estación Aranjuez se encuentra el valor máximo con un 94.06%. Del lado de las configuraciones basadas en CFS encontramos la configuración CFRS_Confi_03_t, con un comportamiento similar al anterior pero con valores mucho más elevados, en este caso el menor porcentaje lo encontramos en la estación Yarumos con un 95.95%, mientras en la estación La Palma se reporta un valor de 295.46%.

A continuación se muestra el desempeño del modelo para el período de simulación en las diferentes estaciones (Figura 36):

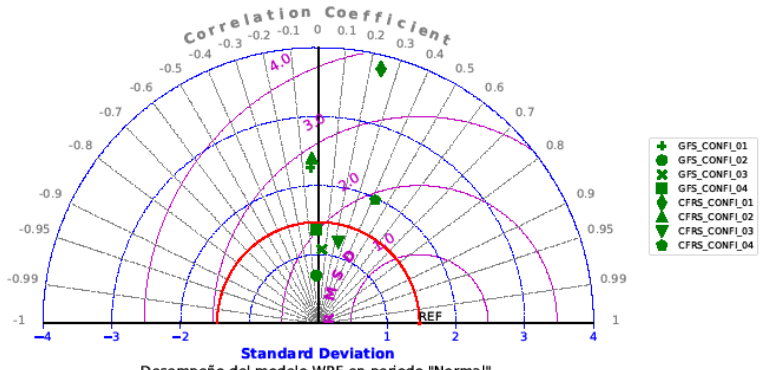
Figura 36. Desempeño de las diferentes configuraciones para las estaciones de referencia. Fase Normal - ENOS. Elaboración propia.



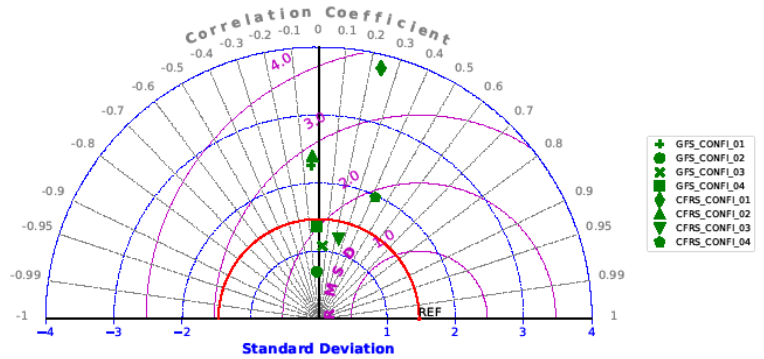
Desempeño del modelo WRF en periodo "Normal"
Aranjuez



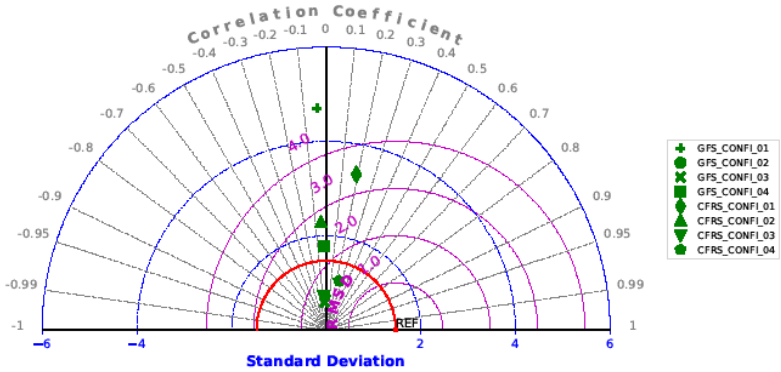
Desempeño del modelo WRF en periodo "Normal"
Bosques del Norte



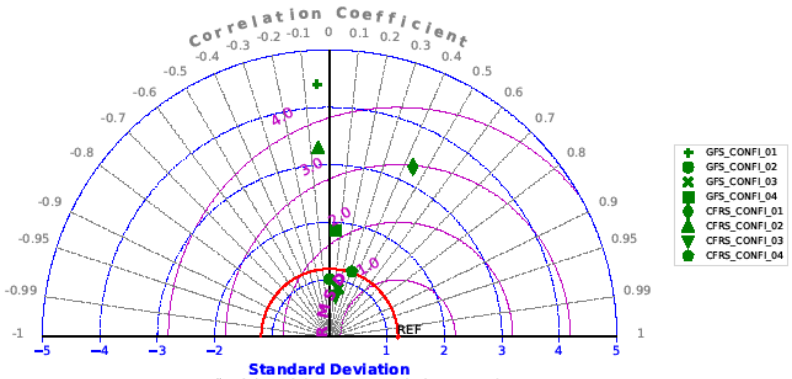
Desempeño del modelo WRF en periodo "Normal"
Bosques del Norte



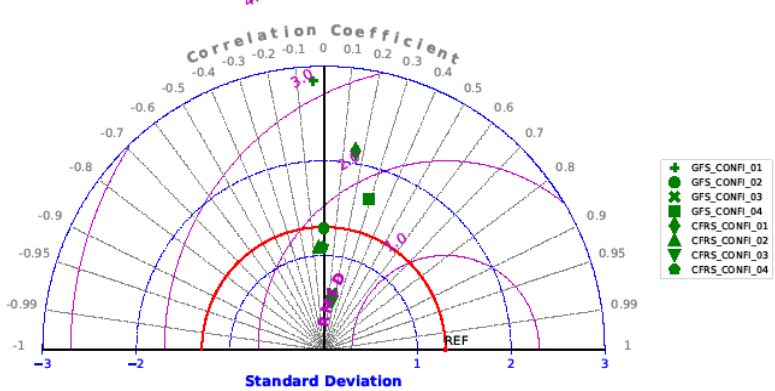
Desempeño del modelo WRF en periodo "Normal"
Est. Uribe (CHEC)



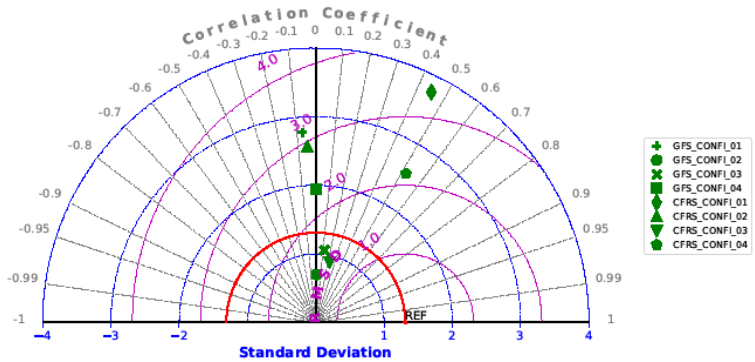
Desempeño del modelo WRF en periodo "Normal"
El Carmen



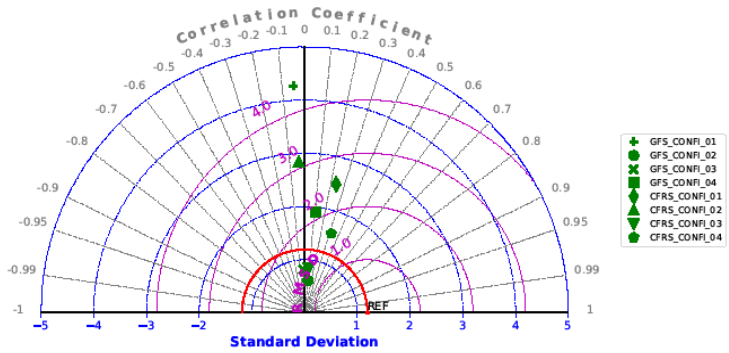
Desempeño del modelo WRF en periodo "Normal"
La Enea



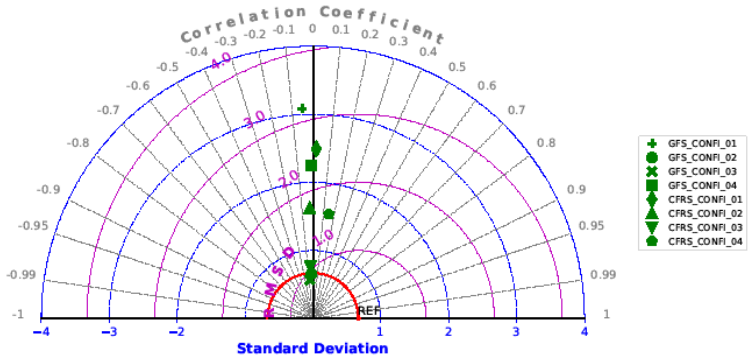
Desempeño del modelo WRF en periodo "Normal"
Hospital



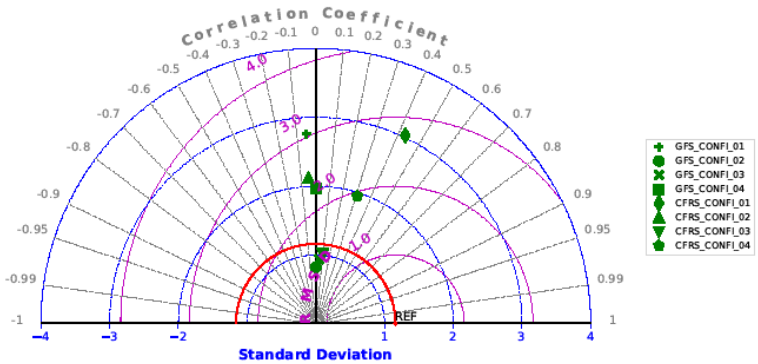
Desempeño del modelo WRF en periodo "Normal"
SGC



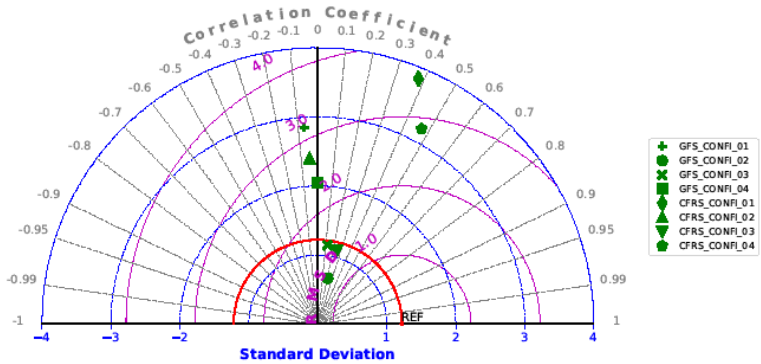
Desempeño del modelo WRF en periodo "Normal"
La Palma



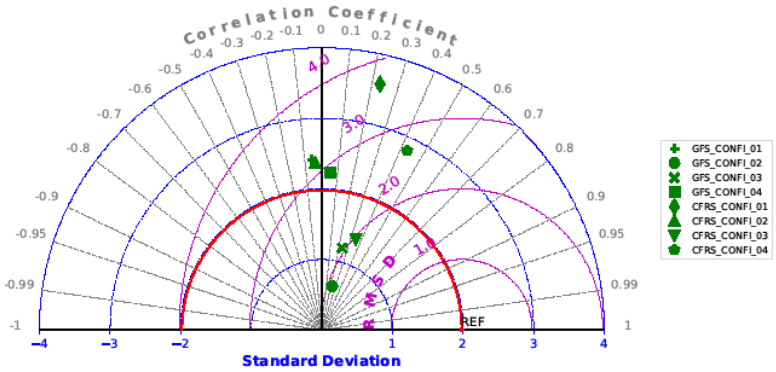
Desempeño del modelo WRF en periodo "Normal"
Niza



Desempeño del modelo WRF en periodo "Normal"
Posgrados



Desempeño del modelo WRF en periodo "Normal"
Yarumos



En términos de correlación, las configuraciones con base GFS presentan valores muy bajos los cuales no superan el 25%, llegando incluso a situaciones como la presentada por la configuración GFS_ConfI_01_t donde todas las series presentan valores negativos. Para los casos basados en CFS se encuentra que para las configuraciones CFRS_Confi_02_t y CFRS_Confi_03_t los valores de correlación no superan el 25%, pero en las configuraciones CFRS_Confi_01_t y CFRS_Confi_04_t las correlaciones varían entre el 30% y el 50%, siendo estas las de mejor desempeño global.

En los valores de desviación los datos de las estaciones de referencia muestran valores entre 1.00 y 2.00 mm comparados con los datos simulados con base GFS se observa que las configuraciones GFS_Confi_02_t y GFS_Confi_03_t son las que presentan mayor acercamiento a los valores observados. Para las simulaciones basadas en CFS la configuración CFRS_Confi_03_t es la que muestra valores de desviación más cercanos a los de referencia.

Los valores de RMSE en las simulaciones basadas en GFS muestran que de nuevo las configuraciones GFS_Confi_02_t y GFS_Confi_03_t poseen los más bajos con rangos entre 1.20 y 2.30 mm de lluvia por cada dato pronosticado. En lado de los casos basados en CFS de nuevo la configuración CFRS_Confi_03_t es la que muestra el mejor comportamiento, con un RMSE en promedio de 1.55 mm con un pico en la estación Yarumos, que fue la que más lluvia acumulo, con un RMSE de 2.12 mm por dato pronosticado.

De acuerdo a los resultados anteriores se observa que no hay una configuración que tenga un mejor desempeño en todos los estadísticos a la vez, por tanto, para la evaluación del desempeño del modelo sobre otras variables se utilizó la configuración CFRS_Confi_04_t que es la que mejor correlación presenta y los valores de sus otros estadísticos están cercanos a los de mejor desempeño. A continuación se muestran los diagramas de Taylor, que relacionan la correlación, la desviación estándar y el error cuadrático de las series simuladas con las observadas en las diferentes estaciones (Figura 37, Figura 38, Figura 39 y Figura 40):

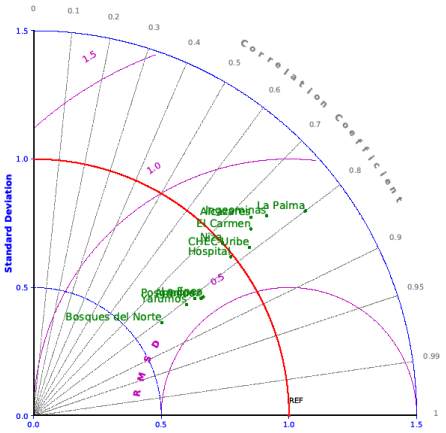


Figura 37. Desempeño de la temperatura simulada para las estaciones de referencia. Fase Normal – ENOS.
Elaboración propia.

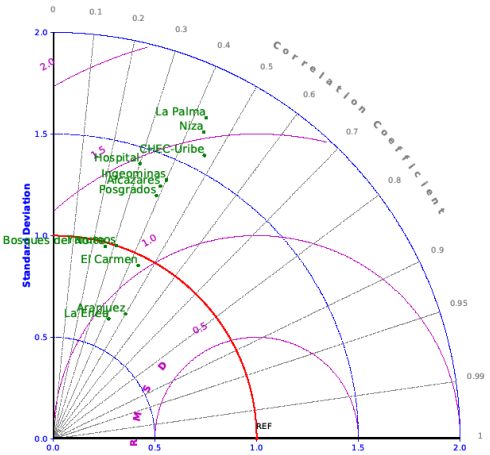


Figura 38. Desempeño de la Humedad Relativa para las estaciones de referencia. Fase Normal - ENOS.
Elaboración propia.

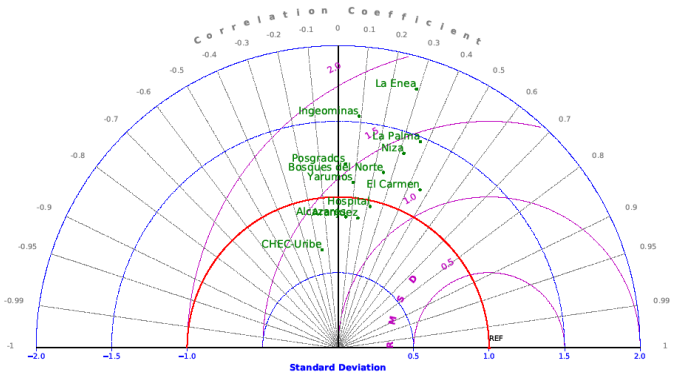


Figura 39. Desempeño de la Velocidad del Viento simulada para las estaciones de referencia. Fase Normal - ENOS.
Elaboración propia.

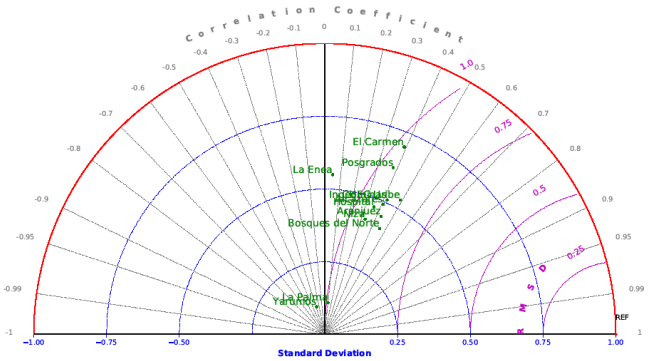


Figura 40. Desempeño de la Presión Atmosférica en las estaciones de referencia. Fase Normal - ENOS.
Elaboración propia.

Al igual que en los periodos analizados anteriormente, la temperatura es la variable que mejor se comporta reflejado por sus valores de correlación encontrando en este caso valores entre el 70% y el 80%, la dispersión de los datos simulados y observados es similar variando entre los 1.59 y 2.27 °C según la estación. El RMSE muestra un valor promedio 1.31 °C como error en cada valor pronosticado.

En la comparación de los datos de humedad relativa observados con los simulados se encuentra que los valores de correlación rondan el 45% con un pico bajo del 26% en la estación Bosques del Norte y un pico alto del 50% en la estación Aranjuez, la dispersión de los datos representada por la desviación estándar muestra que los datos simulados siguen el mismo comportamiento de los datos de referencia con un valor promedio de 7.59 °C, en última instancia el RMSE muestra un error promedio entre 8% y 10% de humedad por encima en los datos proporcionados por el modelo.

El comportamiento de los datos de velocidad de viento para esta fase Normal es similar al de la fase de La Niña con valores de correlación un poco más bajos pero con excepciones en las estaciones Niza, La Palma y El Carmen con valores de 32%, 37% y 46% respectivamente, lo que supone que para estas estaciones el modelo recreo en cierta medida las condiciones del viento, la dispersión de los datos es similar en los datos observados y simulados con una media de 0.58 m/s para los primeros y 0.64 m/s para los segundos. En cuanto al error, podemos encontrar datos simulados por encima de los observados con magnitudes de entre 0.7 y 1.1 m/s.

En los datos de presión atmosférica se encuentran correlaciones del 30% en promedio, señalando en particular los datos de la estación Yarumos que muestran una correlación negativa con un valor de -28%, siendo este punto el de peor comportamiento.

3.1.6 Análisis categórico

- **Proporción Correcta (PC)**

Tabla 16. Resultados para el indicador PC. Fase Normal – ENOS.

Estaciones	Configuración							
	GFS_confi_01_t	GFS_confi_02_t	GFS_confi_03_t	GFS_confi_04_t	CFRS_confi_01_t	CFRS_confi_02_t	CFRS_confi_03_t	CFRS_confi_04_t
Alcazares	59.31%	67.59%	58.62%	57.93%	53.10%	61.38%	53.79%	49.66%
Aranjuez	56.55%	70.34%	61.38%	53.79%	54.48%	62.07%	57.24%	52.41%
Bosques del Norte	54.48%	62.07%	56.55%	54.48%	54.48%	57.24%	55.17%	51.72%
Est. Uribe (CHEC)	58.62%	73.79%	62.76%	57.93%	55.17%	65.52%	53.10%	54.48%
El Carmen	58.62%	70.34%	56.55%	59.31%	55.86%	61.38%	56.55%	50.34%
Enea	50.34%	73.10%	60.00%	46.21%	57.24%	60.69%	53.10%	50.34%
Hospital Caldas	60.00%	68.97%	55.17%	55.86%	56.55%	64.83%	57.24%	46.21%
SGC	62.07%	68.97%	61.38%	59.31%	57.24%	62.76%	53.79%	49.66%
La Palma	56.55%	68.97%	62.76%	62.07%	48.97%	62.07%	51.03%	55.17%
Niza	55.17%	69.66%	56.55%	55.86%	57.93%	65.52%	58.62%	50.34%
Posgrados	53.79%	65.52%	55.86%	50.34%	52.41%	66.21%	53.10%	46.21%
Yarumos	55.86%	68.28%	56.55%	40.69%	53.10%	63.45%	56.55%	49.66%
Promedio	**56.78%**	**68.97%**	**58.68%**	**54.48%**	**54.71%**	**62.76%**	**54.94%**	**50.52%**

Elaboración propia

En este índice se encuentra (Tabla 16) que para todas las configuraciones bajo condiciones del modelo de circulación GFS se consiguen valores por encima del 50% donde la GFS_Confi_02_t es la que muestra el mejor desempeño con un valor promedio del 69%, lo que muestra una buena probabilidad de pronóstico de lluvia para una fase Normal como la relacionada aquí. En el caso de las configuraciones con datos de entrada CFS, los estadísticos también se encuentran por encima del 50% con un desempeño inferior al de las configuraciones GFS, en este caso la configuración CFRS_Confi_02_t es la que mejor comportamiento presenta con una media del 63%.

- **Tasa de Aciertos (H)**

Tabla 17. Resultados para el indicador H. Fase Normal – ENOS.

Estaciones	Configuración							
	GFS_confi_01_t	GFS_confi_02_t	GFS_confi_03_t	GFS_confi_04_t	CFRS_confi_01_t	CFRS_confi_02_t	CFRS_confi_03_t	CFRS_confi_04_t
Alcazares	45.00%	25.00%	25.00%	40.00%	45.00%	55.00%	50.00%	55.00%
Aranjuez	35.71%	42.86%	42.86%	35.71%	64.29%	64.29%	64.29%	71.43%
Bosques del Norte	52.38%	33.33%	38.10%	57.14%	80.95%	52.38%	61.90%	76.19%
Est. Uribe (CHEC)	23.08%	15.38%	30.77%	38.46%	61.54%	61.54%	46.15%	69.23%
El Carmen	50.00%	22.22%	38.89%	38.89%	61.11%	55.56%	55.56%	61.11%
Enea	38.89%	44.44%	44.44%	22.22%	72.22%	33.33%	44.44%	50.00%
Hospital Caldas	50.00%	33.33%	38.89%	44.44%	72.22%	55.56%	50.00%	55.56%
SGC	55.56%	27.78%	33.33%	44.44%	61.11%	61.11%	50.00%	55.56%
La Palma	15.79%	26.32%	21.05%	36.84%	31.58%	36.84%	31.58%	47.37%
Niza	42.11%	42.11%	42.11%	52.63%	73.68%	68.42%	52.63%	63.16%
Posgrados	27.78%	22.22%	44.44%	44.44%	61.11%	72.22%	44.44%	66.67%
Yarumos	44.44%	38.89%	44.44%	38.89%	66.67%	66.67%	55.56%	66.67%
Promedio	**40.06%**	**31.16%**	**37.03%**	**41.18%**	**62.62%**	**56.91%**	**50.55%**	**61.49%**

Elaboración propia

Se observa que para las configuraciones que utilizaron como base el modelo GFS se manejan valores en promedio entre el 30% y el 41% mostrando cierta estabilidad en todas las estaciones de referencia. En este caso, la configuración GFS_Confi_04_t es la que muestra un mejor desempeño con una tasa de aciertos del 41% en promedio con un máximo del 57% en la estación Bosques del Norte. Para las configuraciones basadas en CFS se encuentran mejores valores que en caso anterior en un rango entre el 51% y el 63%. En la configuración CFRS_Confi_01_t encontramos una tasa de aciertos en promedio del 63% lo que indica que esta configuración pronostica un evento de lluvia 2 veces por cada 3 que se dan en la realidad para una fase Normal dentro del ENOS.

- **Falsas Alarmas (FAR)**

Tabla 18. Resultados para el indicador FAR. Fase Normal – ENOS.

Estaciones	Configuración							
	GFS_confi_01_t	GFS_confi_02_t	GFS_confi_03_t	GFS_confi_04_t	CFRS_confi_01_t	CFRS_confi_02_t	CFRS_confi_03_t	CFRS_confi_04_t
Alcazares	84.21%	86.49%	90.00%	85.96%	86.36%	81.03%	85.07%	85.33%
Aranjuez	91.53%	85.37%	88.89%	92.06%	87.14%	84.75%	86.36%	86.67%
Bosques del Norte	83.58%	85.42%	86.21%	82.61%	78.48%	82.54%	81.43%	80.25%
Est. Uribe (CHEC)	94.34%	93.10%	91.84%	91.38%	88.24%	84.91%	91.04%	87.32%
El Carmen	85.00%	87.88%	88.14%	87.27%	83.82%	82.76%	84.62%	85.53%
Enea	89.71%	78.38%	85.71%	94.12%	81.43%	88.24%	87.88%	87.50%
Hospital Caldas	84.48%	84.62%	88.52%	87.10%	81.69%	81.13%	85.48%	87.50%
SGC	82.46%	86.49%	88.00%	85.96%	83.33%	81.03%	86.57%	86.67%
La Palma	94.00%	86.11%	90.70%	86.00%	91.04%	86.00%	90.63%	85.94%
Niza	87.10%	80.49%	86.67%	84.62%	80.00%	77.19%	83.61%	84.42%
Posgrados	91.53%	90.00%	87.10%	88.57%	84.93%	77.19%	87.88%	85.71%
Yarumos	87.10%	83.33%	86.89%	91.46%	83.78%	79.66%	84.62%	84.81%
Promedio	**88.14%**	**85.64%**	**88.22%**	**88.09%**	**84.19%**	**82.20%**	**86.27%**	**85.64%**

Elaboración propia

Para todas las configuraciones tanto las basadas en GFS como las basadas en CFS se puede observar porcentajes altos de falsas alarmas las cuales oscilan entre el 82% y el 88%, esto muestra la sobreestimación que hace el modelo de la lluvia una característica mostrada con anterioridad.

- **Índice de Éxito Crítico (CSI)**

Tabla 19. Resultados para el indicador TS. Fase Normal – ENOS.

Estaciones	Configuración							
	GFS_confi_01_t	GFS_confi_02_t	GFS_confi_03_t	GFS_confi_04_t	CFRS_confi_01_t	CFRS_confi_02_t	CFRS_confi_03_t	CFRS_confi_04_t
Alcazares	13.24%	9.62%	7.69%	11.59%	11.69%	16.42%	12.99%	13.10%
Aranjuez	7.35%	12.24%	9.68%	6.94%	12.00%	14.06%	12.68%	12.66%
Bosques del Norte	14.29%	11.29%	11.27%	15.38%	20.48%	15.07%	16.67%	18.60%
Est. Uribe (CHEC)	4.76%	5.00%	6.90%	7.58%	10.96%	13.79%	8.11%	12.00%
El Carmen	13.04%	8.51%	10.00%	10.61%	14.67%	15.15%	13.70%	13.25%
Enea	8.86%	17.02%	12.12%	4.88%	17.33%	9.52%	10.53%	11.11%
Hospital Caldas	13.43%	11.76%	9.72%	11.11%	17.11%	16.39%	12.68%	11.36%
SGC	15.38%	10.00%	9.68%	11.94%	15.07%	16.92%	11.84%	12.05%
La Palma	4.55%	10.00%	6.90%	11.29%	7.50%	11.29%	7.79%	12.16%
Niza	10.96%	15.38%	11.27%	13.51%	18.67%	20.63%	14.29%	14.29%
Posgrados	6.94%	7.41%	11.11%	10.00%	13.75%	20.97%	10.53%	13.33%
Yarumos	11.11%	13.21%	11.27%	7.53%	15.00%	18.46%	13.70%	14.12%
Promedio	**10.33%**	**10.95%**	**9.80%**	**10.20%**	**14.52%**	**15.72%**	**12.12%**	**13.17%**

Elaboración propia

Para este caso encontramos un periodo de análisis en el cual se encuentran eventos de lluvia con una cierta regularidad, pero como vimos anteriormente la tendencia de todas las configuraciones es generar un alto porcentaje de falsas alarmas, lo que determina que para el CSI los desempeños sean bajos con porcentajes entre el 10% y el 16% en promedio, lo que muestra que el modelo como en la fase de El Niño produce demasiada lluvia y no tiene la capacidad de separar eventos de lluvia por intervalos de tiempo secos.

3.2 Análisis de la macroescala vs microescala

Con anterioridad se mostró el desempeño del modelo con diferentes variables en diferentes fases del ENOS. A continuación se presentará los resultados que relacionan las variables a escala macro y las variables a escala micro o local, esto referido a los datos simulados para el dominio 1 o dominio madre que es el de más baja resolución y el dominio 3 que es el dominio de más alta resolución, tomando como referencia las estaciones con los valores más representativos dentro del análisis anterior.

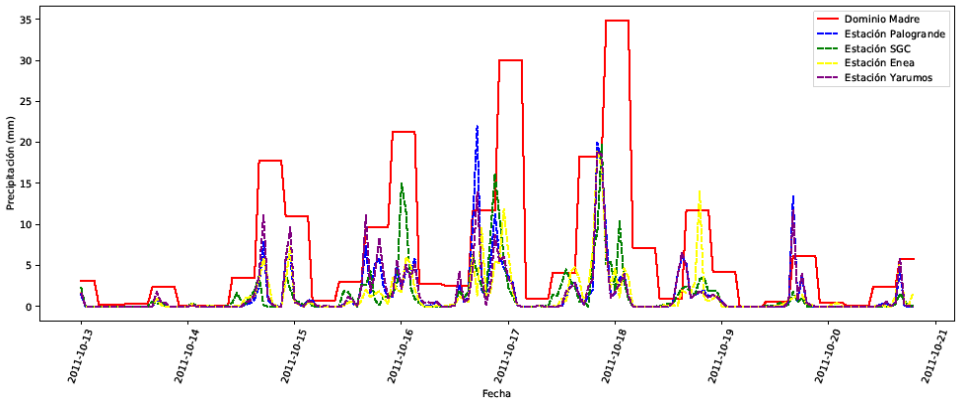


Figura 41. Comparación entre los datos de Precipitación.
Dominio Madre vs. Estaciones referencia. Fase La Niña – ENOS.
Elaboración propia

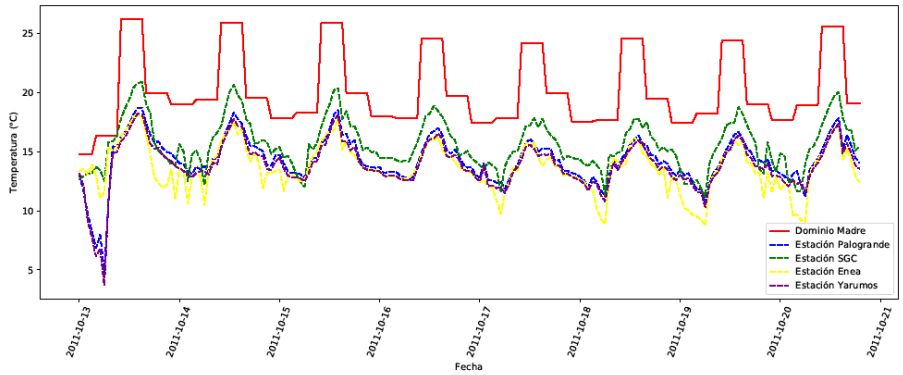


Figura 42. Comparación entre los datos de Temperatura. Dominio Madre vs. Estaciones referencia. Fase La Niña – ENOS. Elaboración propia

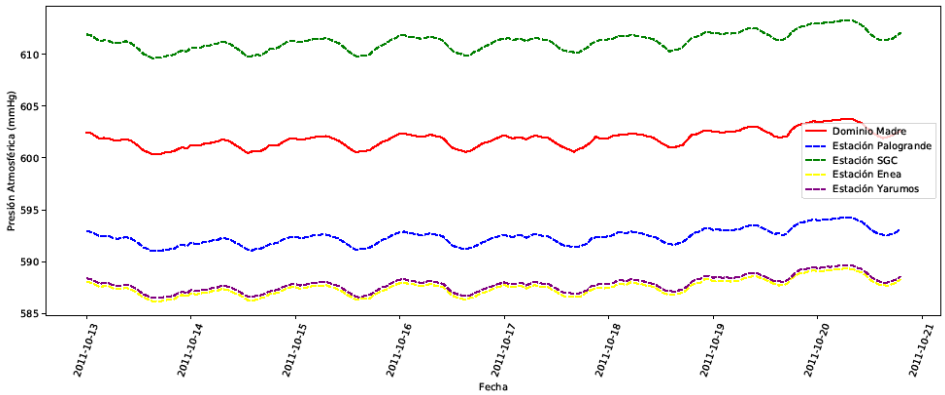


Figura 43. Comparación entre los datos de Presión Atmosférica. Dominio Madre vs. Estaciones referencia. Fase La Niña – ENOS. Elaboración propia

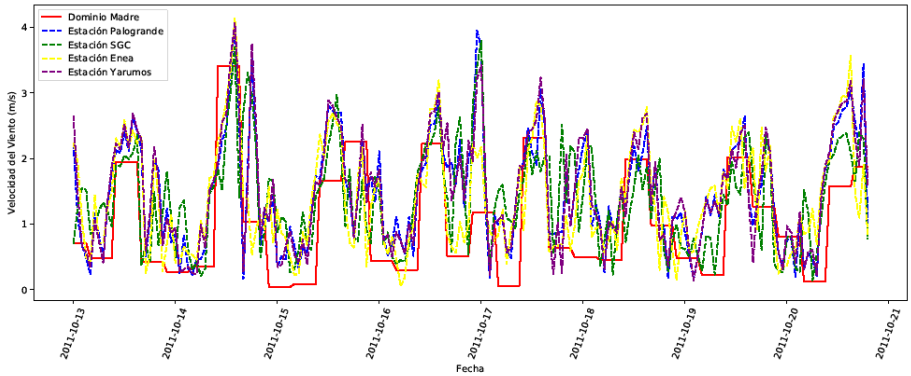


Figura 44. Comparación entre los datos de Velocidad del Viento. Dominio Madre vs. Estaciones referencia. Fase La Niña – ENOS. Elaboración propia

La Figura 41, Figura 42, Figura 43 y Figura 44 muestran una comparación entre los datos del dominio 1 y el dominio 3 para las variables precipitación, temperatura, presión atmosférica y velocidad del viento respectivamente en la fase Niña del ENOS. En este caso la línea continua roja muestra la serie del dominio 1 de más baja resolución y las líneas punteadas corresponden a las series simuladas para las estaciones Palogrande, Ingeominas, Enea y Yarumos.

Se puede observar que los datos simulados a baja resolución tienen incidencia directa sobre los datos locales, es decir, se puede afirmar que la meteorología a nivel macro incide a nivel local. En el caso de la temperatura y la precipitación las magnitudes de los datos del dominio 1 sobrepasan a las magnitudes de los datos del dominio 3, pero siguen las mismas tendencias en el comportamiento. La velocidad del viento se presenta en un mismo rango tanto para el dominio 1 como el dominio 3.

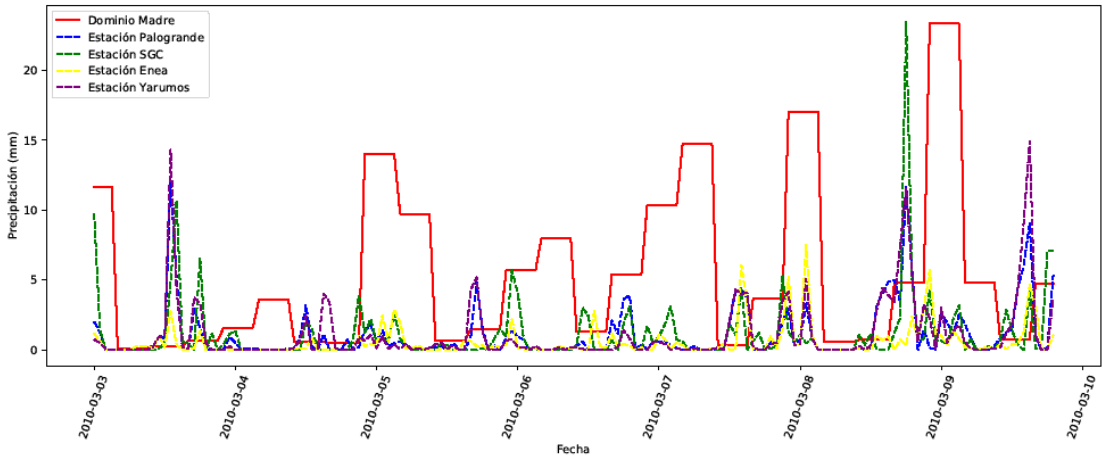


Figura 45. Comparación entre los datos de Precipitación.
Dominio Madre vs. Estaciones referencia. Fase El Niño – ENOS.
Elaboración propia

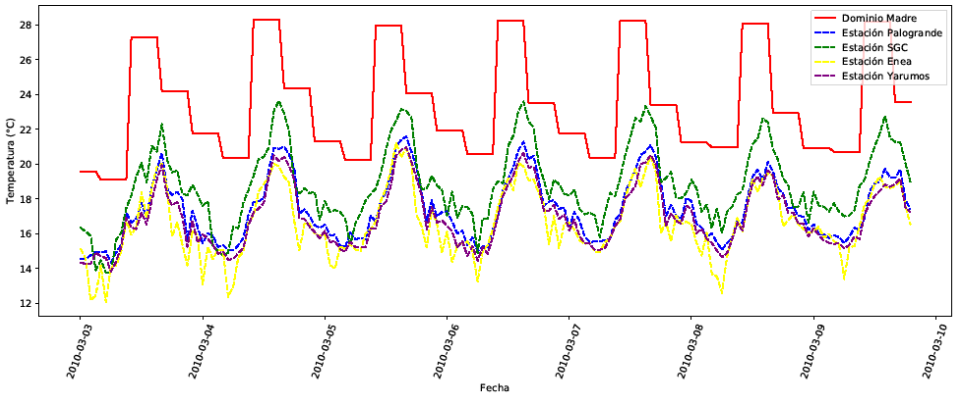


Figura 46. Comparación entre los datos de Temperatura. Dominio Madre vs. Estaciones referencia. Fase El Niño – ENOS. Elaboración propia

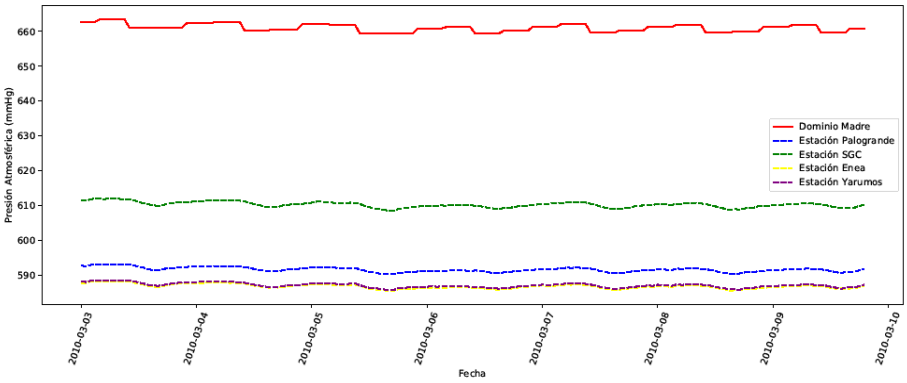


Figura 47. Comparación entre los datos de Presión Atmosférica. Dominio Madre vs. Estaciones referencia. Fase El Niño – ENOS. Elaboración propia

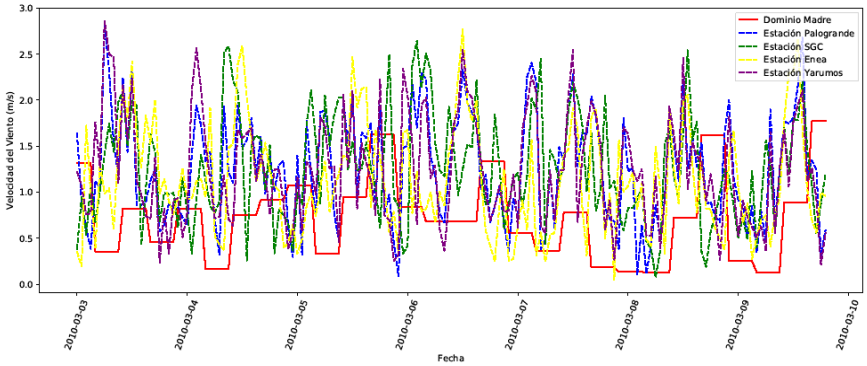


Figura 48. Comparación entre los datos de Velocidad del Viento. Dominio Madre vs. Estaciones referencia. Fase El Niño – ENOS. Elaboración propia

En la fase de El Niño, que es la que se muestra en el grupo de imágenes anterior (Figura 45, Figura 46, Figura 47 y Figura 48) se nota una respuesta menor de las variables a nivel local frente a lo encontrado en el dominio 1. A pesar de esto, la temperatura presenta un comportamiento sincronizado entre los diferentes dominios. Para las otras variables, se nota sendas diferencias, principalmente en la velocidad del viento.

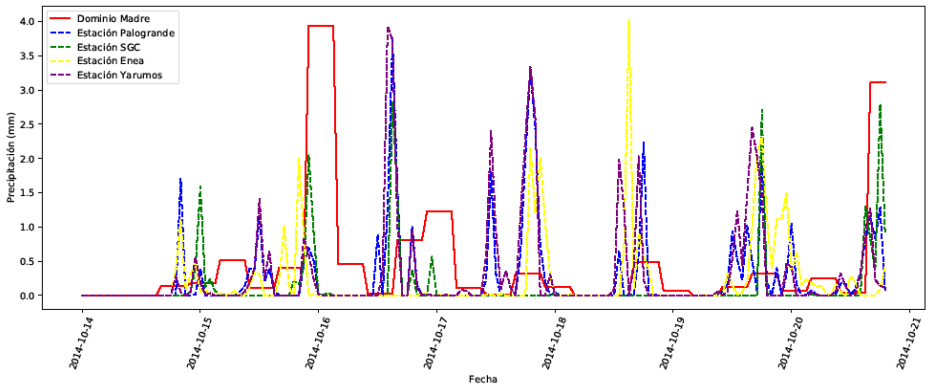


Figura 49. Comparación entre los datos de Precipitación.
Dominio Madre vs. Estaciones referencia. Fase Normal – ENOS.
Elaboración propia

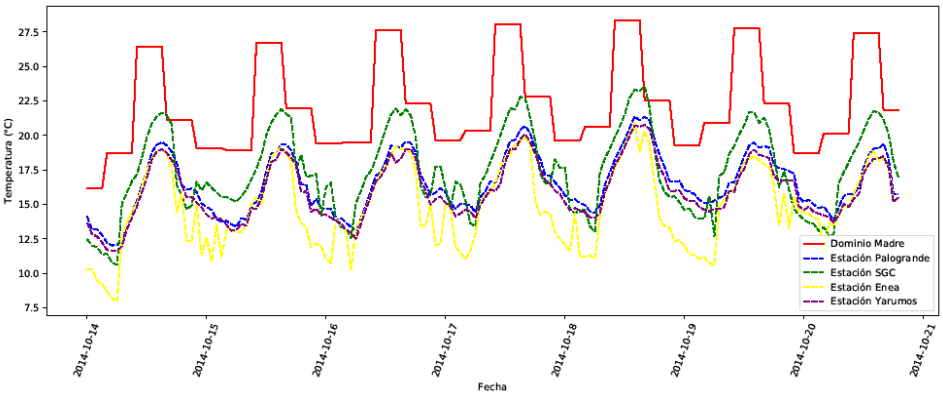


Figura 50. Comparación entre los datos de Temperatura.
Dominio Madre vs. Estaciones referencia. Fase Normal – ENOS.
Elaboración propia

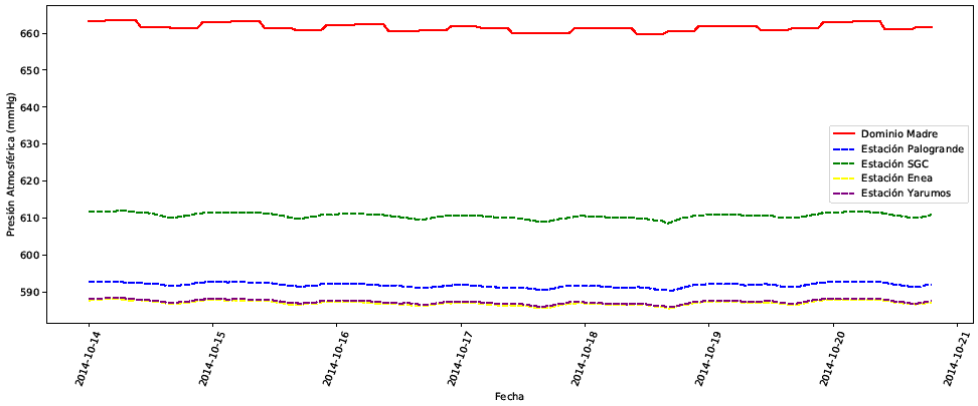


Figura 51. Comparación entre los datos de Presión Atmosférica. Dominio Madre vs. Estaciones referencia. Fase Normal – ENOS. Elaboración propia

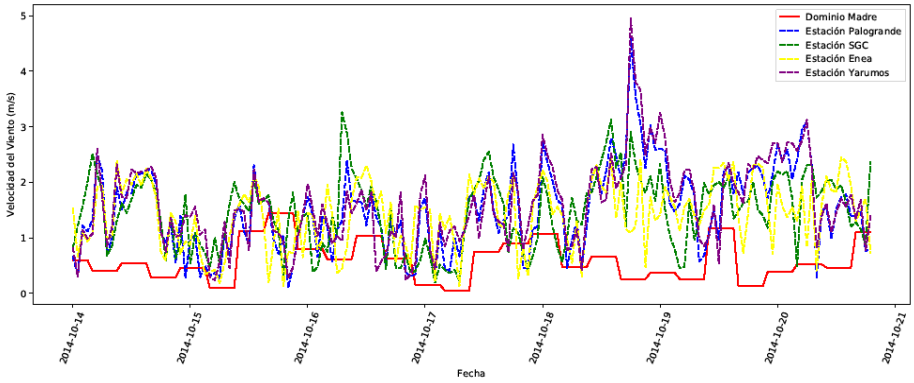


Figura 52. Comparación entre los datos de Velocidad del Viento. Dominio Madre vs. Estaciones referencia. Fase Normal – ENOS. Elaboración propia

Finalmente en la fase normal, la relación entre los datos de los dominios analizados es un poco menos clara, pero se nota incidencia de la parte macroclimática hacia el clima local. Hay que mencionar que la velocidad del viento es la variable menos relacionada, pero aun así se observa un leve emparejamiento en el comportamiento simulado.

También se realizó gráficas para las diferentes fases del ENOS, centradas en la observación del comportamiento de las variables en dominio 1.

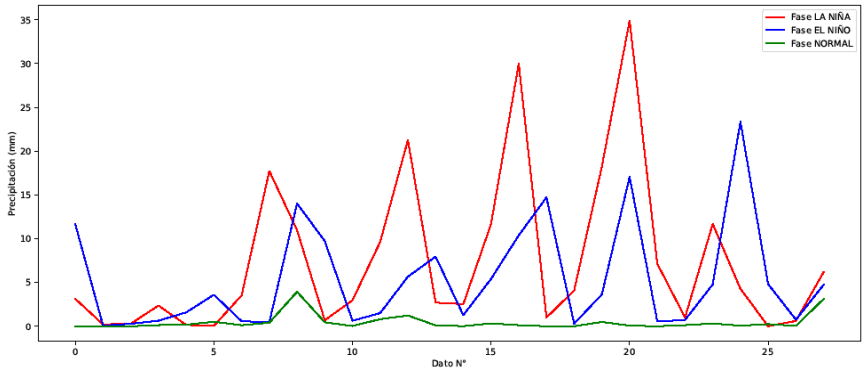


Figura 53. Comparación de datos de Precipitación en el Dominio Madre para las diferentes fases del ENOS.
Elaboración propia.

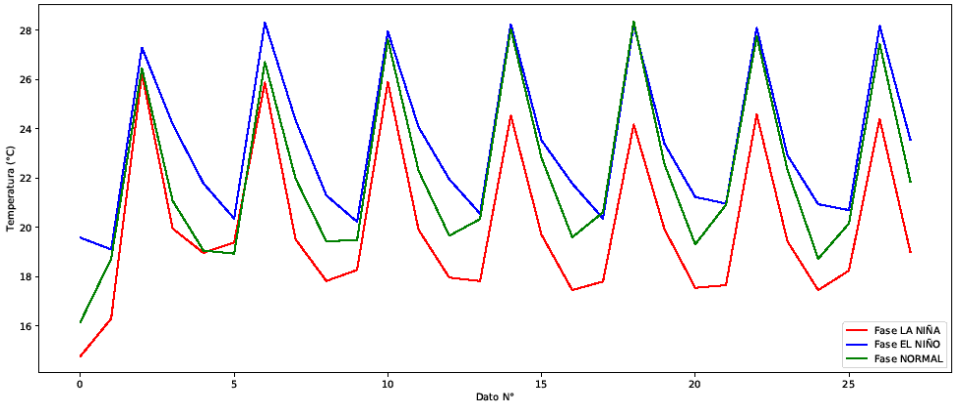


Figura 54. Comparación de datos de Temperatura en el Dominio Madre para las diferentes fases del ENOS.
Elaboración propia.

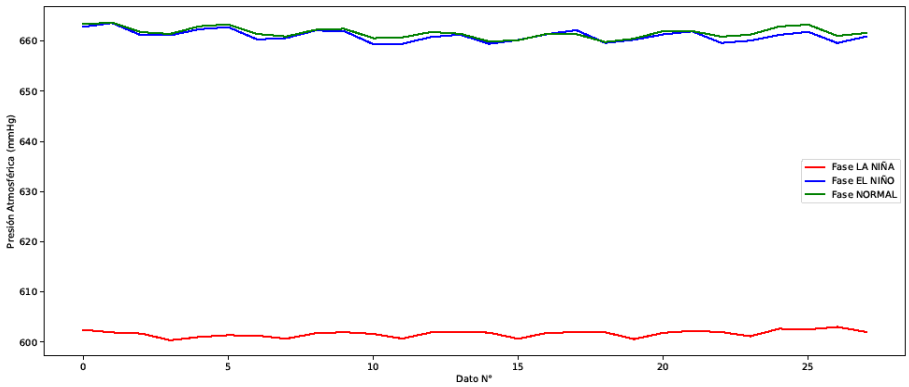


Figura 55. Comparación de datos de Presión Atmosférica en el Dominio Madre para las diferentes fases del ENOS.
Elaboración propia.

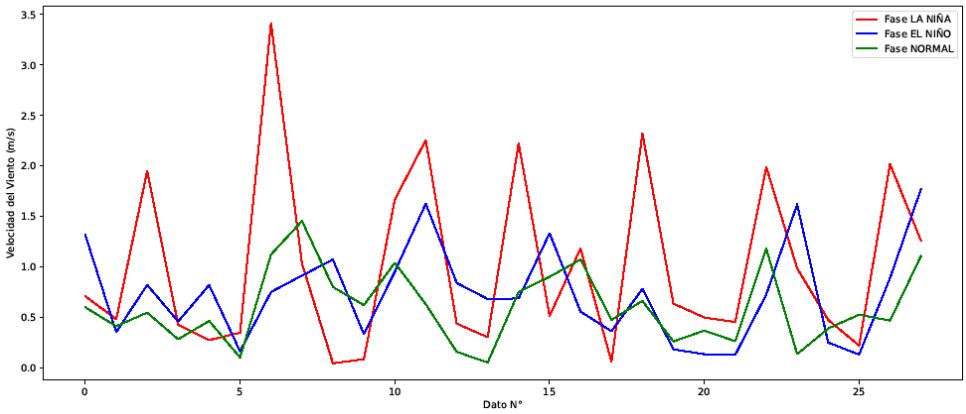


Figura 56. Comparación de datos de Velocidad del Viento en el Dominio Madre para las diferentes fases del ENOS.
Elaboración propia.

En el grupo de imágenes anterior se nota la respuesta que tienen diferentes variables a las fases del ENOS. En precipitación se puede observar que el período de mayores lluvias es La Niña, que es lo que se espera. En temperatura se nota que los datos más bajos son los de la fase Niña, seguidos de la fase Normal y después la fase Niño. De esto se puede indicar, que el modelo sigue los patrones naturales del clima o lo que se espera de él.

4. CONCLUSIONES

a) En este trabajo se buscó un primer acercamiento al modelo WRF como herramienta de modelación numérica de las condiciones meteorológicas, principalmente de la lluvia, en una ciudad como Manizales, cuya necesidad de entender las dinámicas propias de los fenómenos asociados a estas condiciones permitirán en el futuro la mitigación efectiva de los riesgos subyacentes a los eventos de gran intensidad. En este sentido se han encontrado una serie de dificultades derivadas de la naturaleza caótica propia de los fenómenos atmosféricos, las características en topografía y configuración de la ciudad, unos esquemas de parametrización del modelo desarrollados para otras latitudes y otras características de paisaje, clima, entre otros y la capacidad computacional necesaria para llevar a cabo las tareas de simulación y respaldo de la información generada.

b) Teniendo en cuenta lo anterior, este trabajo ha permitido la obtención de una resolución espacial de 1x1 km en los resultados de simulación con intervalos de tiempo de 1 hora en la entrega de datos, con un análisis espacial de la información y un seguimiento estadístico de la precipitación como variable principal.

c) Como se mostró en el análisis de resultados, la efectividad del modelo se evaluó a través de una comparación directa de las series observadas y simuladas, de lo cual se puede concluir que:

- La configuración denominada dentro de la investigación como CFRS_Confi_04_t es la que mejor comportamiento mostró para el periodo Niña y Normal, mientras que la configuración CFRS_Confi_03_t lo fue para el periodo Niño. En general las configuraciones que tuvieron como datos de entrada los que provenían del modelo

CFRS, fueron las que mejor comportamiento presentaron y los valores de sus estadísticos mantuvieron una cierta paridad, al contrario que las simulaciones basadas en GFS cuyo cuyos valores eran más dispares entre las diferentes configuraciones. Este análisis también permitió observar que el modelo en líneas generales tiende a sobreestimar la lluvia pero logra seguir de forma parcial sus patrones a lo largo del día, además los datos de los modelos de entrada son entregados en una resolución temporal de 6 horas y luego con las simulaciones son convertidos a entregas de 1 hora.

- Hay que hacer un énfasis especial en el periodo Niño analizado y en general los periodos secos, ya que el modelo no logra todavía hacer un buen ajuste de los datos simulados frente a los observados. La sobreestimación de la precipitación, además del pobre ajuste en otras variables como la humedad relativa y la presión, hacen que estos periodos sean los de mayor incertidumbre en la calidad de las datos entregados por las simulaciones.

- Con respecto al análisis de las otras variables atmosféricas, se observó que la temperatura es la variable que mejor comportamiento presenta, ya que sus valores de correlación son altos para todas las configuraciones y sus otros estadísticos son cercanos a los de los datos de referencia. Por otro lado la humedad relativa y la presión atmosférica, son variables que presentan un comportamiento más parecido al de la lluvia en sus valores estadísticos. Por último, la velocidad del viento como variable de comparación no es fiable, ya que su comportamiento es mucho más errático comparado con las otras variables y las condiciones en que se ha configurado este modelo no permite obtener datos que la representen de forma parcial o completa.

d) La segunda parte de los resultados muestra un análisis de la lluvia como una variable categórica, este análisis permitió observar las capacidades de predicción que tiene el modelo, en este contexto podemos encontrar que el modelo WRF presenta un desempeño medio-alto en la predicción de los eventos de lluvia, aunque hay cierta disparidad entre configuraciones. Las mejores tendencias de pronóstico se observan en los periodos con lluvia como en la fase La Niña y Normal, reduciéndose en las épocas secas. La sobreestimación de la lluvia afecta la

capacidad predictiva del modelo y lo lleva a sobrepronosticar eventos de lluvia, esto en principio es esperado para las características del modelo la resolución espacial y temporal del trabajo frente a las características de la zona de estudio. Dentro de las diferentes configuraciones, las de mejor desempeño en general fueron las que llevaron de base la información del modelo CFS, aunque los valores estadísticos de comparación de las configuraciones basadas en GFS estaban cerca y en algunos casos eran iguales. Como modelo de pronóstico el WRF es una herramienta fiable, pero hay que hacer una optimización de los procesos internos de cálculo y de configuración para obtener resultados más consistentes. Derivando en una mejor entrega de resultados para aquellos interesados en este tipo de información como investigadores, responsables en la gestión del riesgo y aquellas personas interesadas en datos climáticos y meteorológicos.

e) Este trabajo permitió la exploración de escalas de mayor resolución en el modelado de condiciones atmosféricas, como se refirió anteriormente el modelo se ha utilizado en escalas de nivel nacional habitualmente y en escalas regionales para estudios muy específicos. En este sentido, la aplicación del downscaling se observa que los datos de baja resolución tienen incidencia sobre los datos locales pero son ineficaces en la representación de la condiciones de meteorología en una ciudad como Manizales, es por esto que la reducción de escala y el aumento en el detalle es un camino más acertado hacia la representación de la dinámica atmosférica local.

f) De forma detallada, para la fase La Niña se encontró que en la temperatura y la precipitación las magnitudes de los datos del dominio 1 (menor resolución pero mayor área), sobrepasan a las magnitudes de los datos del dominio 3 (mayor resolución pero menor área), pero siguen las mismas tendencias en el comportamiento. La velocidad del viento se presenta en un mismo rango, tanto para el dominio 1 como el dominio 3. En la fase Niño se nota una respuesta menor de las variables a nivel local (dominio 3) frente a lo encontrado en el dominio 1. A pesar de esto, la temperatura presenta un comportamiento sincronizado entre los diferentes dominios. Para las otras variables, se nota sendas diferencias, principalmente en la velocidad del viento. Finalmente en la fase normal, la relación entre los datos de los dominios analizados es un poco menos clara, pero se nota

incidencia de la escala macro sobre el clima local. Hay que mencionar que la velocidad del viento es la variable menos relacionada, pero aun así se observa un leve emparejamiento en el comportamiento simulado.

g) En cuanto a la respuesta del modelo WRF a las diferentes fases del ENOS, se puede apreciar en los datos simulados la respuesta que tienen diferentes variables a las fases del ENOS. En precipitación se puede observar que el período de mayores lluvias es La Niña, que es lo que se espera. En temperatura se nota que los datos más bajos son los de la fase Niña, seguidos de la fase Normal y después la fase Niño. De esto se puede indicar, que el modelo sigue los patrones naturales del clima o lo que se espera de él.

5. REFERENCIAS

AEMET. (2018a). Escalas meteorológicas. Retrieved October 10, 2021, from https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/191_escalas-meteorologicas

AEMET. (2018b). Modelo climático. Retrieved October 10, 2021, from https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/454_modelo-climatico

AEMET. (2018c). Modelo Global. Retrieved October 10, 2021, from https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/179_modelo-global

Arango, C., Ruiz, J. F. (2011). Implementación del modelo WRF para la sabana de Bogotá. *IDEAM*. Bogota, D.C.

Blum, W., Borromeo Ferri, R. (2009). Mathematical Modelling: Can It Be Taught And Learnt? *Journal of Mathematical Modelling and Application*, *1*(1), 45–58.

Calvo Sánchez, F. J. (2018). Modelos atmosféricos. In C. Santos Burguete (Ed.), *Física del caos en la predicción meteorológica* (Edición di, pp. 129–143). Madrid, España: Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). https://doi.org/10.31978/014-18-009-x.10

Carreño, M. L., Cardona, O. D., & Barbat, A. H. (2007). A disaster risk management performance index. *Natural Hazards*, *41*(1), 1–20. https://doi.org/10.1007/s11069-006-9008-y

Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). MECÁNICA DE FLUIDOS Fundamentos y aplicaciones. *McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.* (Primera edición). México, D.F.

Chen, F. (2007). The Noah Land Surface Model in WRF: A short tutorial. *NCAR, LSM Group Meeting*, (April), 42.

Chen, F., Kusaka, H., Bornstein, R., Ching, J., Grimmond, C. S. B., Grossman-Clarke, S., … Zhang, C. (2011). The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *International Journal of Climatology*, *31*(2), 273–288. https://doi.org/10.1002/joc.2158

Chen, S. H., & Sun, W. Y. (2002). A one-dimensional time dependent cloud model.

Journal of the Meteorological Society of Japan, *80*(1), 99–118. https://doi.org/10.2151/jmsj.80.99

Chou, M.-D., & Suarez, M. J. (1994). An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models. *Nasa Tech. Memo*, *104606*(3), 85. Retrieved from http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.26.4850

Correa Cadavid, O., Ospina Giraldo, E. (2021). Marzo fue el mes más lluvioso desde 2011 en el país: Ideam. Retrieved October 10, 2021, from https://www.eje21.com.co/2017/04/marzo-fue-el-mes-mas-lluvioso-desde-2011-en-el-pais-ideam/#

Cortés Cortés, A. C. (2010). Análisis De La Variabilidad Espacial Y Temporal De La Precipitación En Una Ciudad De Media Montaña Andina Caso De Estudio: Manizales. *Tesis. Universidad Nacional de Colombia. Manizales*.

Dudhia, J. (1989). Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *46*(20), 3077–3107. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2

Duque, N., Orozco, M., Hincapié, L. (2010). Minería de Datos para el análisis de datos meteorológicos. In *Tendencias en Ingeniería de Software e Inteligencia Artificial* (Vol. 4, pp. 105–114). Retrieved from http://www.docentes.unal.edu.co/morozcoa/docs/Duque2011.pdf

Ercole, R. D., Hardy, S., & Metzger, P. (2009). Introducción general IFEA Vulnerabilidades urbanas en los países andinos Introducción general, *38*(3). https://doi.org/10.4000/bifea.2222

Felipe, A., & Montoya, H. (2016). Cambio climático y variabilidad espacio – temporal de la precipitación en colombia. *Revista EIA*. (Vol. 12 pp.131–150).

García-Díez, M. (2014). *Realismo físico , valor añadido y sensibilidad a la elección de las parametrizaciones de un Modelo Regional del Clima sobre Europa*. Universidad de Cantabria. Retrieved from http://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/5864

Garcia, C. (2015). Linda panoramica de la ciudad de manizales. Retrieved October 10, 2021, from http://sobremanizales.blogspot.com/2015/07/linda-panoramica-de-la-ciudad-de.html

Grell, G. A. (1993). Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterizations. *Monthly Weather Review*, *121*(3), 764–787.

https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<0764:PEOAUB>2.0.CO;2

Grell, G. A., & Dévényi, D. (2002a). A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, *29*(14), 38-1-38–4. https://doi.org/10.1029/2002GL015311

Grell, G. A., & Dévényi, D. (2002b). A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, *29*(14), 38-1-38–4. https://doi.org/10.1029/2002GL015311

Hernandez, E. J., Duque Méndez, N. D., Moreno-Cadavid, J. (2016). Generación de pronósticos para la precipitación diaria en una serie de tiempo de datos meteorológicos. *Ingenio Magno*, *7*(1), pp 144–155.

Hernández Leal, E. J. (2016). *Aplicación de técnicas de análisis de datos y administración de Big Data ambientales*. Retrieved from http://www.bdigital.unal.edu.co/54512/

Hong, S.-Y., & Lim, J.-O. J. (2006). The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *Journal of The Korean Meteorological Society*, *42*(2), 129–151. Retrieved from http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys_refs/MICRO_PHYS/WSM6.pdf

Hong, S.-Y., Noh, Y., & Dudhia, J. (2006). A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Monthly Weather Review*, *134*(9), 2318–2341. https://doi.org/10.1175/MWR3199.1

IDEAM, UNAL. (2018). Variabilidad Climática y el cambio climático en Colombia. *Bogota, D.C.*, 28. Retrieved from http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023778/variabilidad.pdf

IDEAM, Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (2005). Atlas climatológico de Colombia, 218. https://doi.org/10.1080/13600860701281671

IDEAM, Instituto de Hidrológia Meteorología y Estudios Ambientales. (2014). Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico . INFORME FINAL.

Jaramillo Robledo, Á. (2005). *Clima andino y café en Colombia*. Chinchina-Caldas. Retrieved from http://hdl.handle.net/10778/859

Jiménez, P. A., Dudhia, J., González-Rouco, J. F., Navarro, J., Montávez, J. P., García-Bustamante, E. (2012). A Revised Scheme for the WRF Surface Layer Formulation. *Monthly Weather Review*, *140*(3), 898–918. https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-

00056.1

Kain, J. S. (2004). The Kain–Fritsch Convective Parameterization: An Update. *Journal of Applied Meteorology*, *43*(1), 170–181. https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2

Linsley, R. K. J., Kolher, M. A., & Paulus, J. L. H. (1977). *Hidrología para ingenieros. Segunda Edición* (Segunda Ed). Bogota, Colombia: McGraw-Hill Latinoamerica.

Lynch, P. (2010). Predicción del tiempo y del clima : crónica de una revolución. *Boletín de la OMM 59* (2), pp 75–78.

Matsui, T., Zhang, S. Q., Lang, S. E., Tao, W.-K., Ichoku, C., & Peters-Lidard, C. D. (2018). Impact of radiation frequency, precipitation radiative forcing, and radiation column aggregation on convection-permitting West African monsoon simulations. *Climate Dynamics*, *0*(0), 1–21. https://doi.org/10.1007/s00382-018-4187-2

Mejía Fernández, F. (2008). Apuntes Sobre el Clima en Manizales. *Boletín Ambiental. Instituto de Estudios Ambiental IDEA*, (68), 5.

Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *102*(D14), 16663–16682. https://doi.org/10.1029/97JD00237

Monsalve Sáenz, G. (1999). Hidrologia en la Ingenieria. *Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería*. https://doi.org/10.1016/0956-7151(94)90403-0

Ogallo, L., Bessemoulin, P., Ceron, J. P., Mason, S., Connor, S. J. (2008). Adaptación a la variabilidad del clima y al cambio climático: el sistema de Foros sobre la evolución probable del clima. *Boletín de La OMM*, *57*(2), 93.

Pachón G., J. A. (2011, February). Distribución de la lluvia en Manizales. *Boletín Ambiental. Instituto de Estudios Ambiental IDEA*, *93*, 11.

Ponce, V. M. (1989). *Engineering hydrology: Principles and practices* (Vol. 640). Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ.

Poveda, G. (2004). La Hidroclimatología De Colombia : Una Síntesis Desde La Escala Inter-Decadal Hasta La Escala Diurna. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias*, *XXVIII*(107), 201–222.

Ramírez Carabalí, C. (2017). *Modelo para la predicción de semanas secas o húmedas en la zona cafetera de Caldas para la planificación de labores agrícolas*.

Rincón de Hoyos, M. E. (2012). Acoplamiento del modelo de mesoescala WRF al modelo de calidad del aire Calpuff, 128. Retrieved from http://www.bdigital.unal.edu.co/7749/

Ruiz, J. F., Arango, C. D., Kilpinen, J. (2013). Verificación del modelo wrf que opera ideam. *IDEAM.*

Ruiz, J. J., Saulo, C., & Nogués-Paegle, J. (2010). WRF Model Sensitivity to Choice of Parameterization over South America: Validation against Surface Variables. *Monthly Weather Review*, *138*(8), 3342–3355. https://doi.org/10.1175/2010MWR3358.1

Saavedra Murrugarra, Y. M. (2016). Validación del modelo wrf en el valle de Cajamarca, región Cajamarca, Perú. Tesis. U*niversidad de Chile*. Retrieved from http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/139925

Santos Burguete, C. (2018). Predecibilidad. *Física Del Caos En La Predicción Meteorológica*, 155–164. https://doi.org/10.31978/014-18-009-x.12

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D., Duda, M. G., Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Technical Note.* Boulder, Colorado, USA. https://doi.org/10.5065/D68S4MVH

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., … Powers, J. G. (2021). MODELING SYSTEM OVERVIEW. Retrieved October 10, 2021, from https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/model_overview.html

Smagorinsky, J. (1963). General Circulation Exxperiments with The Primitive Equations I. The Basic Experiments. *Monthly Weather Review*, *91*(3), 99–164. https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2

Solórzano Tovar, E. (2016). Identificación y caracterización de patrones climáticos en la ciudad de Manizales, usando técnicas de series de tiempo y de conglomerados. Tesis. *Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales*.

Sordo, C. M. (2006). Técnicas Estadísticas para la Proyección Local Prefacio. *Universidad de Cantabria*.

Suastegui, A. C., Antonio, L., Jasso, G., Primitivo, M., Mendoza, N., Angel, M., … Ruíz, O. (2013). Generación y evaluación estadística del pronóstico de lluvia a cinco días (Primera Ed). *Pabellón de Arteaga: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias*. Centro de Investigación Regional Norte Centro, Campo Experimental Pabellón.

Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *106*(D7), 7183–7192. https://doi.org/10.1029/2000JD900719

Tewari, M, Chen, F., Wang, W., Dudhia, J., Lemone, M. A., Mitchell, K., Cuenca, R. H.

(2004). Implementation and verification of the unified Noah land-surface model in the WRF model [presentation]. In *20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction* (pp. 11–15). Seattle, WA, US. Retrieved from http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/phys_refs/LAND_SURFACE/noah.pdf

Tewari, Mukul, Chen, F., Kusaka, H., & Miao, S. (2007). Coupled WRF / Unified Noah / Urban-Canopy Modeling System 1 What is an Urban Canopy Model (UCM), 22.

Turbay, S., Nates, B., Jaramillo, F., Vélez, J. J., & Ocampo, O. L. (2014). Adaptación a la variabilidad climática entre los caficultores de las cuencas de los ríos Porce y Chinchiná, Colombia. *Investigaciones Geograficas*, *85*(85), 95–112. https://doi.org/10.14350/rig.42298

Universidad de Chile. (2006). Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. *Informe Para CONAMA*, 63.

Universidad Nacional de Colombia., CORPOCALDAS. (2015). CDIAC - Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas.

Vélez-upegui, J. J., Duque-méndez, N. D., Mejía-fernández, F., Orozco-alzate, M. (2012). Red de monitoreo Climatico para dar apoyo a la prevención y atención de desastres en Manizales, Colombia (p. 12).

Wilks, D. S. (2019). Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. *Elsevier Inc.* Cambridge, MA. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815823-4.00013-4

Yepes, L. J. (2012). Variabilidad Climática Intraestacional y su Efecto sobre la Precipitación en Colombia : Diagnóstico y Pronóstico. *2012*, 161–214.