



Estudio de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación, el viento y la humedad en la región del Urabá antioqueño a través de resultados de WRF

Leidys Milena Arroyo Quinto

Trabajo de grado para optar al título de
Magíster en Gestión Ambiental

Director:

Vladimir Geovanny Toro Valencia, PhD. Oceanografía Física

Codirector:

Juan Fernando Salazar, PhD. Recursos Hidráulicos

Universidad de Antioquia
Facultad de ingeniería, Escuela Ambiental
Maestría en Gestión Ambiental
Medellín, Colombia
2022

Cita	(Arroyo Quinto, 2022)
Referencia	Arroyo Quinto, L. (2022). <i>Estudio de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación, el viento y la humedad en la región del Urabá Antioqueño a través de resultados de WRF</i> [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Maestría en Gestión Ambiental.

Grupo de Investigación en Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA).



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

A Dios por concederme el privilegio de la vida para continuar con este proyecto académico. A mi familia, compañeros de estudio y amigos por la comprensión y el apoyo en mi proceso de formación como magíster.

También agradezco a mi director Vladimir Toro por su acompañamiento permanente y disposición para encaminarme amablemente en la adquisición de nuevos conocimientos. Al profesor Juan Fernando Salazar, por sus asesorías y observaciones en su función como coasesor y al profesor José Posada por su colaboración en la gestión de los datos utilizados para el desarrollo de este trabajo de investigación.

Tabla de Contenido

<i>Resumen</i>	6
<i>Abstract</i>	7
<i>Introducción</i>	8
<i>Contexto local de Urabá</i>	10
<i>Weather Research and Forecasting Model (WRF) y sus principales características</i>	12
<i>Aplicación del WRF en estudios atmosféricos</i>	13
<i>Objetivos</i>	15
<i>Capítulo 1: Comparación y validación de la información simulada</i>	16
1.1. <i>Datos</i>	16
1.2. <i>Métodos de comparación y validación de la información</i>	20
1.3. <i>Validación de simulaciones</i>	21
1.3.1. <i>Precipitación</i>	21
1.3.2. <i>Viento</i>	25
1.3.3. <i>Humedad</i>	30
<i>Capítulo 2: Caracterización de variables</i>	32
2.1. <i>Métodos para la caracterización de las variables</i>	32
2.2. <i>Distribución espacial y temporal de la precipitación</i>	33
2.3. <i>Distribución espacial y temporal del viento</i>	35
2.4. <i>Distribución espacial y temporal de la humedad</i>	37
<i>Capítulo 3: Análisis de los ciclos diurnos durante los meses de enero, febrero y marzo relacionados con los eventos El Niño 2009-2010 y La Niña 2010-2011</i>	41
3.1. <i>El ENSO y su influencia en el comportamiento atmosférico de Urabá</i>	41
3.2. <i>Métodos empleados en el análisis de los años con efecto del ENSO</i>	42

3.3. Anomalías y distribución espacial de la precipitación	43
3.4. Anomalías del viento	45
3.5. Transporte de humedad y anomalías de humedad	47
Capítulo 4: Mecanismos que afectan el comportamiento del viento, la humedad y la precipitación en Urabá	50
4.1. Métodos empleados.....	50
4.2. Relación del viento superficial y la precipitación	51
4.3. Correlación de las componentes del viento y la precipitación	53
4.4. Correlación de la humedad específica a 950 hPa y las componentes del viento	54
4.5. Análisis del viento	56
5. Conclusiones	59
5.1. Capítulo 1: Validación de las simulaciones	59
5.2. Capítulo 2: Caracterización de las variables	60
5.3. Capítulo 3: Análisis de los ciclos diurnos durante los meses enero, febrero y marzo relacionados con eventos El Niño 2009-2010 y La Niña 2010-2011	61
5.4. Capítulo 4: Mecanismos que afectan el comportamiento del viento, la humedad y la precipitación en Urabá	62
6. Trabajos futuros.....	63
7. Referencias Bibliográficas	64
8. Anexos.....	79

Lista de tablas

Tabla 1. Identificación de estaciones meteorológicas usadas en la validación..... 18

Tabla 2. Resumen de la configuración para las simulaciones con WRF 20

Tabla 3. Estadísticos para la validación del modelo con las bases de datos. 23

Tabla 4. Resultados de los estadísticos aplicados a los datos de precipitación del modelo con respecto a estaciones meteorológicas en el sur y el norte de la región de Urabá..... 79

Tabla 5. Resultados de los estadísticos aplicados a los datos de humedad relativa del modelo y ERA5 con respecto a estaciones meteorológicas de la región de Urabá..... 79

Lista de figuras

<i>Figura 1. Área de estudio.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2. Esquema del funcionamiento de WRF. Tomado de (Skamarock, 2008).....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3. Dominios en los que se realizaron las simulaciones. A) Dominios D01: 30 km, D02:10 km y D03: 3km. B) Zoom sobre el D03.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4. Comparación de la precipitación promedio para los meses de enero, febrero y marzo entre WRF contra CHIRPS, TRMM y GPM.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 5. Promedios espaciales de la precipitación de WRF y las bases de datos A) en el norte (entre 8°N y 8.8°N) y B) en el sur (entre 7.1°N y 8°N).</i>	<i>23</i>
<i>Figura 6. Boxplot con valores del Coeficiente de Correlación (CC) y del Índice de Acuerdo (IOA) para los datos de precipitación del WRF con respecto a las observaciones.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 7. Diagramas de Taylor con valores de correlación, desviación estándar y error cuadrático medio entre WRF y estaciones meteorológicas de Urabá.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 8. Campos de viento con contornos de la velocidad del viento promedio del trimestre enero, febrero y marzo de WRF (izquierda A, D y G) y ERA5(centro B, E y H). A la derecha las diferencias entre WRF y ERA5(C, F e I).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 9. Comparación entre los datos de velocidad del viento de WRF, ERA5 y observaciones in situ. En la columna izquierda los datos de ERA5 y WRF versus las observaciones y en la columna derecha las distribuciones de probabilidad A) para los datos de Capurganá y B) para los datos de Bahía Colombia.....</i>	<i>27</i>

<i>Figura 10. Ciclo diurno del viento para datos observados, modelo WRF y ERA5 A) en el punto localizado en Capurganá. B) en el punto localizado en Bahía Colombia.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 11. Rosas de viento de las observaciones versus WRF y ERA5, para Capurganá (izquierda) y para Bahía Colombia (derecha). Entre el 22 de enero y el 8 de febrero de 2010.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 12. Campos promedio de la humedad específica de los trimestres enero, febrero y marzo de los años entre 2008 y 2013 en el nivel de 950 hPa A) WRF y B) ERA5.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 13. Diagramas de Taylor con valores de correlación, desviación estándar y error cuadrático medio de WRF y ERA5 en relación a 4 estaciones meteorológicas de Urabá.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 14. Promedio espacial del ciclo diurno de la precipitación A) norte de Urabá B) sur de Urabá.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 15. Precipitación mensual entre las latitudes 7.2°N y 8.8°N, para los cortes transversales Este, Centro y Oeste.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 16. Campos de velocidad y dirección del viento promedio entre 2008-2013 en los meses de enero (A, D, G y J), febrero (B, E, H y K) y marzo (C, F, I y L) en el nivel de 850 hPa.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 17. Igual que la figura 16, pero en el nivel de 950 hPa.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 18. Humedad relativa promedio mensual cada tres horas entre 2008-2013 en los meses de enero (A, D, G y J), febrero (B, E, H y K) y marzo (C, F, I y L) en el nivel de 950 hPa.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 19. Perfiles verticales de la humedad específica promedio de enero y febrero entre 2008-2013 (escala horaria) sobre los cortes transversales al Este (A, D y G), Centro (B, E y H) y Oeste (C, F e I) de Urabá. Las marcas blancas corresponden a la topografía.....</i>	<i>39</i>

Figura 20. Flujo estacionario de la humedad a 950 hPa para los meses de enero (A, D, G y J), febrero (B, E, H y K) y marzo (C, F, I y L) entre 2008 y 2013. Las flechas representan los vectores del transporte. 40

Figura 21. Anomalías de la precipitación acumulada con respecto al año 2013 para 2009 (año La Niña) (A, D, G y J), 2010 (año El Niño) (B, E, H y K) y 2011(año La Niña) (C, F, I y L)..... 43

Figura 22. Promedio espacial de la precipitación acumulada durante el día. A) norte (8.0 ° N y 8.8 ° N) B) sur (7.1 ° N y 8.0 ° N). 44

Figura 23. Igual que la Figura 21 con anomalías del viento a 950 hPa..... 46

Figura 24. Sección transversal del viento meridional en 76.54°O para A) 950 hPa y B) 850 hPa. 47

Figura 25. Flujo estacionario de la humedad a 950 hPa para los años 2009 (A, D, G y J), 2010 (B, E, H y K) y 2011(año La Niña) (C, F, I y L) con vectores del transporte horizontal de la humedad. 48

Figura 26. Igual que la Figura 21, pero para la humedad relativa a 950 hPa. 49

Figura 27. Campos de precipitación mensual promedio cada 3 horas para los meses de enero (A, D, G y J), febrero (B, E, H y K) y marzo (C, F, I y L) con vectores del viento a 10 metros..... 52

Figura 28. Correlaciones temporales (cada 3 horas) entre la precipitación y las componentes del viento promedio de enero, febrero y marzo. A) meridional y B) zonal..... 53

Figura 29. Correlación temporal entre la precipitación y las componentes del viento a 10 m para los años 2009, 2010 y 2011. (A, B y C correlación de la precipitación con la componente meridional. D, E y F igual, pero con la componente zonal)..... 54

Figura 30. Correlación temporal entre el promedio trimestral de la humedad específica y el promedio trimestral de las componentes del viento a 950 hPa (enero, febrero y marzo) de los años entre 2008 y 2013. A) correlación de la humedad específica con la componente meridional. B igual, pero con la componente zonal.....55

Figura 31. Correlación temporal entre la humedad específica y las componentes del viento a 950 hPa para los años 2009, 2010 y 2011. A, B y C correlación de la humedad específica con la componente meridional. D, E y F igual, pero con la componente zonal.....55

Figura 32. Campos de viento a 950 hPa con contornos de la velocidad del viento sobre el noroeste de Colombia en celdas de 3.3km (dominio 3) (A, D, G y J) y en celdas de 10 km (Dominio 2) (B, E, H y K).....57

Figura 33. Campos de viento a 950 hPa con contornos de la velocidad del viento sobre el noroeste de Colombia para 2009 (A, D, G y J), 2010 (B, E, H y K) y 2011(C, F, I y L).....58

Figura 34. Campos de la precipitación promedio entre el 1 y el 15 de enero de 2013. (A, B, C y D simulaciones sin el golfo de Urabá. E, F, G y H simulaciones con el golfo de Urabá).80

Figura 35. Secciones transversales en el Este, Centro y Oeste de Urabá de la precipitación diaria promedio entre el 1 y 15 de enero de 2013 para las simulaciones con el golfo de Urabá y sin el golfo de Urabá.....81

Figura 36. Perfiles verticales de la humedad específica promedio del 1 al 15 de enero de 2013 (escala horaria) sobre los cortes transversales al Este (A, D y G), Centro (B, E y H) y Oeste (C, F e I) de Urabá para las simulaciones sin el golfo de Urabá.....82

Figura 37. Perfiles verticales de la humedad específica promedio del 1 al 15 de enero de 2013 (escala horaria) sobre los cortes transversales al Este (A, D y G), Centro (B, E y H) y Oeste (C, F e I) de Urabá para las simulaciones con el golfo de Urabá.....83

Figura 38. Secciones transversales en el Este, Centro y Oeste de Urabá de la velocidad del viento a 10 m entre el 1 y 15 de enero de 2013 para las simulaciones con el golfo de Urabá y sin el golfo de Urabá..... 84

Resumen

Los procesos atmosféricos en la región de Urabá están influenciados por fenómenos remotos y locales. Avanzar en el conocimiento de estos procesos es importante para este lugar donde se produce 3 de cada 10 bananos consumidos a nivel mundial. El objetivo principal de esta investigación fue analizar la variabilidad de la precipitación, el viento y la humedad en el Urabá antioqueño centrándonos en la temporada seca durante los eventos El Niño 2009-2010 y La Niña 2010-2011 en una escala horaria. Para este fin se utilizaron datos generados con el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) en dominios espaciales de 3.3 km y 10 km entre los años 2008-2013. Información que fue validada utilizando datos de TRMM, GPM, CHIRPS y ERA5, además de información de algunas estaciones meteorológicas. El trabajo se llevó a cabo en tres fases. En la primera se caracterizó la variabilidad espacial y temporal de la precipitación, el viento y la humedad, en la segunda se analizaron los ciclos diurnos de estas variables en los meses de enero, febrero y marzo relacionados con los eventos El Niño 2009-2010 y La Niña 2010-2011 y la tercera consistió en el estudio de los mecanismos que afectan el comportamiento de la precipitación, el viento y la humedad en Urabá. Los resultados muestran que el modelo reproduce más precipitación al sur como lo hacen las bases de datos, pero sobrestima los valores de precipitación al norte. La dirección del viento simulado tiene un alto acuerdo con ERA5 en los niveles de 950 hPa, 700hPa y 500 hPa, sin embargo, la velocidad es subestimada en la superficie, lo cual también ocurre con la humedad específica, pero tiene un buen desempeño en la representación de la humedad relativa. La precipitación del modelo varía espacialmente en función de la topografía. Los vientos mantienen una dirección desde el norte y el noreste, a excepción de los años La Niña, donde se desplaza desde el suroeste. Los años La Niña se caracterizan por menor velocidad del viento, más precipitación y menor transporte de humedad, todo lo contrario, ocurre en el año El Niño. En general, el comportamiento de estas variables durante la temporada seca responde al efecto del golfo, la topografía y los cambios oceánicos-atmosféricos que provoca el ENSO cerca de la zona.

Abstract

The atmospheric process in the Urabá region are influenced by local and remote phenomena. To advance in the understanding of this process is important in this place where are produced 3 out of 10 bananas consumed worldwide. The principal objective of this investigation was to analyze the variability of the precipitation, winds and humidity in the Urabá antioqueño we focusing in the dry season during El Niño 2009-2010 y La Niña 2010-2011 events in the diurnal scale. For this purpose, was used the data generated with the Weather Research and Forecasting model (WRF) in the spatial domains of 3.3 km and 10 km between the years 2008-2013. This information was validated used data of TRMM, GPM, CHIRPS Y ERA5 and information of meteorological stations. The work was carried out in three phases. In the first was characterized the variability spatial and temporal of the precipitation, the winds and the humidity, in the second was analyzed the diurnal cycles of the variables in the months January, February and March related with the El Niño 2009-2010 y La Niña 2010-2011 events and the third consisted in the study of the mechanism that affect the behavior of the precipitation, the winds and humidity in Urabá. The result show that the model reproduces more precipitation in the south as well as the data bases, but overestimate the values of precipitation in the north. The wind direction simulated has high agreement with ERA5 in the levels 950hPa, 700hPa y 50hPa, however, the velocity is underestimated in the surface, the which also occurs with the specific humidity, but has a good performance in the representation of the relative humidity. The precipitation of the model varies specially in function of the topography. The winds have a direction from the north and northeast, with the exception of the years La Niña, where the wind move from the southeast. The La Niña years are characterized for lower speed of wind, more precipitation and lower transport of humidity the contrary occurs in the El Niño year. In general, the behavior of this variables during the dry season responses to the effect of the gulf, the topographic and the oceanics-atmospherics changes that cause the ENSO near of the zone.

Introducción

El Urabá antioqueño es una región tropical localizada en las costas del golfo de Urabá, al sur del mar Caribe, en el departamento de Antioquia-Colombia donde del viento, la precipitación y la humedad tienen variaciones en diferentes escalas temporales. Se sabe que, a nivel estacional, estas son afectadas por el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (CORPOURABA, 2019) y desde una mirada interanual por la ocurrencia de las fases de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) (Navarro-Monterroza et al., 2019). No obstante, estos fenómenos no explican todas las variaciones atmosféricas locales, debido a que la localización geográfica del Urabá antioqueño lo expone al efecto de otros fenómenos como la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y chorros de bajo nivel como el del Caribe y del Chocó (Poveda et al., 2006). Adicionalmente, las variables atmosféricas obedecen a diversos fenómenos y mecanismos físicos (Hoyos, 2017) que deben entenderse con mayor profundidad utilizando información de alta resolución o datos que permitan observar con un nivel de detalle óptimo los procesos locales; para así, avanzar en la determinación y entendimiento de su distribución espacio-temporal sobre la región (Wang et al., 2020).

La ZCIT produce un régimen de precipitación unimodal en Urabá (Urrea et al., 2019), que se caracteriza por una temporada húmeda entre abril y octubre y una época seca de noviembre a marzo (Hernández y Mercado, 2020). De manera complementaria, el viento es más fuerte y en sentido noreste en la temporada seca, y débil con una componente predominante del sur en la temporada húmeda, especialmente en el golfo de Urabá (Chevillot et al., 1993). Los comportamientos atmosféricos anteriormente mencionados generan variaciones en la disponibilidad de agua sobre la región; esta última además está relacionada con las fluctuaciones en la evotranspiración y la humedad relativa sobre la zona (Toro-Trujillo et al., 2016; Bastidas Osejo et al., 2019)

Con respecto a las fases del ENSO, la temporada La Niña está asociada al aumento de las precipitaciones y durante su ocurrencia se han presentado inundaciones, deslizamientos e incremento de la erosión, mientras que en los eventos El Niño se han registrado sequías (CORPOURABA, 2011, CORPOURABA, 2015). Además, este fenómeno ha causado impactos negativos a la producción de plátano y banano en la zona, como resultado del exceso y déficit

hídrico que se produce de acuerdo a cada una de sus fases, lo cual altera fisiológicamente los cultivos y produce pérdidas económicas (Cárdenas González et al., 2017), siendo de mucho valor entender a profundidad cómo estos fenómenos alteran el comportamiento de las variables en mención.

A pesar de la información generada sobre el viento, la humedad y la precipitación en Urabá, en algunos casos las investigaciones se han centrado en una zona específica de la región o proporcionan información muy general. Por ejemplo, los estudios sobre viento tienden a apoyar el entendimiento de la hidrodinámica del golfo (Chevillot et al., 1993; Montoya Jaramillo y Toro Botero, 2006; Montoya Jaramillo et al., 2010; Montoya Jaramillo et al., 2017; Toro et al., 2019), ya sea para explicar sus cambios estacionales (Chevillot et al., 1993; Toro et al., 2019), su relación con la dinámica oceanográfica (Montoya Jaramillo y Toro Botero, 2006) o su relación con el comportamiento de las descargas de agua dulce al golfo (Montoya Jaramillo et al., 2010; Montoya Jaramillo et al., 2017), también se ha estudiado la ocurrencia de brisas marinas en la costa este de Urabá (Arroyo Quinto et al., 2022). Con respecto a la precipitación, se ha determinado que espacialmente presenta un gradiente entre norte-sur, con mayores cantidades de lluvia al sur (Toro-Trujillo et al., 2016; Bastidas Osejo et al., 2019), pero es importante profundizar en los mecanismos responsables de este comportamiento y su conexión con otras variables como el viento y la topografía, lo cual implica contar con información continua y de alta resolución.

Sin embargo, en la región de Urabá hay una baja densidad de estaciones meteorológicas y se presentan series de datos con información faltante, que en algunos casos puede llegar al 73% para variables como la precipitación (Amaya et al., 2009; Toro Trujillo, et al., 2015; Batidas Osejo et al., 2019). Por lo tanto, se propone analizar las salidas del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) realizadas en el marco del proyecto “Investigación para la reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia” (Gob. ANT, UdeA, UNAL, UNINORTE, 2021), simuladas en los años entre 2008 y 2013 donde se produjo información de las variables de interés con las características requeridas en este estudio. Los datos se generaron en las resoluciones de 30 km, 10 km y 3.3 km y su período temporal coincide con El Niño 2009-2010 y La Niña 2010-2011 que son eventos extremos del ENSO en los que se han identificado efectos que van desde la escala diaria hasta la interanual (Bedoya-Soto et al., 2019).

Así pues, a través de este trabajo se pretende dar respuesta principalmente al interrogante ¿cuál es la influencia de los fenómenos diurnos y la estación seca en el período 2008-2013 en la distribución espacio-temporal de la precipitación, los vientos y la humedad en el Urabá antioqueño? utilizando las simulaciones anteriormente mencionadas. Esto con el fin de aportar conocimiento que ayude a comprender los cambios que los eventos del ENSO ocurridos en los años de estudio, las épocas climáticas y/o el ciclo diurno pueden provocar en el régimen climático de la zona, siendo esto importante para la planificación de las actividades agrícolas, del uso de los recursos hídricos y de la ocupación territorial para hacer frente a la variabilidad climática (Mesa Sánchez y Peñaranda Vélez, 2015), además, esto serviría para la evaluación del potencial eólico a la luz de la transición energética y el estudio del oleaje local.

Contexto local de Urabá

Urabá está ubicada al noroeste de Colombia, exactamente al sur del mar Caribe y cerca del Istmo de Panamá, influenciada por los vientos Alisios (Correa y Vernet, 2004) y con 512 km de línea de costa del golfo de Urabá, entre Cabo Tiburón y Puerto Rey (Prussmann, 2012). (Figura 1), característica que afecta la Hidrometeorología y el clima local (Toro et al., 2019). A esto se suma la complejidad del terreno y la cobertura vegetal (Urrea et al., 2019). La región cuenta con una formación montañosa de la cordillera occidental llamada Serranía de Abibe. Ésta tiene una cota máxima de 2.200 msnm, pero sus mayores elevaciones en la región se presentan al sur con alturas de 1.375 msnm. Los valores más bajos están al norte y no superan los 500 msnm (CORPOURABA, 2016). En cuanto a la vegetación, en Urabá el suelo está cubierto mayoritariamente por sistemas agrícolas como los extensos cultivos de banano, por bosques mixtos de la serranía de Abibe y manglares en las costas (CORPOURABA, 2018).

A escala estacional, la ZCIT influencia el clima regional debido a sus migraciones meridionales a lo largo del año (CORPOURABA, 2019). Cuando se ubica al sur del Caribe colombiano, se genera un período seco sobre Urabá, con vientos fuertes del norte producidos por la llegada de frentes fríos de las altas latitudes y al tener una localización más septentrional se produce una época húmeda, que se caracteriza por vientos débiles del suroeste y una mayor ocurrencia de precipitaciones (Toro et al., 2019). En esta temporada la

ZCIT se encuentra alrededor de los 10°N y existe un tránsito de ondas del este sobre el mar Caribe, el cual está al norte del golfo de Urabá (Moreno Calderón et al., 2020), Ese comportamiento estacional de las lluvias y el viento en el Caribe también se evidencia con la humedad, que se caracteriza por ser menor en la estación seca y mayor en la temporada lluviosa (Hoyos, 2017).

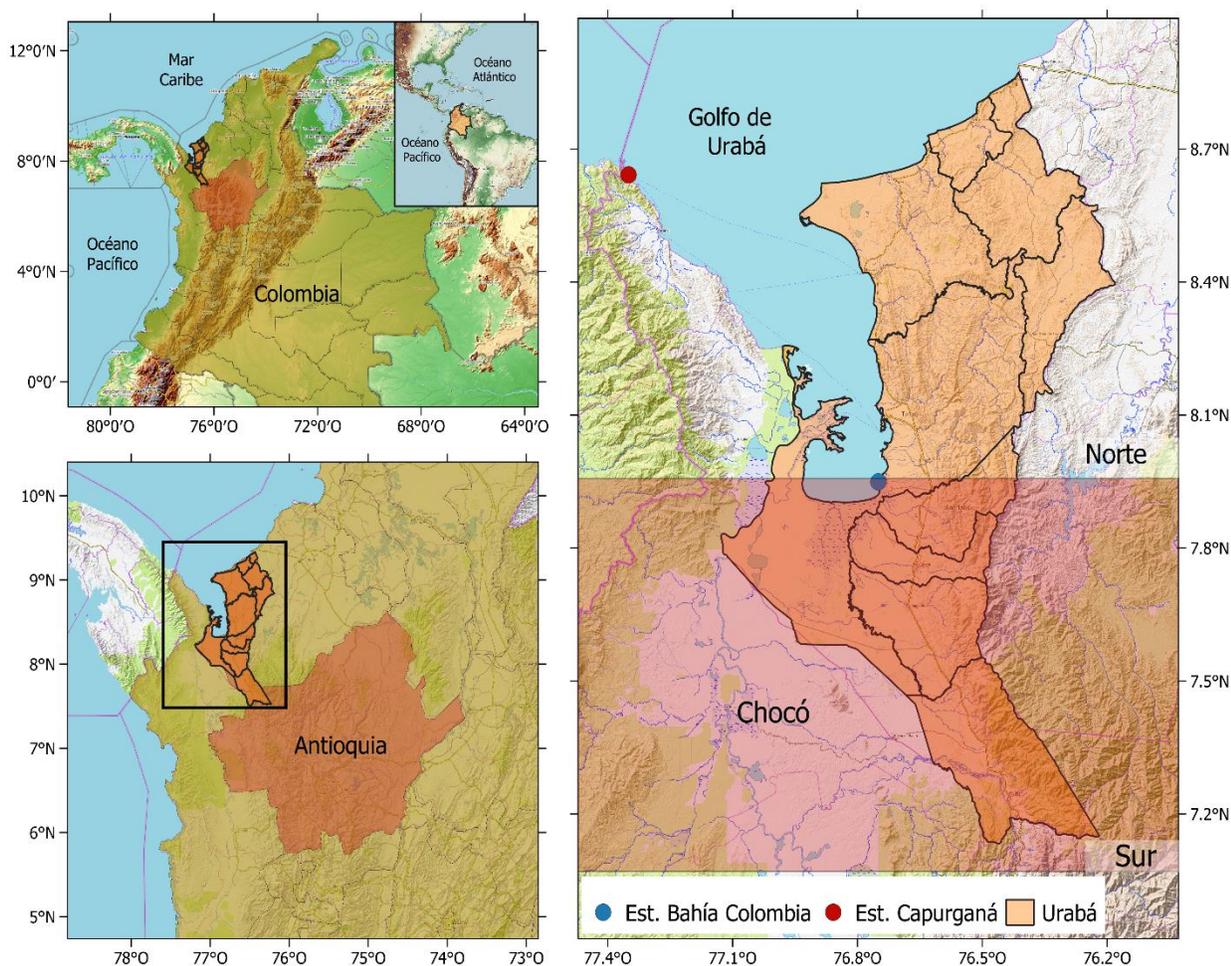


Figura 1. Área de estudio.

Weather Research and Forecasting Model (WRF) y sus principales características

Weather Research and Forecasting (WRF) model (Skamarock, 2008) es un modelo atmosférico de mesoescala diseñado para investigación y aplicaciones operativas. Fue desarrollado a través de una colaboración entre entidades como National Center for Atmospheric Research's (NCAR) Mesoscale and Microscale Meteorology (MMM) Division, National Oceanic and Atmospheric Administration's (NOAA) National Centers for Environmental Prediction (NCEP) and Earth System Research Laboratory (ESRL), Department of Defense's Air Force Weather Agency (AFWA) and Naval Research Laboratory (NRL), Center for Analysis and Prediction of Storms (CAPS) at the University of Oklahoma, and the Federal Aviation Administration (FAA). Este modelo cuenta con un código flexible que es eficiente en entornos computacionales complejos como en computadores portátiles, además es de uso comunitario y cuenta con una amplia gama de aplicaciones, donde se incluye asimilación de datos, física parametrizada, modelado de calidad de aire, acoplamiento océano-atmósfera y simulaciones idealizadas. Sus principales componentes se resumen en el siguiente diagrama (Figura 2).

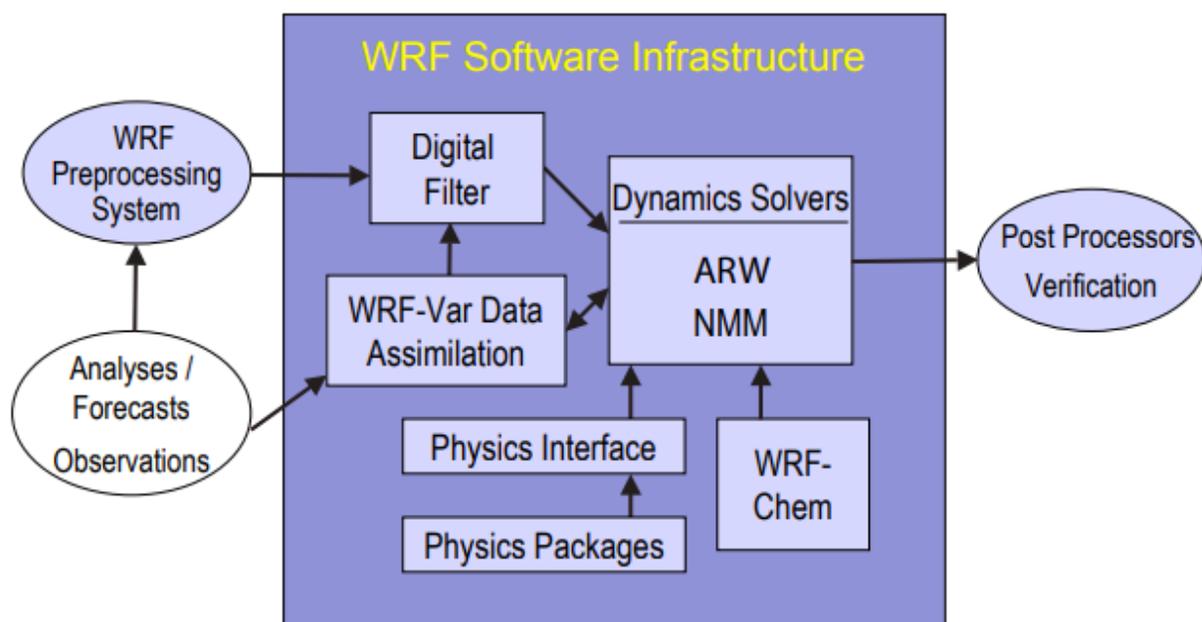


Figura 2. Esquema del funcionamiento de WRF. Tomado de (Skamarock, 2008).

Aplicación del WRF en estudios atmosféricos

Históricamente se ha tenido el interés por simular los flujos atmosféricos y pronosticarlos a través de ecuaciones diferenciales no lineales, conocidas como ecuaciones gobernantes (Haupt et al., 2017). El comportamiento de estos flujos puede presentarse en diferentes niveles espaciales y temporales, que van desde la microescala hasta el nivel planetario, pasando por la mesoescala (Díaz, 2017). Esta última incluye fenómenos que ocurren en términos de pocos kilómetros hasta cientos de kilómetros con una duración de un día o menos, considerando los efectos que pueda tener la topografía en la meteorología local (Oblack, 2020).

Para estudiar y predecir ese último grupo de fenómenos se usan los modelos numéricos de mesoescala, los cuales de acuerdo a Dudhia (2014) tienen su origen desde 1970, pero desde entonces han evolucionado gracias a los avances computacionales, tanto en la dinámica como en la física. En el primer aspecto se destaca el cambio de ecuaciones hidrostáticas a unas totalmente no hidrostáticas, que permiten llegar hasta escalas más finas y en cuanto a la física, se han creado parametrizaciones para representar procesos de la superficie, la radiación, la capa límite, los cúmulos y la convección.

Las mejoras de los modelos atmosféricos de mesoescala, han permitido que estos se hagan muy útiles para el desarrollo de investigaciones sobre procesos que afectan el comportamiento atmosférico a nivel local y tomen valor desde el punto de vista operativo en el pronóstico de variables como la precipitación y el viento, así como en la planificación de proyectos y políticas territoriales y la atención de eventos hidrometeorológicos extremos (Jiménez, 2016).

Uno de estos modelos es el WRF, el cual es ampliamente utilizado a nivel mundial gracias a su capacidad para satisfacer las necesidades de los usuarios y contar con sistemas físicos especializados para abordar un amplio número de procesos del sistema terrestre en escalas, que difícilmente, se consiguen con otros modelos (Powers et al., 2017). Por ejemplo, en los últimos años se ha empleado para el estudio de campos de vientos en el Himalaya (Wang et al., 2020) y Europa central (Zscheischler et al., 2021), patrones de precipitación en la península Ibérica (García-Valdecasas Ojeda et al., 2017) y los Andes Centrales (Junquas et al., 2018), el reciclaje de precipitación en la región de la Meseta Tibetana (Gao et al., 2020),

así como en el estudio del transporte de humedad asociado a ríos atmosféricos en la India (Douluri y Chakraborty, 2021), la convergencia del flujo de humedad en China y su relación con la precipitación (Yuan et al., 2021).

En Colombia ha servido para estudiar con alta resolución la precipitación sobre la cordillera central de los Andes (Posada-Marín et al., 2019) y se ha empleado a nivel operativo por entidades estatales como el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de la Dirección General Marítima de la Armada Nacional (CIOH) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (Mejía y Ruíz, 2012; Muñoz y Chourio, 2018). Además, este modelo ha mostrado un buen desempeño en el país en estudios sobre pronóstico de temperatura y viento (Fernández, 2021), evaluación de potencial eólico (Gil Ruiz et al., 2021), sistemas convectivos (Martínez et al., 2021) y la caracterización de la capa límite atmosférica en zonas urbanas (Herrera-Mejía y Hoyos, 2019).

Para el caso de zonas con topografía compleja y ausencia de información como Urabá el modelo ofrece la posibilidad de realizar el escalamiento de información de baja resolución espacial para captar de una manera más óptima los efectos orográficos del terreno y, por lo tanto, producir datos más ajustados a la realidad (Posada-Marín et al., 2019). Además, en zonas costeras puede mejorar la reproducción de variables como el viento y la precipitación, al representar mejor la línea de costa (Heikkilä et al., 2011).

Para Urabá, las simulaciones con WRF se han hecho en el marco del proyecto de erosión costera de la gobernación de Antioquia (Gob. ANT, UdeA, UNAL, UNINORTE, 2021) y una parte de sus resultados se han empleado para estudiar la ocurrencia de brisas marinas en la costa este del golfo de Urabá (Arroyo Quinto et al., 2022), sin embargo, hace falta analizar variables como la precipitación, la humedad y su relación con los vientos en las diferentes escalas en las que se produjeron los datos, lo cual es abordado en este estudio.

Objetivos

Objetivo general

Analizar la variabilidad de la precipitación, los vientos y la humedad en el Urabá antioqueño en la escala diurna y la estación seca durante los eventos El Niño 2009-2010 y La Niña 2010-2011 utilizando simulaciones de WRF.

Objetivos específicos

- ✓ Caracterizar la variabilidad espacial y temporal de la precipitación, el transporte horizontal de humedad y los vientos.
- ✓ Analizar las diferencias en los ciclos diurnos de la precipitación y el viento asociadas con los eventos El Niño 2009-2010 y La Niña 2010-2011.
- ✓ Describir los posibles mecanismos asociados con la variabilidad de la precipitación y el viento de la región del Urabá antioqueño.

Capítulo 1: Comparación y validación de la información simulada

1.1. Datos

Con el objetivo de poder comparar diferentes bases de datos respecto a la reproducción del viento, la humedad relativa y la precipitación sobre la región de Urabá por el modelo WRF (Skamarock, 2008), se emplearon datos satelitales, reanálisis y observaciones en el período entre 2008 y 2013 que serán descritas a continuación:

Global Precipitation Measurement (GPM)

Es una misión internacional lanzada en el año 2014 que tiene la finalidad de proporcionar observaciones globales de lluvias y nevadas, a través de una costelación de satélites de microondas. Es liderada por The National Aeronautics and Space Administration (NASA) y The Japan Aerospace and Exploration Agency (JAXA) (Hou et al., 2014) y para su mejoramiento continuo cuenta con una red de validación en tierra (Schwaller y Morris, 2011). La información de esta base de datos ha mostrado potencial para calibrar y monitorear radares en el continente americano (Arias y Chandrasekar, 2018). En este trabajo se emplearon mapas promediados de GPM_3IMERGDF, que es un producto con una cobertura global desde el 2000 hasta el presente con resolución temporal diaria y celdas espaciales de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. (https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGDF_06/summary).

The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

Es una misión a cargo de la NASA y Japan's National Space Development Agency que se enfoca en estudiar la precipitación tropical y subtropical. Proporciona promedios de precipitación mensual, diarios y sudarios (3 horas) con una resolución espacial de 0.25° . Este producto satelital ha sido validado recientemente en Urabá por Hernández y Mercado (2020), comparándolo con datos obtenidos de 10 pluviómetros distribuidos en el municipio de Turbo, Antioquia. En este estudio se observó una correlación regular entre las dos fuentes de información, pero se evidenció que reproduce de forma adecuada las temporadas de

lluvias. Además, en el Caribe colombiano, se ha encontrado que TRMM representa la tendencia de las precipitaciones durante las fases del ENSO (Rodríguez, 2018) y que logra captar los patrones de la precipitación media anual (Vallejo-Bernal et al., 2020). Para este trabajo se obtuvieron mapas promedios de la precipitación diaria sobre Urabá de los meses de enero, febrero y marzo entre 2008 y 2013.

Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS)

Es una base de datos administrada por el U.S. Geological Survey (USGS) y la Universidad de California con información disponible desde 1981 hasta el presente y con una resolución espacial de 0.05°. Sus fuentes de información incluyen datos del infrarrojo, de TRMM, del modelo de campos de precipitación del sistema de predicción de la NOAA y observaciones *in situ* de varias regiones del mundo (Funk et al., 2015). CHIRPS ha sido validada en Colombia empleando estaciones meteorológicas, con lo que se encontró que tiene un buen desempeño espacialmente en características de la precipitación como el valor medio, el acumulado anual y la estacionalidad (Urrea et al., 2016). Para el presente trabajo se descargaron datos diarios con procedimiento mejorado de reducción de escala temporal con un tamaño de grilla de 5 km (Versión 2). (Funk et al., 2014).

ERA5

Es un producto de reanálisis administrado por Copernicus Climate Change Service (C3S), que incorpora un registro detallado de la atmósfera global, mejorando los datos de Era-interim, gracias a los desarrollos en física de modelos, dinámica central y asimilación de datos. Además, pasa de una resolución espacial de 70 km a una de 30 km y cuenta con un cubrimiento temporal desde 1950 (Hersbach et al., 2020). Este ha sido útil para la caracterización de vientos en la costa Caribe colombiana (Gil Ruiz et al., 2021) y se ha encontrado que en general, reproduce la precipitación de manera consistente con los valores registrados por estaciones meteorológicas del IDEAM (Vega-Durán et al., 2021). En este trabajo se obtuvo información de viento y humedad específica de ERA5 cada 3 horas, para 20 niveles en la vertical desde los 1000 hPa hasta los 50 hPa cada 50 hPa, así como datos de humedad relativa a 2 metros.

Observaciones in situ

Se empleó información de 13 estaciones meteorológicas ubicadas en la región de Urabá pertenecientes a la red nacional de monitoreo del IDEAM, 8 de ellas fueron usadas para validar la precipitación, 4 para la humedad relativa y 2 se usaron para la validación del viento. La cantidad de estaciones utilizadas se debe a la disponibilidad de información de cada variable para el período de interés. Las comparaciones fueron realizadas para el 2010, dado que es el año en el que hay menos información faltante. La ubicación e identificación de las estaciones meteorológicas se resume en la tabla 1.

Tabla 1. Identificación de estaciones meteorológicas usadas en la validación.

Estación	Ubicación	Variable
Carmelo	8.62°N, -76.38°O	Precipitación
Tulenapa	7.77°N, -76.67°O	Precipitación y Humedad relativa
Tormento	7.76°N, -76.86°O	Precipitación
Nuevo Oriente	7.46°N, -76.69°O	Precipitación
Prado Mar	7.99°N, -76.64°O	Precipitación
Pueblo bello	8.19°N, -76.52°O	Precipitación
Mellito	8.54°N, -76.67°O	Precipitación y Humedad relativa
San Juan	8.75°N, -76.5°O	Precipitación
Villarteaga	7.33°N, -76.49°O	Precipitación
Uniban	7.83°N, -76.65°O	Humedad relativa
Turbo	8.09°N, -76.72°O	Humedad relativa
Capurganá	8.62°N, -77.33°O	Viento
Bahía Colombia	8.09°N, -76.71°O	Viento

Para esta investigación se emplearon datos producidos en un experimento de modelación realizado con la versión 3 de WRF en el marco del proyecto de reversión de la erosión costera en el mar de Antioquia. En el ejercicio se corrieron 6 años que incluyen distintas fases del ENSO (2008–2009, 2009–2010 y 2010–2011) con resultados cada 3 horas. Se realizaron dos simulaciones. Una en celdas de 30 km y otra con una resolución espacial de 3.3 km dentro de un dominio de 10 km para los meses de noviembre a marzo (Figura 3) (Los datos de los dos primeros meses se usaron como spin up) y verticalmente se produjo

información para capas entre 1000 hPa y 50 hPa. En estos experimentos se definieron las condiciones iniciales y de frontera con datos de ERA-Interim y la información de variables estáticas fue obtenida de MODIS. Para el dominio externo fue de 2 minutos de resolución y en los dos dominios internos de 30 segundos. En general, la configuración empleada se resume en la tabla 2.

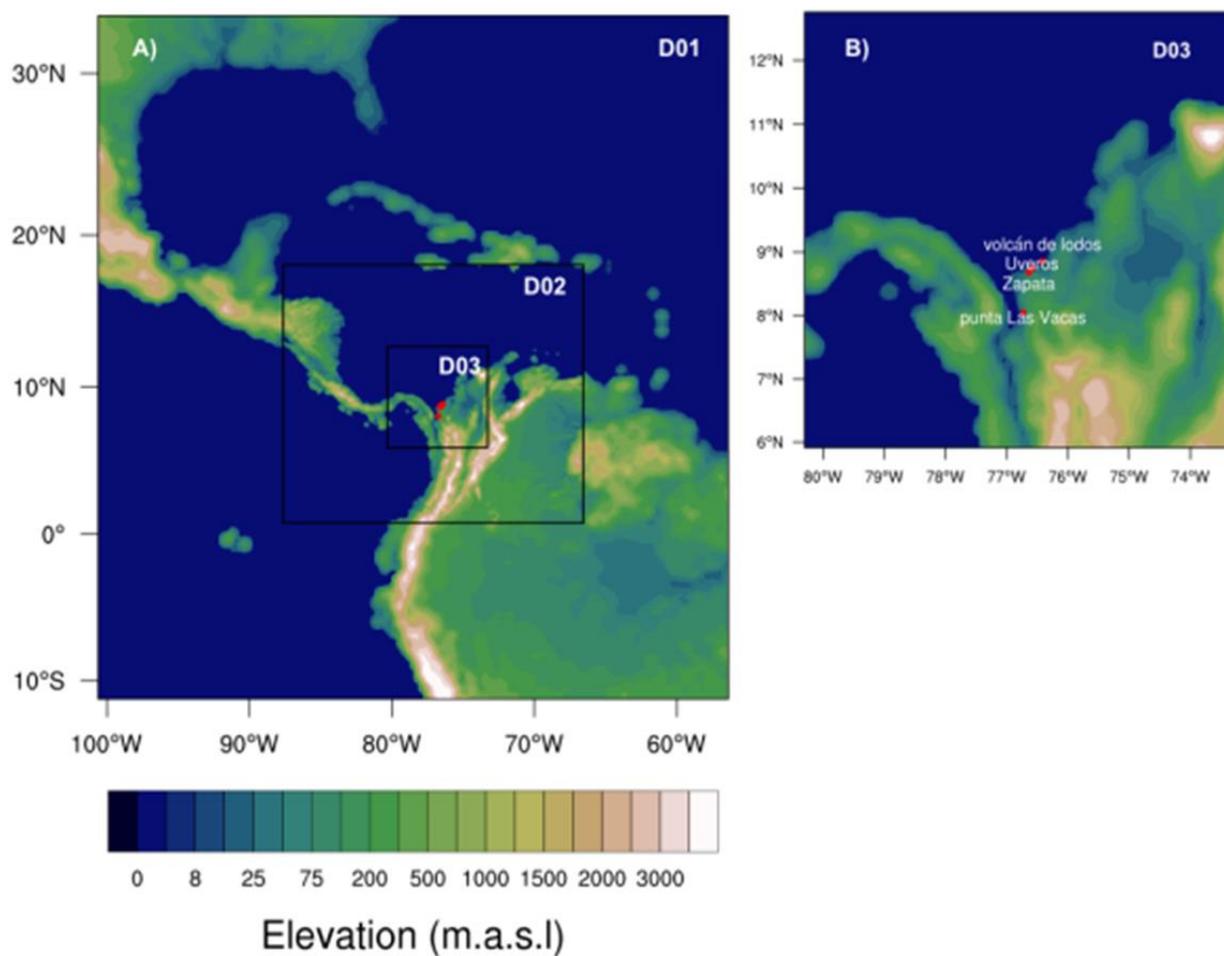


Figura 3. Dominios en los que se realizaron las simulaciones. A) Dominios D01: 30 km, D02:10 km y D03: 3km. B) Zoom sobre el D03.

Tabla 2. Resumen de la configuración para las simulaciones con WRF (Salazar et al., 2018).

Aspecto	Selección	Referencia
Condiciones iniciales y de frontera	Era-interim actualizadas cada 6h	Dee et al.2011
Temperatura superficial del océano	Era-interim actualizadas cada 6h	Dee et al.2012
Tipo de anidamiento	Doble vía (two-way nesting)	Debreu et al.2012
Esquema de convección	Kain Fritsch	Kain 2004
Esquema de procesos superficiales	Noah-MP	Niu et al. 2011
Esquema de capa límite planetaria	Mellor Yamada Janjic	Janjic 2002
Esquema de capa superficial	Monin-Obukhov (Janjic Eta)	Janjic, 1996, 2002
Esquema de microfísica	WRF single moment six class-wsm6	Hong and Lim 2006
Esquema de radiación de onda corta	Dudhia	Duhia 1996
Esquema de radiación de onda larga	RRTM	Mlawer 1997

1.2. *Métodos de comparación y validación de la información*

Como forma de validar la distribución espacial de los datos simulados con WRF se realizaron promedios de cuadrículas del modelo de 3.3 km para obtener celdas de tamaños aproximados al de las bases de datos. Con este ejercicio se produjeron campos de precipitación con celdas de 6.6 km, 9.9 km, 26 km y campos de viento y humedad específica de 29.7 km que se usaron para comparar espacialmente los datos de WRF con la información de CHIRPS (5km), GPM (10 km), TRMM (25 km) y ERA5(30 km) respectivamente. También, se hallaron los promedios espaciales de la precipitación al sur (entre 7.1°N a 8.0°N) y al norte (entre 8°N y 9°N) de la región usando información del modelo y de las bases de datos para los trimestres de enero, febrero y marzo de los años entre 2008 y 2013. A estos promedios se les calcularon el coeficiente de correlación, el bias y el índice de acuerdo. Adicionalmente, se halló la correlación, el error cuadrático medio, el índice de acuerdo y la desviación estándar de los datos de precipitación del modelo con respecto a 8 estaciones meteorológicas. Los valores de estos estadísticos se representaron en un diagrama de Taylor.

Para el viento se hicieron comparaciones de los campos del modelo y ERA5 en los niveles de 950 hPa, 700 hPa y 500hPa, con el fin de identificar similitudes y diferencias en

alturas cercanas y distantes a la superficie y se validó la velocidad del viento del modelo y ERA5 en las celdas correspondientes a la ubicación de dos estaciones meteorológicas, para lo cual se calculó la densidad de probabilidad de los datos y se realizaron rosas de viento.

Con respecto a la humedad, se emplearon dos variables. Por una parte, se realizaron los campos de humedad específica a 950 hPa del modelo y ERA5 con el fin de comparar el comportamiento de esta variable cerca de la superficie y, por otro lado, se halló la correlación, el error cuadrático medio, el índice de acuerdo y la desviación estándar para la humedad relativa a 2 m del modelo y de ERA5 con respecto a los datos de 4 estaciones meteorológicas. El resumen de estos estadísticos se presenta en un diagrama de Taylor.

1.3. Validación de simulaciones

Los datos usados en este estudio han sido validados previamente en el mar Caribe, dada la disponibilidad de información observada para esta región. Los resultados de dicha validación mostraron un buen desempeño del modelo WRF en la reproducción del viento con respecto a ASCAT y la precipitación al compararla con CRU, GPCC y TRMM (Gob. ANT, UdeA, UNAL, UNINORTE, 2021). Este buen desempeño del modelo sobre el Caribe sugiere su capacidad de representar dichas variables con cierto nivel de confianza en la región de Urabá.

Para esta investigación, la validación de las simulaciones se realizó principalmente utilizando bases de datos y reanálisis, debido a la baja densidad de estaciones meteorológicas en la región, lo cual limitó la posibilidad de realizar una comparación espacial más robusta con datos *in situ*, especialmente en la zona costera y oceánica, por lo tanto, las comparaciones realizadas se hicieron en las posiciones geográficas que coinciden con la ubicación de las estaciones meteorológicas con información disponible.

1.3.1. Precipitación

La distribución espacial de la precipitación modelada con WRF para el trimestre enero, febrero y marzo es comparada con las bases de datos TRMM, GPM y CHIRPS (Figura 4). Los mapas muestran los valores promedios más altos al sur de la región y los menores valores al norte, lo cual ha sido observado en otros estudios (Bastidas Osejo et al., 2019). No obstante, la precipitación en el modelo presenta diferencias positivas al

norte del golfo de Urabá y al norte de la región con respecto a las tres bases de datos, al sur de la región con CHIRPS y con GPM; dichos valores pueden alcanzar los 9 mm/día. Contrario a esto, al sur del golfo de Urabá el modelo presenta diferencias negativas con las bases de datos de hasta 3 mm/día.

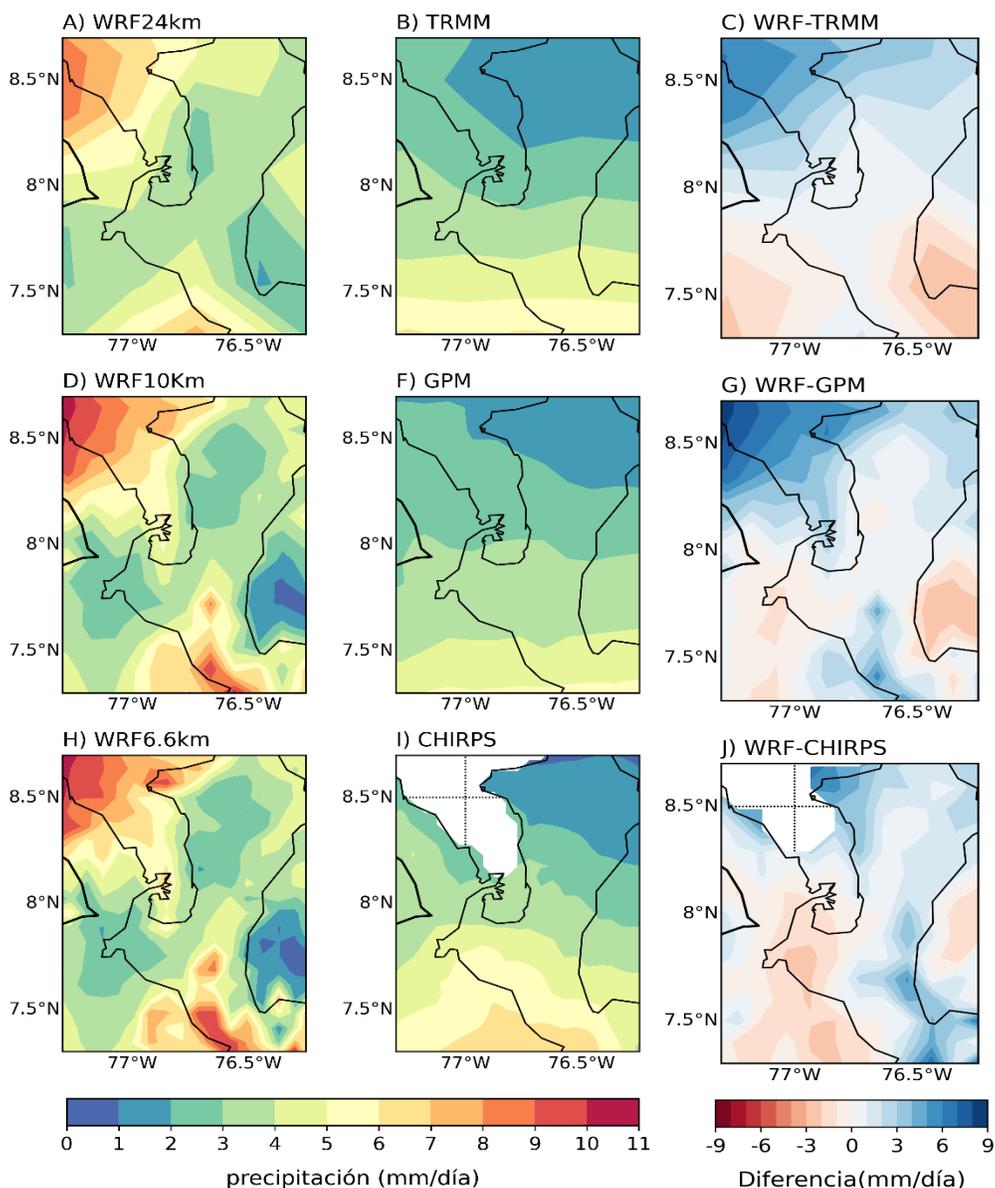


Figura 4. Comparación de la precipitación promedio para los meses de enero, febrero y marzo entre WRF contra CHIRPS, TRMM y GPM.

Al sur de la región el modelo muestra un índice de acuerdo con respecto a CHIRPS de 0.76 y un valor de correlación de 0.4, para el caso de GPM es de 0.66 y 0.64 y con

relación a TRMM de 0.86 y 0.6 respectivamente (Tabla 3). Estos valores sugieren una buena concordancia del modelo con las bases de datos en la reproducción de la precipitación especialmente en el sur (Figura 5B). Sin embargo, en el norte (Figura 5A) no se evidencian estas similitudes y en cambio, el modelo presenta valores de precipitación más altos con respecto a las bases de datos. Es de aclarar que el esquema de convección usado en este caso fue Kain Fritsch y éste ha mostrado un sesgo húmedo en regiones secas (Srinivas et al., 2012; Ratna et al., 2014). Los errores de este esquema se relacionan con su mayor sensibilidad a parámetros como el coeficiente de corriente descendente y la altura inicial del flujo ascendente (Yan et al., 2014), Aunque se ha determinado, que en general en las zonas tropicales la activación de los esquemas de convección basada en la velocidad vertical puede aumentar la ocurrencia de eventos de lluvias en la escala horaria (Kong et al., 2022).

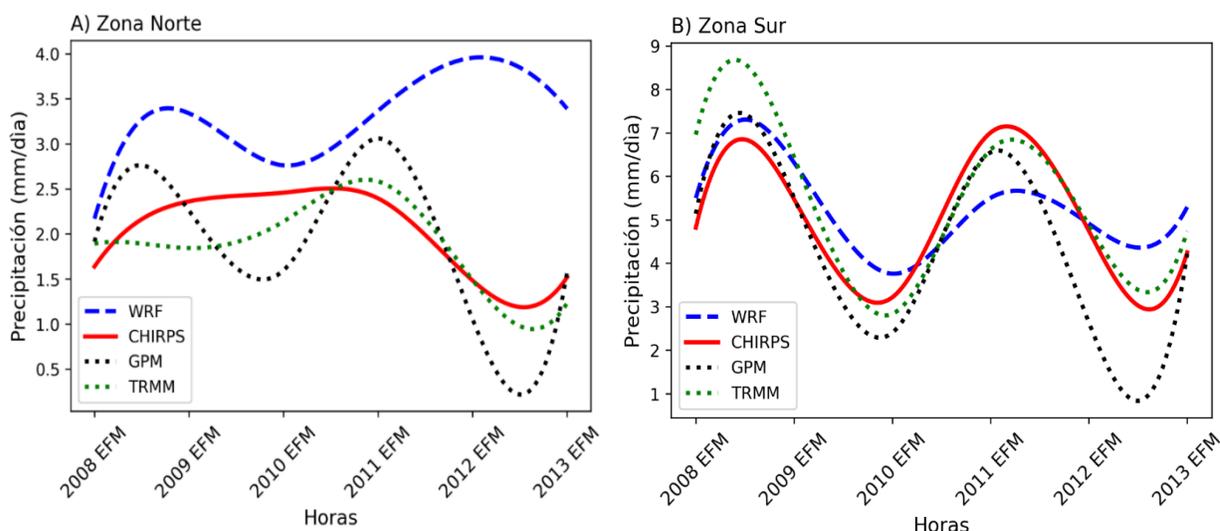


Figura 5. Promedios espaciales de la precipitación de WRF y las bases de datos A) en el norte (entre 8°N y 8.8°N) y B) en el sur (entre 7.1°N y 8°N).

Tabla 3. Estadísticos para la validación del modelo con las bases de datos.

	Sur		Norte	
	IOA*	Diferencia**	IOA	Diferencia
WRF vs CHIRPS	0.77	0.30	0.33	1.19

WRF vs GPM	0.66	0.81	0.35	1.25
WRF vs TRMM	0.86	-0.20	0.22	1.30

*IOA: Corresponde al Agreement of Index (Índice de Acuerdo), para medir el grado de error del modelo en comparación a datos observados. Se mide en el rango 0-1.

** Es la diferencia del valor del promedio espacial de las simulaciones menos el promedio espacial de las bases de datos para los trimestres de enero, febrero y marzo entre 2008 y 2013.

Por otra parte, los diagramas de Taylor (Figura 7) muestran que las simulaciones tienen una correlación de baja (3 estaciones) a moderada con los datos de 8 estaciones meteorológicas ubicadas en diferentes puntos de la región de estudio (Anexo 1- Tabla 4), así como valores de desviación estándar que pueden ser cercanos al de las observaciones como en el caso de las estaciones Carmelo, Prado Mar y Pueblo Bello o distantes como sucede con Villarteaga, Nueva Oriente y San Juan, sin embargo, respecto al índice de acuerdo (Figura 6) se obtuvieron valores que van de 0.37 a 0.7 y sugieren una capacidad aceptable del modelo para simular los datos observados (Pereira et al., 2018).

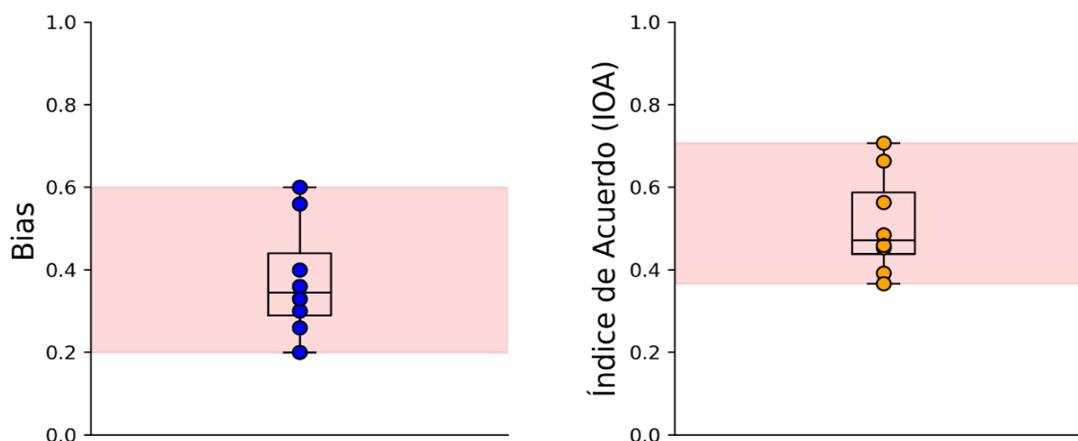


Figura 6. Boxplot con valores del Coeficiente de Correlación (CC) y del Índice de Acuerdo (IOA) para los datos de precipitación del WRF con respecto a las observaciones.

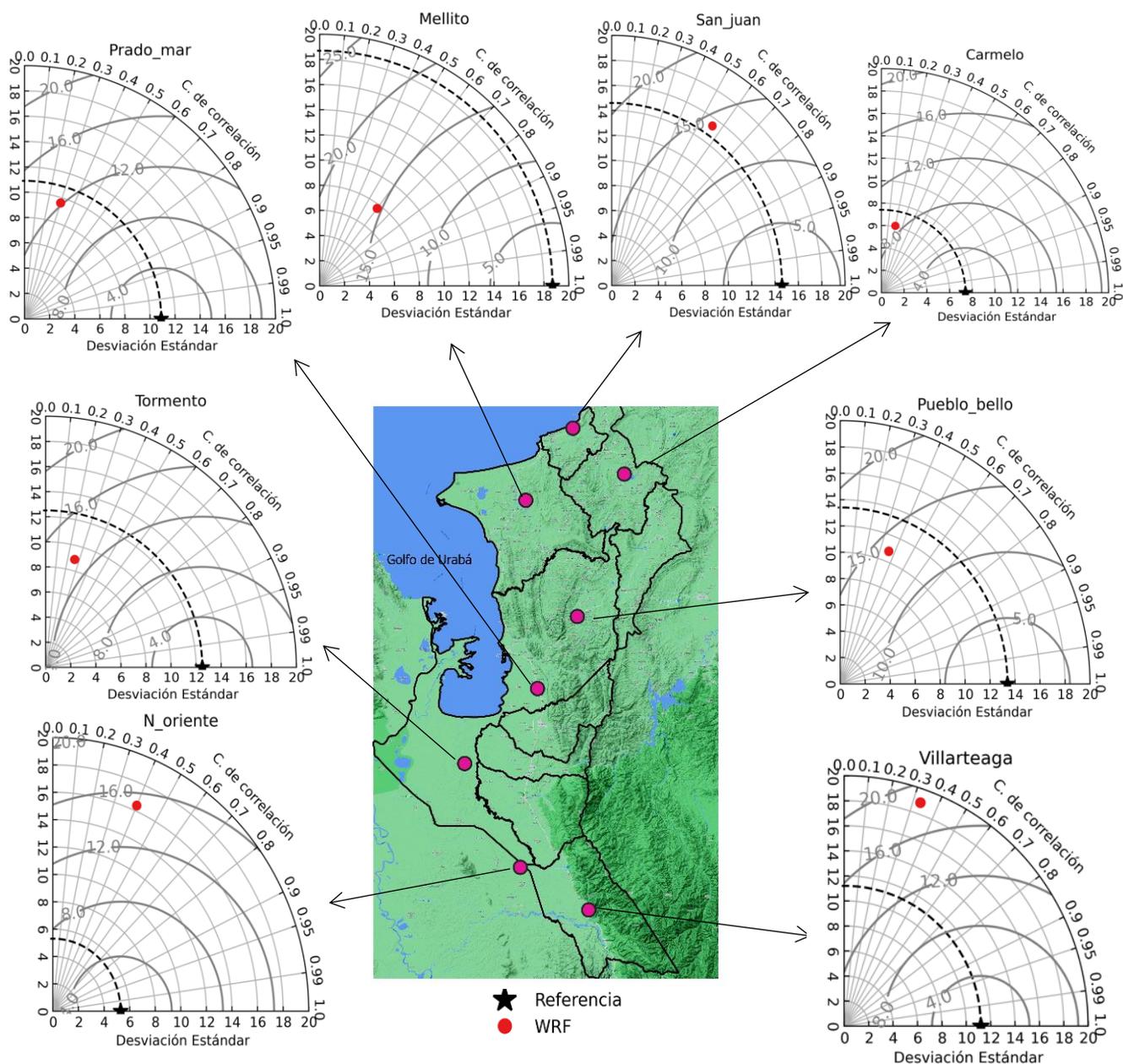


Figura 7. Diagramas de Taylor con valores de correlación, desviación estándar y error cuadrático medio entre WRF y estaciones meteorológicas de Urabá.

1.3.2. Viento

Durante la temporada seca, los vientos alisios hacen presencia en Urabá con una dirección desde el norte y el noreste (Thomas et al., 2007). Este comportamiento es captado tanto por el reanálisis ERA5 como por WRF (Figura 8), además estas dos fuentes de información muestran las mayores velocidades del viento superficial al norte y al interior del

golfo y las menores velocidades al sur. Este último comportamiento concuerda con la presencia de mayor complejidad en el terreno sobre esta parte de Urabá (CORPOURABA, 2016). A los 950 hPa (Figura 8B) el reanálisis tiene valores de velocidad superiores a los generados por el modelo, los cuales pueden llegar a ser de 7 m/s, mientras en los campos de WRF (Figura 8A) no superan los 3 m/s, pero las direcciones del viento son similares. Estos comportamientos sugieren la sensibilidad del modelo para captar los efectos de la topografía cerca de la superficie, lo cual se evidencia en las diferencias de la figura 8C (2 m/s a 8 m/s). Por otra parte, los campos del modelo presentan una alta similitud con ERA5 en cuanto la dirección y la velocidad del viento a las alturas de 700 hPa (Figuras 8D y 8E) y 500 hPa (Figuras 8G y 8H). Las velocidades del viento tienen diferencias menores (1 m/s) (Figuras 8F Y 8I) y las direcciones se mantienen de este a oeste.

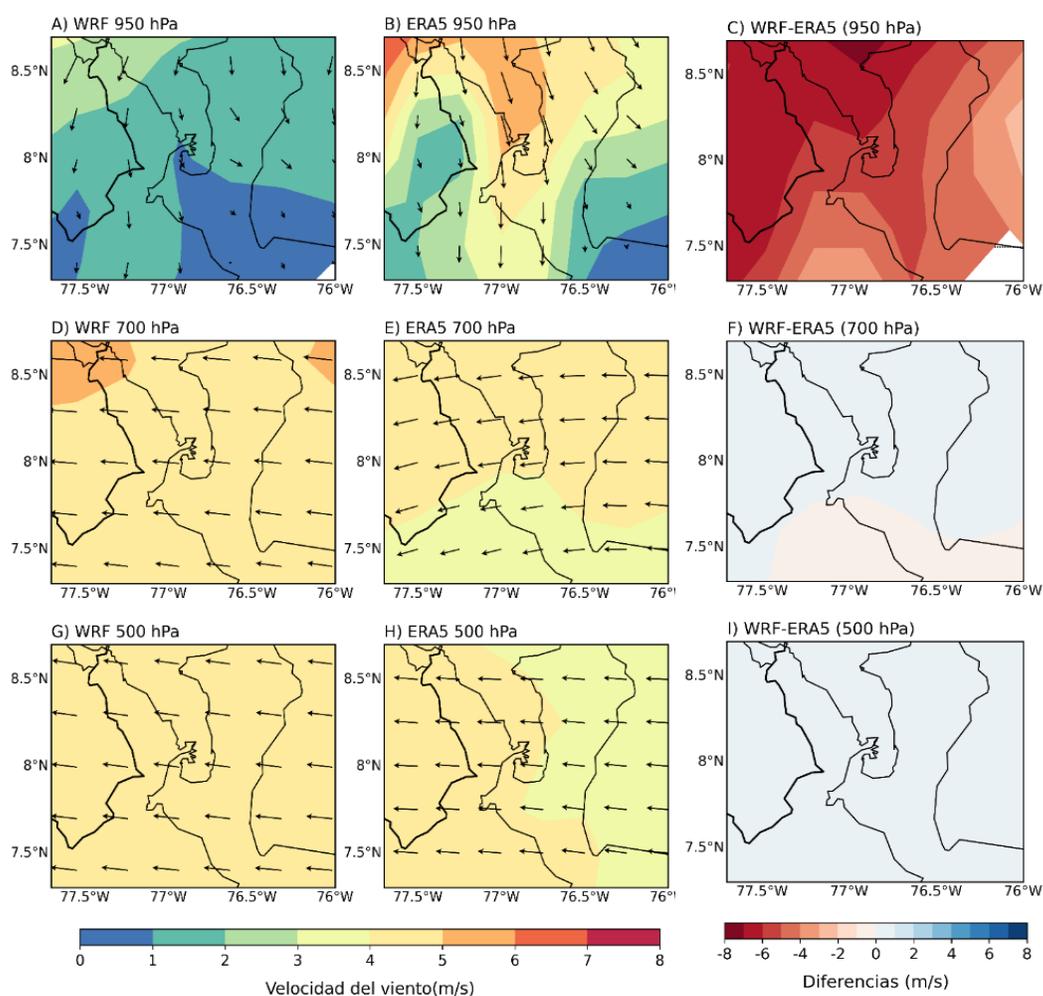


Figura 8. Campos de viento con contornos de la velocidad del viento promedio del trimestre enero, febrero y marzo de WRF (izquierda A, D y G) y ERA5(centro B, E y H). A la derecha las diferencias entre WRF y ERA5(C, F e I).

Al comparar de manera puntual los valores de velocidad del viento del modelo y de ERA5 con datos de observaciones en la parte sur y norte de Urabá (Figura 9) el desempeño de ambas es aceptable, con un leve mejor resultado de WRF en el norte, donde presenta un índice de acuerdo de 0.36 contra 0.30 de ERA5. No obstante, los mejores acuerdos tanto para ERA5 como para el modelo se presentan al sur, pero con un mejor ajuste del WRF a los datos observados.

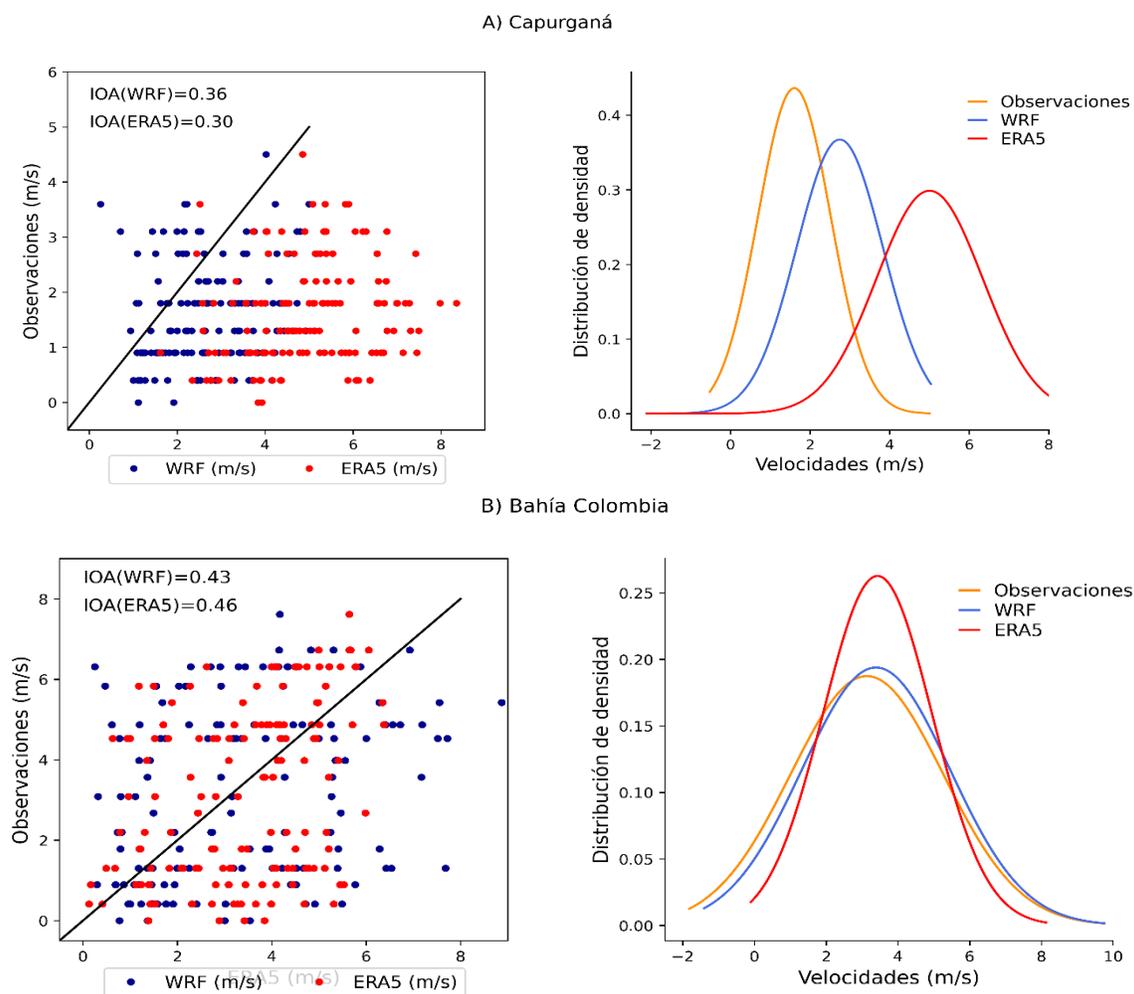


Figura 9. Comparación entre los datos de velocidad del viento de WRF, ERA5 y observaciones *in situ*. En la columna izquierda los datos de ERA5 y WRF versus las observaciones y en la columna derecha las distribuciones de probabilidad A) para los datos de Capurganá y B) para los datos de Bahía Colombia.

Además, Se hicieron comparaciones del ciclo diario de la velocidad del viento entre modelo WRF y datos de las estaciones de Capurganá y Bahía Colombia para los días entre el 22 de enero y el 8 de febrero de 2010 (Figura 10). Para el caso de Capurganá los resultados

sugieren menores errores entre WRF y las observaciones en comparación con ERA5. El modelo presenta diferencias promedio con las observaciones de 1 m/s, mientras ERA5 de 3.4 m/s (Figura 10A). Por su parte, con relación a Bahía Colombia los errores son similares tanto para WRF como ERA5, con diferencias promedio de 0.25 m/s y 0.29 m/s respectivamente, lo cual puede deberse a efectos topográficos (Figura 10B).

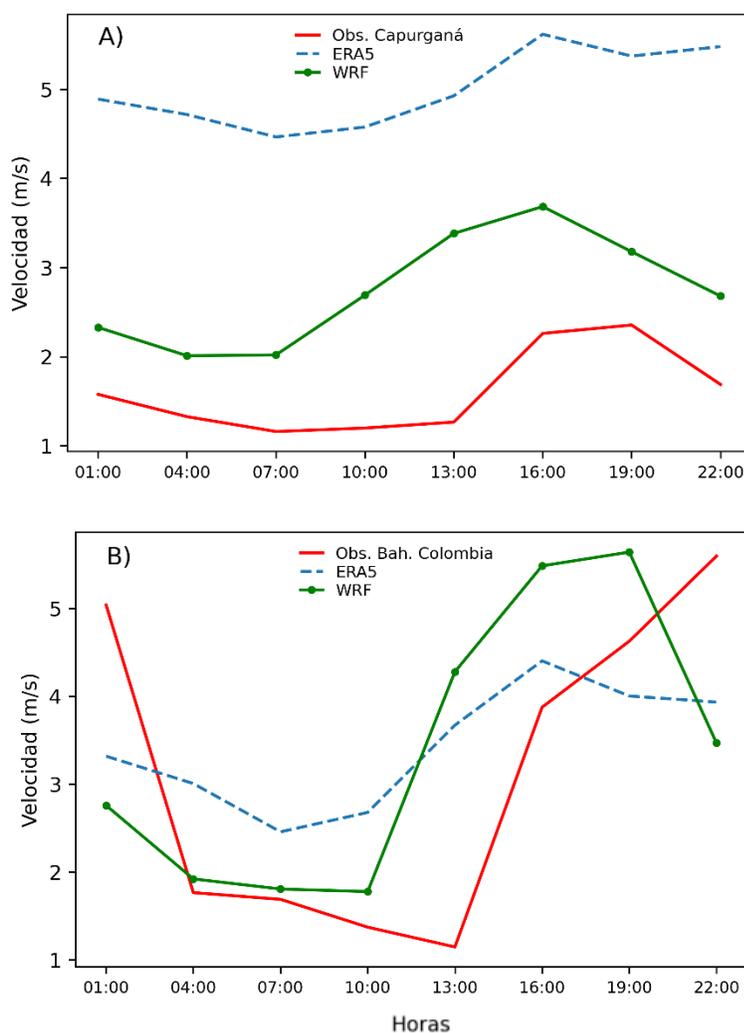


Figura 10. Ciclo diario del viento para datos observados, modelo WRF y ERA5 A) en el punto localizado en Capurganá. B) en el punto localizado en Bahía Colombia.

En cuanto a la dirección del viento tanto el modelo como ERA5 muestran valores que se mantienen principalmente entre el noreste y el noroeste (Figura 11), pero con frecuencias distintas a las de las observaciones, y las mayores similitudes se presentan con la estación de

Bahía Colombia, lo cual también ocurre con la velocidad. Cabe aclarar que dicha estación está en una zona donde el terreno presenta alturas cercanas al nivel del mar.

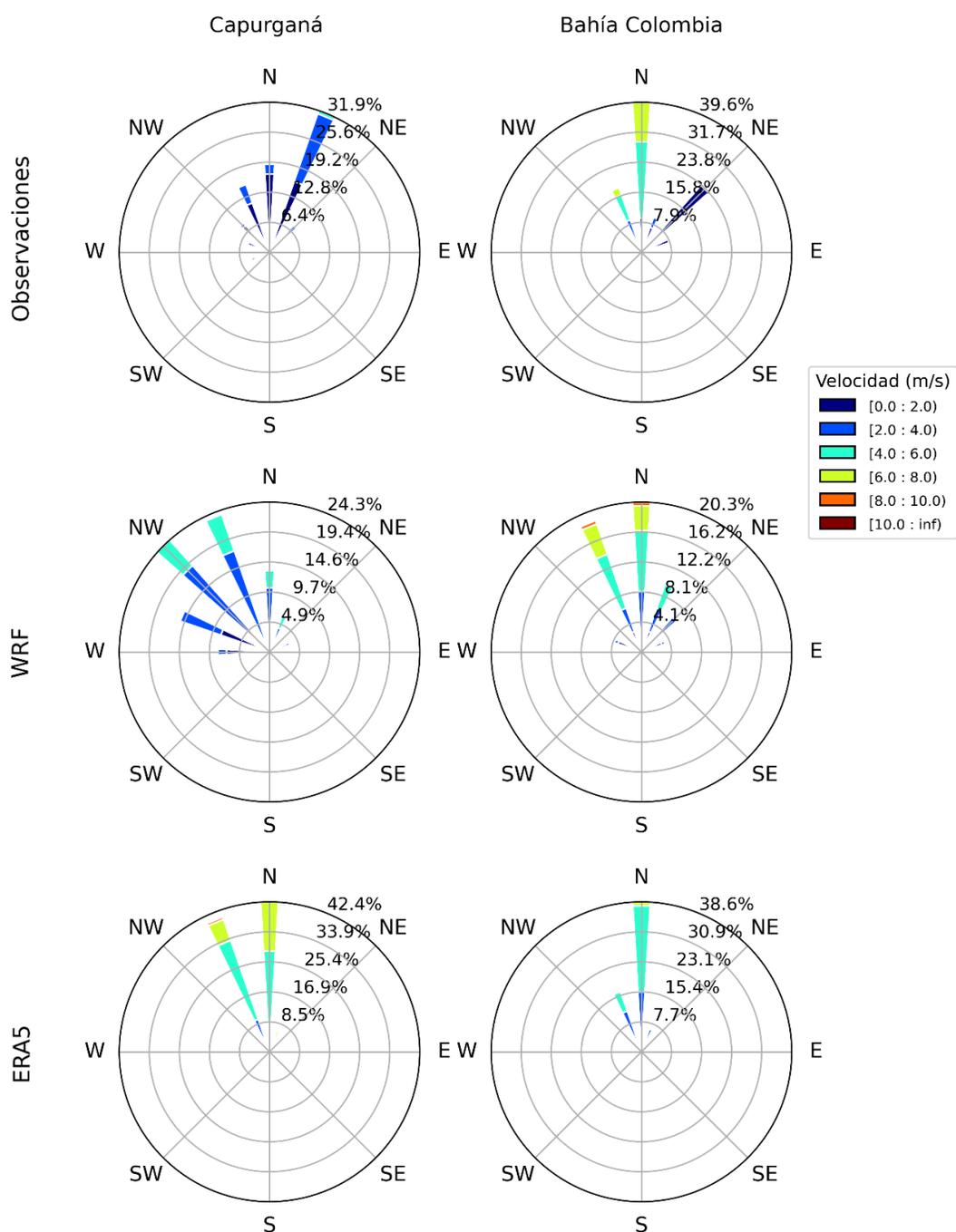


Figura 11. Rosas de viento de las observaciones versus WRF y ERA5, para Capurganá (izquierda) y para Bahía Colombia (derecha). Entre el 22 de enero y el 8 de febrero de 2010.

1.3.3. Humedad

La comparación de los patrones espaciales de la humedad específica a 950 hPa entre el WRF y la base de datos ERA5 se presenta en la figura 12. Este resultado muestra que en general el modelo WRF tiene valores menores de humedad en el nivel de 950 hPa sobre la región de estudio con respecto a ERA5 (0.0148kg/kg-0.0160kg/kg: WRF; 0.0152kg/kg-0.0164kg/kg: ERA5) y muestra los menores valores al interior del golfo de Urabá y el norte de la región, pero coincide con ERA5 en que ambos tienen valores altos de humedad específica al oeste del golfo de Urabá, cerca de donde se ubica la serranía del Darién, este comportamiento es consistente con el sentido en el que se desplaza el viento a 950 hPa (Figura 8A y 8B), el cual se mueve desde el norte y el noreste, dicho comportamiento puede tener como efecto el transporte de la humedad del golfo hacia otras zonas de la región, donde además la topografía actúa como barrera y retiene dicha humedad.

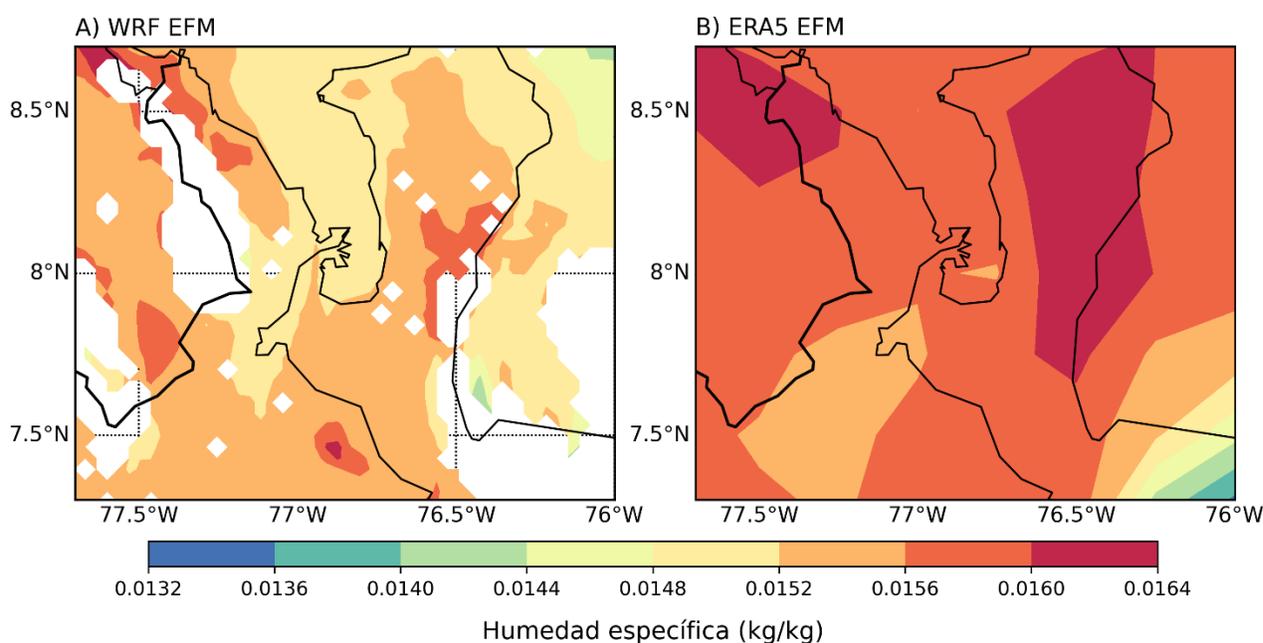


Figura 12. Campos promedio de la humedad específica de los trimestres enero, febrero y marzo de los años entre 2008 y 2013 en el nivel de 950 hPa A) WRF y B) ERA5.

Para complementar el análisis anterior se compararon los datos de humedad relativa del modelo y de ERA5 a 2 metros en puntos cercanos a 4 estaciones meteorológicas de la zona de estudio (Figura 13). El modelo presenta un buen

desempeño con respecto a los datos de referencia de cada estación. Sus valores de correlación están entre 0.4 y 0.6, mientras ERA5 tiene correlaciones que van de 0.28 a 0.7 (Anexo 2 – Tabla 5).

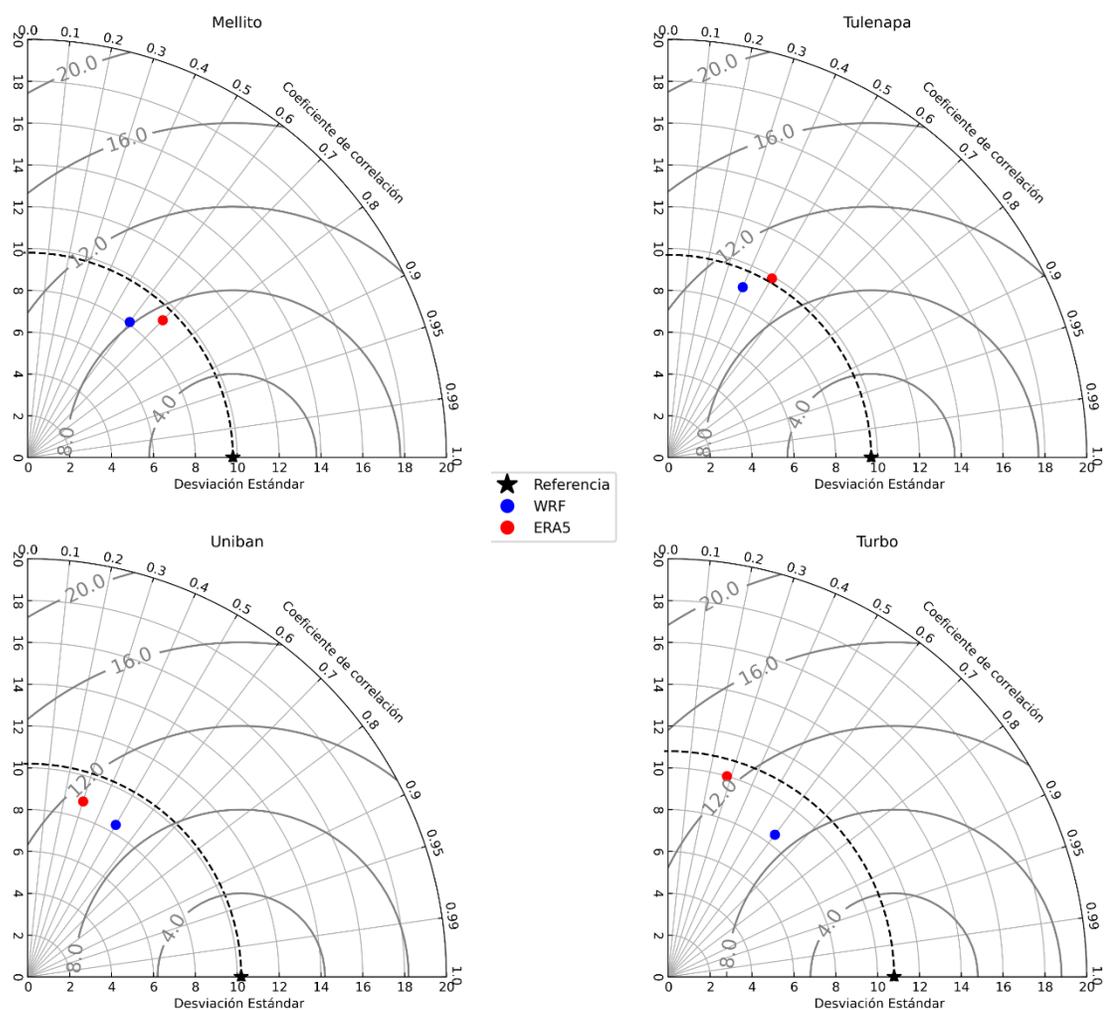


Figura 13. Diagramas de Taylor con valores de correlación, desviación estándar y error cuadrático medio de WRF y ERA5 en relación a 4 estaciones meteorológicas de Urabá.

Capítulo 2: Caracterización de variables

2.1. Métodos para la caracterización de las variables

El comportamiento de las variables atmosféricas en cada región está influenciado por las características particulares del paisaje (Pielke, 2001) y en el caso de las regiones colombianas son factores importantes de la variabilidad natural la presencia de costas, la altitud y los fenómenos de gran escala como el ENSO y la ZCIT (Poveda, 2004; Mesa Sánchez y Peñaranda Vélez, 2015).

La región de Urabá al estar influenciada por las costas del golfo de Urabá, el mar Caribe y las montañas de la serranía de Abibe requiere de un análisis más puntual para identificar algunos rasgos específicos del clima ligados a estos elementos locales. Para este fin se realizaron promedios mensuales y trimestrales (de enero, febrero y marzo) de los datos simulados de precipitación, humedad y de las componentes horizontales del viento. Los análisis de la precipitación se realizaron en la zona sur y norte de la región, así como en tres secciones transversales en el este, centro y oeste de Urabá (figura 15). También se graficaron los campos de viento sobre toda región para cada uno de los meses de análisis a las alturas de 950 hPa y 850 hPa con una frecuencia de cada 3 horas. Estos niveles de presión fueron seleccionados por ser las capas donde se presenta el mayor transporte de humedad y la presencia de flujos horizontales de viento a nivel superficial (Poveda, 2004).

Además, se realizaron perfiles verticales de la humedad específica en las tres secciones transversales mencionadas y se hicieron campos de humedad relativa en el nivel de 950 hPa sobre el área de estudio. El transporte horizontal de la humedad se evaluó calculando el flujo estacionario de humedad a 950 hPa, la cual es una componente del balance hídrico atmosférico expresado como (Junquas et al., 2018):

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{Q} = E - P$$

Donde E y P son la evaporación y la precipitación respectivamente, W es el agua precipitable y \vec{Q} el Flujo Integrado en la Vertical (VIMF):

$$VIMF = \frac{1}{g} \int_{suf}^P qUdp$$

Siendo p la presión, g la gravedad, q la humedad específica y U representa las componentes zonal y meridional del viento.

2.2. *Distribución espacial y temporal de la precipitación*

La precipitación acumulada promedio sobre la región, de acuerdo a los resultados del modelo, muestra los valores más altos al sur y al noroeste del golfo de Urabá (Figura 4), siendo el mes de marzo donde se presentan los valores más altos. El análisis de la precipitación a nivel horario sobre las zonas norte (Figura 14A) y sur (Figura 14B) de Urabá muestra que en ambas regiones se presentan los picos más altos entre las 16:00 y las 19:00 para los tres meses de análisis y los menores valores se observan entre las 10:00 y 13:00 horas.

En la parte continental el modelo reproduce la precipitación de acuerdo a la presencia de topografía. Esto puede observarse a través de las secciones transversales presentadas en la figura 15, donde en todos los cortes en la parte sur se presentan los picos cerca de 7.4° N y 7.6°N, latitudes en las que se tienen alturas de más de 900 msnm para el caso del este. La sección transversal del oeste presenta el pico más pronunciado al norte (8.6°N) y la del este al sur(7.4°N). Cabe notar, que cerca de los 8.6°N es la zona del norte donde se presentan los valores más altos de precipitación, lo cual puede obedecer a la extensión de la serranía de Abibe hasta este punto, aunque ya, con alturas menores (alrededor de 400 msnm).

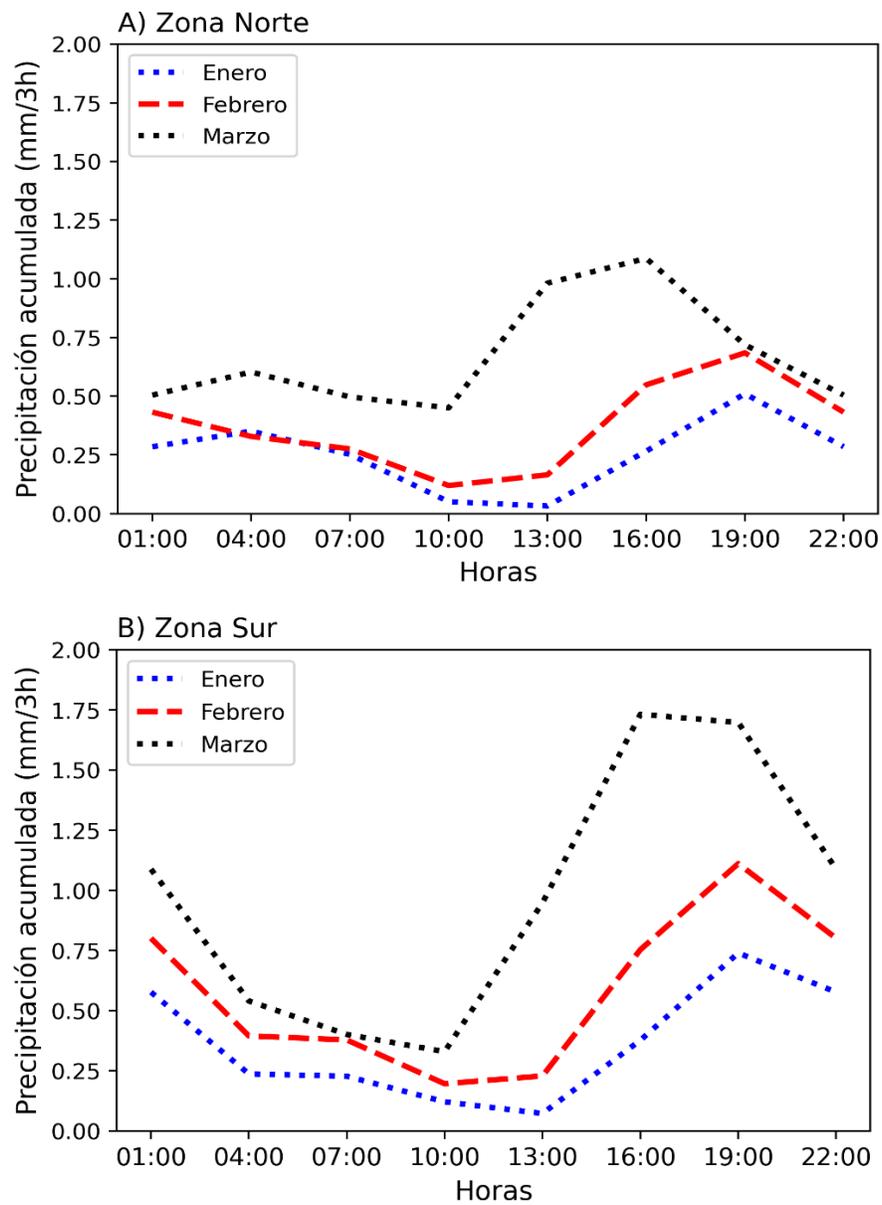


Figura 14. Promedio espacial del ciclo diurno de la precipitación A) norte de Urabá B) sur de Urabá.

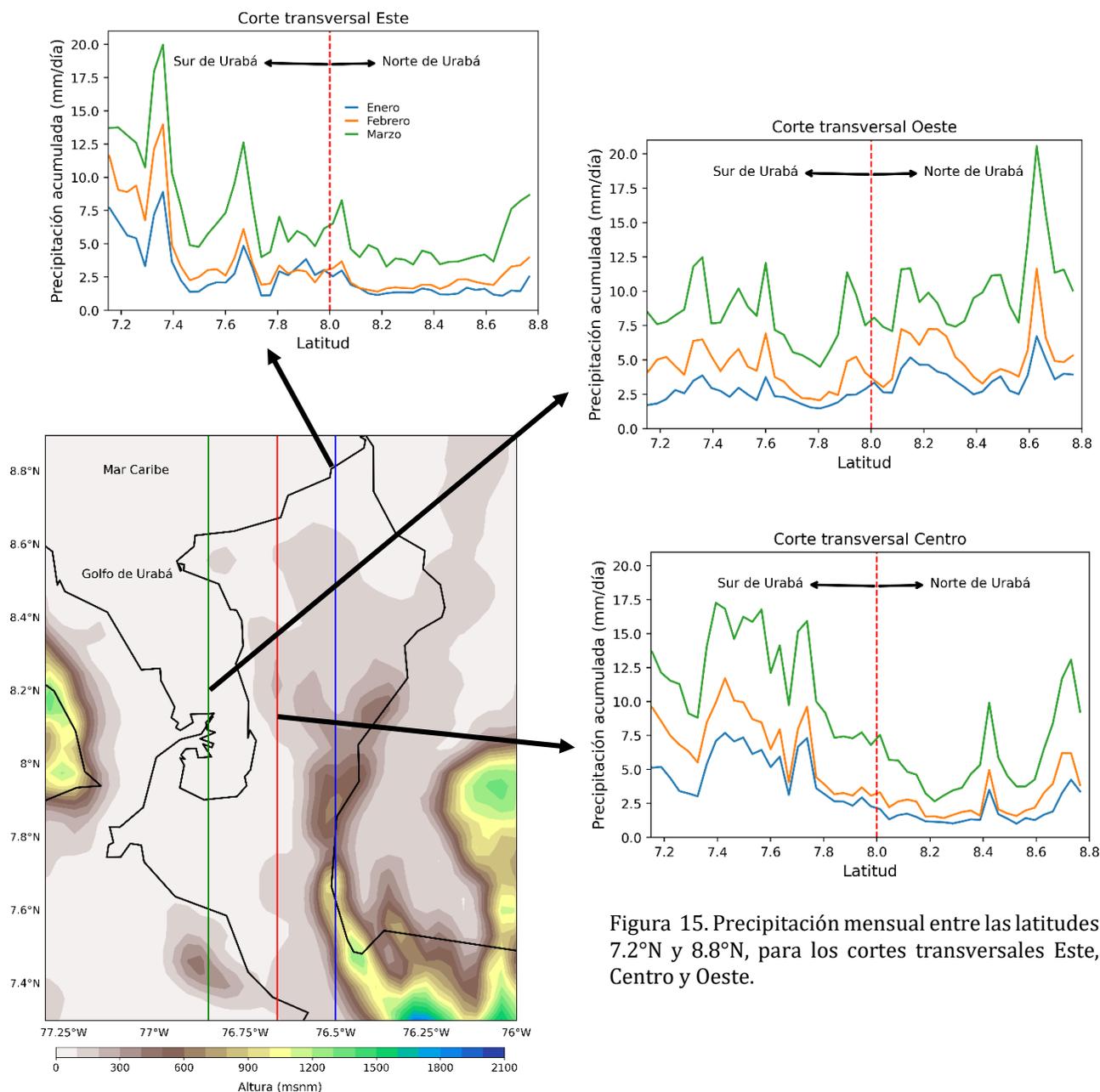


Figura 15. Precipitación mensual entre las latitudes 7.2°N y 8.8°N, para los cortes transversales Este, Centro y Oeste.

2.3. Distribución espacial y temporal del viento

En los niveles de 850 hPa y 950 hPa la velocidad del viento sobre la región varía a lo largo de las horas (Figuras 16 y 17), mostrando los valores más altos a la 01:00 y las 19:00, pero manteniéndose más fuerte en la zona norte de Urabá con valores máximos de 4.8 m/s. La dirección del viento en los 950 hPa muestra cambios durante el día con una clara influencia de la topografía. Al sureste el terreno crea una obstrucción sobre el campo de viento llegando a valores casi nulos, mientras sobre el oeste del golfo de Urabá modifica la

dirección del viento en valores de hasta 90°. A los 850 hPa se evidencia menos variabilidad en la dirección del viento, y éste mantiene un desplazamiento desde el este hacia el oeste, tal como se espera en el primer trimestre del año (Thomas et al., 2007).

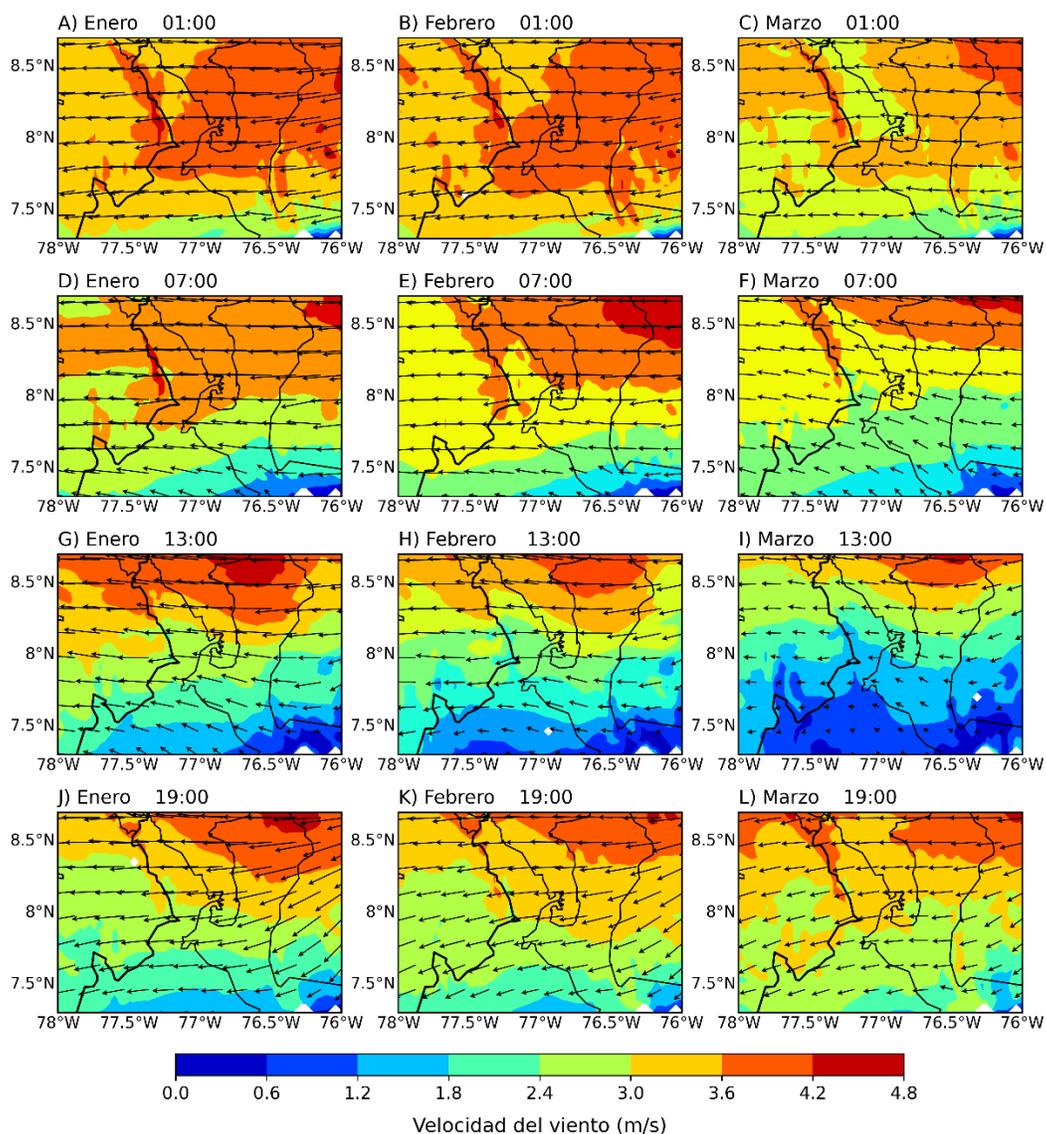


Figura 16. Campos de velocidad y dirección del viento promedio entre 2008-2013 en los meses de enero (A, D, G y J), febrero (B, E, H y K) y marzo (C, F, I y L) en el nivel de 850 hPa.

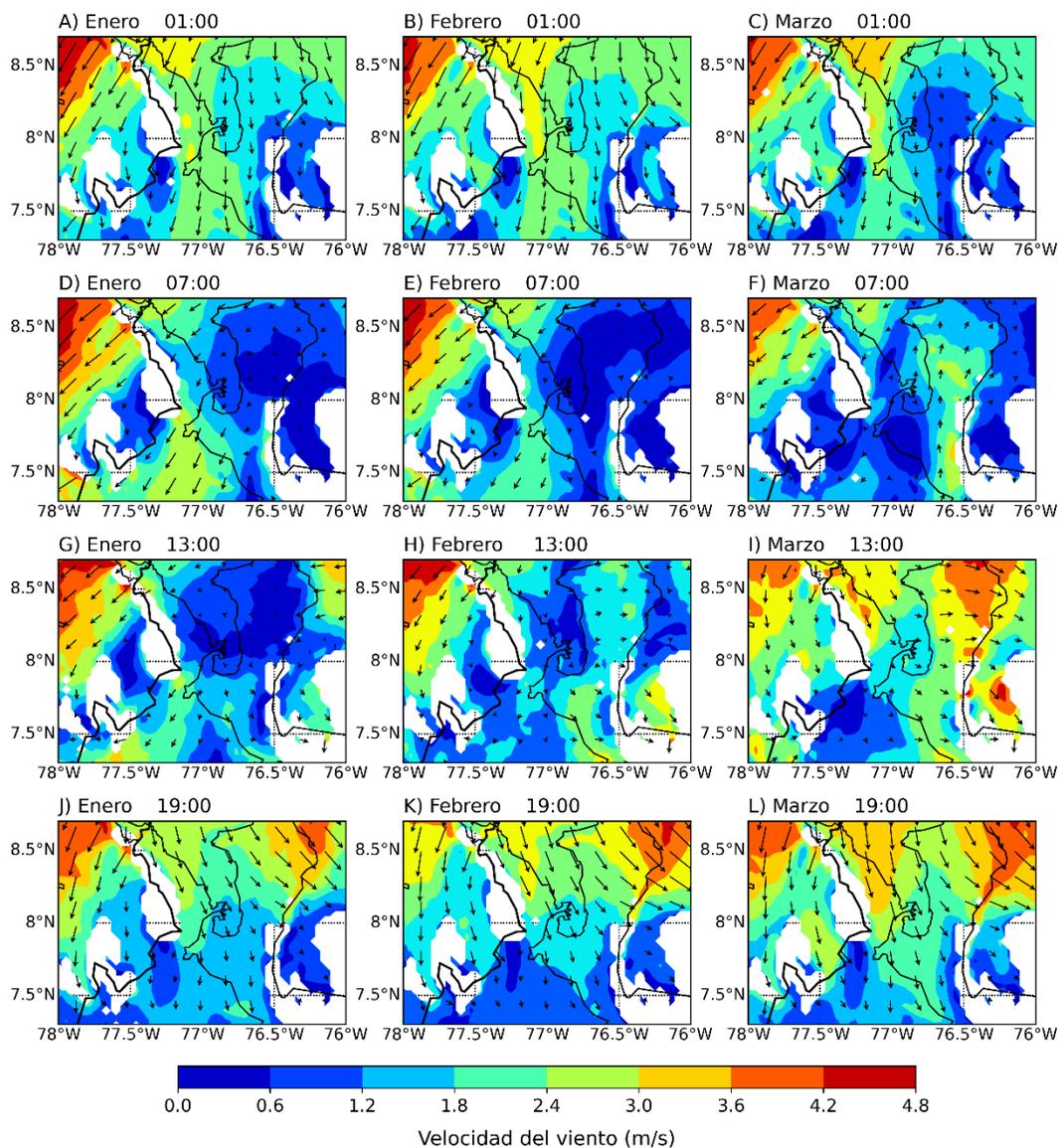


Figura 17. Igual que la figura 16, pero en el nivel de 950 hPa.

2.4. Distribución espacial y temporal de la humedad

La humedad relativa sobre la región de Urabá a 950 hPa durante los tres primeros meses del año, se mantiene a largo del día entre 75% y 95% en promedio, siendo marzo el mes con los valores más altos en comparación con los otros dos meses (Figura 18). A la 01:00 se observan los porcentajes más altos de humedad al interior del golfo (Figuras 18A, 18B y 18C), lo cual concuerda con la acumulación de precipitación en esta zona a dicha hora. Luego, a las 07:00 se presenta una reducción en el porcentaje de humedad relativa sobre Urabá (18D, 18E y 18F), así como una disminución en la velocidad del viento a 950 hPa (Figuras 17D, 17E

y 17F). A las 13:00 en el golfo se presenta una reducción en la humedad relativa y los valores más altos se observan en el sur (Figuras 18G, 18H y 18I) junto con un desplazamiento del viento hacia esa zona (Figuras 17G, 17H y 17I). Finalmente, a las 19:00 se presenta una reducción general de la humedad relativa (Figuras 18J, 18K y 18L) y un incremento en la velocidad del viento con dirección hacia el sureste (Figura 17J, 17K y 17L).

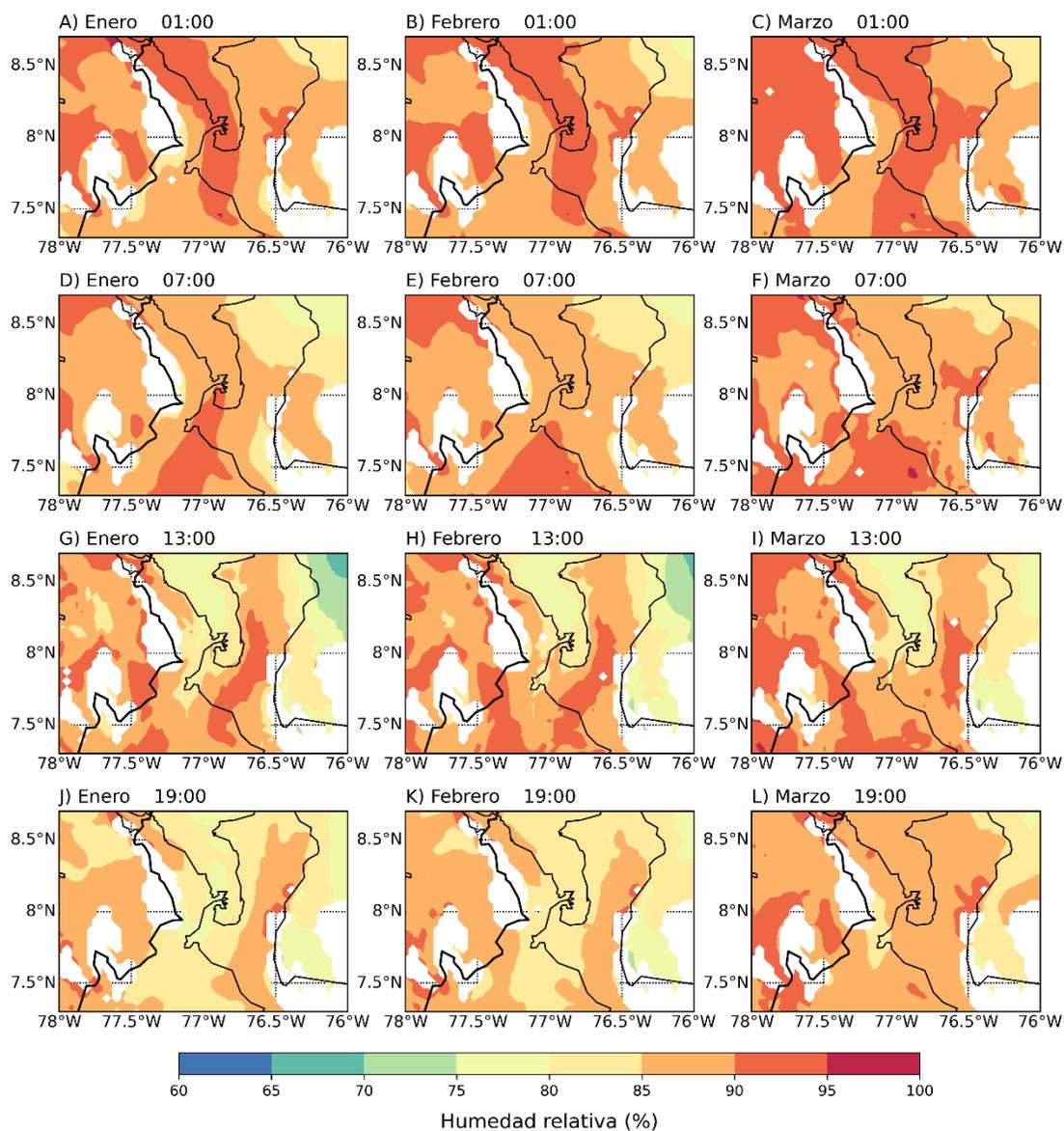


Figura 18. Humedad relativa promedio mensual cada tres horas entre 2008-2013 en los meses de enero (A, D, G y J), febrero (B, E, H y K) y marzo (C, F, I y L) en el nivel de 950 hPa.

Los perfiles verticales de humedad específica sobre las tres secciones transversales en las que se analizó la precipitación (Figura 19) muestran que a las 07:00 la mayor humedad se

presenta entre los 8.2°N y 8.75°N. A las 16:00 y 19:00 en los cortes del oeste y el centro, los mayores valores de humedad se observan a lo largo de todas las latitudes y hasta los 955 hPa, mientras en el corte del este la humedad se acumula en las laderas de las zonas más altas (7.25°N y entre 8°N y 8.75°N).

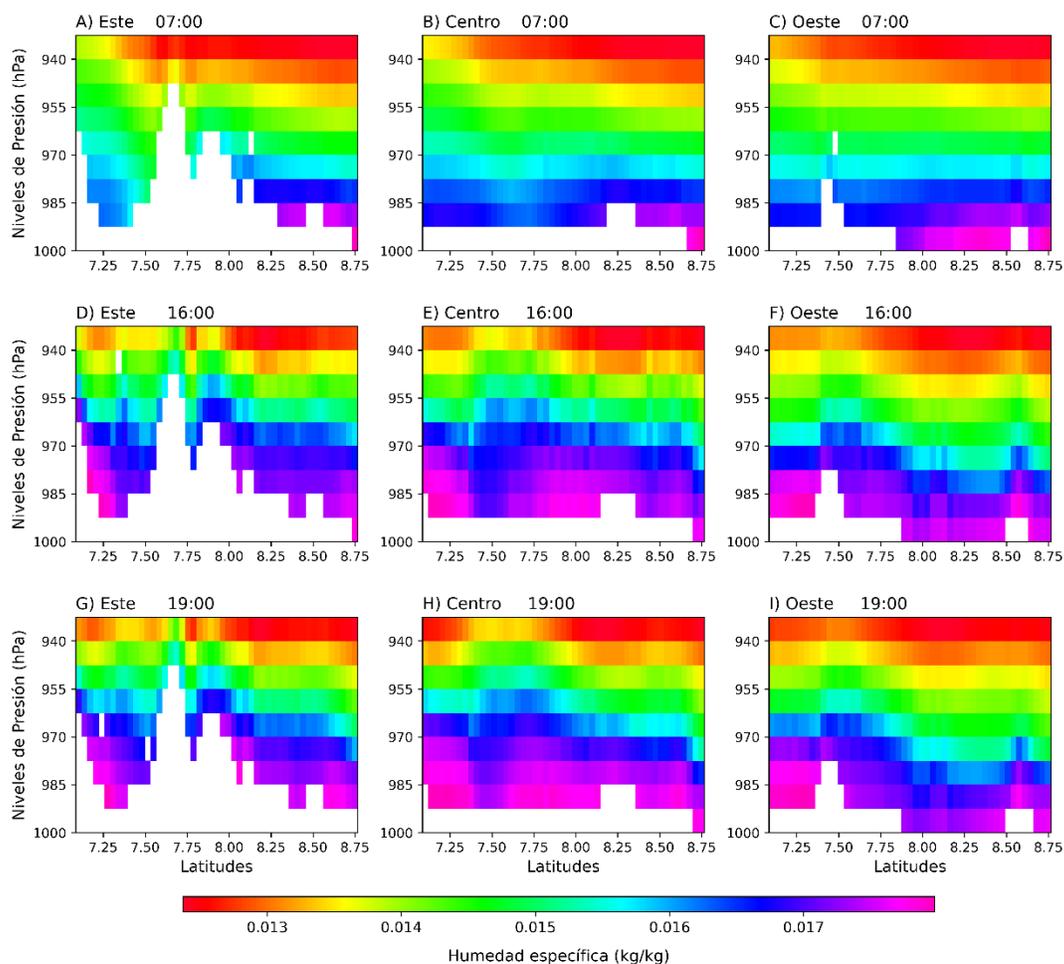


Figura 19. Perfiles verticales de la humedad específica promedio de enero y febrero entre 2008-2013 (escala horaria) sobre los cortes transversales al Este (A, D y G), Centro (B, E y H) y Oeste (C, F e I) de Urabá. Las marcas blancas corresponden a la topografía.

Por su parte, el transporte de la humedad a 950 hPa (Figura 20) tiene un comportamiento similar en los tres meses de estudio. A la 1:00 se observa el movimiento de la humedad desde el norte del golfo y a medida que ingresa al continente va disminuyendo hasta el sur, en las laderas más altas de la serranía de Abibe. Entre las 07:00 y las 13:00 se observa menor transporte de humedad sobre el continente y a las 19:00 incrementa el

transporte de humedad con sentido hacia el sureste, siendo el sitio con menor transporte en la región.

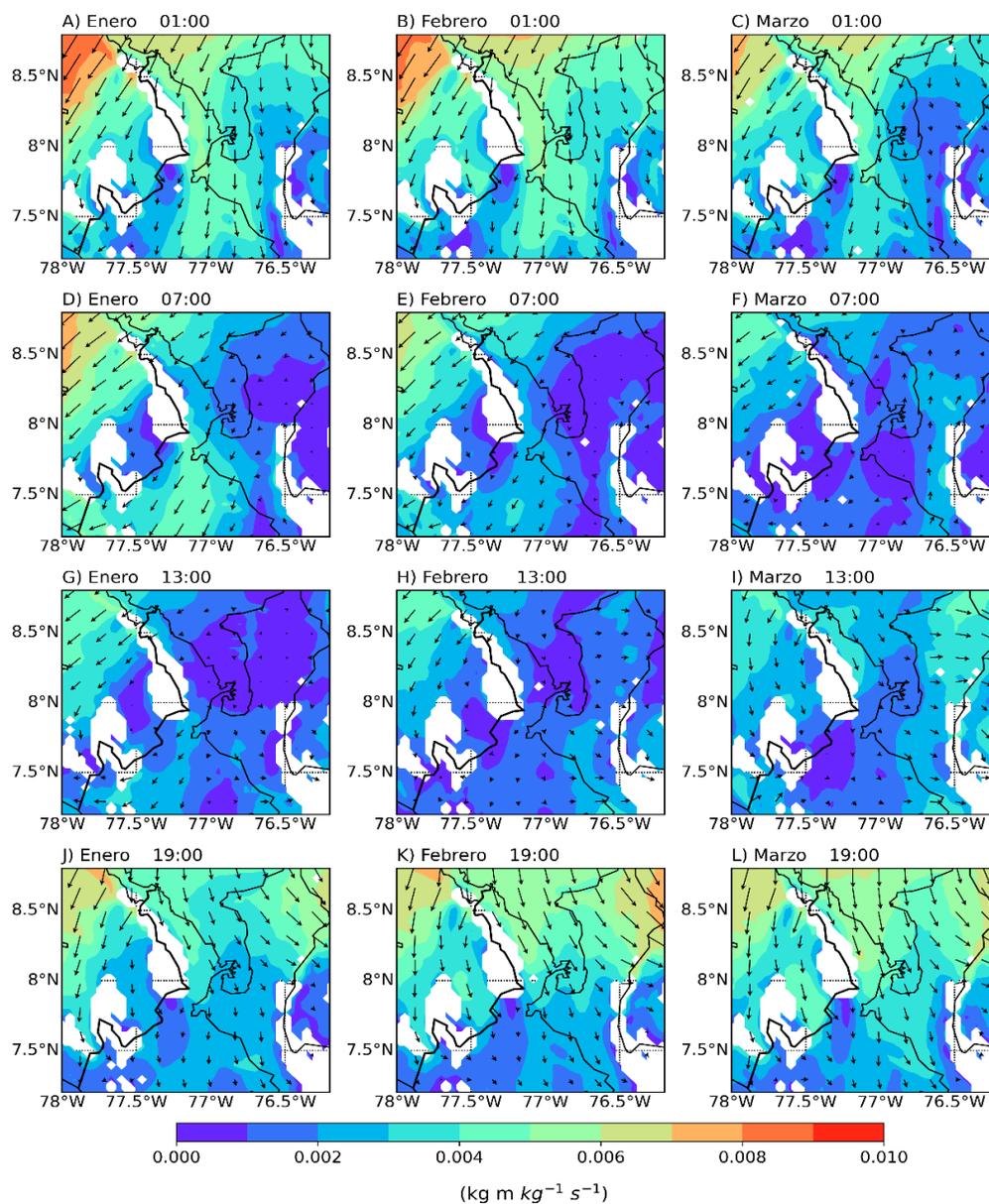


Figura 20. Flujo estacionario de la humedad a 950 hPa para los meses de enero (A, D, G y J), febrero (B, E, H y K) y marzo (C, F, I y L) entre 2008 y 2013. Las flechas representan los vectores del transporte.

Capítulo 3: Análisis de los ciclos diurnos durante los meses de enero, febrero y marzo relacionados con los eventos El Niño 2009-2010 y La Niña 2010-2011

3.1. El ENSO y su influencia en el comportamiento atmosférico de Urabá

El ENSO corresponde a las perturbaciones de la temperatura superficial del Mar (TSS por sus siglas en inglés) sobre el océano Pacífico Tropical, el cual afecta la climatología nacional (Arango-Ruda y Poveda, 2018). Para monitorear la ocurrencia de este fenómeno se utilizan diferentes índices basados en las anomalías de TSS promediadas, normalmente, con relación a un período base de 30 años. De estos índices los más usados son Niño 3.4 y Oceanic Niño Index (ONI) (Trenberth y NCAR, 2020). Este último se calcula sobre la región del océano Pacífico conocida como 3.4 (120 ° -170 ° W) y cuando es igual o mayor a 0.5°C, ocurre la fase El Niño; por el contrario, se clasifica como La Niña si es igual o menor a -0.5°C (NOAA, 2009). Durante El Niño se presenta una reducción en las precipitaciones con una alta influencia en el trimestre diciembre-enero-febrero (Navarro Monterroza et al., 2017) que se atribuye al desplazamiento de la convergencia de humedad hacia el oeste de su posición original (Guarín y Ochoa, 2010), y al haber fase La Niña las precipitaciones sobre el país incrementan (Serna et al., 2018). En cuanto al efecto del ENSO sobre los vientos se ha encontrado que en el mar Caribe estos disminuyen en la fase La Niña y aumentan durante El Niño (Casallas, 2017).

En el período de 2008-2013 se presentaron varios eventos externos del ENSO de acuerdo al ONI. Para el trimestre enero-febrero-marzo de los años 2008, 2009, 2011 y 2012 se registraron anomalías correspondientes a la temporada La Niña, mientras el 2010 cumplió las condiciones para la temporada El Niño y el 2013 fue neutro.

Algunas de las particularidades presentadas durante este lapso de tiempo fue la sucesión de eventos La Niña que se caracterizaron por ser de los más fuertes después de 1982 (Hu et al., 2014) y la ocurrencia de un evento El Niño (2009-2010) con una rápida transición a condiciones La Niña debido a un anormal calentamiento del océano Índico y las altas temperaturas del océano Pacífico Central (Kim et al., 2011). Esta última característica hace

que sea clasificado como Niño Modoki (Lee y McPhaden, 2010; Yu y Kim, 2013), el cual tiene su aparición, desarrollo y decaimiento de forma *in situ*, con una mayor influencia del forzamiento atmosférico y una teleconexión con el océano Índico (Kao y Yu, 2009). Por otra parte, en La Niña 2010-2011 el Pacífico Tropical mostró un enfriamiento prolongado con un evento que pasó de moderado a fuerte (Zhang et al., 2013) y que además estuvo relacionado con la reducción del nivel medio global del mar, gracias a los cambios en los patrones de precipitación, por la transición de El Niño 2009-2010 a La Niña 2010-2011 (Boening et al., 2012).

En Colombia el enfriamiento generalizado del océano Pacífico Tropical, produjo un incremento inusual de las temperaturas en el mar Caribe, facilitando el transporte de humedad hacia el país y en efecto el aumento de las precipitaciones (Arias et al., 2015), que se tradujo en grandes pérdidas económicas y humanas (Hoyos et al., 2013). En el caso de Urabá en el período 2010-2011 hubo una temporada invernal que causó impactos económicos y sociales por la generación de inundaciones, deslizamientos y avenidas torrenciales en los diferentes municipios de la región (CORPOURABA, 2011). El Niño 2009-2010, a pesar de ubicarse en la categoría de débil en Colombia, produjo un desabastecimiento hídrico en muchos municipios, siendo más marcado su efecto en regiones como el Caribe (IDEAM, 2014).

3.2. Métodos empleados en el análisis de los años con efecto del ENSO

Los datos de precipitación, viento y humedad se analizaron en este caso para los trimestres enero, febrero y marzo de los años entre 2009 a 2013. De acuerdo al índice ONI (<https://origin.cpc.ncep.noaa.gov>) el 2009 y 2010 presentaron condiciones El Niño, 2011 La Niña y el 2013 neutralidad. Con los valores trimestrales de estos años se calcularon las anomalías estandarizadas de la precipitación, el viento y la humedad específica a escala subdiaria (cada 3 horas) tomando como referencia el año 2013. También se realizó el perfil del viento entre las latitudes 7.1°N y 8.8°N para los niveles verticales de 950 hPa y 850 hPa y se calculó el transporte estacionario de humedad a 950 hPa de los años 2009, 2010 y 2011.

3.3. Anomalías y distribución espacial de la precipitación

En la figura 21 se presentan las anomalías de precipitación cada 3 horas para el año 2009 (Figuras 21A, 21D, 21G y 21J), 2010 (Figuras 21B, 21E, 21H y 21K) y 2011 (Figuras 21C, 21F, 21I y 21L), con respecto al año 2013. Estos resultados evidencian que durante los años La Niña (2009 y 2011) se presentan las anomalías positivas más marcadas al interior (1:00) y oeste del golfo de Urabá (13:00), sin embargo, a las 7:00 la parte continental mayoritariamente presenta anomalías negativas. Durante el año 2010 (año El Niño) a pesar de no observarse anomalías positivas tan marcadas como en el 2009, el campo de anomalías presenta en la parte continental valores de 0 a -1.5 mm/3h, y a las 7:00 se observan anomalías positivas al norte de la región.

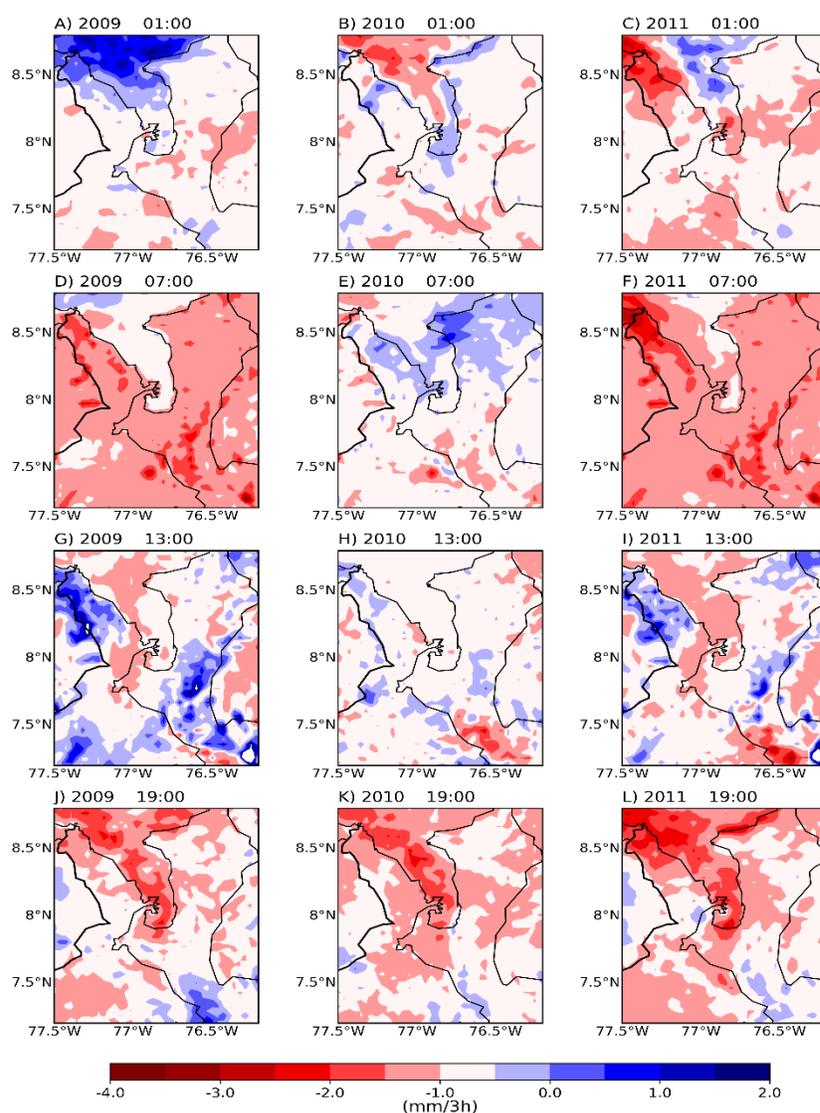


Figura 21. Anomalías de la precipitación acumulada con respecto al año 2013 para 2009 (año La Niña) (A, D, G y J), 2010 (año El Niño) (B, E, H y K) y 2011(año La Niña) (C, F, I y L).

El análisis espacial de la acumulación de la precipitación cada 3 horas (Figura 22). muestra que en el sur de la región de Urabá (Figura 22B) es la zona donde en promedio se acumuló mayor precipitación durante los años 2009, 2010 y 2011, pero tanto en el norte (Figura 22A) como en el sur, los años 2009 y 2011 presentan los valores más altos, mientras el 2010 tiene los más bajos. Además, la hora en la que se presenta el pico más alto de acumulación de precipitación es las 19:00, mientras a las 10:00 y las 13:00 se observan los más bajos.

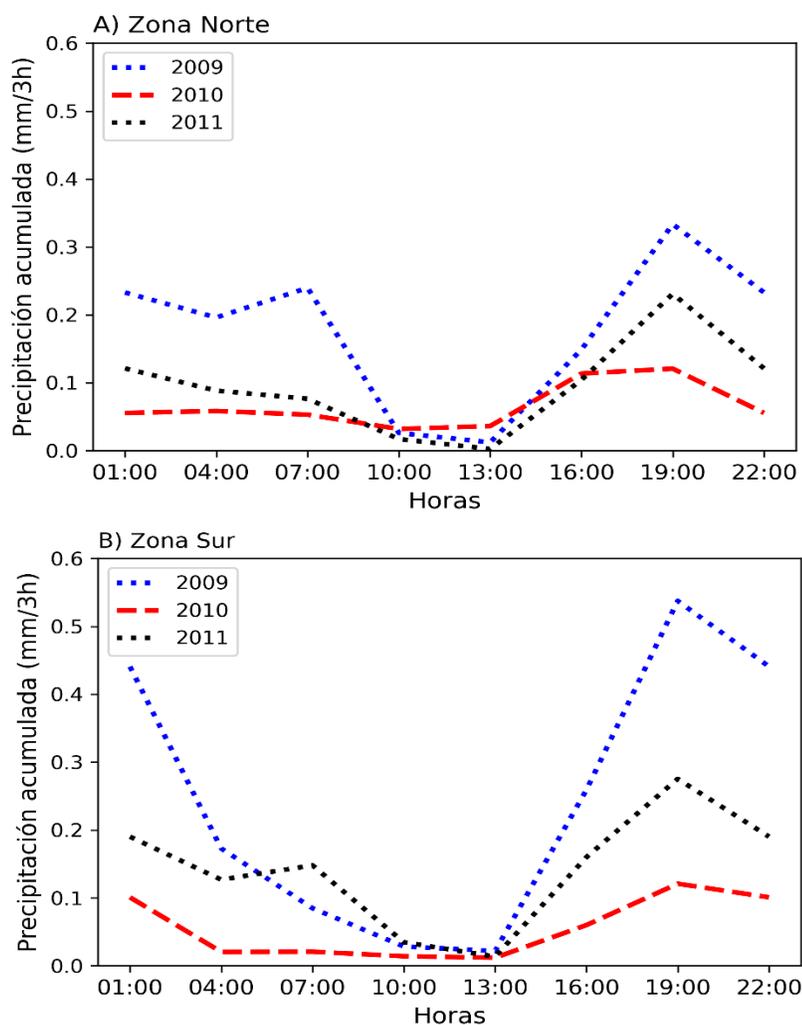


Figura 22. Promedio espacial de la precipitación acumulada durante el día. A) norte (8.0 ° N y 8.8 ° N) B) sur (7.1 ° N y 8.0 ° N).

3.4. Anomalías del viento

Las anomalías de la velocidad del viento para el año 2009 y 2011 (años La Niña) y 2010 (año El Niño) usando como referencia el año 2013 son presentadas en la figura 23. En estos resultados se observa que para todas las horas estudiadas la velocidad del viento sobre Urabá presenta anomalías positivas durante el año El Niño y anomalías negativas en el año La Niña. Las anomalías más fuertes se localizan en la parte suroccidental de la región con valores extremos alrededor de -3.2 m/s, en el año La Niña y de 4 m/s en el año El Niño. El incremento de la velocidad del viento para años El Niño en el Caribe, ya ha sido evidenciado en los primeros meses del año asociados a un fortalecimiento del Chorro de Bajo Nivel del Caribe (CLLJ) (Serna et al., 2018). De manera complementaria se han reportado reducciones considerables de la velocidad del viento en el Caribe colombiano durante los años La Niña relacionadas con un debilitamiento del CLLJ (Bastidas-Salamanca y Rueda-Bayona, 2021).

Los perfiles del viento meridional sobre la longitud -76.54°O (Figura 24) a los 950 hPa (Figura 24A), muestran que esta componente del viento horizontal en los años 2009 y 2011 tuvo un desplazamiento mayormente en dirección hacia el norte (excepto a las 13:00 y 19:00 entre 8.2°N y 8.8°N), mientras en el 2010 se mantuvo en valores negativos indicando un desplazamiento hacia el sur y alcanzó las mayores velocidades (-5 m/s). A los 850 hPa (Figura 24B) en general, se mantuvo el comportamiento evidenciado a los 950 hPa, pero con valores más estables a lo largo del día, tanto al sur como al norte de la región de Urabá.

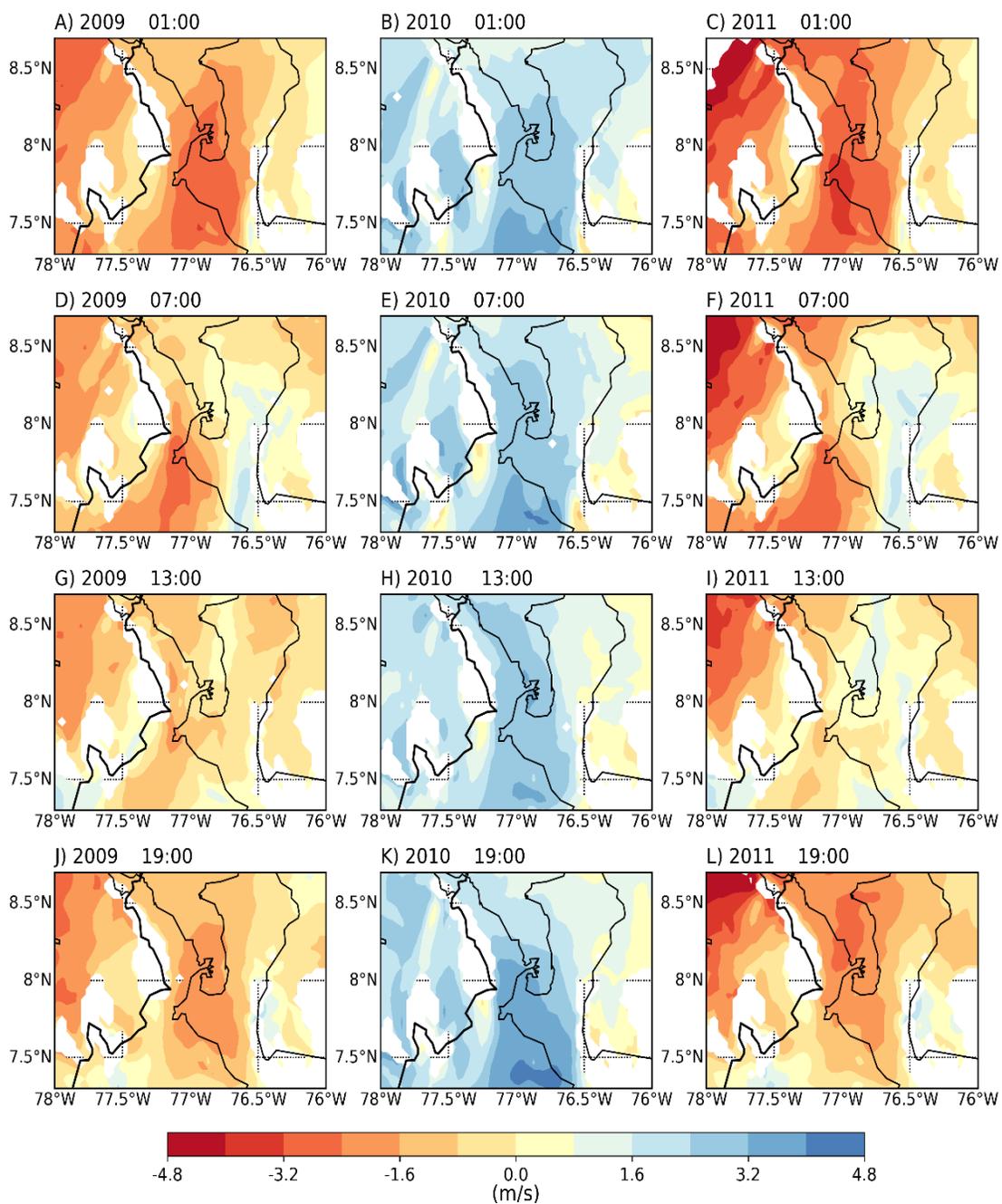


Figura 23. Igual que la Figura 21 con anomalías del viento a 950 hPa.

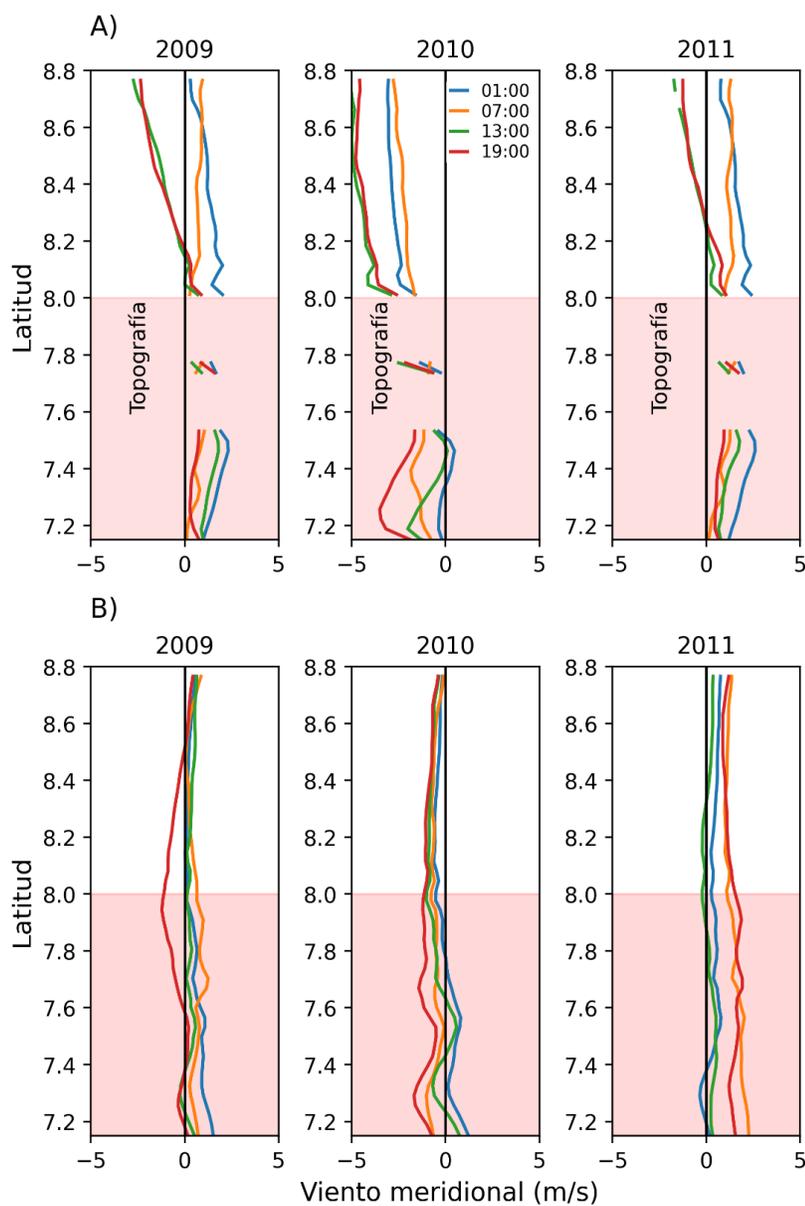


Figura 24. Sección transversal del viento meridional en 76.54°O para A) 950 hPa y B) 850 hPa.

3.5. Transporte de humedad y anomalías de humedad

De forma complementaria al comportamiento del viento durante La Niña (2009 y 2011) y El Niño (2010) el transporte de humedad a los 950 hPa (Figura 25) para 2009 y 2011 es inferior (0 y 0.008 kg m /kg s) al observado en el año 2010, donde alcanzó valores

máximos de $0.014 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ en la región de estudio. El menor transporte de humedad hacia zonas externas a Urabá es un indicio de mayor acumulación, que se traduce en el aumento de las precipitaciones. Otro elemento importante es el sitio de donde proviene la humedad en los años La Niña y el año El Niño. En el primer caso se observan flujos que ingresan a la región desde el oeste y el sur, mientras en el segundo caso es desde el norte y el noreste. El sentido en el que se desplaza la humedad marca como fuentes el océano Pacífico y el mar Caribe, tal como lo encontraron Arias et al. (2015) en un estudio realizado en el período 2009-2012 para Colombia.

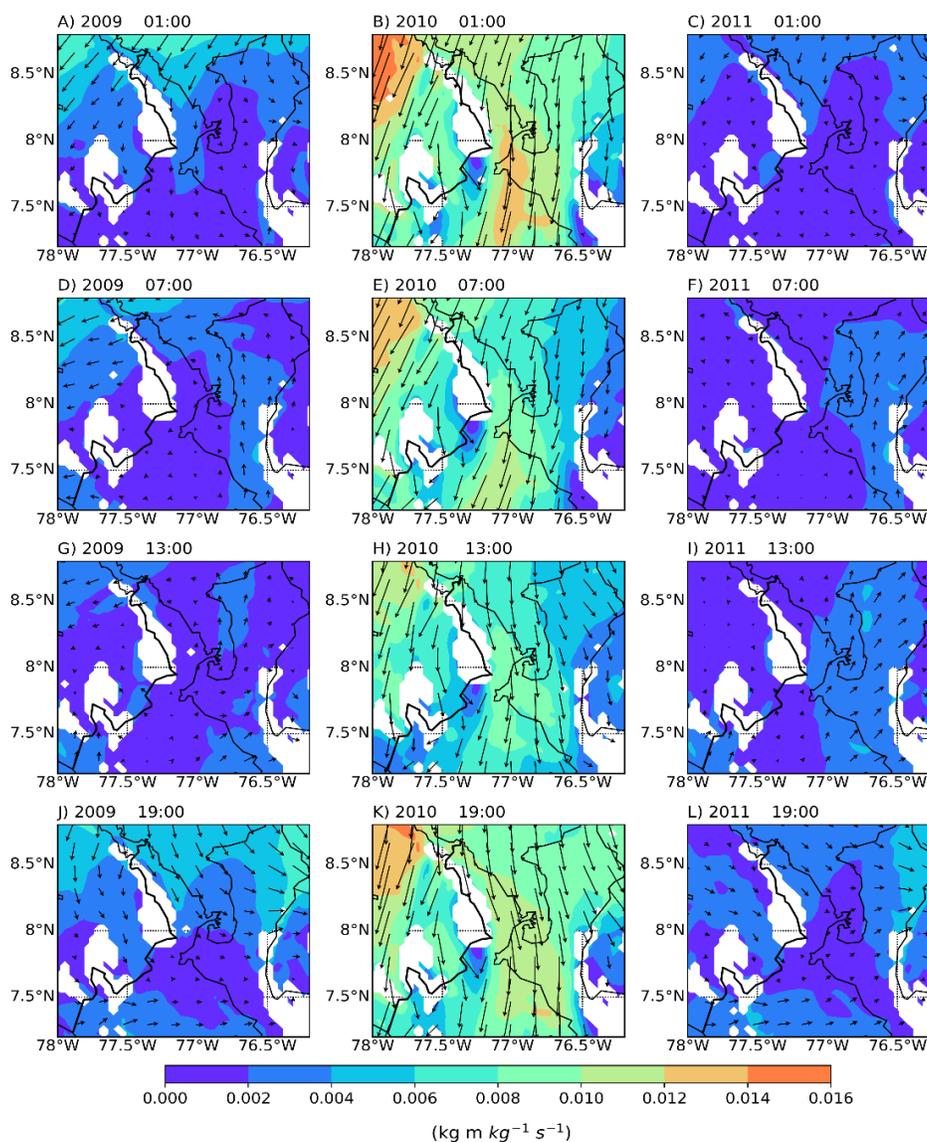


Figura 25. Flujo estacionario de la humedad a 950 hPa para los años 2009 (A, D, G y J), 2010 (B, E, H y K) y 2011(año La Niña) (C, F, I y L) con vectores del transporte horizontal de la humedad.

Las anomalías de humedad relativa a 950 hPa presentadas en la figura 26 muestran que los años 2009 y 2011 presentan patrones espaciales parecidos, tal como ocurre con el transporte de humedad en esta misma capa (Figura 25). Para estos dos años las anomalías sobre el área de estudio son mayoritariamente negativas. Solo se observan anomalías positivas marcadas a las 7:00. Contrario a esto, en el 2010 casi todas las horas presentan anomalías positivas en la parte continental de Urabá, a excepción del sur de la región. Vale resaltar, que las 19:00 es la hora con los valores positivos más bajos y que a las 13:00 y a las 19:00 el golfo presenta anomalías positivas.

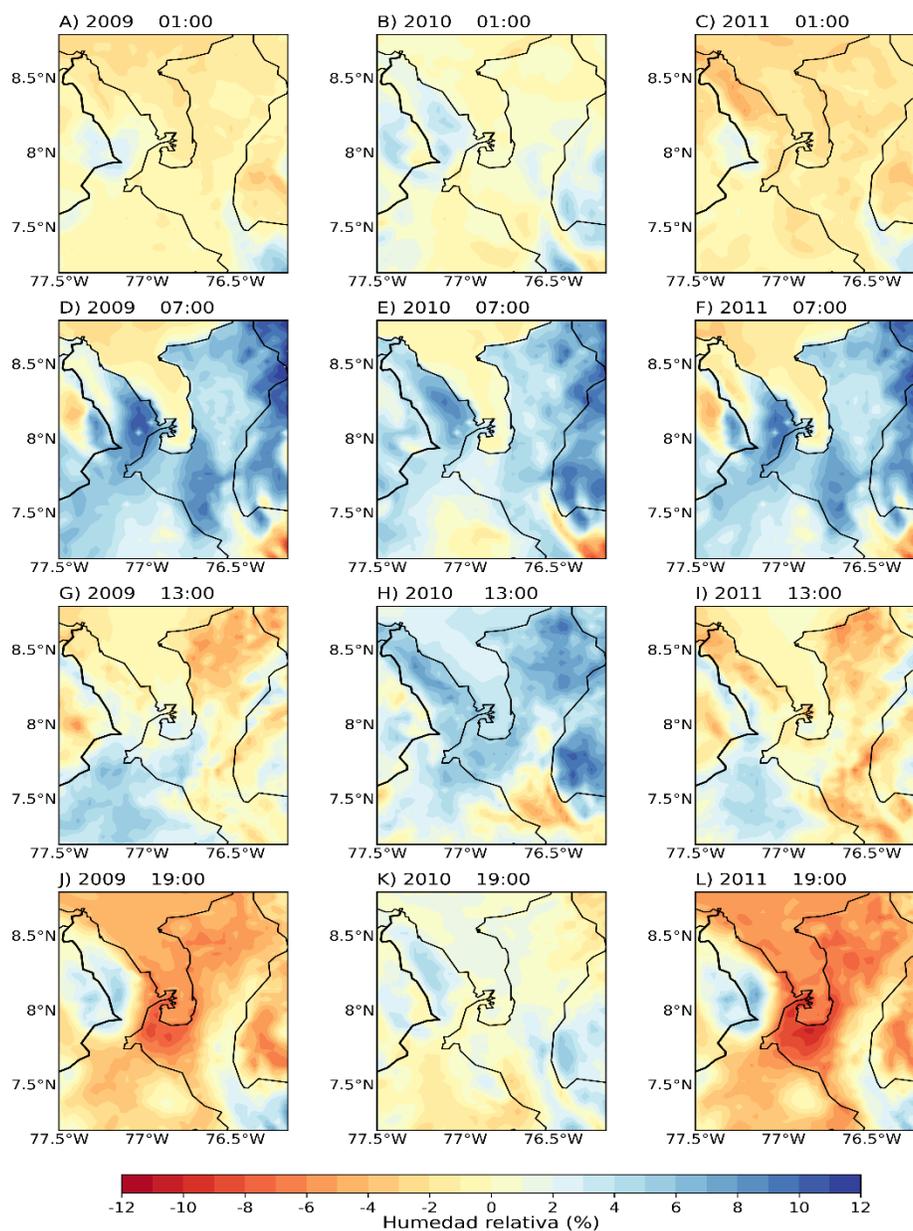


Figura 26. Igual que la Figura 21, pero para la humedad relativa a 950 hPa.

Capítulo 4: Mecanismos que afectan el comportamiento del viento, la humedad y la precipitación en Urabá

El vapor de agua, los vientos y la precipitación tienen una relación permanente a través del balance hídrico atmosférico (Wallace y Hobbs, 2006), en el cual la precipitación es la principal salida de agua de la atmósfera y surge como resultado de la evaporación de humedad local o humedad advectada desde otros lugares por los vientos (Trenberth, 1999). El último de estos mecanismos provoca el aumento de la convergencia de vapor de agua y como consecuencia la convección profunda que da origen a la precipitación (Back y Bretherton, 2005).

Además, Los patrones del viento junto con la topografía determinan la distribución espacial de las lluvias gracias a la redistribución de la humedad sobre el terreno (Blocken et al., 2006), que de acuerdo a su elevación, pendiente y orientación afecta el comportamiento espacial de la precipitación (Basist et al., 1994), así como su cantidad sobre las regiones (Ntwali et al., 2016).

A nivel local las brisas marinas juegan un papel importante en la advección de humedad hacia la costa y tienen influencia en el ciclo diario de la precipitación (Zhu et al., 2017) que según su amplitud, pico y tipo de propagación puede clasificarse en oceánica, continental y costera. La última tipología presenta una mayor influencia de las brisas debido a que estas permiten el inicio y posible mantenimiento de la propagación de la convección, aunque la topografía y las temporadas climáticas también influyen la precipitación a escala diaria (Kikuchi y Wang, 2008).

4.1. Métodos empleados

Para el análisis de los mecanismos que afectan el comportamiento de la precipitación, el viento y la humedad en el Urabá antioqueño se realizaron promedios de los datos simulados de estas variables cada tres horas para los meses de enero, febrero y marzo del período entre 2008 a 2013. Con esta información se realizaron los campos de precipitación con vectores del viento promedio a 10 metros, para evidenciar la relación de estas variables

en los niveles más cercanos a la superficie y fenómenos que ocurren a estas alturas como los flujos marinos hacia y desde la costa (brisas marinas) (Arroyo Quinto et al., 2022). Además, se graficaron los campos de viento en un área que incluye el noroeste de Colombia entre las latitudes de 5.8°N y 10°N y las longitudes de -75.5°O y -80°O para el período de 2008 a 2013 en celdas de 3.3 km y de 10 km y los años 2009, 2010 y 2011 en celdas de 3.3 km. Así mismo, se hallaron las correlaciones temporales sobre Urabá de las componentes del viento con la precipitación y la humedad para los promedios trimestrales multianuales de estas variables (de 2008 a 2013). Dichas correlaciones también se hallaron entre la precipitación y los promedios trimestrales del viento y la humedad en los años 2009, 2010 y 2011.

Adicionalmente, se realizó una prueba de conceptos con el fin de complementar el objetivo 3 de este trabajo (*“Describir los posibles mecanismos asociados con la variabilidad de la precipitación y el viento de la región del Urabá antioqueño”*). Dicho ejercicio consistió en realizar una simulación con el WRF reemplazando el golfo de Urabá por un área continental entre las longitudes -77.77°O/-76.35°O y las latitudes 7.85°N/9°N. La configuración utilizada fue la misma descrita en la tabla 2, con una resolución espacial de 3.3 km y una frecuencia temporal de cada 3 horas para los 15 primeros días del mes de enero de 2013. Los resultados obtenidos de la prueba de conceptos se presentan en el anexo 3.

4.2. Relación del viento superficial y la precipitación

Los campos de precipitación mensual promedio a escala horaria se presentan en la figura 27. Este resultado evidencia que a las 1:00 y las 7:00 la mayor acumulación de precipitación ocurre al interior del golfo, especialmente en la parte noroccidental del mismo, mientras en las otras zonas se presentan valores de máximo 0.6 mm/3h. El viento se mueve en el continente principalmente con un sentido hacia el norte, lo cual sugiere el transporte de humedad hacia esta zona y sirve para justificar los valores mayores de precipitación sobre el golfo. A las 13:00 la distribución espacial de la precipitación cambia y los valores más altos se presentan en el este y sur de la región, por su parte el viento inicia a moverse hacia la costa en sentido oeste-este. Estos patrones coinciden con la clasificación de la precipitación en el ciclo diurno propuesta por Kikuchi y Wang (2008), lo cual también se relaciona con la ocurrencia de las brisas marinas (Arroyo Quinto et al., 2022). Finalmente, a las 19:00 se

presenta precipitación en la parte continental con los valores más altos al sur de Urabá, además se alcanzan las mayores velocidades del viento con una dirección hacia el suroeste. Es de notar, que en general en todos los meses se mantiene el mismo patrón en las horas analizadas, aunque enero es el mes más seco y marzo muestra mayor acumulación de precipitación.

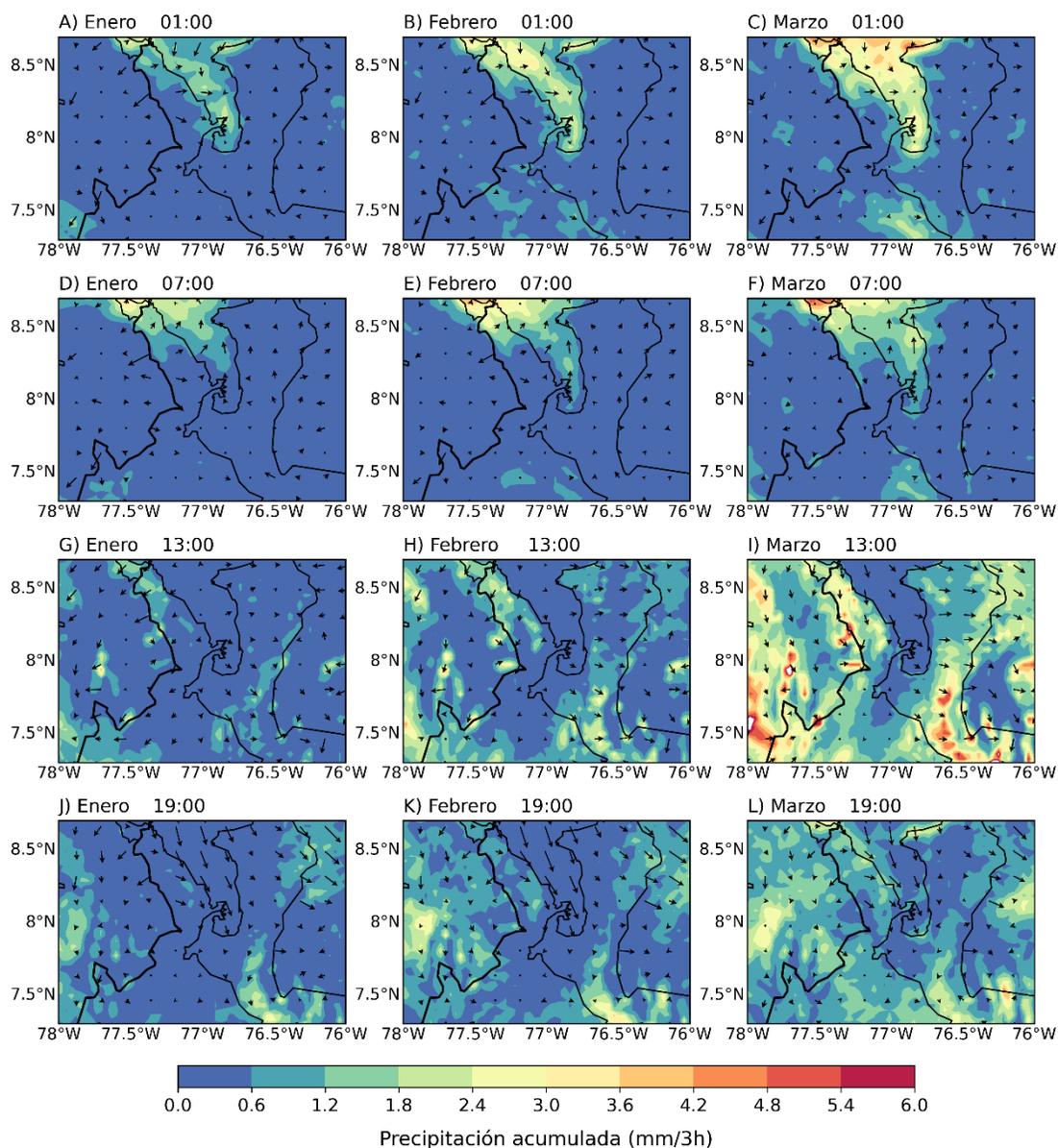


Figura 27. Campos de precipitación mensual promedio cada 3 horas para los meses de enero (A, D, G y J), febrero (B, E, H y K) y marzo (C, F, I y L) con vectores del viento a 10 metros.

4.3. Correlación de las componentes del viento y la precipitación

El ciclo diario de la precipitación en la mayor parte del golfo de Urabá muestra una correlación positiva alta (de hasta 0.75) con la componente meridional a 10 m (Figura 28A), que indica un incremento de la precipitación cuando aumenta el valor de esta componente, algo similar ocurre con la componente zonal, pero con valores más bajos (de hasta 0.5) (Figura 28B). Además, en casi toda la parte continental la componente meridional presenta correlación negativa con la precipitación, contrario a lo que ocurre con la componente zonal que tiene valores altos de correlación positiva en el continente. En general, la acumulación de precipitación en el golfo está relacionada con la componente meridional y en el continente se debe principalmente a la componente zonal.

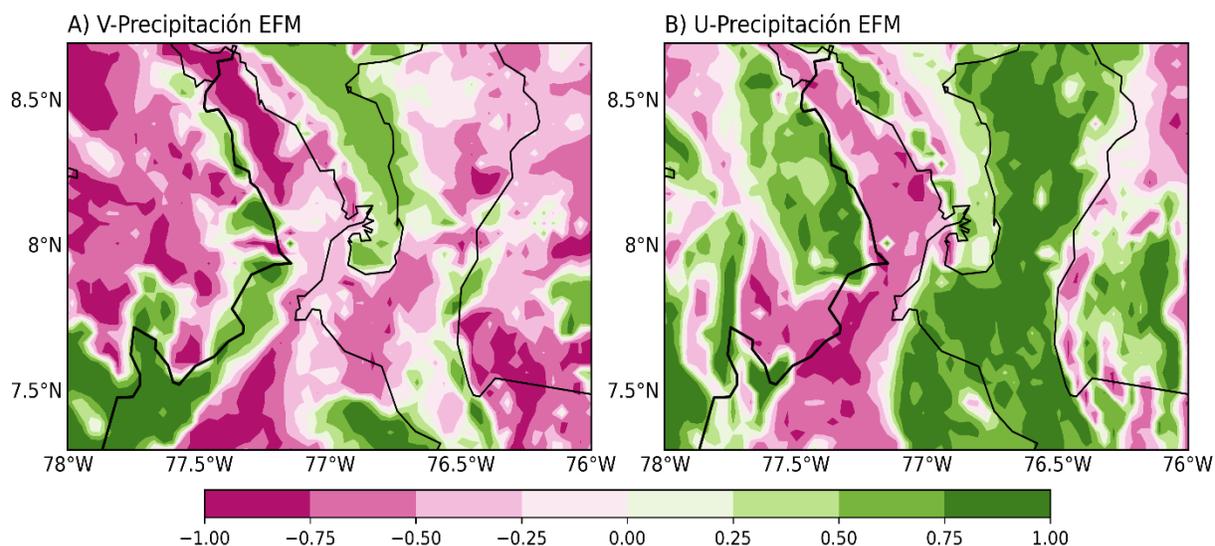


Figura 28. Correlaciones temporales (cada 3 horas) entre la precipitación y las componentes del viento promedio de enero, febrero y marzo. A) meridional y B) zonal.

La correlación entre las componentes del viento a 10 m y la precipitación para los años 2009, 2010 y 2011 en el trimestre enero, febrero y marzo son presentadas en la figura 29. En general, los años con condiciones La Niña (2009 y 2011) exhiben un comportamiento similar, marcando correlaciones negativas entre la precipitación y la componente meridional en el golfo y la zona norte de la Urabá, mientras en el año 2010 se presentan correlaciones positivas en el golfo y el norte de Urabá respecto a estas mismas variables. En el caso de la componente zonal los años 2009 y 2011 presentan correlaciones positivas con la

precipitación sobre toda la parte continental y el oeste del golfo de Urabá, mientras en el año 2010 esta correlación negativa solo se observa al sur de la región.

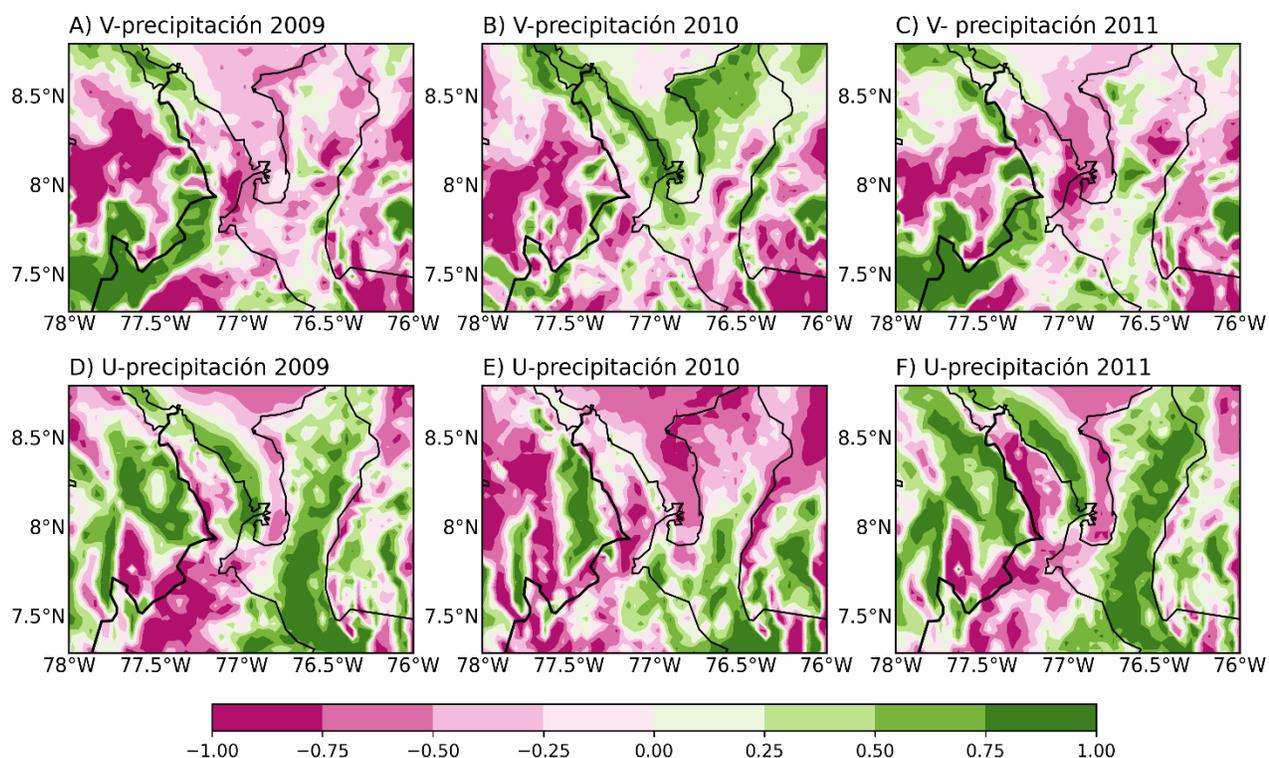


Figura 29. Correlación temporal entre la precipitación y las componentes del viento a 10 m para los años 2009, 2010 y 2011. (A, B y C correlación de la precipitación con la componente meridional. D, E y F igual, pero con la componente zonal).

4.4. Correlación de la humedad específica a 950 hPa y las componentes del viento

Por otra parte, la correlación entre la humedad específica y las componentes del viento a 950 hPa para el promedio trimestral (enero, febrero y marzo) en el período entre 2008-2013, presentada en la figura 30, muestra que al aumentar el valor de la componente meridional sobre el continente aumenta la humedad y en el golfo se presenta una reducción de esta variable. La componente zonal presenta correlaciones negativas con la humedad sobre toda la región de estudio, con los valores más altos en el golfo y al sur de Urabá.

En las figuras 31A y 31C se observa que en los años 2009 y 2011 la componente meridional tiene una relación inversamente proporcional con la humedad sobre toda la región de Urabá, lo cual implica que al aumentar esta componente del viento se reduce la

humedad específica. Por su parte, en el año 2010(31B) la relación entre estas dos variables es inversa al interior del golfo, mientras en el continente es directamente proporcional, dicho comportamiento se conserva en las correlaciones con la componente zonal en el 2010, pero con valores más altos (31E) y también se presenta para los años 2009 y 2011(31D Y 31F).

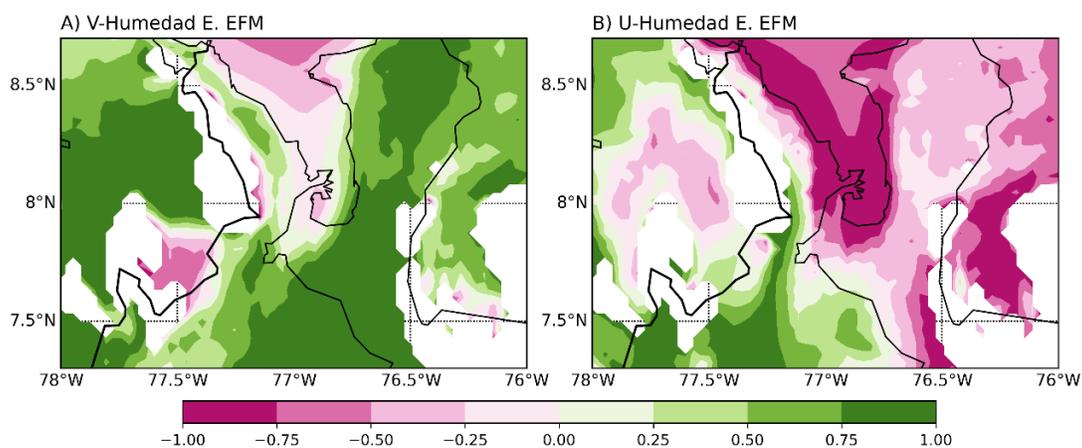


Figura 30. Correlación temporal entre el promedio trimestral de la humedad específica y el promedio trimestral de las componentes del viento a 950 hPa (enero, febrero y marzo) de los años entre 2008 y 2013. A) correlación de la humedad específica con la componente meridional. B) igual, pero con la componente zonal.

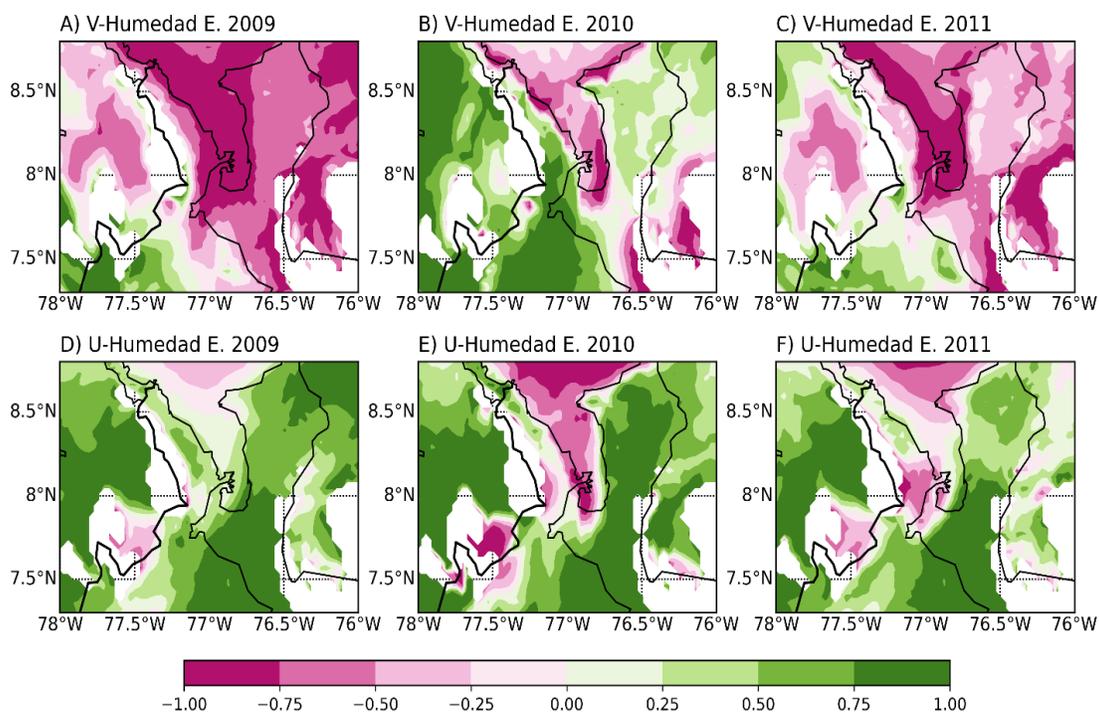


Figura 31. Correlación temporal entre la humedad específica y las componentes del viento a 950 hPa para los años 2009, 2010 y 2011. A, B y C correlación de la humedad específica con la componente meridional. D, E y F igual, pero con la componente zonal.

4.5. Análisis del viento

Los campos de vientos observados en un marco que incluye el noroeste de Colombia (incluida parte de la cuenca del Pacífico y el mar Caribe) muestran que para los meses de estudio a Urabá ingresan vientos del noreste (alisios) a lo largo de todo el día (Figura 32). Además, se observan vientos más fuertes en el mar Caribe, mientras en la costa Pacífica están los más débiles. Este comportamiento se evidencia tanto en los vientos generados en celdas del modelo del 3.3 km (Dominio 3) como de 10 km (Dominio 2). La presencia de vientos del noreste durante la temporada de estudio se ha explicado como una consecuencia del descenso de la ZCIT hacia el sur (Tchantsev y Cabrera Luna, 1998).

También se analizaron por separado los años que durante el trimestre enero, febrero y marzo, tuvieron condiciones extremas del ENSO, es decir los años 2009, 2010 y 2011 (Figura 33). El 2009 y 2011 (La Niña) mostraron patrones similares en el comportamiento del viento a lo largo del día, presentando las velocidades más altas en el mar Caribe y las menores velocidades en la costa Pacífica. Además, se observó que el viento llega desde el noreste, atraviesa Panamá y se curva en dirección este hacia la costa Pacífica colombiana desde donde ingresa a Urabá por el sur, cabe aclarar que a las 19:00 se rompe este patrón e ingresa viento a Urabá directamente desde el norte. Los vientos de baja velocidad sobre la costa Pacífica colombiana son coherentes con la alta presión que se genera sobre esta zona como consecuencia de la reducción de la temperatura cuando ocurren eventos La Niña (IDEAM, 2011). En el año 2010 (El Niño) el viento presenta velocidades mayores a las observadas en 2009 y 2011 y durante todo el ciclo diurno el viento se desplaza desde el noreste, adicionalmente las velocidades más altas se observan en el océano Pacífico.

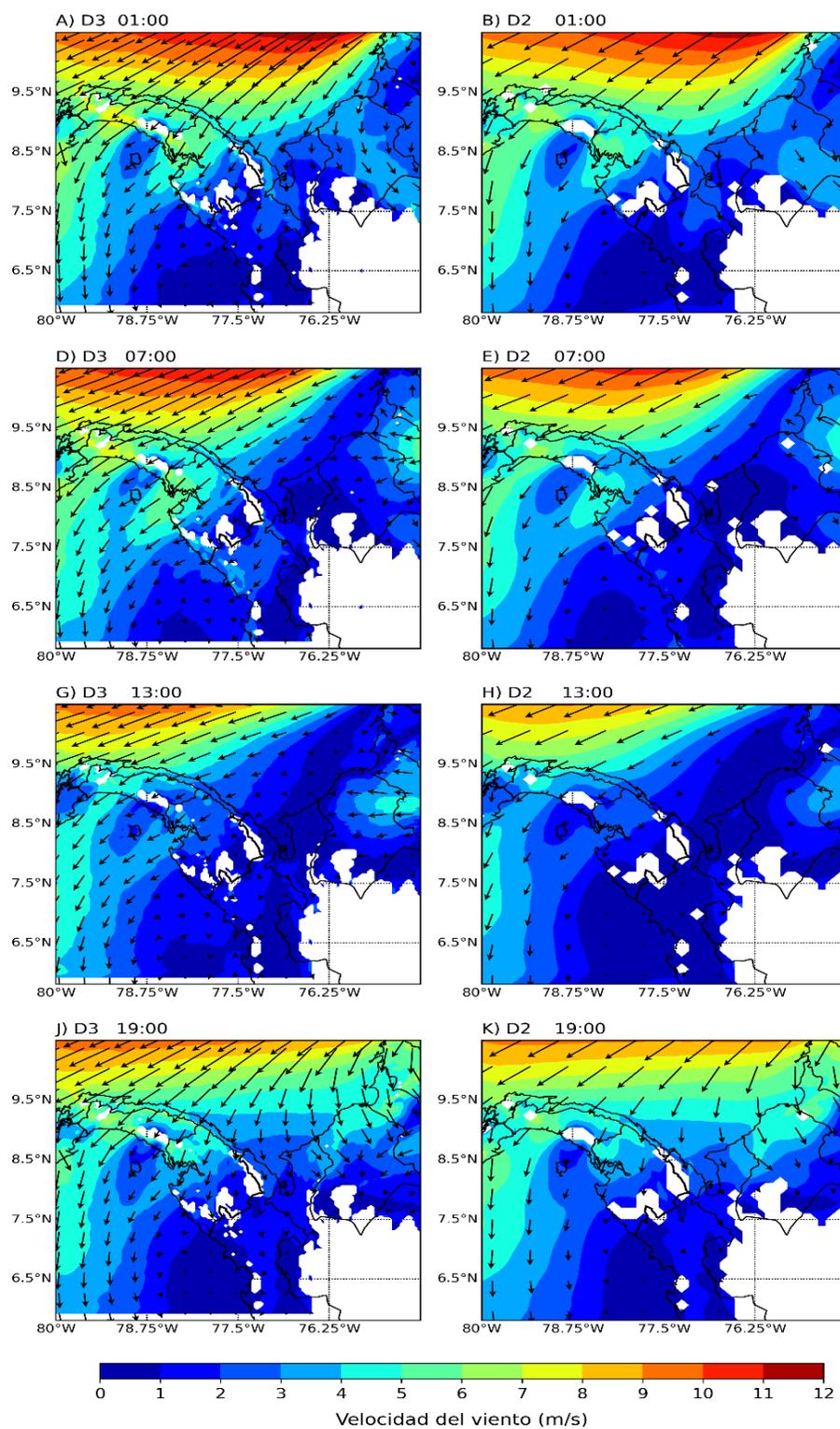


Figura 32. Campos de viento a 950 hPa con contornos de la velocidad del viento sobre el noroeste de Colombia en celdas de 3.3km (dominio 3) (A, D, G y J) y en celdas de 10 km (Dominio 2) (B, E, H y K).

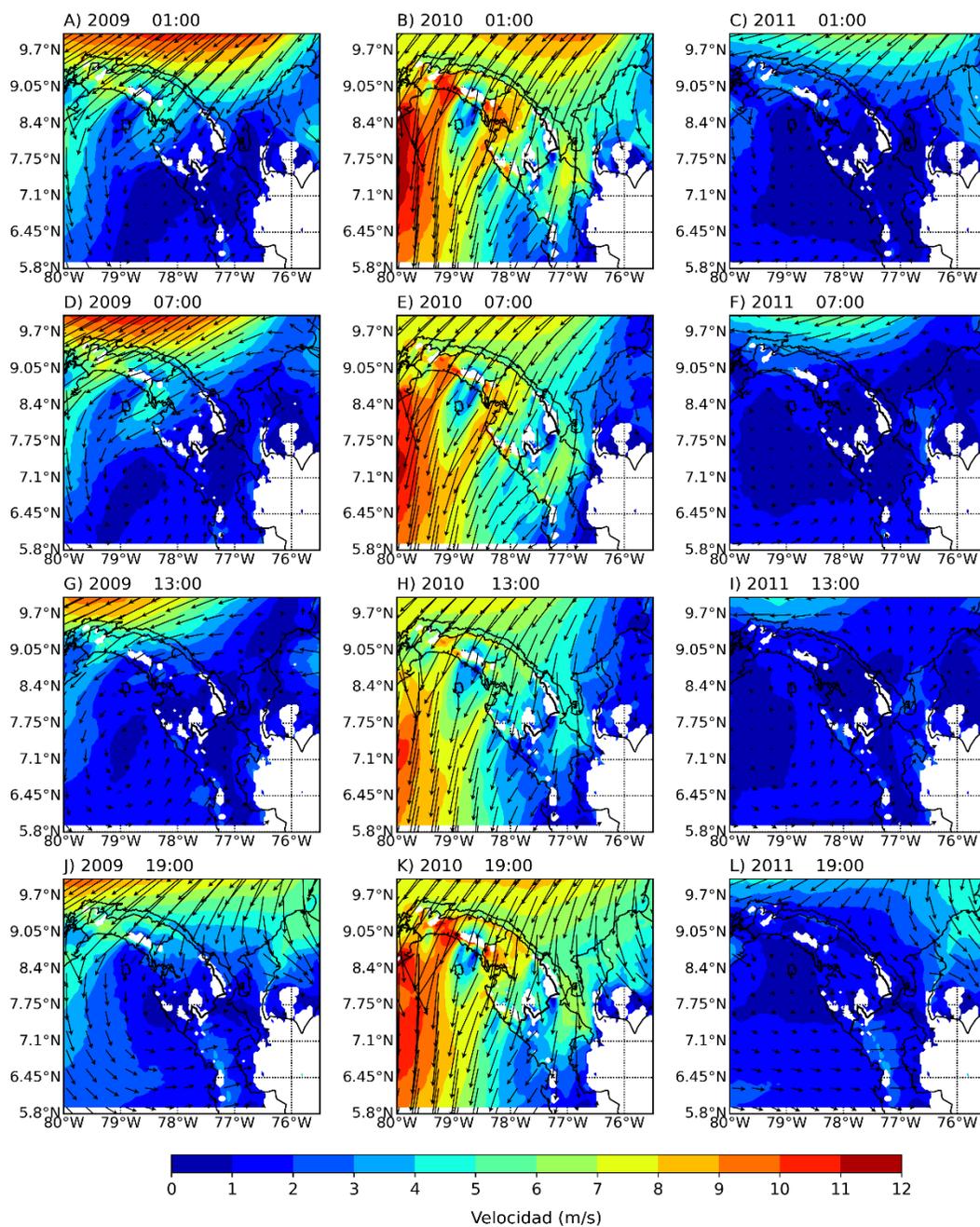


Figura 33. Campos de viento a 950 hPa con contornos de la velocidad del viento sobre el noroeste de Colombia para 2009 (A, D, G y J), 2010 (B, E, H y K) y 2011(C, F, I y L).

5. Conclusiones

En el presente trabajo se estudió el comportamiento espacio-temporal de la precipitación, el viento y la humedad en el Urabá antioqueño, usando información simulada con WRF de los años entre 2008 y 2013 para los meses de enero, febrero y marzo (temporada seca en la región). Se utilizó información de alta resolución espacial lo cual permitió avanzar en el conocimiento de las variables en mención, pese a la ausencia de información medida en la región, aspecto que fue manejado realizando comparaciones con bases de datos y reanálisis. Cabe aclarar que los datos empleados fueron validados para el mar Caribe con buenos resultados, lo cual genera un grado de confianza en la aplicación de los mismo en la región de Urabá. Esta investigación es un punto de partida para usar WRF como una herramienta útil en otras investigaciones con enfoque océano-atmosférico en regiones costeras tropicales como el Urabá antioqueño, con presencia de topografía compleja cercana a la línea de costa. Las principales conclusiones a partir de los resultados de esta investigación se presentan a continuación:

5.1. Capítulo 1: Validación de las simulaciones

En términos generales el modelo WRF logró reproducir de manera adecuada los patrones espaciales y temporales de la precipitación, el viento y la humedad al comparar las simulaciones con información *in situ* y bases de datos de acceso libre. Respecto a los datos medidos en campo, a pesar de presentar correlaciones entre 0.2 y 0.7 con WRF, los valores del índice de acuerdo en todos los casos fueron por encima de 0.3, lo cual también se presentó con las bases de datos. Las comparaciones de la precipitación entre datos *in situ* y el modelo WRF sugieren una sobreestimación de los valores (bias mayores que 1), a excepción de la estación El Tormento, ubicada al sur de la región que presentó un bias de -0.9. Pese a esto, es necesario contar con mayor información observada para realizar comparaciones más robustas. De ahí la importancia de usar como opción alternativa bases de datos que cuentan con un cubrimiento espacial total de la zona.

La representación espacial de la precipitación mostró que los mayores valores se presentan al sur de Urabá y los menores al norte, coincidiendo con el gradiente norte-sur evidenciado en las bases de datos CHIRPS, GPM y TRMM. Sin embargo, para WRF este

gradiente no presenta un desarrollo latitudinal marcado como el que se observa en las bases de datos. Esto se debe a que WRF tiene una representación más detallada de la topografía, lo cual es fundamental en la reproducción de la precipitación en esta zona; de manera específica se presentan altos valores de precipitación al norte del golfo Urabá, que concuerdan con la presencia de la serranía del Darién. Además, se evidencia en los resultados del modelo la diferencia entre la distribución de la precipitación en el continente y el golfo, que no es observada en las bases de datos. En general, la representación de la precipitación es similar para el modelo y las bases de datos al sur de la región, no siendo así al norte donde el modelo sobrestima los valores respecto a todas las bases de datos con valores de diferencia promedio mayores a 1 mm/día.

En cuanto a la dirección del viento los resultados de WRF y ERA5 son similares a los 950 hPa durante la temporada seca. Esta coincidencia en la dirección del viento también se observó a los 700 hPa y 500 hPa. Cerca de la superficie los valores de la magnitud del viento para WRF son subestimados hasta en 8 m/s en comparación con ERA5. Estos resultados sugieren que, al menos la magnitud del viento, puede estar afectada por la topografía en el caso del modelo WRF, debido a que su mayor resolución le permite representar de manera más adecuada los efectos de la topografía en el viento. Por otro lado, las comparaciones con mediciones *in situ* presentaron valores de índices de acuerdo de hasta 0.43 para el WRF y con ERA5 de 0.46.

Los campos de humedad específica del modelo a 950 hPa subestiman los valores obtenidos de ERA5, mientras las comparaciones de esta variable a 2 m de altura con las estaciones meteorológicas, muestran una ligera subestimación con respecto a WRF y una diferencia importante respecto a ERA5.

En general, los resultados sugieren que en Urabá existe una alta variabilidad espacial y temporal del viento moduladas por la topografía y la presencia del golfo.

5.2. *Capítulo 2: Caracterización de las variables*

La precipitación presenta sus mayores valores al sur de la región y en algunas áreas al norte (zona oceánica) del golfo de Urabá. En el sur se observó un gradiente longitudinal, que incrementa de este a oeste. En el norte se observan picos de precipitación que coinciden

con la presencia de topografía. Durante la temporada seca la precipitación presenta valores bajos en enero que van incrementando hasta el mes marzo, en general en este trimestre, los valores más altos de precipitación acumulada (1.75 mm/3h) ocurren en horas de la tarde (entre 16:00 y 19:00) y los menores valores (cerca de 0 mm/3h) entre la mañana y el medio día (entre 10:00 y 13:00).

El modelo reproduce adecuadamente la presencia de los vientos alisios en la región durante el primer trimestre del año. A los 950 hPa el viento mantiene principalmente una dirección desde el norte durante todo el día, con las mayores velocidades en el norte de la región y las menores en el sur, alrededor de las zonas más altas del terreno, sugiriendo la influencia de la topografía en esta variable. Lo mismo ocurre a los 850 hPa, pero con direcciones del viento en sentido este-oeste. Por otro lado, a las 19:00 se presentan las mayores velocidades del viento, mientras que a las 7:00 ocurren las menores velocidades.

La distribución latitudinal de la humedad sobre Urabá, varía a lo largo del día. A las 7:00 los valores más altos se presentan al norte a una altura de 985 hPa (entre 0.017 kg/kg y 0.018 kg/kg) mientras, entre las 16:00 y las 19:00 (en casi toda el área de estudio, especialmente en las laderas de las montañas) se presentan a una altura de 970 hPa. En la superficie (950 hPa) el transporte de humedad se da principalmente desde el noreste y el noroeste presentándose los valores más altos (0.01 kg m /kg s) a las 1:00 y las 19:00 y a las 7:00 y las 13:00 se presenta el menor transporte de humedad. Los resultados sugieren que hay una relación entre el transporte de humedad y la velocidad del viento.

5.3. Capítulo 3: Análisis de los ciclos diurnos durante los meses enero, febrero y marzo relacionados con eventos El Niño 2009-2010 y La Niña 2010-2011

Existe una influencia de las fases del ENSO en el comportamiento de variables como la precipitación, el viento y la humedad en el Urabá antioqueño. En el caso particular de El Niño 2009-2010 y La Niña 2010-2011 durante los meses enero, febrero y marzo se evidenciaron comportamientos diferenciadores en cada fase.

Los años 2009 y 2011 (La Niña), mostraron valores altos de precipitación en comparación al 2010 (El Niño). En los años La Niña ocurrió un incremento de la precipitación (de hasta 4 mm/3h) en el sur de la zona de estudio y en el golfo de Urabá, zonas en las que se

presentó mayor acumulación de precipitación. Por otro lado, la velocidad del viento en 2009 y 2011 presentó reducciones de hasta 3 m/s con respecto al 2013 (año neutro), siendo el suroeste la zona donde más se evidenció este comportamiento. Por el contrario, el año 2010 se caracterizó por incrementos de hasta 4 m/s. En cuanto a la dirección del viento 2009 y 2011 presentaron en general direcciones desde el suroeste hacia el norte, mientras que en 2010 se mantuvo la dirección del viento desde el noreste y noroeste hacia el sur. En estas mismas direcciones se dio el mayor transporte de la humedad en Urabá en el 2010.

En general, las variables de estudio tuvieron comportamientos contrastantes del año 2010 respecto a 2009 y 2011, evidenciándose su modulación ante la ocurrencia de las fases del ENSO. Durante El Niño aumentó la magnitud del viento y el transporte de humedad y se redujo la precipitación, mientras durante La Niña aumentó la precipitación y se redujo la magnitud del viento y el transporte de humedad sobre la región.

5.4. Capítulo 4: Mecanismos que afectan el comportamiento del viento, la humedad y la precipitación en Urabá

Los resultados encontrados en el capítulo cuatro sugieren relaciones entre la precipitación, el viento y la humedad en Urabá que condicionan el comportamiento de estas variables durante la temporada seca. La distribución espacial de la precipitación está relacionada con cambios en la dirección del viento superficial, provocando mayor precipitación en la zona oceánica cuando la componente meridional aumenta. En el continente esta relación ocurre con el incremento de la componente zonal. Estas relaciones crean un patrón diurno en las precipitaciones en el que se presentan los mayores valores en la mañana sobre el golfo y en la tarde sobre el continente.

En el caso particular de los años 2009 y 2011 existen relaciones inversas en el golfo y gran parte del continente entre la precipitación y la componente meridional. Contrario a esto en 2010 dichas relaciones son directas. Por su parte, los aumentos de la componente zonal provocan incrementos de precipitación en el continente y al oeste del golfo en los años 2009 y 2011. En el 2010 esto solo sucede al sur de la región y en el resto de la zona de estudio se presenta una relación inversamente proporcional. Con respecto a la humedad específica y el viento los años 2009 y 2011 mantienen relaciones inversas con la componente meridional

sobre toda la región, mientras que en 2010 ocurren relaciones directamente proporcionales en el continente. Por su parte, la componente zonal en los tres años aumenta en el continente cuando aumenta la humedad específica y tiene un comportamiento contrario en el golfo. Así pues, Las relaciones componente meridional-precipitación y componente meridional-humedad en el continente, se invierten con los cambios en las fases del ENSO (Directa Niño-Inversa Niña).

Durante la temporada seca los vientos ingresan a Urabá directamente desde el noreste. Sin embargo, en los años 2009 y 2011 (La Niña), los vientos llegan desde del océano Pacífico y terminan ingresando a la zona de estudio por el sur, lo cual puede explicar la dirección del viento sobre Urabá para estos años durante el día. En el 2010 se presentaron las mayores magnitudes del viento respecto a 2009 y 2011. En general, los resultados sugieren la importancia de la presencia del mar Caribe y el océano Pacífico en el transporte de humedad hacia la región de acuerdo a las temporadas climáticas y la ocurrencia de las fases del ENSO.

6. Trabajos futuros

Como una forma de complementar los resultados obtenidos en esta investigación, resulta interesante realizar una prueba de conceptos a través de simulaciones con el modelo WRF en las que se analice el comportamiento de las variables de estudios en un escenario sin la existencia de topografía en la región para identificar de manera contundente la influencia de este elemento en la meteorología local de Urabá.

Además, sería importante poder analizar el comportamiento de la precipitación, el viento y la humedad durante las distintas fases del ENSO y la temporada húmeda para un período de tiempo más extenso (por ejemplo, una década) que permita identificar la influencia de este fenómeno en las variables en un largo plazo.

7. Referencias Bibliográficas

- Amaya, G., Restrepo-Tamayo, C., Vélez, M. y Álvarez, O. (2009). Modelación del comportamiento hidrológico de tres cuencas en el Urabá Antioqueño-Colombia. *Avances en recursos hidráulicos*, 19,21-38. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=145012892002>
- Arango-Ruda, E. y Poveda, G. (2018). Efectos de El Niño y La Niña sobre la hidrología de la Amazonia Colombiana. *Revista Colombia Amazónica*,11, 33-58
- Arias, I. y Chandrasekar, V. (2018). Cross Validation of GPM and Ground-Based Radar in Latin America and the Caribbean," *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2018, 3891-3893. 10.1109/IGARSS.2018.8517848
- Arias, P. A, Martínez, J. A. y Vieira, S. C. (2015). Moisture sources to the 2010-2012 anomalous wet season in northern South America. *Climate Dynamics*. 45, 2861-2884. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2511-7>
- Arroyo Quinto, L. M., Toro Valencia, V.G., Rincón Vargas, E., Posada-Marín, J. A., Molina Santamaría, R. D. y Salazar, J. F. (2022). Daytime breeze cycle characterization in a tropical coastal region using the WRF model: the case of the Gulf of Urabá, Colombia. *Bol. Cient. CIOH*; 41(1), 49-61. <https://doi.org/10.26640/22159045.2022.594>
- Back, L. E., y Bretherton, C. S. (2005). The Relationship between Wind Speed and Precipitation in the Pacific ITCZ. *Journal of Climate*, 18, (20), 4317-4328. <https://doi.org/10.1175/JCLI3519.1>
- Basist, A., Bell, G. D. y Meentemeyer, V. (1994). Statistical Relationships between Topography and Precipitation Patterns. *Journal of Climate*, 7(9), 1305-1315. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1994\)007<1305:SRBTAP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1994)007<1305:SRBTAP>2.0.CO;2)

- Bastidas Osejo, B., Betancur-Vargas, T. y Martínez, A. (2019). Spatial distribution of precipitation and evapotranspiration estimates from Worldclim and Chelsa datasets: improving long-term water balance at the watershed-scale in the Urabá region of Colombia. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 14(2), 105-117. <http://dx.doi.org/10.2495/SDP-V14-N2-105-117>
- Bastidas-Salamanca, M. y Rueda-Bayona, J.G. (2021). Effect of Climate Variability Events over the Colombian Caribbean Offshore Wind Resource. *Water*, 13(22), 3150. <https://doi.org/10.3390/w13223150>
- Bedoya-Soto, J.M., Poveda, G., Trenberth, K.E. et al. (2019). Interannual hydroclimatic variability and the 2009–2011 extreme ENSO phases in Colombia: from Andean glaciers to Caribbean lowlands. *Theoretical and Applied Climatology*, 135, 1531–1544. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2452-2>
- Blocken B., Poesen J. y Carmeliet J. (2006). Impact of wind on the spatial distribution of rain over micro-scale topography: numerical modelling and experimental verification. *Hydrological Processes*, 20(2), 345-368. <https://doi.org/10.1002/hyp.5865>
- Boening, C., Willis, J.K., Landerer, F.W., Nerem, R.S. y Fasullo, J. (2012). The 2011 La Niña: So strong, the oceans fell. *Geophysical Research Letters*, 39(19). <https://doi.org/10.1029/2012GL053055>
- Cárdenas González, J.H., Zapata-Henao, S. y Sánchez-Torres, J.D. (2017). Análisis productivo de plátano en alta densidad y su relación con la precipitación en Urabá. *Revista Politécnica*, 13(24), 27-35. <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1088>
- Casallas, A. (2017). Eventos intensos "El Niño" en Colombia: características de su dinámica atmosférica e impactos en la producción energética de una hidroeléctrica. Tesis

Ingeniería Ambiental. Departamento de Ingeniería Ambiental, Universidad Sergio Arboleda. Bogotá, Colombia. 10.13140/RG.2.2.12431.33441

Chevillot, P., Molina M., A., Giraldo, L., y Molina, C. (1993). Estudio geológico e hidrológico del Golfo de Urabá. Boletín Científico CIOH, (14), 79–90.
<https://doi.org/10.26640/22159045.62>

Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá (CORPOURABA). (2019). Plan de ordenación y Manejo de la cuenca del Río León: Caracterización del medio físico, Clima. Apartadó-Antioquia, Colombia.<http://corpouraba.gov.co/wp-content/uploads/1.-Formulaci%C3%B3n-POMCA-r%C3%ADo-Le%C3%B3n.pdf>

Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá (CORPOURABA). (2015). Plan de Contingencia frente al fenómeno El Niño 2015-2016. Apartadó-Antioquia, Colombia.
http://corpouraba.gov.co/sites/default/files/plan_de_contingencia_fenomeno_el_ni%C3%B1o_2015-2016_1_0.pdf

Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá (CORPOURABA). (2011). Resumen eventos hidrometeorológicos y movimientos en masa durante la temporada invernal 2010–2011 en jurisdicción de CORPOURABA. Apartadó-Antioquia, Colombia.
http://www.corpouraba.gov.co/sites/default/files/informinund_0.pdf

Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá (CORPOURABA). (2016). Plan de Acción Institucional Versión 06 2016-2019. Apartadó-Antioquia, Colombia.
<http://corpouraba.gov.co/corporacion/planes-proyectos-institucionales/plan-de-accion-institucional-pai-2016-2019/>

Corporación para el Desarrollo Sostenible del Urabá (CORPOURABA). (2018). Plan de ordenación y Manejo de la cuenca del Río Turbo-Currulao: Tomo V- Vegetación, Flora, Fauna y ecosistemas. Apartadó-Antioquia, Colombia.
<http://corpouraba.gov.co/turbo-currulao/>

- Correa, I. y Vernet, G. (2004). Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (Sector Arboletes-Turbo) Costa Caribe Colombiana. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras, 33,7-28. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2004.33.0.245>
- Díaz, D. (2017). Modelado y Simulación de Sistemas Climáticos: Desde la escala global hasta los microclimas. Libro: Modelado y simulación de sistemas naturales (pp. 7-11). Bogotá, Colombia: Ed. Utadeo. <https://www.divulgameteo.es/ampliab/4/1878/Modelado-y-simulacion-de-sistemas-climaticos-desde-la-escala-global-hasta-los-microclimas.html>
- Douluri, L. y Chakraborty, A. (2021). Assessment of WRF-ARW model parameterization schemes for extreme heavy precipitation events associated with atmospheric rivers over West Coast of India. Atmospheric Research, 249, 105330. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105330>
- Dudhia, J. (2014). A history of mesoscale model development. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 50, 121–131. <https://doi.org/10.1007/s13143-014-0031-8>
- Fernández, L. (2021). Validación de pronósticos de temperatura, viento y radiación solar empleando el modelo atmosférico WRF. Tesis para optar al título de Ingeniero Ambiental. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. <http://hdl.handle.net/10495/18408>
- Funk, C. C, Peterson, P. J., Landsfeld, M. F., Pedreros, D. H. et al. (2014). A quasi-global precipitation time series for drought monitoring. U. S. Geological Survey Data Series 832, 1-4. <https://doi.org/10.3133/ds832>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., et al. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. Scientific Data, 2,150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

- Gao, Y., Chen, F., Miguez-Macho, G. et al. (2020). Understanding precipitation recycling over the Tibetan Plateau using tracer analysis with WRF. *Climate Dynamics*, 55, 2921–2937. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05426-9>
- García-Valdecasas Ojeda, M., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y. y Esteban-Parra M. J. (2017). Evaluation of WRF capability to detect dry and wet periods in Spain using drought indices. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(3), 1569–1594. doi:10.1002/2016JD025683
- Gil Ruiz, S., Cañón Barriga, J. y Martínez, J. (2021). Wind power assessment in the Caribbean region of Colombia, using ten-minute wind observations and ERA5 data. *Renewable Energy*, 172, 158-176, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.033>
- Gobernación de Antioquia, Universidad de Antioquia, Universidad Nacional y Universidad del Norte (2021). *Erosión Costera en el litoral Antioqueño. Compilación de resultados.* Litografía Grafiservicios S.A.S. Medellín, Antioquia.
- Guarín, G. W., y Ochoa, A. (2010). Simulación de escenarios de producción bananera en Urabá (Colombia) según las fases del fenómeno ENSO. En *Memorias de la XIX Reunión Internacional para la cooperación en la Investigación y el Desarrollo Integral de las Musáceas (Banano y Plátano)- ACORBAT 2010, ACORBAT - AUGURA*, Medellín, Colombia. 226-232. 10.13140/2.1.2131.9687
- Haupt, S.E., Jiménez, P.A., Lee, J.A. y Kosović, B. (2017). 1 - Principles of meteorology and numerical weather prediction. George, K. (Eds). In *Woodhead Publishing Series in Energy, Renewable Energy Forecasting*, Woodhead Publishing, 3-28. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100504-0.00001-9>

- Heikkilä, U., Sandvik, A. y Sorteberg, A. (2011). Dynamical downscaling of ERA-40 in complex terrain using the WRF regional climate model. *Climate Dynamics*, 37, 1551–1564. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0928-6>
- Hernández, T. y Mercado, A. (2020). Estimación de la distribución espacial y temporal de la precipitación en el distrito de Turbo, Colombia. Tesis de grado Ingeniería Oceanográfica. Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería. Medellín, Colombia. <http://hdl.handle.net/10495/15278>
- Herrera-Mejía, L. y Hoyos, C. (2019). Characterization of the atmospheric boundary layer in a narrow tropical valley using remote-sensing and radiosonde observations and the WRF model: the Aburrá Valley case-study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145, 2641–2665. <https://doi.org/10.1002/qj.3583>
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., et al. (2014). The Global Precipitation Measurement Mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(5), 701-722. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1>
- Hoyos, I. (2017). Transporte de humedad atmosférica en Colombia: origen, variabilidad y acople con fenómenos climáticos globales. Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. <http://hdl.handle.net/10495/7415>
- Hoyos, N., Escobar, J., Restrepo, J.C., Arango, A.M. y Ortiz J.C., (2013). Impact of the 2010–2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: The human toll of an extreme weather event. *Applied Geography*, 39, 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.11.018>

Hu, Z. Z., Kumar, A., Xue, Y. et al. (2014). Why were some La Niña followed by another La Niña? *Climate Dynamics*, 42, 1029–1042. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1917-3>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (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. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Actualizacion+Modelo+Institucional+El+Ni%C3%B1o+++La+Ni%C3%B1a.pdf/02f5e53b-0349-41f1-87e0-5513286d1d1d>

Jiménez, J.F. (2016). Altura de la Capa de Mezcla en un área urbana, montañosa y tropical. Caso de estudio: Valle de Aburra (Colombia). Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. <http://hdl.handle.net/10495/5738>

Junquas, C., Takahashi, K., Condom, T., Espinosa, J.-C., Chavez, S., Sicart, J.-E. y Lebel, T. (2018). Understanding the influence of orography on the precipitation diurnal cycle and the associated atmospheric processes in the central Andes. *Climate Dynamics*, 50, 3995–4017. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3858-8>

Kao, H., y Yu, J. (2009). Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific Types of ENSO. *Journal of Climate*, 22(3), 615-632. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2309.1>

Kikuchi, K., y Wang, B. (2008). Diurnal Precipitation Regimes in the Global Tropics. *Journal of Climate*, 21(11), 2680-2696. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI2051.1>

Kim, W., Yeh, S.W., Kim, J.H., Kug, J.S., et al. (2011). The unique 2009–2010 El Niño event: A fast phase transition of warm pool El Niño to La Niña. *Geophysical Research Letters*, 38(15), 1-5. <https://doi.org/10.1029/2011GL048521>

Kong, X., Wang, A., Bi, X., Sun, B., y Wei, J. (2022). The Hourly Precipitation Frequencies in the Tropical-Belt Version of WRF: Sensitivity to Cumulus Parameterization and Radiation

- Schemes. *Journal of Climate*, 35(1), 285-304. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0854.1>
- Lee, T. y McPhaden, M. (2010). Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific. *Geophysical Research Letters*, 37(14). <https://doi.org/10.1029/2010GL044007>
- Martínez, J. A., Camacho, J. C., Vásquez, D., Espinosa, D., y Arias, P. A. (2021). Simulation of Mesoscale Convective Systems near the Tropical Andes: Insights from Convection-Permitting Simulations of Two Events, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-10264, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-10264>
- Mejía, S. y Ruíz, J.F. (2012). Validación de los pronósticos de precipitación con los modelos GFS, MM5, WRF, CMM5 Y CWRF sobre el territorio colombiano. Subdirección de Meteorología IDEAM. Colombia. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21132/Validaci%C3%B3n+Modelos+MM5+WRF+%28Ruiz.pdf/13192c3b-a59f-4114-9eb0-220d3c897cef>
- Mesa Sánchez, O. J. y Peñaranda Vélez, V. M. (2015). Complejidad de la estructura espacio-temporal de la precipitación. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 39(152), 304-320. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.196>
- Montoya Jaramillo, L. y Toro Botero, F. (2006). Calibración de un modelo hidrodinámico para el estudio de los patrones de circulación en el Golfo de Urabá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Posgrado en Recursos Hidráulicos. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8180>
- Montoya Jaramillo, L., Toro Botero, F. M. y Gómez Giraldo, A. (2017). Study of Atrato river plume in a tropical estuary: Effects of the wind and tidal regime on the gulf of Urabá, Colombia. *DYNA* 84(200), 367-375. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n200.55040>

- Montoya Jaramillo, L., Toro Botero, F. y Gómez Giraldo, A. (2010). Descripción de los patrones estacionales de circulación hidrodinámica en el golfo de Urabá (Colombia). Cuadernos Del Caribe, 8 (14), 13-34. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ccaribe/article/view/40915>
- Moreno Calderón, M., Pico Hernández, A., Dagua Paz, C. J., Herrera Moyano, D. P. y Gonzales Montes, S. (2020). Boletín Meteomarino Mensual del Caribe Colombiano No.86 / febrero de 2020. Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia: Dirección General Marítima. <https://doi.org/10.26640/23394099.86.2020>
- Muñoz, Á.G. y Chourio, X. (2018). Informe de Validación del Nuevo Sistema Calibrado de Pronóstico del CIOH. Reporte Interno. <http://cpps.dyndns.info/cpps-docs-web/dircient/grasp/Validacion WRF Colombia GRASP.pdf>
- Navarro Monterroza, E., Vieira, S. y Arias, P. (2017). Variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia durante eventos ENSO. XV Seminario Iberoamericano de Redes de Agua y Drenaje, SEREA2017, 1-8. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3113796>
- Navarro-Monterroza, E., Arias, P. y Viera, S. (2019). Niño-Oscilación del Sur, fase Modoki y sus efectos en la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 43(166), 120-132. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.704>
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (2009). Climate Variability Oceanic Niño Index. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-ni%C3%B1o-index>
- Ntwali, D., Ogwang, B. y Ongoma, V. (2016). The Impacts of Topography on Spatial and Temporal Rainfall Distribution over Rwanda Based on WRF Model. Atmospheric and Climate Sciences, 6(2), 145-157. <http://dx.doi.org/10.4236/acs.2016.62013>

- Oblack, R. (2020, August 26). Synoptic Scale vs. Mesoscale Weather Systems. <https://www.thoughtco.com/synoptic-scale-vs-mesoscale-weather-systems-3444176>
- Pereira, H.R., Meschiatti, M. C., Pires, R. C., et al. (2018). On the performance of three indices of agreement: an easy-to-use r-code for calculating the Willmott indices. *Bragantia*, Campinas, 77(2),394-403. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2017054>
- Pielke, R. A. (2001). Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall. *Reviews of Geophysics*, 39 (2), 151-177. <https://doi.org/10.1029/1999RG000072>
- Posada-Marín, J., Rendón, A., Salazar, J. F., Mejía, J. y Villegas, J. C. (2019). WRF downscaling improves ERA-Interim representation of precipitation around a tropical Andean valley during El Niño: implications for GCM-scale simulation of precipitation over complex terrain. *Climate Dynamics*, 52, 3609-3629. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4403-0>
- 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 Exactas, Físicas y Naturales*, 28(107), 201-222. <https://biblat.unam.mx/es/revista/revista-de-la-academia-colombiana-de-ciencias-exactas-fisicas-y-naturales/articulo/la-hidroclimatologia-de-colombia-una-sintesis-desde-la-escala-inter-decadal-hasta-la-escala-diurna>
- Poveda, G., Waylen, P. y Pulwarty, R. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(1), 3-27. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.10.031>

- Powers, J. G., Klemp, J. B., Skamarock, W. C., Davis, C. A., Dudhia, J., et al. (2017). The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions. *American Meteorological Society*, 98(8), 1717-1737. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>
- Prussmann, J. (2012). Nuevos elementos para el Manejo Integrado de la Región de Urabá, Costa Caribe colombiana: base de datos geoespacial geomorfológica de la Franja litoral de los departamentos de Antioquia y Chocó. Maestría en Ciencias de La Tierra, Departamento de Geología. Universidad Eafit, Medellín. 108. <http://hdl.handle.net/10784/12193>
- Ratna, SB, Ratnam, JV, Behera, SK et al. (2014). Performance assessment of three convective parameterization schemes in WRF for downscaling summer rainfall over South Africa. *Climate Dynamic*, 42, 2931–2953. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1918-2>
- Rodríguez, M. (2018). Caracterización de eventos extremos de precipitación diaria en Colombia: observaciones, simulaciones y proyecciones. Tesis de maestría en Medio Ambiente y Desarrollo. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69875>
- Salazar, J., Posada-Marín, J. y Molina, R. (2018) Investigación para reversión del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia. Informe preliminar, componente de la atmósfera. Medellín, Colombia
- Schwaller, M. R., y Morris, K. R. (2011). A Ground Validation Network for the Global Precipitation Measurement Mission. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28(3), 301-319. <https://doi.org/10.1175/2010JTECHA1403.1>
- Serna, L. M., Arias, P. A. y Vieira, S. C. (2018). Las corrientes superficiales de chorro del Chocó y el Caribe durante los eventos de El Niño y El Niño Modoki. *Revista de la Academia*

Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 42(165), 410-421.
<https://doi.org/10.18257/raccefyn.705>

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., et al. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). University Corporation for Atmospheric Research. <http://dx.doi.org/10.5065/D68S4MVH>

Srinivas, C.V., Hariprasad, D., Bhaskar Rao, D. V., Anjaneyulu, et al. (2012). Simulation of the Indian summer monsoon regional climate using advanced research WRF model. *International Journal of Climatology*, 33(5), 1195-1210. 10.1002/joc.3505

Tchantsev, V. y Cabrera Luna, E. (1998). Algunos aspectos de investigación de la formación del régimen oceanográfico en el Pacífico Colombiano. *Boletín Científico CCCP*.7,7-19.
<https://ojs.dimar.mil.co/index.php/CCCP/article/view/333>

Thomas, Y.F., García Valencia, C., Cesaraccio, M. y Rojas, G.X. (2007). El Paisaje en el Golfo. En García Valencia, C. (Ed). *Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó*(pp.79-131). Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras –Invemar– y Gobernación de Antioquia. Santa Marta. <http://hdl.handle.net/1834/5917>

Toro Trujillo, A.M., Arteaga Ramírez, R., Vázquez Peña, M. y Ibáñez Castillo, L.A. (2015). Relleno de series diarias de precipitación, temperatura mínima, máxima de la región norte del Urabá Antioqueño. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (2),577-588.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=263138088011>

Toro, V. G., Mosquera, W., Barrientos, N. y Bedoya, Y. (2019). Circulación oceánica del golfo de Urabá usando campos de viento de alta resolución temporal. *Boletín Científico CIOH*, 38(2), 26-35. <https://doi.org/10.26640/22159045.2019.516>

Toro-Trujillo, A. M., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A., y Ibáñez-Castillo, L. A., (2016). Irrigation Requirements and Yield Prediction of Bananas Growing through a

Simulation Model in Urabá Antioqueño. *Water Technology and Sciences*, 7(6), 105-122 https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000600105

Trenberth, K. y National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). (2020). *The Climate Data Guide: Niño SST Indices* (Niño 1+2, 3, 3.4, 4; ONI and TNI). <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>

Trenberth, K.E. (1999). Atmospheric Moisture Recycling: Role of Advection and Local Evaporation. *Journal Climate*, 12 (5),1368–1381. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1368:AMRROA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1368:AMRROA>2.0.CO;2)

Urrea, V., Ochoa, A. y Mesa, O. (2016). Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el período 1981-2014. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica Lima, Perú, 28 Al 30 De Setiembre De 2016. [https://www.researchgate.net/publication/310844678 Validacion de la base de datos de precipitacion CHIRPS para Colombia a escala diaria mensual y anual en el periodo 1981-2014](https://www.researchgate.net/publication/310844678_Validacion_de_la_base_de_datos_de_precipitacion_CHIRPS_para_Colombia_a_escal_a_diaria_mensual_y_anual_en_el_periodo_1981-2014)

Urrea, V., Ochoa, A. y Mesa, O. (2019). Seasonality of Rainfall in Colombia. *Water Resources Research*, 55 (5), 4149-4162. <https://doi.org/10.1029/2018WR023316>

Vallejo-Bernal, S., Urrea, V., Bedoya-Soto, J., Posada, D. et al. (2020). Ground validation of TRMM 3B43 V7 precipitation estimates over Colombia. Part I: Monthly and seasonal timescales. *International Journal of Climatology*, 41(1), 601-624. <https://doi.org/10.1002/joc.6640>

Vega-Durán, J., Escalante-Castro, B., Canales, F.A., Acuña, G.J., et al. (2021) Evaluation of Areal Monthly Average Precipitation Estimates from MERRA2 and ERA5 Reanalysis in a

Colombian Caribbean Basin. Atmosphere, 12(11), 1430.
<https://doi.org/10.3390/atmos12111430>

Wallace, J. y Hobbs, P. (2006). Atmospheric Science. An Introductory Survey, Washington, USA. <https://www.elsevier.com/books/atmospheric-science/wallace/978-0-12-732951-2>

Wang, Y., Yang, K., Zhou, X., et al. (2020). Synergy of orographic drag parameterization and high resolution greatly reduces biases of WRF-simulated precipitation in central Himalaya. Climate Dynamics, 54(3), 1729-1740. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05080-w>

Yan, H., Qian, Y., Lin, G., Leung et al. (2014). Parametric sensitivity and calibration for the Kain-Fritsch convective parameterization scheme in the WRF model. Climate Research, 59,135-147. <https://doi.org/10.3354/cr01213>

Yu, J.Y. y Kim, S.T. (2013). Identifying the types of major El Niño events since 1870. International Journal of Climatology, 33(8), 2105-2112. <https://doi.org/10.1002/joc.3575>

Yuan, G., Zhang, L. y Liu, Y. (2021). Impacts of soil moisture and atmospheric moisture transport on the precipitation in two typical regions of China. Atmospheric Research. 247, 105-151. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105151>

Zhang, R.H., Zheng, F., Zhu J. y Wang Z. (2013). A successful real-time forecast of the 2010-11 La Niña event. Scientific Reports, 3, (1108). <https://doi.org/10.1038/srep01108>

Zhu, L., Meng, Z., Zhag, F. y Markowski, P.M. (2017). The influence of sea- and land-breeze circulations on the diurnal variability in precipitation over a tropical island. Atmospheric Chemistry and Physics, 17(21), 13213-13232. <https://doi.org/10.5194/acp-17-13213-2017>

Zscheischler, J., Naveau, P., Martius, O., Engelke, S. y Raible, C. C. (2021). Evaluating the dependence structure of compound precipitation and wind speed extremes. *Earth System Dynamics*,12(1),1-16. <https://doi.org/10.5194/esd-12-1-2021>

8. Anexos

Anexo 1

Tabla 4. Resultados de los estadísticos aplicados a los datos de precipitación del modelo con respecto a estaciones meteorológicas en el sur y el norte de la región de Urabá.

Ubicación	Estación	CC*	IOA*	Bias*	ECM*	Desvmod*	Desvobs*
Sur	Villarteaga	0.33	0.46	9.28	20.69	18.92	11.16
	Nvaoriente	0.38	0.37	7.1	16.73	16.36	5.26
	Tormento	0.26	0.45	-0.9	13.35	8.86	12.49
Norte	Pradomar	0.28	0.48	2.5	12.68	9.64	10.94
	Pueblobello	0.36	0.56	1.71	13.97	10.84	13.39
	Sanjuan	0.64	0.7	1.4	11.42	7.72	14.6
	Carmelo	0.2	0.39	1.24	8.71	6.13	7.42

*CC: Coeficiente de Correlación, IOA: Índice de Acuerdo, Bias: Sesgo, ECM: Error Cuadrático Medio, Desvmod: Desviación estándar del modelo y Desvobs: Desviación estándar de las observaciones.

Anexo 2

Tabla 5. Resultados de los estadísticos aplicados a los datos de humedad relativa del modelo y ERA5 con respecto a estaciones meteorológicas de la región de Urabá.

Datos	Estación	CC	IOA	Bias	ECM	Desv*	Desvobs
WRF	Mellito	0.61	0.63	9.60	12.50	8.08	9.80
	Tulenapa	0.40	0.59	7.01	12.40	8.86	9.75
	Uniban	0.48	0.61	7.59	12.22	8.42	10.17
	Turbo	0.57	0.57	12.25	15.28	8.53	10.76
ERA5	Mellito	0.71	0.73	-7.71	10.63	9.24	9.80
	Tulenapa	0.52	0.61	-8.90	13.09	9.86	9.75
	Uniban	0.32	0.56	-5.87	12.62	8.89	10.17
	Turbo	0.28	0.55	-3.02	12.82	10.00	10.76

*Desviación estándar

Anexo 3

Precipitación

En las simulaciones del modelo con la ausencia del golfo de Urabá (Figuras 34A, 34B, 34C y 34D) se conserva la variabilidad temporal de la precipitación en los primeros días del mes de enero tal como ocurre en el ejercicio con presencia del golfo (Figuras 34E, 34F, 34G y 34H). Sin embargo, cuando se suprime el golfo, a las 07:00 se observa una expansión de la precipitación hasta la zona sur de lo que antes era el golfo. A las 13:00 la precipitación se presenta principalmente en el continente, y en el área que correspondía al golfo los valores son cercanos a cero, al igual que cuando este cuerpo de agua existía (Figura 34G).

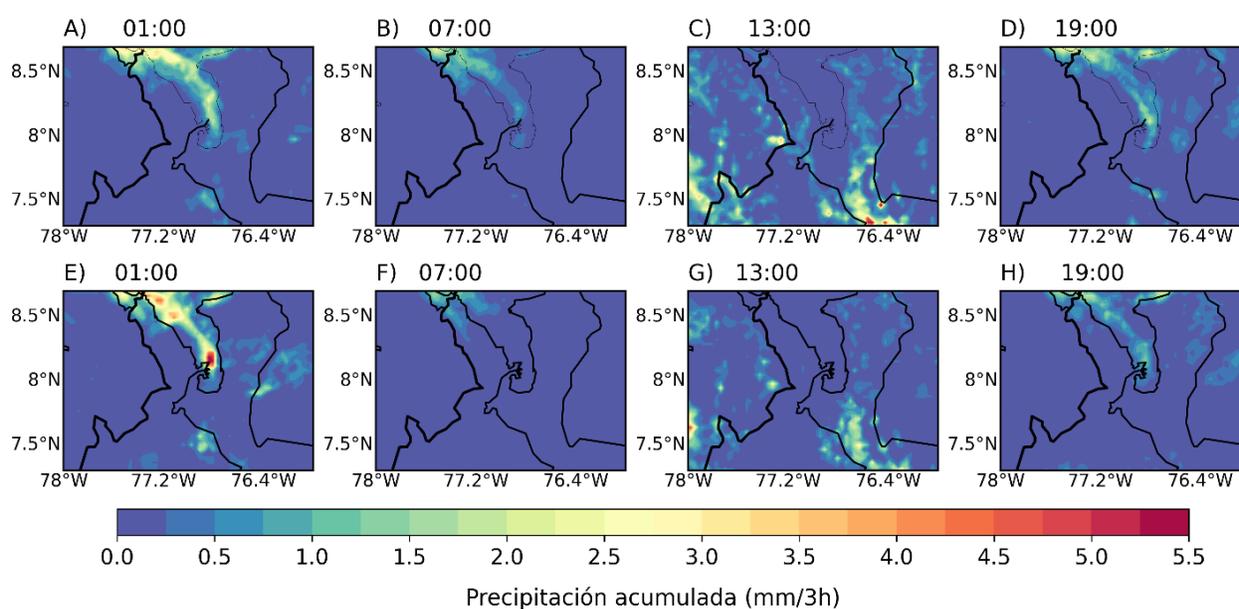


Figura 34. Campos de la precipitación promedio entre el 1 y el 15 de enero de 2013. (A, B, C y D simulaciones sin el golfo de Urabá. E, F, G y H simulaciones con el golfo de Urabá).

Se realizaron cortes longitudinales sobre la región (Figura 35) en las mismas longitudes de la figura 15. Los resultados sugieren que en los casos sin golfo se presentan incrementos en la precipitación en la zona norte, especialmente en los cortes del este (entre 8.2°N y 8.4°N y entre 8.6°N y 8.8°N) y el oeste (8.6°N) de Urabá. En la zona sur, el corte transversal del centro muestra que sin golfo hay incrementos en la precipitación diaria en la frontera sur (entre 7.2°N y 7.3°N), así como cerca de 7.7°N. Estos puntos tanto en el norte como en el sur se localizan después de zonas altas del terreno. Por el contrario, en la sección del este se presenta una reducción de la precipitación entre las latitudes 7.2°N y 7.4°N.

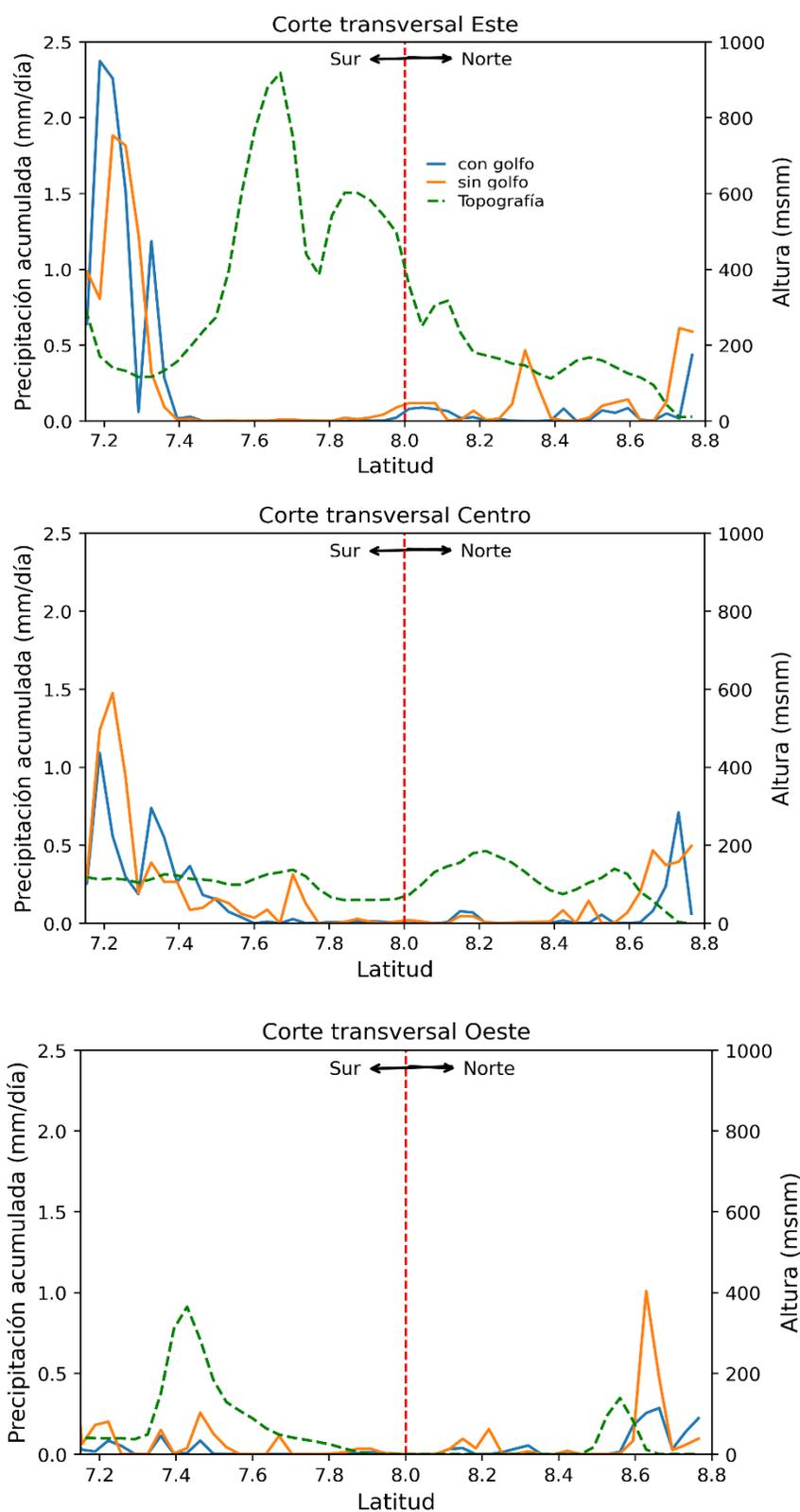


Figura 35. Secciones transversales en el Este, Centro y Oeste de Urabá de la precipitación diaria promedio entre el 1 y 15 de enero de 2013 para las simulaciones con el golfo de Urabá y sin el golfo de Urabá.

Humedad

En cuanto a la humedad específica, se observa que en las simulaciones sin golfo (Figura 36) respecto a las que lo incluyen (Figura 37) esta variable tiene valores levemente más altos en el oeste entre las latitudes 8.50°N y 8.75°N, mientras en los cortes del centro y este de la región los cambios presentados no son tan notorios, pero en todas las secciones transversales en las latitudes del norte con incrementos de humedad específica también se presentan incrementos en la precipitación.

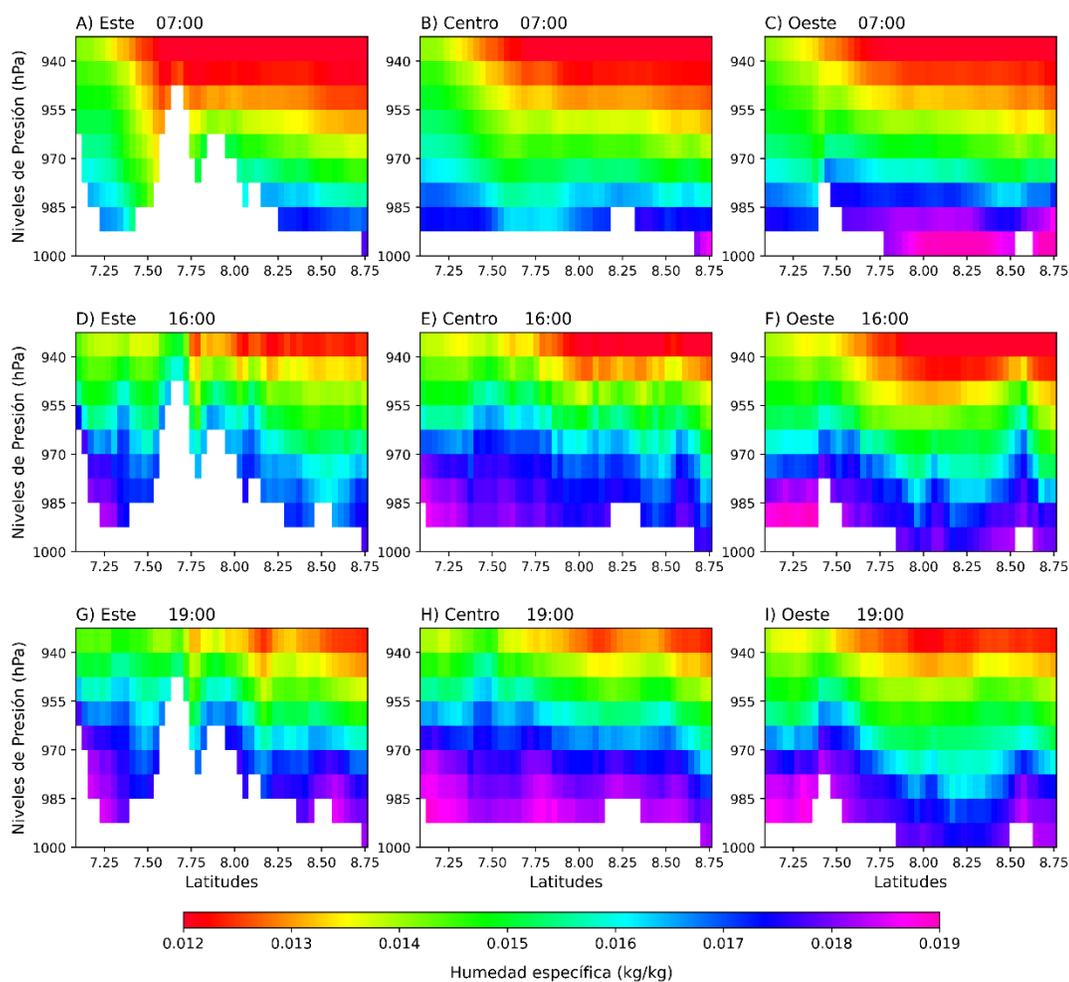


Figura 36. Perfiles verticales de la humedad específica promedio del 1 al 15 de enero de 2013 (escala horaria) sobre los cortes transversales al Este (A, D y G), Centro (B, E y H) y Oeste (C, F e I) de Urabá para las simulaciones sin el golfo de Urabá.

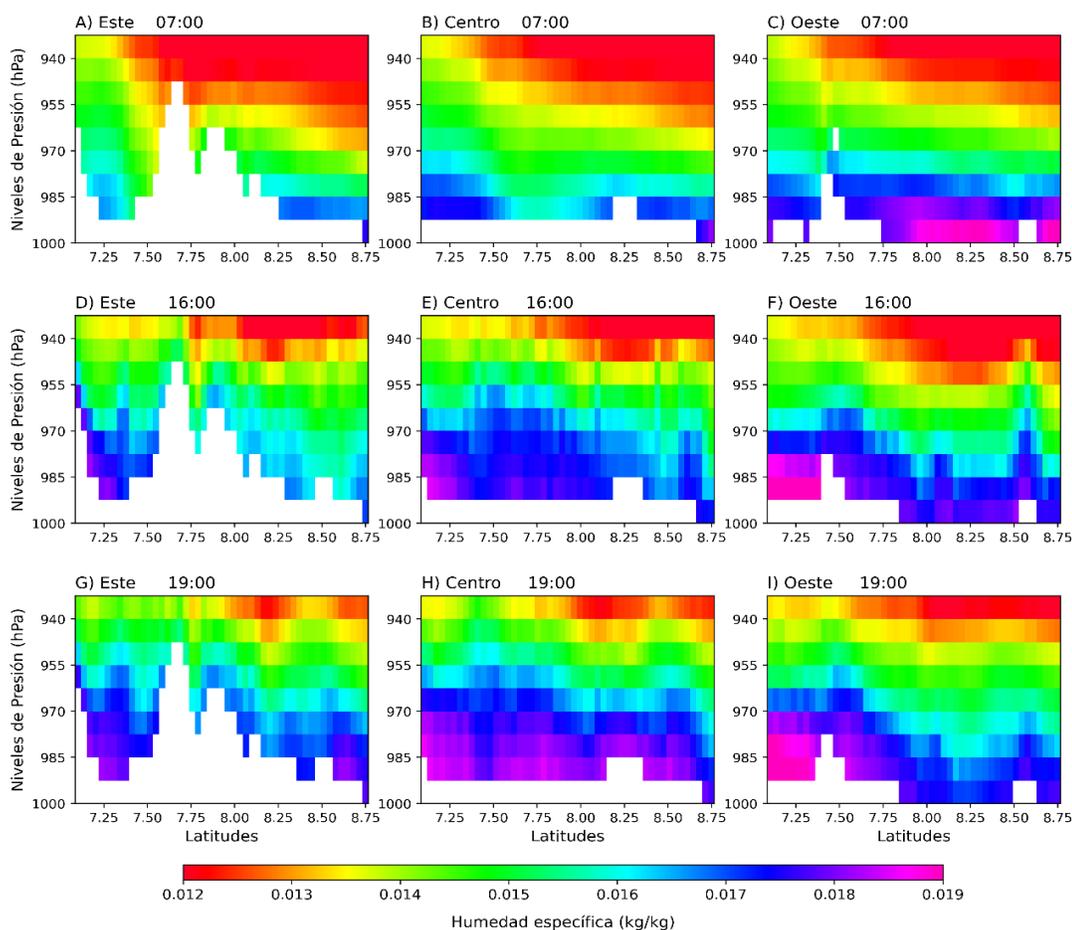


Figura 37. Perfiles verticales de la humedad específica promedio del 1 al 15 de enero de 2013 (escala horaria) sobre los cortes transversales al Este (A, D y G), Centro (B, E y H) y Oeste (C, F e I) de Urabá para las simulaciones con el golfo de Urabá.

Viento

El comportamiento de la velocidad del viento a 10 m en las simulaciones sin golfo es similar al que se observa con la presencia del mismo (Figura 38), sin embargo, se presenta un pequeño incremento de esta variable en todas las latitudes analizadas, que puede estar relacionado con el cambio de la superficie sobre esa área.

La ausencia del golfo genera cambios someros en la distribución espacial y temporal de la precipitación, el viento y la humedad sobre Urabá, pero no altera el comportamiento general de estas variables a lo largo del día. Los cambios más grandes se producen en la zona correspondiente al golfo a la 7:00 para el caso de la precipitación.

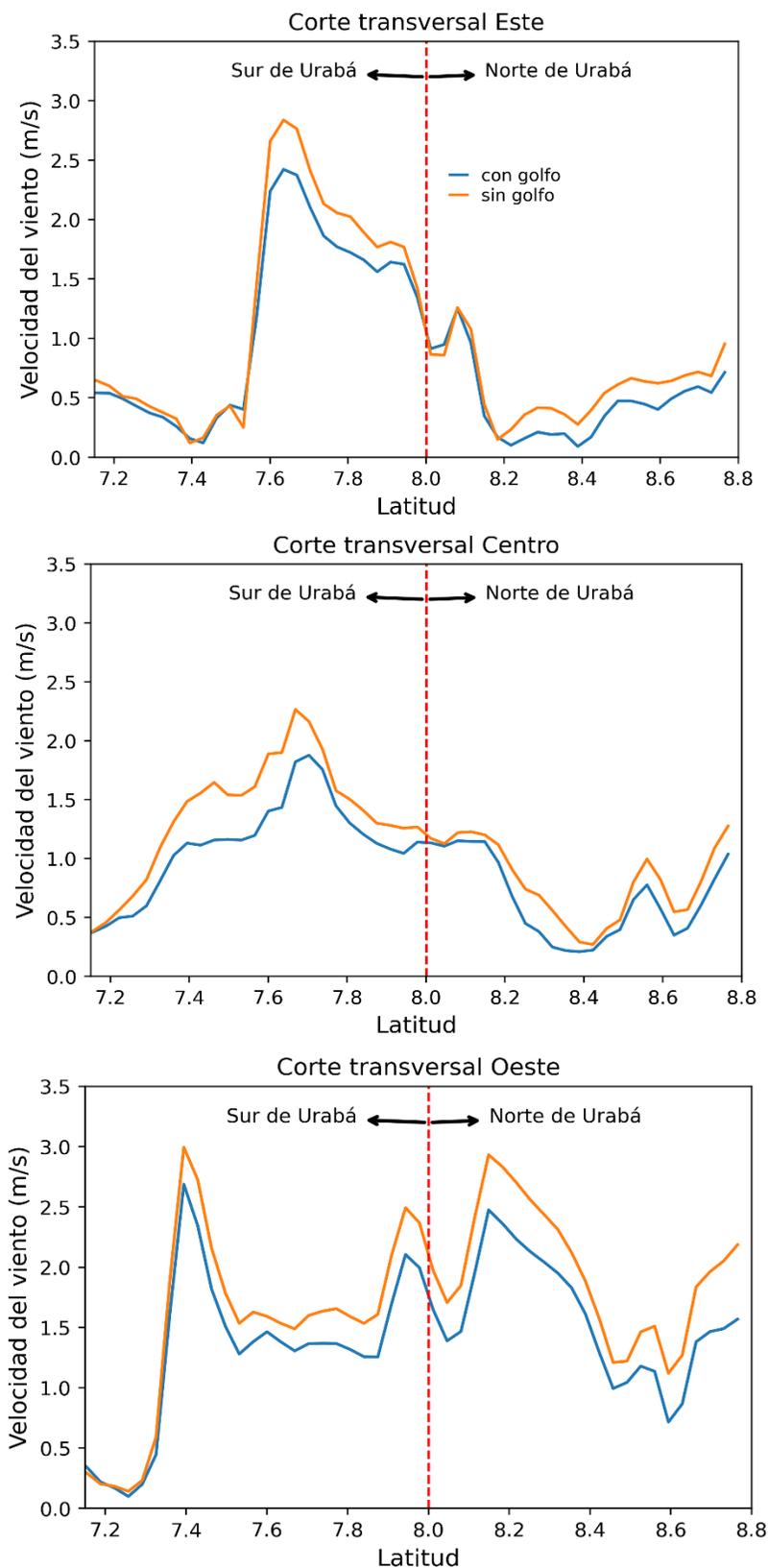


Figura 38. Secciones transversales en el Este, Centro y Oeste de Urabá de la velocidad del viento a 10 m entre el 1 y 15 de enero de 2013 para las simulaciones con el golfo de Urabá y sin el golfo de Urabá.

Productos derivados de este trabajo

Artículo publicado:

Título: Daytime breeze cycle characterization in a tropical coastal region using the WRF model: the case of the Gulf of Urabá, Colombia

Autores: Leidys Milena Arroyo Quinto, Vladimir G. Toro Valencia, Eisenhower Rincón Vargas, José Andrés Posada Marín, Rubén Darío Molina Santamaría y Juan Fernando Salazar

Revista: Bol. Cient. CIOH; 41(1), 49-61. <https://doi.org/10.26640/22159045.2022.594>

Documento para uso pedagógico:

Título: Guías prácticas: aprendiendo y conociendo la región de Urabá

Autor: Leidys Milena Arroyo Quinto

Objetivo: La finalidad de este documento es aportar conocimiento a los docentes de la región de Urabá sobre aspectos conceptuales acerca de la meteorología de la zona, que conlleven a fortalecer la enseñanza de algunos contenidos de las áreas fundamentales a partir del contexto.