



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Caracterización y predicción estacional de la precipitación en Colombia

María Camila Ángel Trujillo

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia
2017

Caracterización y predicción estacional de la precipitación en Colombia

María Camila Ángel Trujillo

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Recursos Hidráulicos

Director:
Ph.D. Carlos David Hoyos Ortiz

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
Facultad de Minas
Escuela de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia
2017

”La ciencia nunca resuelve un problema sin crear diez más.”

George Bernard Shaw

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a mis padres, por ser la motivación y el más grande apoyo en todo lo que hago y porque todos mis logros son el resultado de la educación y el amor que siempre me han brindado.

Le agradezco a mi director Carlos David Hoyos, por haberme propuesto y dado la oportunidad de desarrollar este tema, por sus valiosos aportes a este trabajo y a mi formación y por incentivar mi independencia investigativa y mi capacidad para solucionar problemas.

Al profesor John Mejía por la excelente experiencia de investigación en el Desert Research Institute y por permitirme descubrir y trabajar temas diferentes que aumentan mi interés por esta ciencia.

A los profesores Germán Poveda, Jaime Ignacio Vélez y todos los profesores que han sido parte de mi formación profesional y de maestría por sus valiosas enseñanzas y por ayudarme a descubrir el gusto por lo que hago.

A mis compañeros que pasaron por la 306, por haber hecho este camino mucho más divertido.

A Susi por casi toda una vida de amistad, por estar ahí en los momentos buenos y en los no tan buenos, por los consejos, los regaños y las risas infinitas.

A Santi por ser un amigo incondicional y escucharme siempre.

A la Facultad de Minas por la Beca de Facultad y a ISAGEN por permitirme participar en el Proyecto de Variabilidad y Cambio Climático.

Resumen

La precipitación es una de las variables más importantes y complejas que intervienen en el ciclo hidrológico, por lo que el entendimiento de su comportamiento en el tiempo y el espacio y la precisión y confiabilidad de sus pronósticos resultan de vital importancia para diferentes aplicaciones y toma de decisiones en temas de planeación y manejo de recursos hídricos.

El objetivo principal de este trabajo es entender la variabilidad de la precipitación a escala mensual sobre diferentes regiones de Colombia y aplicar dicho conocimiento en el mejoramiento de los pronósticos estacionales. Primero, se comienza con una caracterización de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia, usando un análisis de componentes principales, las cuales apoyan la delimitación de zonas con comportamiento climático similar, que coinciden con las regiones Andina, Caribe, Pacífico, Orinoquía y Amazonas. Los resultados muestran el régimen bimodal de la precipitación asociado al centro y norte del país y el ciclo unimodal presente en el este y sur. En cuanto a la variabilidad interanual se identifican las regiones Pacífico, Caribe y Andina como zonas de alta varianza asociada a El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) y con el gradiente de temperaturas del mar en el Atlántico Tropical. La región del Amazonas muestra una relación débil con el océano Pacífico y más fuerte con el Atlántico, con el cual se obtiene una relación opuesta a la que presenta el resto del país. La región Orinoquía refleja la menor variabilidad de la precipitación en la banda interanual y la más baja relación con las variables macroclimáticas analizadas.

Se analiza la utilidad de los pronósticos dinámicos de la versión 2 del NCEP Climate Forecast System (CFSv2) y se evalúa su habilidad en la representación de la variabilidad identificada a partir de las observaciones. El análisis muestra que a pesar de que el CFSv2 presenta sesgos considerables, los patrones espaciales de distribución de la lluvia y su variabilidad a escala mensual es relativamente bien representada. Además, se observa que el modelo captura la teleconexión existente con los fenómenos y variabilidad macroclimática, siendo su capacidad para pronosticar las variables climáticas y oceánicas significativamente más alta que la que presenta la precipitación en el país.

Por último, se implementan técnicas de post-procesamiento a los pronósticos de precipitación del CFSv2 y se desarrollan diferentes esquemas estadísticos multivariados que incluyen además de la precipitación pronosticada, los pronósticos dinámicos de diferentes índices macroclimáticos y variables de circulación regional. Como resultado final, se obtiene que los modelos híbridos de tipo dinámico-estadístico resultantes pueden representar una mejora considerable de la capacidad predictiva de las anomalías de precipitación mensual en horizontes de pronóstico de hasta 9 meses.

Palabras clave: Variabilidad Estacional, Precipitación, Colombia, Fenómenos macroclimáticos, Pronóstico, Modelo Híbrido.

Abstract

The precipitation is one of the most important and challenging variables in the hydrological cycle. That is why the understanding of its behavior in time and space and also the accuracy and reliability of its forecasts are very important for different applications and decision-making in water resources management.

The main objective of this investigation is to understand the monthly variability of precipitation over different regions of Colombia and apply that knowledge in the improvement of seasonal forecasts. First, the characterization of the spatial-temporal variability of precipitation in Colombia is performed by using an analysis of principal components, which allows to difference zones with similar climatic behavior, which are the Andina, Caribe, Pacífico, Orinoquía and Amazonas regions. The results show the bimodal regime of precipitation associated with the center and north of Colombia and the unimodal cycle present in the east and south. In terms of interannual variability, the Pacifico, Caribe and Andina regions are identified as areas of high variance associated with El Niño / Southern Oscillation (ENSO) and with the gradient of sea surface temperatures in the Tropical Atlantic. The Amazon region shows a weak relationship with the Pacific Ocean and a stronger one with the Atlantic, with a sign opposite to rest of the country. The Orinoquía region shows the lowest variability of precipitation in the interannual band and the lowest relation with the macroclimatic variables analyzed.

The utility of the dynamic forecasts of the version 2 of the NCEP Climate Forecast System (CFSv2) is analyzed and the skill of the forecasts in the representation of the variability from the observations is evaluated. The analysis shows that although the CFSv2 presents strong biases, the spatial distribution patterns of rain and its monthly variability is relatively well forecasted. In addition, it is seen that the model captures the existing teleconnection with the macroclimatic phenomena and patterns, being the skill to forecast the climatic and oceanic variables significantly higher than the one achieved with the precipitation forecast in Colombia.

Finally, post-processing techniques are applied to the CFSv2 precipitation forecasts and different multivariate statistical schemes are developed to include the dynamic forecasts of different macroclimatic indices and variables of regional circulation with the predicted precipitation from CFSv2. The final results shows that the dynamical-statistical hybrid models

can further improve the predictive capacity of monthly precipitation anomalies forecasts at leads of up to 9 months.

Keywords: Seasonal Variability, Precipitation, Colombia, Macroclimatic Forcing, Forecast, Hybrid Model

Tabla de Contenido

Agradecimientos	IV
Resumen	v
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xiv
1 Introducción	2
2 Datos y Metodología	8
2.1 Precipitación del satélite TRMM	8
2.2 Temperatura superficial del mar	9
2.3 Índices Climáticos	9
2.4 Sistema de pronóstico climático CFSv2	11
2.5 Reanálisis Climáticos	12
2.5.1 CFSR	12
2.5.2 ERA-Interim	13
2.5.3 NCEP/NCAR Reanalysis 1	13
2.6 Caracterización de la variabilidad espacio-temporal en Colombia	13
2.6.1 Variabilidad espacial de la precipitación	13
2.6.2 Variabilidad temporal de la precipitación	14
2.6.3 Influencia de fenómenos macroclimáticos	15
2.6.4 Mecanismos físicos de teleconexión con fenómenos macroclimáticos	16
2.6.5 Relación con patrones de circulación regional	18
2.7 Capacidad predictiva de sistema dinámico de pronóstico CFSv2	19
2.7.1 Coherencia espacial y temporal de las variables climáticas	19
2.7.2 Simulación de la relación con fenómenos macroclimáticos	20
2.7.3 Capacidad predictiva de variables de circulación regional	20
2.7.4 Posibles procesos físicos asociados a la capacidad predictiva	21
2.8 Pronóstico estacional de la precipitación en Colombia	21
2.8.1 Post-procesamiento estadístico de las salidas del modelo	22
2.8.2 Modelos híbridos de pronóstico	24
2.8.3 Evaluación del post-procesamiento y modelos híbridos desarrollados	25

3	Variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia	27
3.1	Variabilidad espacial de la precipitación	27
3.1.1	Delimitación de regiones con condiciones climáticas similares	29
3.2	Variabilidad temporal de la precipitación	30
3.2.1	Ciclo anual	30
3.2.2	Varianza explicada en diferentes bandas espectrales	33
3.2.3	Persistencia de anomalías	34
3.3	Influencia de fenómenos macroclimáticos	35
3.3.1	Análisis de asociación y dependencia	36
3.3.2	Análisis probabilístico	40
3.4	Mecanismos físicos de teleconexión con fenómenos macroclimáticos	45
3.5	Relación con patrones de circulación regional	53
3.6	Discusión de predictibilidad	57
4	Capacidad predictiva de sistema de pronóstico climático CFSv2	59
4.1	Coherencia espacial y temporal de la precipitación	61
4.1.1	Comparación de patrones espaciales	61
4.1.2	Comparación de series integradas en las regiones climáticas de Colombia	64
4.1.3	Capacidad predictiva según el mes de pronóstico	68
4.1.4	Análisis de Funciones Ortogonales Empíricas	71
4.2	Fenómenos macroclimáticos y su relación con la precipitación	73
4.2.1	Temperatura superficial del mar	73
4.2.2	Capacidad de pronóstico de precipitación e intensidad del ENSO	79
4.3	Variables de circulación regional	81
4.4	Posibles procesos físicos asociados a la predictibilidad de la precipitación	82
5	Pronóstico estacional de la precipitación en Colombia	87
5.1	Post-procesamiento estadístico de la precipitación pronosticada por el modelo CFSv2	87
5.1.1	Ajuste de distribución estadística de la precipitación	87
5.1.2	Ajuste no paramétrico de anomalías de precipitación	90
5.2	Modelos híbridos de pronóstico	93
5.3	Evaluación de modelos desarrollados y ajustes implementados	96
5.3.1	Cálculo de parámetros de ajuste y error con las observaciones	96
5.3.2	Valor agregado de los modelos híbridos	100
6	Conclusiones	103
	Bibliografía	106

Lista de Figuras

- 2-1.** Localización de zonas Niño y zonas de medición de los índices TNA y TSA. 11
- 2-2.** Configuración de corridas del Reforecast del modelo CFSv2. Tomado de (Saha, 2014) 12
- 2-3.** Anomalías estandarizadas de temperatura superficial del mar en la zona Niño 3.4. 16
- 2-4.** Anomalías estandarizadas de precipitación sobre Colombia a partir de información del TRMM. 17
- 2-5.** Esquema explicativo del ajuste cuantil a cuantil de los pronósticos de precipitación del CFSv2. 22
- 2-6.** Esquema explicativo del ajuste de las anomalías de precipitación pronosticadas por el CFSv2 con respecto a las anomalías observadas por el TRMM. 23

- 3-1.** Varianza explicada por las veinte primeras componentes principales del análisis de EOF a la precipitación estandarizada en Colombia. 27
- 3-2.** Patrones espaciales de las dos primeras EOF de la precipitación estandarizada en Colombia y evolución temporal de sus componentes principales. 28
- 3-3.** Delimitación de regiones con condiciones climáticas similares. 29
- 3-4.** Histogramas de las series de precipitación integradas sobre cada una de las regiones a partir de la información del TRMM. 30
- 3-5.** Ciclo anual de la precipitación del satélite TRMM sobre Colombia. 31
- 3-6.** Ciclo anual de las series de precipitación de cada una de las regiones. 32
- 3-7.** Varianza explicada por las bandas semianual, anual e interanual del espectro de Fourier de la precipitación del TRMM. 33
- 3-8.** Varianza explicada del espectro de Fourier de las series de precipitación estandarizadas de cada una de las regiones. 34
- 3-9.** Autocorrelación de anomalías de precipitación en las regiones climáticas de Colombia. 35
- 3-10.** Mapas de correlación de SST con la PC1 de la precipitación en Colombia para rezagos de 0, 2, 4 y 6 meses. Contornos indican zonas con correlaciones que superan el nivel de significancia estadística del 95%. 36
- 3-11.** Matriz de correlación entre los índices macroclimáticos y las PC1 y PC2 de la precipitación estandarizada en Colombia para diferentes rezagos. 38

3-12. Matriz de correlación entre los índices macroclimáticos y la precipitación estandarizada sobre las regiones de Colombia para diferentes rezagos.	39
3-13. Mapa de correlación entre los índices Niño 3.4 (izq) y TNA (der) con la precipitación del TRMM sobre Colombia para rezagos de 0 y 3 meses respectivamente. Contornos indican zonas con correlaciones que superan el nivel de significancia estadística del 95 %.	40
3-14. Magnitudes de precipitación de los percentiles 20, 40, 60 y 80 sobre Colombia. 41	41
3-15. Cambios en las probabilidades de excedencia de los quintiles de la precipitación en Colombia en condiciones de anomalías positivas y negativas del índice Niño 3.4	41
3-16. Cambios en las probabilidades de excedencia de los quintiles de la precipitación en Colombia en condiciones de anomalías positivas y negativas del índice TNA 42	42
3-17. Cambios de la distribución de probabilidad de la serie de precipitación en la región Caribe en condiciones de anomalías positivas y negativas del índice Niño 3 y del índice TNA.	43
3-18. Cambios de la distribución de probabilidad de la serie de precipitación en la región Amazonas en condiciones de anomalías positivas y negativas del índice Niño 3.4 y del índice TNA.	44
3-19. Anomalías promedio de temperatura superficial del mar, omega a 500 hPa y humedad específica integrada en la vertical durante los meses con anomalías positivas y negativas de precipitación en Colombia	46
3-20. Anomalías promedio de las funciones másicas de corriente zonal y meridional durante los meses con anomalías positivas y negativas de precipitación en Colombia	48
3-21. Cambios en la probabilidad de excedencia de omega a 500 hPa durante anomalías positivas y negativas del índice Niño 3.4	50
3-22. Cambios en la probabilidad de excedencia del potencial de velocidad a 200 hPa durante anomalías positivas y negativas del índice Niño 3.4	51
3-23. Cambios en la probabilidad de excedencia de omega a 500 hPa durante anomalías positivas y negativas del índice TNA	52
3-24. Cambios en la probabilidad de excedencia del potencial de velocidad a 200 hPa durante anomalías positivas y negativas del índice TNA	53
3-25. Anomalías en la magnitud (contornos) y dirección (flechas) del viento a 925 hPa sobre Suramérica en los casos de anomalías positivas de precipitación en cada una de las regiones del país.	54
3-26. Anomalías en la magnitud (contornos) y dirección (flechas) del viento a 925 hPa sobre Suramérica en los casos de anomalías negativas de precipitación en cada una de las regiones del país.	55

4-1. Correlación, error cuadrático medio adimensional y relación de desviaciones estándar entre los pronósticos de precipitación del CFSv2 y la precipitación del reanálisis CFSR.	60
4-2. Precipitación media multianual en los trimestres de DEF, MAM, JJA y SON a partir de la información del satélite TRMM, el reanálisis CFSR y los pronósticos del modelo CFSv2 en los horizontes de 0 y 9 meses.	62
4-3. Sesgo, relación de desviaciones estándar y correlación de anomalías de los pronósticos de precipitación a horizonte de 0 y 9 meses del modelo CFSv2 con respecto al reanálisis CFSR.	63
4-4. Comparación del ciclo anual de los pronósticos de precipitación a 0 meses de horizonte del modelo CFSv2 con los datos del CFSR y el TRMM. Las barras denotan la desviación estándar correspondiente a cada mes	65
4-5. Igual que en la Figura 4-4 pero para horizonte de pronóstico de 9 meses.	65
4-6. Evolución de la correlación y el RMS de los pronósticos de precipitación del modelo CFSv2 con los datos del TRMM y el CFSR.	66
4-7. Evolución de la correlación de anomalías y el RMSE de las anomalías estandarizadas de los pronósticos de precipitación del modelo CFSv2 con los datos del TRMM y el CFSR.	68
4-8. Pronósticos de la temperatura de la zona Niño 3.4 realizados en los meses de marzo de 2017 (izq) y junio de 2017 (der) (IRI, 2014)	69
4-9. Correlación de la precipitación del CFSv2 con los datos del TRMM en función del mes de inicio y el horizonte de pronóstico	70
4-10. Resultados de la primera Función Ortogonal Empírica de los pronósticos de precipitación de horizonte 0 del modelo CFSv2 en comparación con los datos del TRMM y el CFSR.	72
4-11. Resultados de la segunda Función Ortogonal Empírica de los pronósticos de precipitación de horizonte 0 del modelo CFSv2 en comparación con los datos del TRMM y el CFSR.	73
4-12. Sesgo y correlación de anomalías de los pronósticos de temperatura superficial del mar a horizonte de 0 y 9 meses del modelo CFSv2 con respecto al reanálisis CFSR.	74
4-13. Evolución de la correlación y el RMSE de las anomalías estandarizadas de los pronósticos de temperatura superficial del mar del modelo CFSv2 con los datos del OISST y el CFSR.	75
4-14. Correlación de los pronósticos de SST en diferentes regiones de los océanos Pacífico y Atlántico del CFSv2 con los datos observados en función del mes de inicio y el horizonte de pronóstico.	76
4-15. Correlación de la precipitación en Colombia con la temperatura superficial del mar con datos satelitales, datos del reanálisis CFSR y pronósticos de horizonte 0 y 9 meses del modelo CFSv2.	78

4-16. Correlación media de anomalías de los pronósticos de precipitación del CFSv2 en todos los horizontes con los datos del CFSR de acuerdo al año (junio año 0 a mayo año 1) en el cual se inician los pronósticos e intensidad del ENSO en cada año.	80
4-17. Correlación de anomalías de los pronósticos de precipitación del CFSv2 con los datos del TRMM dependiendo de la fase del ENSO presente en el momento de inicio de los pronósticos.	81
4-18. Evolución de la correlación de anomalías de los pronósticos del modelo CFSv2 con el CFSR de los índices de los chorros del caribe (CLLJ) y el Chocó, los flujos de humedad de las cuencas Orinoco y Amazonas, la velocidad del viento vertical (ω) a 500 hPa y velocidad zonal y meridional a 800 hPa sobre Colombia.	82
4-19. Correlación de los pronósticos de horizontes de noviembre de 2016 de 12, 24 y 72 horas de velocidad del viento zonal y meridional a 200 hPa del GFS con el FNL.	83
4-20. Mapa de precipitación promedio del TRMM en noviembre de 2016 y correlación de los pronósticos de horizontes de 12, 24 y 72 horas de velocidad del viento zonal y meridional a 200 hPa del GFS con el FNL.	84
5-1. Ajuste cuantil a cuantil de los pronósticos de precipitación a horizonte de 0 meses del modelo CFSv2 con respecto a los datos del satélite TRMM.	88
5-2. Ajuste cuantil a cuantil de los pronósticos de precipitación a horizonte de 9 meses del modelo CFSv2 con respecto a los datos del satélite TRMM.	88
5-3. Ciclo anual de los pronósticos de precipitación a horizonte de 0 meses del modelo CFSv2 antes y después del ajuste cuantil a cuantil con respecto a los datos del satélite TRMM.	89
5-4. Ciclo anual de los pronósticos de precipitación a horizonte de 9 meses del modelo CFSv2 antes y después del ajuste cuantil a cuantil con respecto a los datos del satélite TRMM.	90
5-5. Histogramas conjuntos de las anomalías de precipitación de los pronósticos de horizonte 0 y 9 del CFSv2 con las anomalías de precipitación del TRMM sobre Colombia	91
5-6. Series de pronósticos de precipitación de horizonte 0 del CFSv2 ajustadas a partir del histograma conjunto con la precipitación del TRMM	91
5-7. Series de pronósticos de precipitación de horizonte 9 del CFSv2 ajustadas a partir del histograma conjunto con la precipitación del TRMM	92
5-8. Correlación entre la precipitación estandarizada del TRMM y las series pronosticadas por el CFSv2 de precipitación de cada región y de los índices en los diferentes horizontes de pronóstico	93

5-9. Correlación entre la precipitación estandarizada del TRMM sobre Colombia y las series pronósticadas por el CFSv2 de los índices Niño 3.4, TNA y CHOCÓ en función del mes de inicio y el horizonte de pronóstico	95
5-10. Correlación de anomalías (ACC), error relativo del sesgo medio (rMBE) y skill score del error cuadrático medio (MSESS) de los modelos de pronóstico de precipitación sobre Colombia en comparación con el TRMM	97
5-11. Correlación de anomalías (ACC), error relativo del sesgo medio (rMBE) y skill score del error cuadrático medio (MSESS) de los modelos de pronóstico de precipitación sobre la región Andina en comparación con el TRMM	97
5-12. Correlación de anomalías (ACC), error relativo del sesgo medio (rMBE) y skill score del error cuadrático medio (MSESS) de los modelos de pronóstico de precipitación sobre la región Caribe en comparación con el TRMM	98
5-13. Correlación de anomalías (ACC), error relativo del sesgo medio (rMBE) y skill score del error cuadrático medio (MSESS) de los modelos de pronóstico de precipitación sobre la región Pacífico en comparación con el TRMM	98
5-14. Correlación de anomalías (ACC), error relativo del sesgo medio (rMBE) y skill score del error cuadrático medio (MSESS) de los modelos de pronóstico de precipitación sobre la región Orinoquía en comparación con el TRMM . . .	99
5-15. Correlación de anomalías (ACC), error relativo del sesgo medio (rMBE) y skill score del error cuadrático medio (MSESS) de los modelos de pronóstico de precipitación sobre la región Amazonas en comparación con el TRMM . . .	99
5-16. Distribución de probabilidades de excedencia de las anomalías estandarizadas de precipitación sobre la región Andina del TRMM, CFSR y los pronósticos de horizonte 0, 3, 6 y 9 de los modelos MV & PPT NP, CFSv2 NP, CFSv2 y RLM-MPRE durante eventos de La Niña y El Niño.	101

Lista de Tablas

- 3-1. Cambios en las probabilidades de excedencia de la precipitación en las regiones de Colombia en condiciones anómalas de los índices climáticos 45
- 5-1. Descripción de modelos híbridos desarrollados 96

1 Introducción

El sistema climático terrestre es altamente dinámico, dominado por las relaciones no lineales y los procesos de evolución acoplada y retroalimentación que se presentan entre los diferentes componentes que lo definen y que generan fluctuaciones de las variables climáticas en todas las escalas temporales y espaciales (Stocker et al., 2013).

Hasta la fecha, la alta complejidad de la variabilidad climática ha limitado considerablemente el entendimiento y la predictibilidad de cada uno de sus componentes, más aún cuando se desean realizar caracterizaciones del clima a escalas espaciales más reducidas, como la regional o local, en las cuales las interacciones que ocurren por fuera del dominio de interés se consideran forzadores externos, mientras que los procesos que suceden al interior responden principalmente a retroalimentaciones de naturaleza caótica (Garreaud et al., 2009).

El caso de Colombia es aún más complejo, puesto que, tal como lo presenta Poveda (2004), la localización del país en la franja tropical, lo expone no solo a una mayor cantidad de radiación solar, sino también a la influencia de los océanos Pacífico y Atlántico, que lo rodean y modulan la entrada de humedad a la región. Dichas limitaciones se intensifican debido a las condiciones topográficas y geomorfológicas que representan los 3 ramales de la Cordillera de los Andes que atraviesan la región, los cuales inducen la formación de microclimas complejos dominados por la presencia de lluvias orográficas. Igualmente, la cercanía de la selva Amazónica y la cuenca del Orinoco, con dinámicas hidroclimáticas propias altamente dominadas por procesos de retroalimentación suelo-atmósfera (Poveda et al., 2006), representan otro componente que induce una mayor complejidad al estudio del sistema.

Lo anterior, sugiere que la variabilidad climática en Colombia responde tanto a la influencia de fenómenos macrolimáticos que actúan como forzadores externos, como a las interacciones que ocurren internamente como consecuencia de las condiciones geomorfológicas, de cobertura vegetal y de afectación antropogénica, las cuales dan como resultado comportamientos altamente complejos que son completamente dependientes de las condiciones iniciales del sistema y que pueden presentar una alta sensibilidad a cualquier tipo de fluctuación que exista en el mismo.

En el país, dada la importancia del clima en la disponibilidad hídrica, de la cual dependen prácticamente todos los sectores productivos, se han invertido muchos esfuerzos en la in-

vestigación en torno a la caracterización de la variabilidad hidrológica, teniendo como principales variables de interés la precipitación y los caudales, que permiten monitorear la cantidad de agua disponible en una región o cuenca hidrográfica específica. Dichos trabajos, han presentado como una de las principales características de la variabilidad temporal de las series hidrológicas en el país, el marcado ciclo anual y semianual que exhiben las series y que responde principalmente a la migración latitudinal de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) sobre Colombia (Poveda, 2004; Poveda et al., 2006; Carmona and Poveda, 2012).

Con respecto a la variabilidad espacial de la precipitación, los estudios han encontrado la alta influencia que tiene la Cordillera de los Andes sobre la distribución espacial de la lluvia, la cual se refleja en el comportamiento opuesto de algunos de los modos de oscilación principales de la precipitación en ambos lados de la barrera (Córdoba et al., 2009), y en las dinámicas diferentes que toma esta variable dependiendo de la ubicación en relación a la cordillera y que responden a la localización de los sistemas convectivos de mesoescala principalmente en las laderas y pies de montaña (Zuluaga and Poveda, 2004) y en la existencia de óptimos pluviográficos en las vertientes externas de las cordilleras occidental y oriental y en el interior de las mismas debido al efecto orográfico que se genera por las circulaciones locales impuestas por la fisiografía y la interacción con las diferentes fuentes de humedad (Hurtado, 2009).

De igual forma, se ha analizado la influencia de diferentes fenómenos macroclimáticos en el país, encontrando que el fenómeno de El Niño/Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés) es el que presenta una mayor relación con el comportamiento temporal de las variables hidrológicas (Poveda et al., 2001; Poveda and Mesa, 2002; Poveda et al., 2002; Puertas and Carvajal, 2008; Poveda et al., 2011; Arango et al., 2012; Córdoba-Machado et al., 2015). Esta relación ha sido analizada a diferentes escalas espaciales y temporales, encontrando que el fenómeno ejerce una influencia en prácticamente todos los aspectos relacionados con la variabilidad climática e hidrológica observada. Por ejemplo, se ha encontrado que sus efectos se ven reflejados en prácticamente todas las escalas temporales, revelando que el impacto del fenómeno se observa desde los eventos extremos analizados en resoluciones de tiempo más finas (Grimm and Tedeschi, 2009; Grimm, 2011), hasta en el ciclo diario calculado a partir de registros horarios (Poveda and Mesa, 2002; Poveda et al., 2005) y en el ciclo anual a partir de datos diarios o mensuales (Gil et al., 1998; Poveda et al., 2002, 2006).

Los estudios que analizan la teleconexión con el ENSO encuentran que existe una relación inversa entre este fenómeno y la climatología del país, la cual se refleja en la reducción de la precipitación y los caudales durante los periodos con ocurrencia de la fase El Niño y un aumento de los mismos bajo La Niña, influencia que se observa más marcada en el trimestre de diciembre, enero, febrero, que es precisamente cuando el fenómeno alcanza su mayor

intensidad, y es menos evidente durante los meses de marzo, abril, mayo (Gil et al., 1998; Poveda et al., 2002, 2006), cuando la atmósfera no se encuentra aún acoplada al océano y se genera lo que se conoce como la "barrera de predictibilidad de la primavera" (Zheng, 2010; Duan and Wei, 2013).

De igual forma, se han utilizado diferentes metodologías para determinar el grado de asociación entre las variables hidrológicas y los índices del fenómeno, para lo cual se han utilizado principalmente técnicas paramétricas (Poveda et al., 2002; Córdoba et al., 2009; Arango et al., 2012), que a pesar de que logran reflejar la relación inversa existente con el fenómeno, pueden llegar a subestimar la influencia real que este puede ejercer sobre la hidroclimatología de la región, puesto que no captan totalmente la relación no lineal que existe entre estas variables. De igual forma, la mayoría de estas caracterizaciones no analizan los procesos físicos involucrados en la teleconexión con el ENSO, lo que lleva a ignorar en muchos casos variables importantes que pueden explicar esta relación, además de esto, debido a que la mayoría de investigaciones sólo utilizan técnicas de asociación, no es posible cuantificar realmente la afectación de la disponibilidad hídrica en el país debido a la ocurrencia de alguna de las fases del fenómeno.

La mayoría de investigaciones relacionadas con la influencia de fenómenos macroclimáticos sobre la hidroclimatología colombiana se concentran únicamente en el fenómeno ENSO, dado que este fenómeno se desarrolla en el océano con mayor extensión, tiene una capacidad de afectar las condiciones climáticas sobre muchas regiones del planeta, por lo que es el fenómeno más estudiado y medido actualmente, lo cual facilita el estudio de sus impactos sobre el país. Sin embargo, a pesar de la marcada influencia del ENSO sobre el Colombia, se debe tener en cuenta que este país tiene igualmente costa sobre el océano Atlántico, por lo que las dinámicas de este océano y su acoplamiento con la atmósfera pueden llegar a afectar de alguna forma las condiciones climáticas del país. Nobre and Srukla (1996), Enfield (1996), Garreaud et al. (2009) y Toshie Kayano et al. (2011), han identificado una relación entre los gradientes de temperatura superficial del mar (TSM) en el Océano Atlántico tropical y las anomalías en la circulación atmosférica sobre Suramérica, que se ven reflejadas en una afectación del régimen de precipitaciones en la región.

Lo anterior refleja que a pesar de los esfuerzos invertidos en la investigación alrededor de la variabilidad del clima en Colombia, aun queda mucho por estudiar en este tema. De igual forma, se continúan teniendo grandes debilidades en cuanto a pronóstico se trata, por lo que se requiere realizar caracterizaciones encaminadas a entender la predictibilidad que se puede alcanzar dependiendo de la localización y época del año. Uno de los sectores que principalmente ha invertido en la investigación en temas de pronóstico del recurso hídrico en Colombia ha sido el sector eléctrico, puesto que el 70 % de la energía consumida anualmente en el país proviene de centrales de generación hidroeléctrica, por lo que existe un gran in-

terés en conocer la disponibilidad de agua en el futuro, para temas de planeación energética, estrategias de comercialización de energía y optimización de la operación de embalses.

Los estudios que se han realizado en el país en temas de predicción hidrológica se han concentrado principalmente en el pronóstico de caudales a partir del desarrollo de modelos estadísticos, principalmente de tipo autorregresivo, tal como los presentados en ?, Sánchez and Poveda (2006), Vanegas Ramos (2011) y Bermudez (2012), los cuales se basan únicamente en la historia de la serie a pronosticar y algunas variables de apoyo como índices macroclimáticos. La principal debilidad que presentan estos modelos es que la mayoría de estos no permiten plantear diferentes escenarios para el pronóstico de las condiciones futuras. Así mismo, al ser modelos netamente estadísticos, no tienen en cuenta o subestiman la física de las interacciones que se presentan entre los diferentes componentes del sistema hidrológico.

La precipitación, a pesar de ser la variable más directamente relacionada con la disponibilidad del recurso hídrico por representar la cantidad de agua que realmente llega a la superficie, establece un reto mayor que el caudal en cuanto a los pronósticos, puesto que su alta variabilidad espacial y temporal y su baja memoria la convierte en una de las variables más complejas del sistema climático, limitando altamente la capacidad predictiva de los modelos estadísticos desarrollados para su pronóstico e incluso siendo una de las variables con mayor incertidumbre en sistemas dinámicos acoplados de pronóstico climático.

Los sistemas dinámicos de pronóstico climático son aquellos que están compuestos por modelos totalmente acoplados del océano, superficie terrestre, criósfera y atmósfera, los cuales permiten a través de las ecuaciones de la dinámica de fluidos y la termodinámica y algunas parametrizaciones, simular la interacción entre cada uno de los componentes del sistema climático a nivel global y de esta forma pronosticar el comportamiento de cada una de las variables involucradas durante los próximos meses. Sin embargo, debido a la alta complejidad de las interacciones que ocurren dentro del sistema climático y a que muchos de estos procesos deben ser parametrizados porque se desconocen las ecuaciones que los gobiernan, los modelos dinámicos de pronóstico no son perfectos y su capacidad predictiva y el ajuste de las simulaciones con las condiciones observadas dependen altamente de la ubicación de la región donde se desean analizar los resultados. De igual forma, al ser modelos de resolución espacial gruesa, presentan mayores problemas en zonas altamente afectadas por factores locales como la topografía, que inducen dinámicas que difícilmente logran ser representadas por este tipo de modelos.

Lo anterior justifica la construcción de herramientas robustas de pronóstico que consideren no sólo la física del sistema climático, sino también el conocimiento previo de las relaciones observadas con diferentes tipos de forzadores. Dichas herramientas, podrían ser modelos híbridos de tipo dinámico-estadístico que estén compuestos por los resultados obtenidos a

partir de sistemas de predicción global, que pueden ser ajustados a partir de modelos estadísticos que permitan obtener una mejor representación del clima en el país y suministrar pronósticos con mayor confiabilidad.

Por otro lado, estas herramientas de tipo dinámico-estadísticas, deben permitir asignar una confiabilidad a los pronósticos climáticos obtenidos, la cual depende principalmente de la precisión del modelo dinámico global, que es variable tanto espacial como temporalmente, y del porcentaje de variabilidad climática en el país que sea posible explicar a través de relaciones estadísticas con los principales forzadores externos. La definición de esta confiabilidad facilitará la toma de decisiones bajo pleno conocimiento del nivel de incertidumbre que se está asumiendo en cada uno de los pronósticos y por lo tanto representa una alta utilidad en el planteamiento de las estrategias de gestión del recurso hídrico en el país.

Dado lo expuesto anteriormente, este trabajo propone el desarrollo de metodologías robustas de pronóstico climático para el país, a partir de la construcción de modelos híbridos dinámico-estadísticos que permitan mejorar los pronósticos de precipitación estacionales. La estrategia propuesta para el cumplimiento de estos objetivos consiste inicialmente en una caracterización de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en Colombia, la cual permite distinguir entre lo que responde a las interacciones internas y la que se encuentra forzada por fenómenos macroclimáticos, identificando los procesos físicos que explican la influencia de estos fenómenos sobre la precipitación del país y seleccionando las variables que pueden servir como predictores de la precipitación en cada una de las regiones de Colombia.

Una vez se conoce como se comporta la precipitación en cada una de las regiones de Colombia, se evalúa la utilidad de los pronósticos dinámicos de la versión 2 del NCEP Climate Forecast System (CFSv2), a través del análisis de su capacidad para representar lo observado en la caracterización climática, en términos de variabilidad espacio-temporal de la precipitación y su relación con fenómenos macroclimáticos y patrones de circulación regional. DE igual forma, se analiza la capacidad predictiva de variables que se consideran que pueden ser útiles como predictores de la precipitación, para su posterior inclusión en modelos multivariados.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la evaluación del modelo, se aplican técnicas de post-procesamiento a los pronósticos de precipitación del CFSv2 para lograr un mejor ajuste con las observaciones y se desarrollan modelos híbridos de tipo dinámico-estadístico, los cuales utilizan las relaciones encontradas entre la precipitación en cada una de las regiones con los índices y variables climáticas, incorporando en esquemas estadísticos los pronósticos dinámicos de estas variables resultantes del modelo CFSv2 con las predicciones de precipitación de antes y después de los post-procesamientos.

El documento se encuentra estructurado en seis capítulos, de los cuales el Capítulo 2 presenta

la descripción cada una de las bases de datos utilizadas en el estudio y el planteamiento de la metodología a seguir y los análisis que se implementarán en los para el cumplimiento de los objetivos. El Capítulo 3 comprende toda la caracterización de la variabilidad temporal y espacial de la precipitación en Colombia y su relación con fenómenos macroclimáticos, mientras que el Capítulo 4 contiene la evaluación del sistema de pronóstico climático global CFSv2 sobre el país, a través de la identificación de sus principales fortalezas y debilidades en cuanto a precisión en la representación de los comportamientos observados de las variables climáticas y la determinación de la incertidumbre que maneja el modelo. En el Capítulo 5 se encuentra el post-procesamiento estadístico de los resultados del modelo CFSv2 y el desarrollo de los modelos híbridos para pronóstico de precipitación mensual en el país, así como las evaluaciones de los resultados obtenidos en cuanto a confiabilidad, incertidumbre y precisión. Finalmente, el Capítulo 6 resume las principales conclusiones encontradas en el estudio.

2 Datos y Metodología

2.1. Precipitación del satélite TRMM

Dada la alta variabilidad espacial de la precipitación, resulta prácticamente imposible tener una cobertura total y uniforme de mediciones a partir de estaciones en tierra, las cuáles sólo permiten obtener un registro puntual del sitio donde están ubicadas y generalmente son escasas en zonas poco pobladas o pobremente conectadas. Los satélites, por otro lado, pueden cubrir totalmente un área de interés, proporcionando mediciones uniformemente distribuidas a una resolución específica.

La Misión de Medición de la Lluvia Tropical (TRMM por sus siglas en inglés) es una misión conjunta entre la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA), cuyo objetivo es la recolección de información de precipitación. El satélite de la misión fue lanzado a finales de noviembre de 1997 y terminó de recolectar datos el 15 de abril de 2015, teniendo más de 17 años de información de precipitación disponible (NASA, 2016).

Las estimaciones de precipitación a partir de la información del satélite TRMM se encuentran en una resolución de 0.25° de latitud y longitud y con una cobertura entre 50°N y 50°S , en todo el rango de longitudes. La información se encuentra disponible en varias resoluciones temporales, que van desde 3 horas, hasta mensual, pasando por la diaria. La base de datos contiene múltiples productos dependiendo del algoritmo de cálculo de precipitación que cada uno utiliza. En este trabajo se utiliza la información a resolución mensual del producto 3B43 que combina las estimaciones de la información de infrarrojo con los resultados del análisis de acumulados mensuales de precipitación de las estaciones del Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) (NASA, 2016).

La elección del producto TRMM para el análisis de variabilidad de la precipitación en Colombia se basa en los resultados obtenidos en diferentes validaciones de esta base de datos sobre el país, los cuales han encontrado que los productos de este satélite a pesar de que presentan sesgos en comparación a los acumulados provenientes de estaciones en tierra, logran capturar adecuadamente los diferentes patrones característicos de la variabilidad estacional e interanual de la lluvia en Colombia (Hurtado, 2009; Estupiñan Castellanos, 2016; Poveda et al., 2017).

Por otro lado, la información satelital no es susceptible a problemas que se presentan comúnmente en las estaciones en tierra, como lo son la presencia de datos espurios y periodos faltantes, los cuales pueden afectar los resultados y obligar a descartar gran parte de los datos. Adicionalmente, con el satélite TRMM se puede obtener una cobertura total del país, lo cual no es posible a partir de las estaciones de medición que para el caso de Colombia se encuentran concentradas principalmente sobre la región Andina, mientras que la densidad de estaciones en zonas más alejadas como los llanos orientales y la Selva Amazónica Colombiana es considerablemente baja (IDEAM, 2014; Dinku et al., 2010; Estupiñan Castellanos, 2016).

2.2. Temperatura superficial del mar

La temperatura superficial del mar (TSM) constituye una de las principales variables que caracterizan la ocurrencia de fenómenos macroclimáticos, por lo que es fundamental en el análisis de influencia de patrones climáticos de macroescala sobre la variabilidad de la precipitación en el país. La información de esta variable en el trabajo se obtiene de la base de datos de la NOAA Optimum Interpolation (OI) Sea Surface Temperature (SST) V2, la cual contiene cobertura global de los océanos a una resolución espacial de 1° de latitud por 1° de longitud. La base de datos contiene información desde 1981 hasta el presente y se encuentra a resolución temporal semanal y mensual, usando para este trabajo los datos mensuales (NOAA, 2016c).

2.3. Índices Climáticos

Para el análisis de la asociación de la variabilidad de la precipitación en el país con fenómenos macroclimáticos se utiliza la información de diferentes tipos de índices climáticos, los cuáles se encuentran disponibles a resolución mensual en la página web de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2016a). A continuación se presentan los índices utilizados y el significado de cada uno de estos.

- **Multivariate ENSO Index (MEI):** Es un índice creado para monitorear el ENSO a partir de la información de 6 variables, las cuáles son presión a nivel del mar, componentes zonal y meridional de la velocidad del viento superficial, temperatura superficial del mar, temperatura del aire en superficie y fracción total de la nubosidad. El índice es construido a partir de un filtrado espacial de cada uno de los campos por separado en clusters, a los cuales se le aplica análisis de componentes principales, para finalmente estandarizar la primera componente y obtener el índice. Los valores positivos de este índice tienden a estar relacionados con la ocurrencia de la fase cálida del fenómeno,

mientras que valores negativos se presentan durante la fase fría del mismo.

- **Southern Oscillation Index (SOI):** Es un índice estandarizado del ENSO basado en la diferencia de presiones a nivel del mar entre Tahiti y Darwin en Australia. Al ser una medida de las fluctuaciones de presión entre el oeste y el este del Pacífico permite monitorear el comportamiento de la atmósfera durante las fases de El Niño y La Niña, además que presenta una muy buena relación con los cambios de temperatura superficial en el este del océano. Para el caso de este índice, los valores negativos indican presión por debajo de lo normal en Tahiti y por encima de lo normal en Darwin, por lo que valores negativos prolongados de este índice coinciden con la ocurrencia de la fase El Niño, mientras que los valores positivos se asocian con la fase El Niño.

- **Oceanic Niño Index (ONI):** Es el índice utilizado para la declaración de condiciones de El Niño o La Niña. Es un índice basado en la temperatura superficial del mar en la zona Niño 3.4, ubicada en el centro del Pacífico Tropical, a partir de una media móvil de 3 meses. Para la declaración de la ocurrencia de la fase El Niño, se requieren anomalías de temperatura superficial del mar mayores a $0,5^{\circ}C$ que permanezcan por más de 5 meses consecutivos, mientras que si las anomalías se encuentran por debajo de $-0,5^{\circ}C$ durante este periodo, se declara la ocurrencia de La Niña.

- **Bivariate EnSo Timeseries (BEST):** Índice del ENSO que considera información oceánica de las temperaturas superficiales del mar en la zona Niño 3.4 e información atmosférica de la diferencia de presiones superficiales entre Tahiti y Darwin.

- **Zonas Niño (Niño 1+2, Niño3, Niño 3.4 y Niño4):** En estas zonas se monitorea la temperatura superficial del mar por su relación con el fenómeno ENSO. La región Niño 1+2 se ubica en la costa de Suramérica cerca a Perú entre las latitudes $0^{\circ}N$ y $10^{\circ}N$ y las longitudes $90^{\circ}W$ y $80^{\circ}W$, mientras que las regiones Niño 3, Niño 3.4 y Niño 4 se encuentran en el Pacífico Tropical, entre las latitudes $5^{\circ}S$ y $5^{\circ}N$ y entre las longitudes $150^{\circ}W$ y $90^{\circ}W$, $170^{\circ}W$ y $120^{\circ}W$ y $160^{\circ}E$ a $150^{\circ}W$ respectivamente.

- **Tropical Northern Atlantic Index (TNA):** Es un índice de las anomalías estandarizadas de temperatura superficial del mar en la zona comprendida entre las latitudes $5^{\circ}N$ y $25^{\circ}N$ y las longitudes $55^{\circ}W$ y $15^{\circ}W$ del océano Atlántico.

- **Tropical Southern Atlantic Index (TSA):** Este índice representa las anomalías estandarizadas de temperatura superficial del mar en la zona comprendida entre las latitudes $20^{\circ}S$ y 0° y las longitudes $30^{\circ}W$ y $10^{\circ}E$ del océano Atlántico.

En la Figura 2-1 se presenta la ubicación de cada una de las zonas Niño y las regiones donde se calculan los índices TNA y TSA.

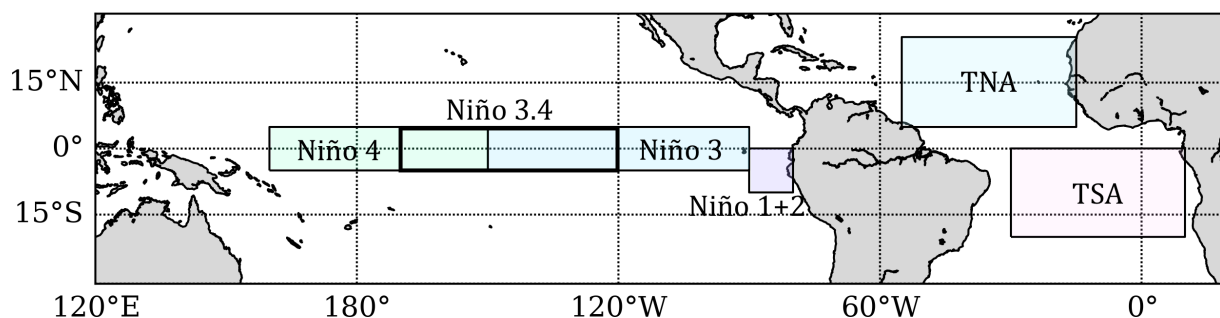


Figura 2-1: Localización de zonas Niño y zonas de medición de los índices TNA y TSA.

2.4. Sistema de pronóstico climático CFSv2

El sistema de pronóstico climático CFSv2 es la segunda versión del Climate Forecast System (CFS) del National Center for Environment Predictions (NCEP) de los Estados Unidos de América. Este modelo acoplado del océano, superficie terrestre, criósfera y atmósfera entró en operación en marzo de 2011, como reemplazo a la primera versión (CFSv1) que fue implementado desde agosto de 2004 (Saha, 2014).

El componente atmosférico del CFSv2 es el Global Forecast System (GFS), tiene un truncamiento triangular espectral de 126 ondas (T126), que corresponde a una resolución horizontal de alrededor de 100 km, con 64 niveles híbridos sigma-presión. Como componente oceánico tiene la versión 4p0d del Modular Ocean Model (MOM4) del Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) y como parametrización convectiva utiliza Arakawa-Schubert simplificado con mezcla de momentum (Saha, 2014).

Los datos que se utilizan del modelo son los que provienen de los pronósticos retrospectivos, los cuales contienen información de pronósticos a 9 meses realizados cada 5 días, 4 veces al día, a las 0000, 0600, 1200 y 1800 UTC, comenzando a las 0000 del primero de enero de cada año. Adicionalmente, el modelo proporciona pronósticos estacionales de 123 días, los cuales se corren a las 0000 UTC en los días en los cuales no se realizan los pronósticos mensuales. Además de estos, se tienen pronósticos de 45 días, realizados a las 0600, 1200 y 1800 UTC de los mismos días que se corren los pronósticos estacionales (Saha, 2014). En la Figura 2-2 se presenta un esquema explicativo de los días en los cuales se realizan cada uno de los pronósticos del CFSv2.

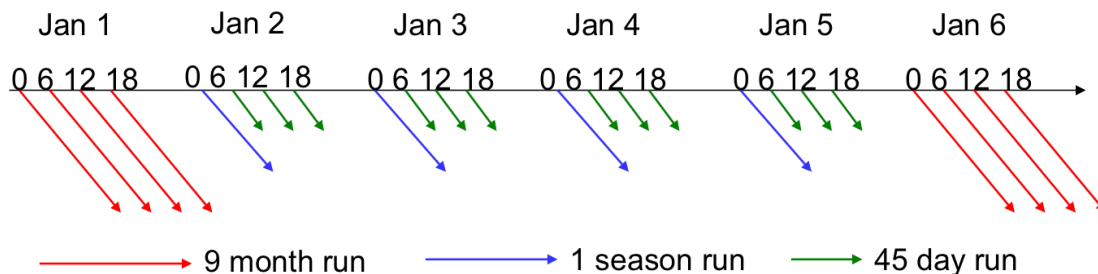


Figura 2-2: Configuración de corridas del Reforecast del modelo CFSv2. Tomado de (Saha, 2014)

Para este trabajo, se utilizan únicamente los datos provenientes de los pronósticos a 9 meses, de los cuales se tiene información del periodo comprendido entre 1982 y 2010, por lo que existen 292 pronósticos para cada año, para un total de 8468 pronósticos. Se utiliza información de diferentes variables simuladas en toda la columna atmosférica, variables en superficie y variables oceánicas, las cuales se pueden obtener a una resolución horizontal de 1° .

2.5. Reanálisis Climáticos

Los reanálisis climáticos son bases de datos construidas a partir de modelos acoplados del sistema climático compuesto por el océano, la atmósfera, criósfera y superficie terrestre, a los cuales se le incluye la asimilación de todos los datos que se encuentren disponibles cada 6 o 12 horas, permitiendo obtener una estimación consistente del estado del clima en cada paso de tiempo (Dee et al., 2016b). Cada reanálisis debe asimilar una gran cantidad de observaciones, las cuales incluyen mediciones in-situ, información de radiosondas, boyas, reportes de aeronaves y barcos e información de satélites de alta resolución (Dee et al., 2016b).

En este trabajo se utilizan dos bases de datos de reanálisis, el Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), desarrollado por el NCEP, el ERA-Interim, desarrollado por el European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) y el NCEP/NCAR desarrollado por NCEP y el National Center for Atmospheric Research (NCAR). A continuación se presenta la descripción de cada uno de estos.

2.5.1. CFSR

El CFSR es el reanálisis desarrollado por el NCEP para la calibración y obtención de estados iniciales de los componentes del modelo CFSv2. Tiene una resolución horizontal T382, que corresponde aproximadamente a 38 km y 64 niveles híbridos sigma-presión en la vertical. El reanálisis tiene una longitud de registro desde enero de 1979 hasta marzo de 2011 y cuenta con información de todas las variables oceánicas, atmosféricas y en superficie (Saha et al.,

2010).

Al ser el reanálisis construido a partir del modelo CFSv2 y la asimilación de múltiples observaciones provenientes de diferentes fuentes de información, constituye una base de datos a partir de la cual se pueden comparar los pronósticos obtenidos por este sistema de predicción.

2.5.2. ERA-Interim

El Reanálisis global ERA-Interim fue desarrollado por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Este contiene información de todas las variables superficiales y a diferentes niveles de presión en la atmósfera a resoluciones diaria y mensual y cuenta con un periodo de registro desde 1979 hasta el presente, siendo constantemente actualizada en la página web del ECMWF. El modelo tiene una resolución horizontal espectral T255, lo que corresponde a un tamaño de pixel de 0.75° aproximadamente y tiene 60 niveles en la vertical, que van desde la superficie hasta 0.1 hPa (Dee et al., 2016a).

2.5.3. NCEP/NCAR Reanalysis 1

El Reanálisis global del NCEP/NCAR es el resultado de la cooperación entre NCEP y NCAR para el desarrollo de un sistema de asimilación de información que incluya diversas bases de datos. El reanálisis tiene información desde 1948 hasta el presente a resoluciones temporales de 6 horas, diaria y mensual. La resolución espacial de la información es de 2.5° en la horizontal y 17 niveles de presión o 28 niveles sigma en la vertical (Kalnay et al., 1996).

2.6. Caracterización de la variabilidad espacio-temporal en Colombia

2.6.1. Variabilidad espacial de la precipitación

Para la caracterización de la variabilidad espacial se aplica inicialmente el análisis de Funciones Ortogonales Empíricas (EOF) a los campos de precipitación estandarizada sobre el país. Esta metodología es ampliamente usada en la caracterización de datos atmosféricos, luego de que Lorenz (1956) presentara su utilidad en la determinación de los modos principales de variabilidad de un sistema de alta dimensionalidad. El método consiste en la descomposición de los datos de interés en un conjunto de vectores que constituyen una combinación lineal de la variable original y contienen la mayor parte de la varianza de esta. La técnica se basa en la suposición de que las series originales presentan correlaciones significantes entre ellas, por lo que se tienen información redundante que puede ser reducida a través de la implementación

de la metodología (Hannachi et al., 2007).

La aplicación de EOF en este trabajo parte del cálculo de la matriz de correlación de rezago cero entre los campos de precipitación estandarizada sobre la zona comprendida entre las latitudes $5^{\circ}S$ y $15^{\circ}N$ y las longitudes $80^{\circ}W$ y $65^{\circ}W$, la cual cubre la totalidad del territorio Colombiano, parte de los países vecinos y una pequeña porción del océano Pacífico y Mar Caribe cercano a la costa del país.

La matriz de correlación resultante es una matriz cuadrada y simétrica con respecto a la diagonal, cuyos valores propios representan los principales modos de variabilidad espacial y los vectores propios permiten obtener información acerca de la variación temporal cada una de las estructuras espaciales representadas por los componentes principales. Los componentes principales obtenidos son ortogonales entre sí, lo que implica que el porcentaje de variabilidad explicado por cada uno de estos es independiente con el explicado por los demás componentes, lo que permite obtener gran cantidad de información a partir únicamente de algunas series resultantes.

A partir de los resultados de las EOF, es posible diferenciar zonas con comportamientos similares de la precipitación en el país, lo cual permite calcular series integradas sobre dichas regiones y luego caracterizar la distribución de la precipitación sobre cada una de las regiones.

2.6.2. Variabilidad temporal de la precipitación

La variabilidad temporal de la precipitación se caracteriza inicialmente en la escala anual a partir de los valores medios mensuales multianuales, los cuales se calculan tanto para las series correspondientes a cada uno de los píxeles del TRMM, como para las series integradas sobre las regiones delimitadas a partir del análisis de EOF descrito en la sección anterior. El comportamiento del ciclo anual resultante permite observar los meses en los cuales se presentan los máximos de precipitación en cada una de las zonas del país y los meses con las condiciones más secas.

Para la determinación de las frecuencias dominantes en las series de precipitación se utilizan métodos espectrales como la Transformada de Fourier, la cual permite convertir una serie que se encuentra en el dominio del tiempo al dominio de las frecuencias y de esta forma determinar los periodos de oscilación más importantes en la variabilidad temporal del clima en el país. A partir de los resultados obtenidos de la Transformada de Fourier, es posible asignar un cierto porcentaje de la varianza de las series que es explicado por frecuencias como la de 6 meses, 12 meses o de 3 a 7 años, el cual se calcula a partir de la siguiente expresión.

$$\%Varianza = \frac{C_i^2}{\sum_i C_i^2} * 100 \quad (2-1)$$

Donde C_i son los coeficientes de Fourier asociados a cada una de las frecuencias de interés.

Para tener una idea inicial de la memoria de las anomalías de precipitación sobre cada una de las regiones, se calcula la persistencia de cada serie a partir de la autocorrelación rezagada de las series estandarizadas de precipitación consigo mismas.

2.6.3. Influencia de fenómenos macroclimáticos

Para determinar la influencia que diferentes fenómenos macroclimáticos pueden ejercer sobre la precipitación en Colombia, se realiza un análisis de asociación y dependencia de las series de precipitación provenientes del satélite TRMM con los principales índices o variables climáticas que definen la ocurrencia de los fenómenos que podrían afectar la climatología de esta región.

Para la caracterización de estas relaciones se emplean como primer acercamiento técnicas paramétricas como el Coeficiente de Correlación de Pearson, el cual al ser una medida no dimensional de la covarianza entre las series de interés, permite obtener una medida del grado de asociación lineal existente entre estas. El coeficiente de correlación puede tomar se encuentra acotado entre -1 y 1, en el cual 1 implica una relación directa perfecta entre las series y -1 una relación inversa, mientras que los valores cercanos a 0 implican que las variables no presentan una relación lineal significativa (Wilks, 2011). Se calcularon correlaciones cruzadas entre las series de precipitación estandarizada en Colombia y los índices climáticos para diferentes rezagos, asumiendo que el fenómeno macroclimático antecede siempre las condiciones climáticas en el país.

El coeficiente de correlación permite obtener una idea de los índices o variables climáticas que presentan una relación lineal más alta con la precipitación en el país, sin embargo, no proporcionan información acerca de como pueden llegar a influir los cambios en las condiciones de cada una de estas variables sobre la precipitación en las zonas de interés. Para esto se realiza entonces un análisis probabilístico que consiste en determinar como cambia la distribución estadística de las series de precipitación en el país ante condiciones particulares de los diferentes índices climáticos que representan la ocurrencia de los principales fenómenos que, de acuerdo con los resultados del análisis de asociación, ejercen una mayor influencia sobre la climatología del país.

El análisis probabilístico consiste principalmente en la elección de un rango en la serie del índice climático por fuera del cual se consideran condiciones extremas del fenómeno analiza-

do, para luego evaluar el comportamiento de la precipitación en estos periodos y determinar posibles cambios en las probabilidades de excedencia para cada una de las fases extremas. El rango en este estudio se considera como una desviación estándar por encima y por debajo de la media de cada serie temporal de los índices utilizados, tal como se presenta en la Figura 2-3 para el caso de las anomalías estandarizadas de la temperatura superficial del mar en la zona Niño 3.4. Una vez se obtienen los periodos con condiciones extremas del fenómeno analizado, se procede a analizar el comportamiento de las series de precipitación en cuanto a los cambios que se puedan presentar en la función de distribución de las probabilidades para cada una de las condiciones macroclimáticas en comparación con la distribución y las probabilidades de la serie completa.

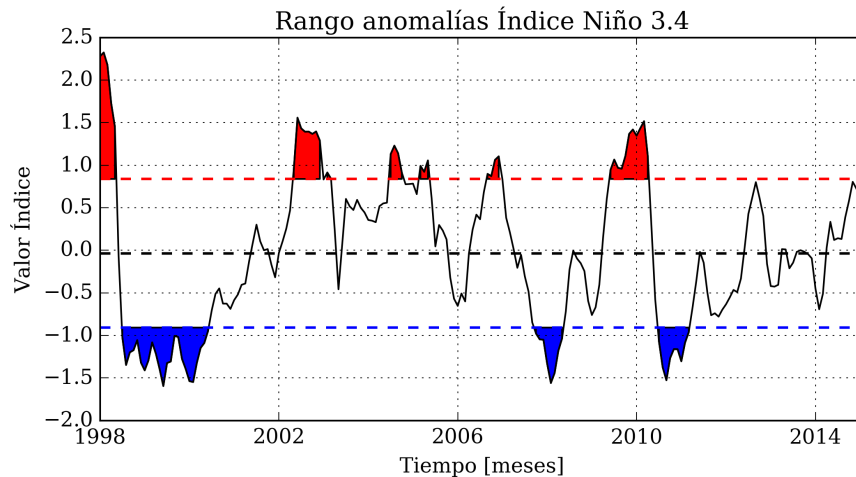


Figura 2-3: Anomalías estandarizadas de temperatura superficial del mar en la zona Niño 3.4.

La comparación de las distribuciones de la precipitación durante las diferentes condiciones extremas de los índices se realiza tanto visual como a partir de la prueba no paramétrica de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (Bohm and Zech, 2010) a un nivel de significancia del 95 % , teniendo las siguientes hipótesis nula e hipótesis alterna.

- H_0 : Las distribuciones son iguales
- H_a : Las distribuciones no son iguales

2.6.4. Mecanismos físicos de teleconexión con fenómenos macroclimáticos

Con el objetivo de identificar las principales alteraciones del sistema climático que están relacionadas con las anomalías de precipitación en el país y caracterizar los mecanismos

físicos que explican la teleconexión de esta variable con fenómenos macroclimáticos, se realiza inicialmente un seguimiento y atribución de anomalías de precipitación, evaluando el comportamiento de diferentes variables oceánicas y atmosféricas antes o durante periodos excesivamente secos o húmedos en el país.

El seguimiento y atribución de anomalías de precipitación consiste en evaluar los periodos en los cuáles las series de precipitación en el país han tomado valores extremos, los cuáles se definen a partir de una desviación estándar por encima y una desviación estándar por debajo de la media de la serie de precipitación estandarizada, teniendo en cuenta que los periodos en los cuales la precipitación toma valores mayores a una desviación estándar por encima de la media se consideran periodos húmedos, ya que corresponden a un percentil cercano al 85, mientras que los periodos en los cuáles se tengan valores menores a una desviación estándar por debajo de la media se consideran periodos secos por estar debajo del percentil 15, tal como se observa en el ejemplo presentado en la Figura 2-4 en el caso de las anomalías estandarizadas de la precipitación en Colombia.

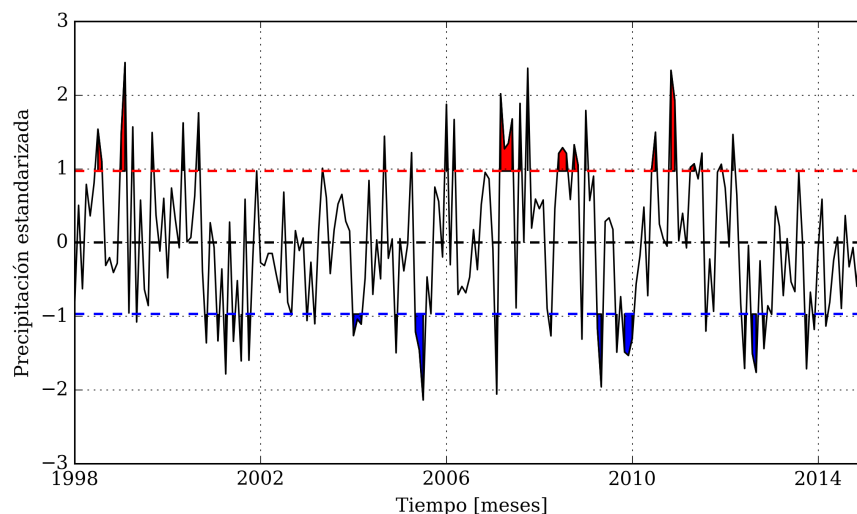


Figura 2-4: Anomalías estandarizadas de precipitación sobre Colombia a partir de información del TRMM.

Una vez se han determinado los periodos húmedos y secos de cada una de las series de precipitación a analizar, se grafican las anomalías promedio de algunas variables climáticas y oceánicas en la macro-escala para estos periodos, con el objetivo de identificar patrones característicos de fenómenos macroclimáticos o modificaciones climáticas a escala global que podrían estar asociadas con precipitaciones más altas o más bajas de lo normal en cada una de las regiones de Colombia.

En los análisis se consideran variables oceánicas y de circulación y humedad atmosférica

provenientes de datos satelitales, como el caso de la temperatura superficial del mar, que se obtiene de OISST, y de datos del reanálisis NCEP/NCAR para las variables atmosféricas. De igual forma, se calculan algunas variables que son de utilidad para la caracterización de la circulación atmosférica, como las funciones másicas de corriente en las direcciones zonal y meridional, definidas por Peixoto and Oort (1992) y Yu and Zwiers (2010) a partir de las siguientes expresiones:

- Función Másica de Corriente Meridional

$$\Psi = 2\pi a \cos(\varphi) \int_0^P v \frac{dp}{g} \quad (2-2)$$

- Función Másica de Corriente Zonal

$$\Psi = 2\pi a \int_0^P u_D \frac{dp}{g} \quad (2-3)$$

Donde a es el radio de la tierra, g es la gravedad promedio, p la presión, φ las longitudes, v la velocidad del viento en la componente meridional y u_D la componente divergente del viento en la dirección zonal.

Luego de analizar el comportamiento de las variables durante anomalías de precipitación, se comparan los patrones encontrados con las modificaciones de las probabilidades de excedencia de variables de circulación durante condiciones anómalas de los índices macroclimáticos que guardan una mayor relación con la precipitación del país. Dicha caracterización se basa en el análisis del potencial de velocidad, variable generalmente usada en la caracterización de la circulación tropical. El potencial de velocidad χ es definido por Krishnamurti (1971) y Tanaka et al. (2004) a partir de la siguiente expresión:

$$D = \nabla \cdot V = -\nabla^2 \chi \quad (2-4)$$

2.6.5. Relación con patrones de circulación regional

Además de las variables macroclimáticas, se analiza la asociación de la precipitación en las diferentes regiones del país con los patrones de circulación dominantes en la región. Se realiza un análisis de seguimiento de anomalías de precipitación como el descrito en la sección anterior para cada una de las regiones de interés y se caracteriza el comportamiento de los vientos horizontales a 925 hPa en el norte de Suramérica y el Caribe. La escogencia de esta variable se debe a que alrededor de este nivel se encuentran las magnitudes máximas del Chorro del Caribe (CLLJ) y el Chorro del Chocó, con los cuales diversos autores han encontrado una relación importante de la climatología colombiana (Poveda et al., 2006; Poveda and Mesa, 1999, 2000).

2.7. Capacidad predictiva de sistema dinámico de pronóstico CFSv2

La capacidad predictiva de los sistemas de pronóstico global consiste en la posibilidad que tienen estos de representar adecuadamente el comportamiento de las variables climáticas y puede ser medida a través del grado de ajuste entre los resultados del modelo y los valores reales de la variable de interés obtenidos a partir de observaciones o de estimaciones de la misma.

Se evalúan los resultados del reforecast del modelo CFSv2, los cuales se denotan de acuerdo al día y hora en el cual se corre el pronóstico, por lo que día 1 sería el primer día que se corren los pronósticos en el mes, teniendo en cuenta que esto puede ocurrir desde el primero del mes hasta el quinto día del mes.

2.7.1. Coherencia espacial y temporal de las variables climáticas

En esta sección se evalúan los patrones de variabilidad espacial y temporal de las variables climáticas del sistema de pronóstico CFSv2 y se comparan con el comportamiento de las mismas en el reanálisis CFSR y con los datos del satélite TRMM en el caso de la precipitación, con el objetivo de determinar qué características se logran simular correctamente en el modelo y cuáles son las principales debilidades del mismo.

Esta evaluación se lleva a cabo a través del cálculo de diferentes medidores de ajuste en cada uno de los píxeles que cubre el dominio de estudio, los cuales incluyen la estimación de desviaciones o sesgos con respecto a los datos observados, correlaciones y correlaciones de las anomalías.

Así mismo, se evalúan las series integradas sobre cada una de las regiones climáticas de Colombia definidas en el análisis de variabilidad, comparando la evolución temporal de las series, el comportamiento del ciclo anual y la representación de las anomalías estandarizadas. Se analiza la evolución con el horizonte de pronóstico de diferentes criterios de ajuste y error como el coeficiente de correlación, el RMSE y la relación de desviaciones estándar entre las series pronosticadas y las series observadas.

Para evaluar si la capacidad predictiva del modelo tiene alguna dependencia o relación con el mes de inicio de los pronósticos o el mes que se desea pronosticar, se calculan las correlaciones por meses entre las series pronosticadas y observadas sobre cada una de las regiones.

Dado que la capacidad del modelo para representar los diferentes modos de oscilación de la precipitación puede implicar grandes oportunidades para la corrección de los errores sis-

temáticos del modelo (Kang et al., 2004; Kim et al., 2008, 2012), se comparan los patrones espaciales de las EOF y la evolución temporal de las componentes principales de las anomalías de precipitación sobre el país calculados a partir del reanálisis CFSR y los pronósticos de horizonte 0 y 9 del CFSv2 con los calculados a partir de las observaciones del TRMM.

2.7.2. Simulación de la relación con fenómenos macroclimáticos

Teniendo en cuenta que fenómenos macroclimáticos como el ENSO y las anomalías de temperatura superficial del mar en diferentes zonas del océano pueden ejercer una importante influencia sobre la variabilidad climática en el país a escala interanual; la correcta representación de estas relaciones en el sistema de pronóstico es un aspecto relevante en la evaluación del comportamiento del modelo y la capacidad predictiva de este sobre Colombia.

En esta sección se evalúa la capacidad del modelo de representar el comportamiento de la temperatura superficial del mar sobre el trópico y en cada una de las regiones de los océanos Pacífico y Atlántico de donde se obtienen los principales índices macroclimáticos. Dicha evaluación se realiza tanto para las series durante todo el periodo común con las observaciones (1984-2009), como por meses dependiendo el mes de inicio y el mes pronosticado, con el fin de determinar características importantes como la presencia de la "Barrera de predictibilidad de la primavera" (Duan and Wei, 2013) en los pronósticos sobre el Océano Pacífico Tropical.

Además de la capacidad del modelo para pronosticar las variables macroclimáticas, resulta de interés conocer la capacidad de este para representar de la teleconexión observada entre estas variables y la precipitación en Colombia, para esto se comparan los patrones espaciales de la correlación observada entre la temperatura superficial del mar y la precipitación con los patrones obtenidos con la información del reanálisis y con los pronósticos de horizonte 0 y 9.

Finalmente, se intenta asociar la capacidad del modelo para pronosticar la precipitación en cada una de las regiones con la ocurrencia e intensidad de las fases del ENSO, El Niño y La Niña. Se calculan las correlaciones por año (junio a mayo) entre las precipitación observada y pronosticada y se relaciona cada año con la intensidad del ENSO según el índice ONI y se calculan las correlaciones de los pronósticos y las observaciones durante todos los meses que han coincidido con un fenómeno de El Niño, La Niña o condiciones neutrales del Pacífico Tropical.

2.7.3. Capacidad predictiva de variables de circulación regional

Además de los índices macroclimáticos, variables de circulación a nivel regional como los vientos en las 3 direcciones o la advección de humedad, guardan una relación estrecha con

la intensidad de la lluvia, por lo que podrían ser predictores útiles de las anomalías de precipitación en cada una de las regiones del país.

De acuerdo con lo anterior, se calcula la correlación de anomalías con los datos del CFSR para determinar la capacidad predictiva del modelo en los diferentes horizontes para pronosticar vientos zonales, meridionales y verticales y la advección de humedad en las zonas que se ha identificado previamente que presentan una relación con la precipitación en cada región.

2.7.4. Posibles procesos físicos asociados a la capacidad predictiva

Con el fin de buscar los procesos físicos que pueden explicar o estar asociados con la predictibilidad de la precipitación en Colombia y dada la limitación para identificar dichos procesos a escalas temporales tan gruesas como la mensual, se analiza la degradación de la capacidad predictiva de un modelo de corto plazo para pronosticar variables asociadas a la precipitación. El modelo de pronóstico meteorológico que se analiza es el Global Forecast System (GFS), el cual es desarrollado por NCEP y representa la componente atmosférica del CFSv2 (NOAA, 2018).

Se analizan los pronósticos cada 6 horas realizados durante el mes de noviembre de 2016, teniendo en cuenta únicamente la corrida que se realiza diariamente a las 12Z. Se cuenta con horizontes de pronóstico de hasta 120 horas, los cuales se comparan con los datos provenientes del final analysis del modelo (FNL) (NOAA, 2018).

Se seleccionan como variables para el análisis, la velocidad del viento en las dos direcciones horizontales, dado que guardan una relación indirecta con la precipitación pero a diferencia de esta última, son variables que son directamente pronosticadas en el modelo y no parametrizadas. De igual forma, se analizan niveles de presión altos para evitar inconvenientes impuestos por la superficie.

2.8. Pronóstico estacional de la precipitación en Colombia

El pronóstico de la precipitación en Colombia se realiza a escala mensual, con un horizonte de pronóstico de 9 meses. Los pronósticos se realizan a partir de distintas metodologías basadas en los resultados del modelo CFSv2, a los cuales se les realiza un post-procesamiento estadístico que permita corregir algunos de los problemas observados. De igual forma, se desarrollan modelos híbridos a partir de diferentes configuraciones de modelos estadísticos con los resultados del modelo dinámico CFSv2 y se comparan los diferentes resultados para

identificar las mejores técnicas de pronóstico y las principales debilidades y fortalezas de cada una de las metodologías implementadas.

2.8.1. Post-procesamiento estadístico de las salidas del modelo

A partir de los resultados obtenidos en el análisis de coherencia del modelo con los datos satelitales y de reanálisis, se plantean diferentes estrategias de post-procesamiento estadístico (MOS por sus siglas en inglés) (Warner, 2010) de los pronósticos del modelo CFSv2, con el objetivo de corregir las principales debilidades del modelo y de esta forma lograr una mejor representación del comportamiento observado.

La primera corrección que se plantea consiste en ajustar los sesgos presentes en los pronósticos, de tal forma que las magnitudes pronosticadas sean similares a las observadas en los datos. La corrección se realiza a partir del ajuste cuantil a cuantil de los datos pronosticados con respecto a los datos observados, que en este caso se asumen que son los del TRMM.

El ajuste cuantil-cuantil es una de las técnicas de corrección de sesgos más usadas y permite corregir la distribución estadística de la precipitación pronosticada del cFSv2 en cada uno de los horizontes para que se parezca a la observada del TRMM. En la Figura 2-5 se presenta un esquema explicativo de la técnica, en la cual se busca que los percentiles pronosticados y los observados sigan una línea de 45°.

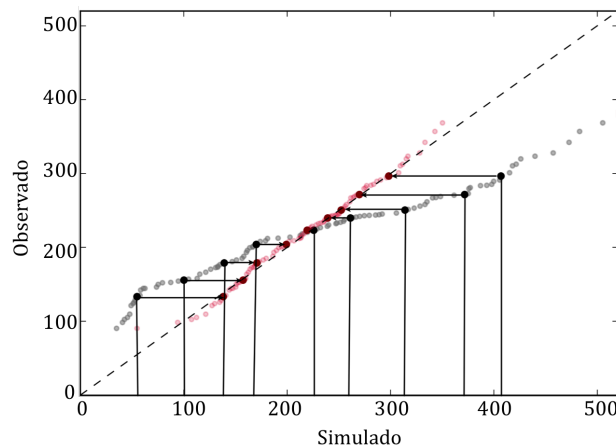


Figura 2-5: Esquema explicativo del ajuste cuantil a cuantil de los pronósticos de precipitación del CFSv2.

Como segunda aproximación, se plantea el ajuste de las anomalías de los pronósticos de precipitación a partir del histograma conjunto con las anomalías de precipitación del TRMM. Este ajuste constituye una aproximación no paramétrica, en la cual se identifica un rango de posibilidades en el cual debe estar la precipitación observada para cada rango de

valores pronosticados.

Una vez se tiene el histograma de anomalías de precipitación observada correspondiente a cada intervalo de los pronósticos de precipitación del CFSv2, el ajuste se basa en la construcción de un generador de números aleatorios que presente la misma distribución estadística de las anomalías de precipitación observada. La generación de números aleatorios con la misma distribución observada, parte de simular números aleatorios uniformemente distribuidos entre 0 y 1, lo cual coincide con el rango en el cual se encuentran las probabilidades acumuladas de las anomalías de precipitación, por lo que es posible dividir los números aleatorios generados en cada uno de los intervalos de probabilidad, teniendo una mayor amplitud los rangos que presentan una mayor probabilidad observada y de esta forma coincidiendo con una mayor probabilidad de que el número aleatorio se encuentre en el rango. En la Figura 2-6 se presenta un esquema explicativo del procedimiento descrito.

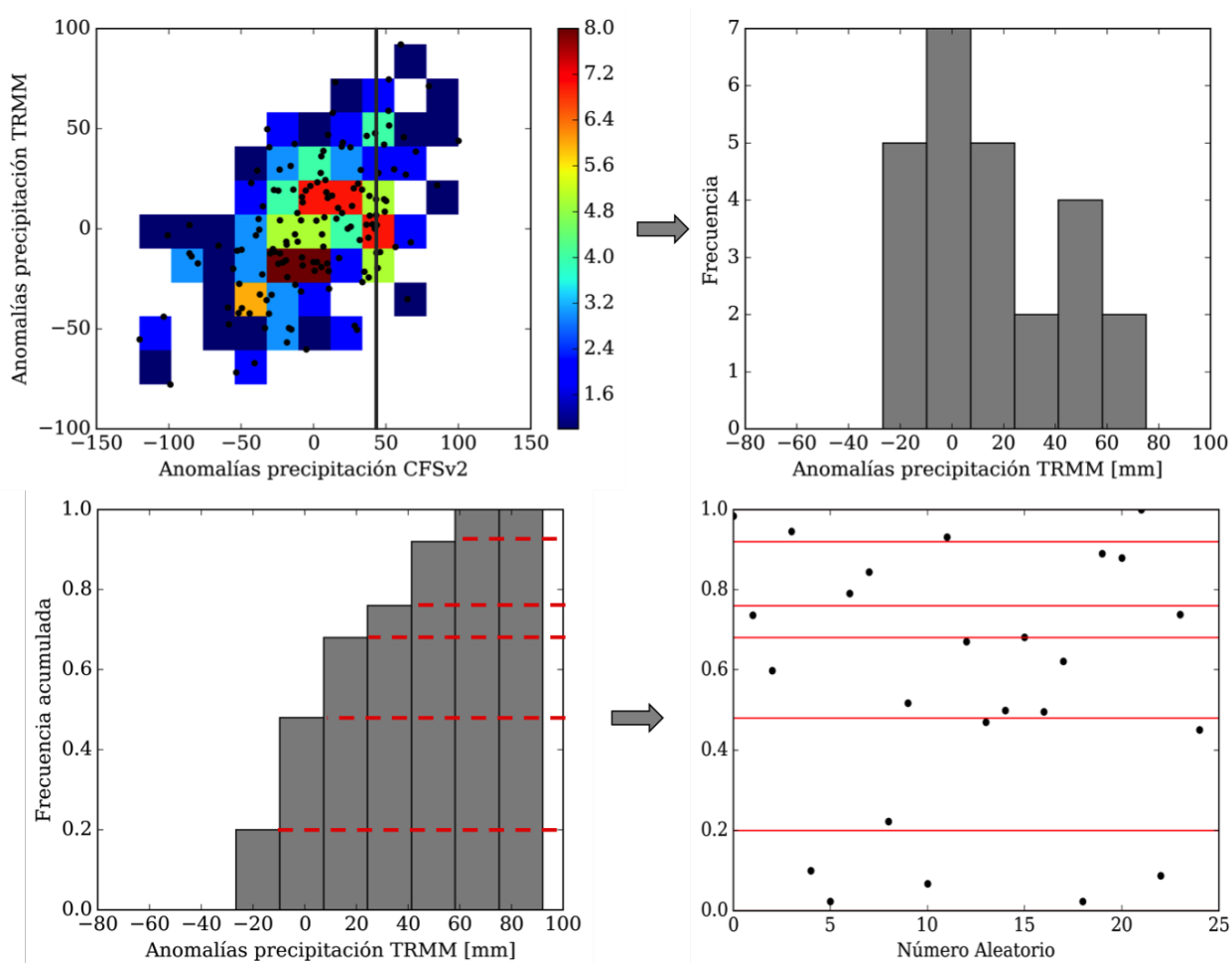


Figura 2-6: Esquema explicativo del ajuste de las anomalías de precipitación pronosticadas por el CFSv2 con respecto a las anomalías observadas por el TRMM.

Finalmente, el valor exacto de las anomalías para cada una de los valores pronosticados se calcula a partir de la interpolación del número aleatorio dentro del rango de anomalías de precipitación observadas en el cual se encuentra de acuerdo con la distribución de probabilidades correspondiente. La ecuación de la interpolación se presenta a continuación.

$$AP_p = \frac{Aleat - P_{acum1}}{P_{acum2} - P_{acum1}} * (AP_{O2} - AP_{O1}) + AP_{O1} \quad (2-5)$$

Donde AP_p es la anomalía de precipitación pronosticada corregida, $Aleat$ es el valor exacto de cada número aleatorio, P_{acum1} es la probabilidad acumulada en el extremo inferior del rango considerado, P_{acum2} es la probabilidad acumulada en el extremo superior, AP_{O1} es el valor de la anomalía de precipitación observada en el extremo inferior del rango y AP_{O2} la anomalía de precipitación observada en el extremo superior de cada rango.

Dado que la estimación parte de un generador de números aleatorios, cada vez que se realice la corrida se obtienen resultados levemente diferentes, por lo que es posible correr varias veces el ajuste para tener un amplio rango de posibilidades y de esta forma, más allá de un pronóstico determinístico se puede asignar un intervalo en el cual más probablemente se encontrará la precipitación de los próximos meses.

Para la evaluación de ambas correcciones se implementa la metodología de "leave one out cross validation" (LOOCV) (Badr et al., 2014), la cual consiste en estimar la distribución probabilística y el histograma conjunto con el resto de la información, dejando por fuera el periodo que se va a pronosticar, para luego ajustar este periodo con la distribución o con el histograma calculado. Esta metodología de evaluación permite obtener resultados más conservadores, que representan mejor lo que se esperaría de la implementación de estos ajustes en tiempo real, en el cual para el periodo a pronosticar no se contaría con la información observada sino únicamente con la información histórica.

2.8.2. Modelos híbridos de pronóstico

Se plantea la construcción de modelos híbridos que permitan usar además de los pronósticos de precipitación del CFSv2, los pronósticos que este modelo realiza de otras variables como la temperatura superficial del mar, la humedad atmosférica o los vientos en las 3 direcciones, basados en las relaciones encontradas de la precipitación con estas variables en el capítulo 3.

El uso de los pronósticos de variables macroclimáticas como predictores de la precipitación se realiza teniendo en cuenta el rezago temporal en el cual se encuentra una mayor relación de la lluvia con cada uno de los predictores, a partir de lo cual se implementan diferentes modelos estadísticos que permitan ajustar dichos predictores a la lluvia observada por el satélite TRMM. Los modelos híbridos que se desarrollan, incluyen distintas combinaciones

de predictores para cada una de las regiones, considerando que los predictores pueden o no variar dependiendo del mes en el cual se realizan los pronósticos y dependiendo del mes que se desea pronosticar.

El modelo de ajuste que se utiliza para pronosticar la precipitación a partir de los pronósticos de diferentes variables del CFSv2 es una regresión lineal múltiple, la cual relaciona de forma lineal los predictores con la variable a pronosticar, que en este caso es la precipitación observada. este modelo se expresa de la forma:

$$y = C_1x_1 + C_2x_2 + \dots + C_nx_n \quad (2-6)$$

Donde y corresponde a la precipitación observada (variable a predecir) y las x son los pronósticos de las variables del CFSv2 (predictores o variables independientes) y las C son las constantes asignadas a cada uno de los predictores.

Dado que el periodo común entre el TRMM y el CFSv2 es desde enero de 1998 a diciembre de 2009, no se escoge un periodo de calibración y validación diferente sino que de igual forma se realiza la validación a partir de la metodología de LOOCV utilizada para la evaluación de los post-procesamientos de la precipitación del modelo, en la cual para cada periodo pronosticado se calibran los modelos con el resto de la información disponible exceptuando el periodo deseado.

2.8.3. Evaluación del post-procesamiento y modelos híbridos desarrollados

La evaluación de los pronósticos obtenidos a partir de los post-procesamientos aplicados a la precipitación del CFSv2 y de los modelos híbridos desarrollados se realiza a través del cálculo de métricas de ajuste y error con las observaciones del TRMM. Las métricas usadas son la correlación de anomalías (ACC por sus siglas en inglés), el error del sesgo medio relativo (rMBE) (Jolliffe and Stephenson, 2003) y el skill score del error cuadrático medio (MSESS) (Jolliffe and Stephenson, 2003).

El rMBE s y el MSESS se definen como:

$$rMBE = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N \left(\frac{F_i - O_i}{O_i} \right) \quad (2-7)$$

$$MSESS = 1 - \frac{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2}{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (Ref_i - O_i)^2} \quad (2-8)$$

Donde F_i es cada uno de los meses pronosticados por el modelo que se está evaluando, O_i son las observaciones del TRMM de cada mes y Ref_i es el modelo de referencia con el cual se está comparando, que en este caso es la climatología.

De igual forma, se incluyen en la evaluación modelos de regresión lineal múltiple basados únicamente en la información histórica de la precipitación del TRMM y los índices climáticos que guardan una mayor relación con cada región. Se comparan los diferentes enfoques híbridos con este tipo de modelos dado que se considera que los modelos híbridos deben tener algún valor agregado con respecto a los estadísticos más sencillos para que se justifique su implementación.

Se plantean tres modelos estadísticos de regresión lineal múltiple, los cuales se desarrollan tomando datos de entrada de la información histórica. El modelo RLM-MPR rezaga 10 meses la información histórica de precipitación y de los índices incluyendo ya estos también su rezago observado. El modelo RLM-MPRS utiliza únicamente la información del último mes para pronosticar los siguientes 10 meses y el modelo RLM-MPRE va rezagando de a un mes los últimos 10 meses con información, por lo que para pronosticar el primer mes se cuentan con 10 datos de cada predictor, mientras que para el último mes apenas se tiene un dato de cada uno de los predictores.

Se discuten los resultados de todos los modelos, encontrando la mejor configuración de modelos para cada una de las regiones del país y analizando la predictibilidad potencial que es posible alcanzar en cada una de estas, así como las limitaciones y oportunidades que condicionan esta predictibilidad.

Además de calcular y analizar parámetros de ajuste y error de los modelos con las observaciones, se busca una medir la utilidad que los pronósticos provenientes de los modelos desarrollados podrían llegar a tener en aplicaciones reales. Dicha utilidad se aborda evaluando el valor agregado de los modelos híbridos en comparación con los estadísticos y el CFSv2, en su capacidad de distinguir entre eventos de El Niño y La Niña en los pronósticos de anomalías de precipitación.

3 Variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia

3.1. Variabilidad espacial de la precipitación

Del análisis de EOF se obtienen tantos valores y vectores propios como la longitud del registro que se tenga, sin embargo, no todos estos representan una parte importante de la variabilidad de la precipitación, por lo que es importante escoger únicamente aquellos que puedan explicar un porcentaje relevante de la varianza total de la serie. De acuerdo con la regla de North (North et al., 1982), para este caso se obtiene que hasta el segundo componente se puede obtener información relevante de los modos de variabilidad de la precipitación estandarizada en Colombia.

En la Figura 3-1 se presenta la varianza explicada por cada una de las primeras veinte componentes principales del del análisis de EOF a la precipitación estandarizada en Colombia.

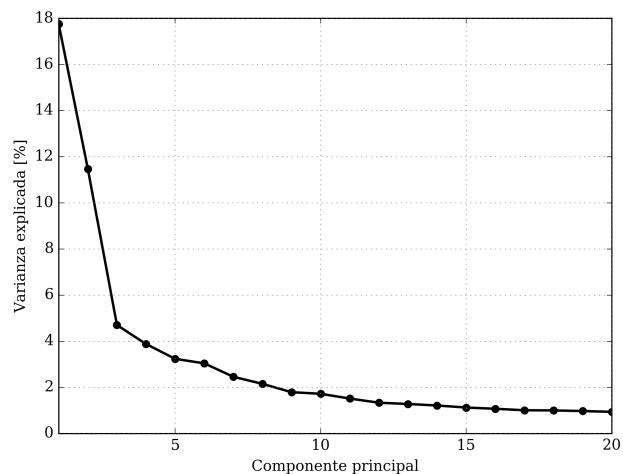


Figura 3-1: Varianza explicada por las veinte primeras componentes principales del análisis de EOF a la precipitación estandarizada en Colombia.

En la Figura 3-1 se observa que las dos primeras componentes explican un porcentaje de la varianza mucho mayor que las demás, puesto que la primera explica un 17.74 % y la segunda

un 11.47%, mientras que a partir de la tercera cada una de las componentes explica menos de un 5%. Igualmente, se tiene que a partir de la componente 12, la varianza explicada por cada una se estabiliza tomando valores menores al 2%. En la Figura 3-2 se presenta el patrón espacial formado por las dos primeras funciones ortogonales empíricas y la evolución temporal correspondiente a estas componentes principales.

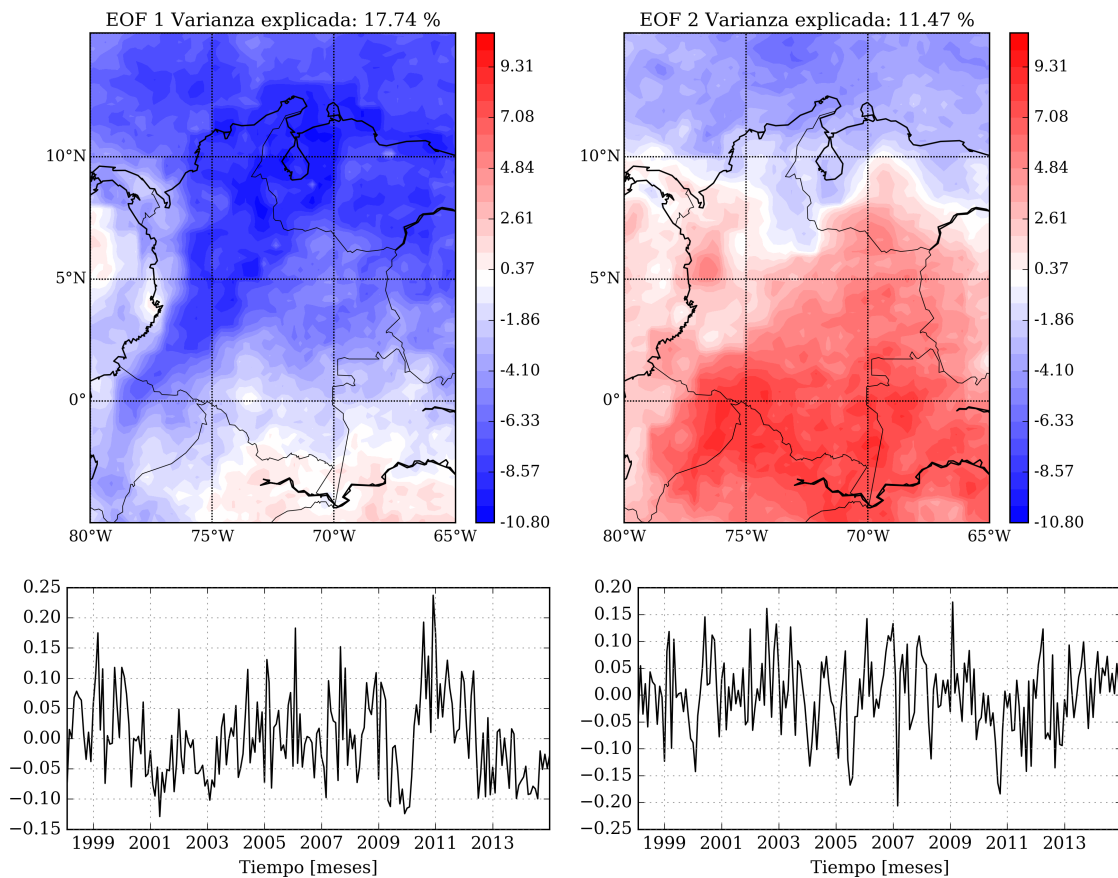


Figura 3-2: Patrones espaciales de las dos primeras EOF de la precipitación estandarizada en Colombia y evolución temporal de sus componentes principales.

En la Figura 3-2 se observa que la primera EOF está asociada con un modo que presenta el mismo signo sobre todo Colombia, sobresaliendo la región atravesada por los Andes y el norte del país. Con respecto a la segunda EOF, se observa que esta presenta un dipolo entre el norte y el resto del país, además que se presenta una mayor intensidad asociada a la selva amazónica colombiana y valores más cercanos a cero sobre la cordillera de los Andes.

3.1.1. Delimitación de regiones con condiciones climáticas similares

En el análisis de los modos de variabilidad espacial de la precipitación sobre Colombia a partir de funciones ortogonales empíricas se evidencia la existencia de regiones que presentan un comportamiento similar de esta variable. A partir de la primera EOF es posible diferenciar la región atravesada por los tres ramales de la cordillera de los Andes y el norte del país, de la región sobre la costa Pacífica y las regiones al sur en la selva amazónica y al oeste sobre los llanos orientales. Con la segunda EOF se diferencia la región al norte del país de la región andina, con lo cual es posible delimitar cinco regiones climáticas, que de ahora en adelante se denotaran Caribe, Andina, Pacífico, Orinoquía y Amazonas, por su similitud con las regiones naturales del país (Rangel-Ch and Aguilar, 1995). En la Figura 3-3 se presenta la delimitación de las regiones a partir de píxeles de 1° y la evolución temporal de las series de precipitación integrada a partir del satélite TRMM sobre cada una de estas regiones.

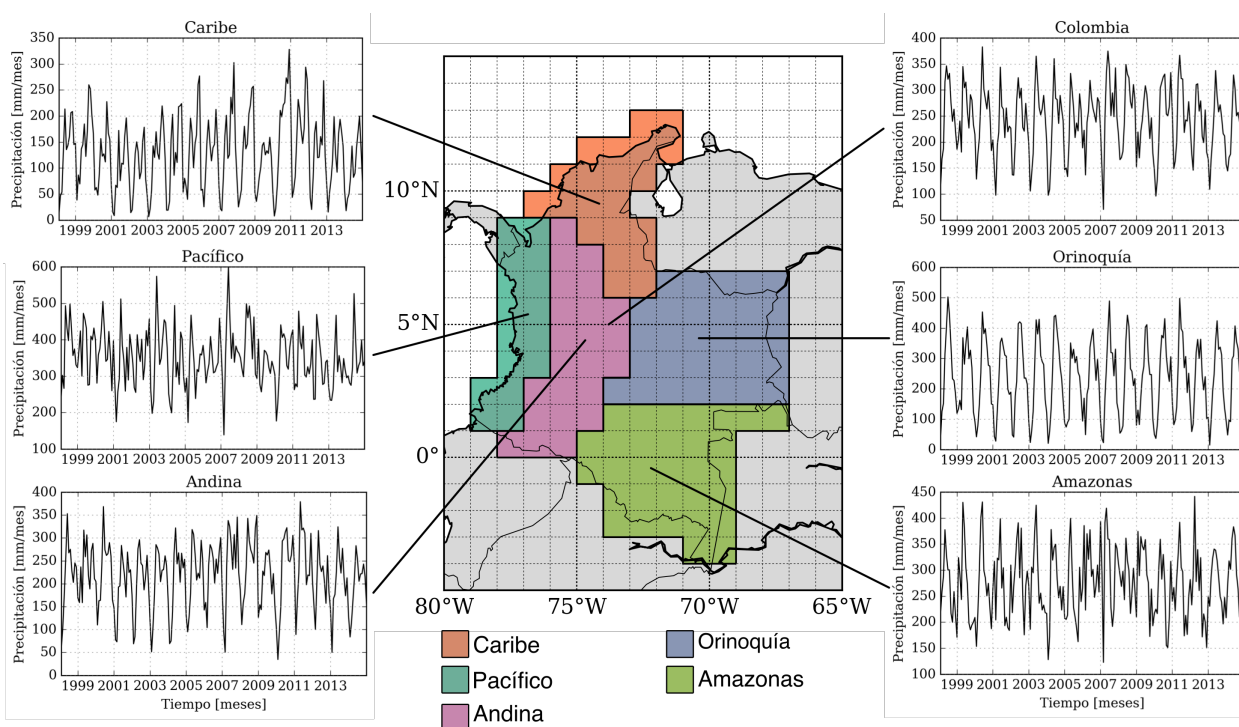


Figura 3-3: Delimitación de regiones con condiciones climáticas similares.

La Figura 3-4 presenta los histogramas de las series de precipitación resultantes de cada una de las regiones, donde se puede observar la forma de la distribución para cada uno de los casos, que permite determinar el rango de valores en el cual varía cada una de estas y las magnitudes en las cuales se encuentra la mayor concentración de valores de precipitación.

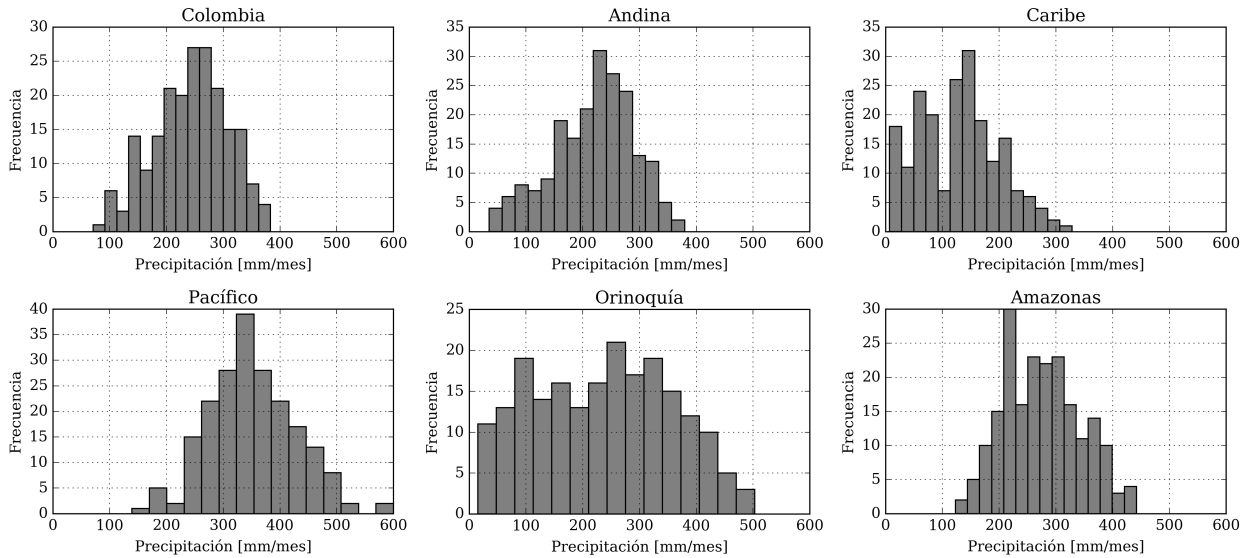


Figura 3-4: Histogramas de las series de precipitación integradas sobre cada una de las regiones a partir de la información del TRMM.

En la Figura 3-4 se observa que la región Pacífico presenta los valores más altos de precipitación, puesto que su mayor concentración se encuentra alrededor de los 350 mm/mes, lo cual responde a que en esta región se encuentra una de las zonas más lluviosas del planeta Poveda (2004). La distribución para todo Colombia refleja mayor concentración en los valores medios cercanos a 250 mm/mes, lo cual coincide igualmente con lo observado regiones Andina y Amazonas, mientras que la región Orinoquía es la que refleja la distribución más uniforme entre las magnitudes de 100 y 350 mm/mes. La región Caribe es la que presenta los menores acumulados de precipitación mensual, con mayor ocurrencia de valores entre 100 y 200 mm/mes.

3.2. Variabilidad temporal de la precipitación

3.2.1. Ciclo anual

El ciclo anual es una de las principales características de la variabilidad de la precipitación a escala mensual, puesto que permite observar las condiciones medias durante cada uno de los meses del año. En la Figura 3-5 se presentan los promedios mensuales multianuales de la precipitación del TRMM sobre Colombia para cada uno de los meses del año, donde se observa que el comportamiento de la precipitación durante el año es altamente variable espacialmente, puesto que se identifica que durante los meses de mayo a octubre se presentan los mayores valores de precipitación sobre la costa Pacífica colombiana, mientras que para los llanos orientales, los meses más húmedos van de abril a agosto aproximadamente, siendo los

meses de diciembre a febrero los más secos. Con respecto a los Andes colombianos, se observan condiciones más húmedas en los meses de marzo, abril y mayo y septiembre, octubre y noviembre, comportamiento similar al que se observa en la región caribe del país. En cuanto al sur del país, sobre la selva amazónica, se observa que la variabilidad anual se caracteriza por mayores precipitaciones en los meses de marzo a julio. Una de las características que se observan en general sobre todo el país es que el trimestre de diciembre a febrero presenta los menores acumulados de precipitación.

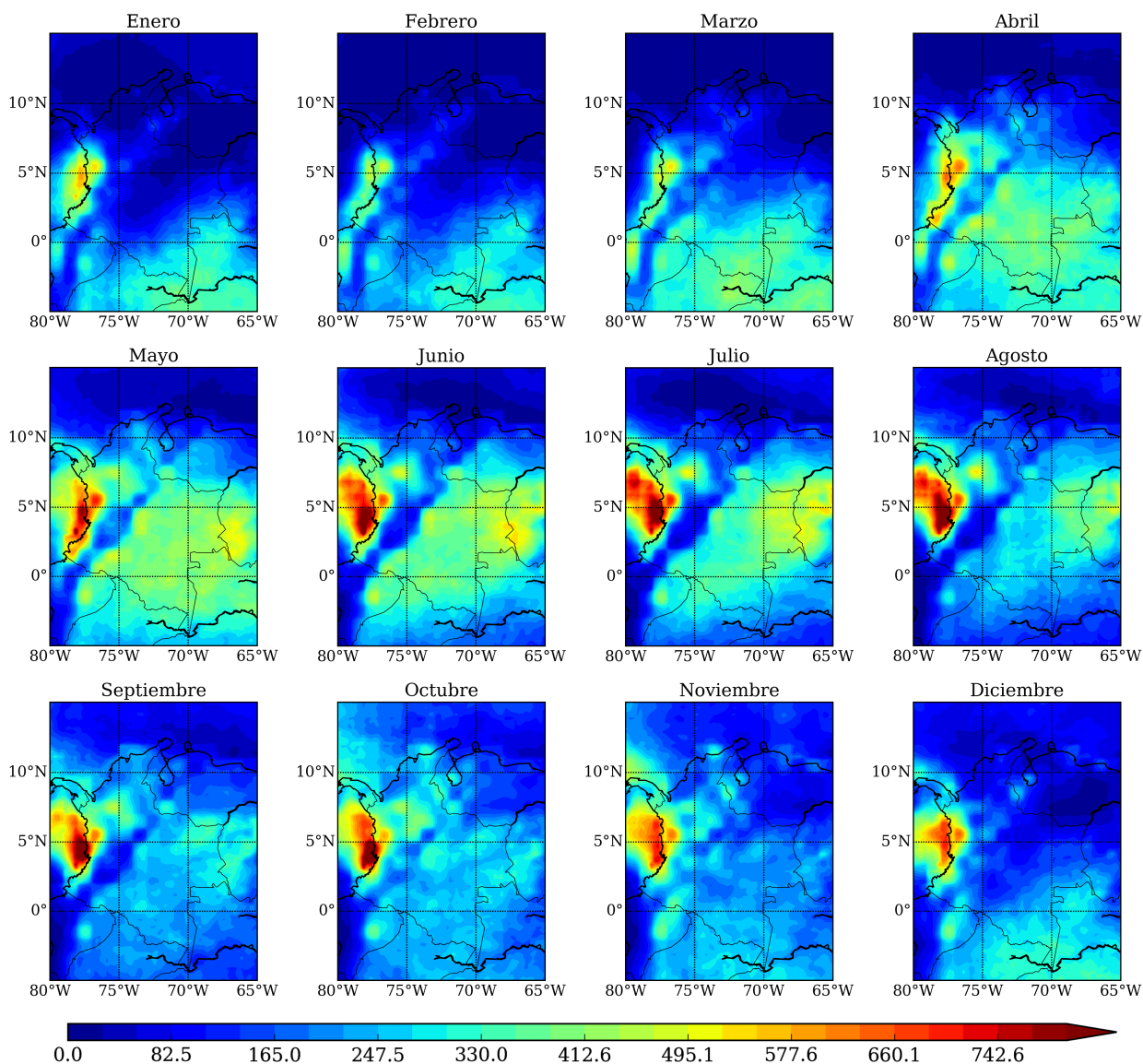


Figura 3-5: Ciclo anual de la precipitación del satélite TRMM sobre Colombia.

En la Figura 3-6 se presenta el ciclo anual de cada una de las series integradas sobre Colombia y las regiones delimitadas, donde es posible observar con mayor claridad lo descrito a partir

de los mapas presentados en la Figura 3-5. En las gráficas se observa un comportamiento bimodal de las regiones Andina, Caribe y Pacífico, el cual se caracteriza en la región Andina por un pico más alto en el trimestre de abril a junio y uno un poco menor de septiembre a noviembre, comportamiento similar al observado para la región Pacífico y diferente de la región Caribe en la cual el Pico más alto es el de septiembre a noviembre, mientras que el de abril a junio presenta magnitudes menores. Para las tres regiones se observa que los valores mínimos de precipitación ocurren durante los meses de diciembre a marzo, mientras que en julio y agosto se presenta un pequeño valle.

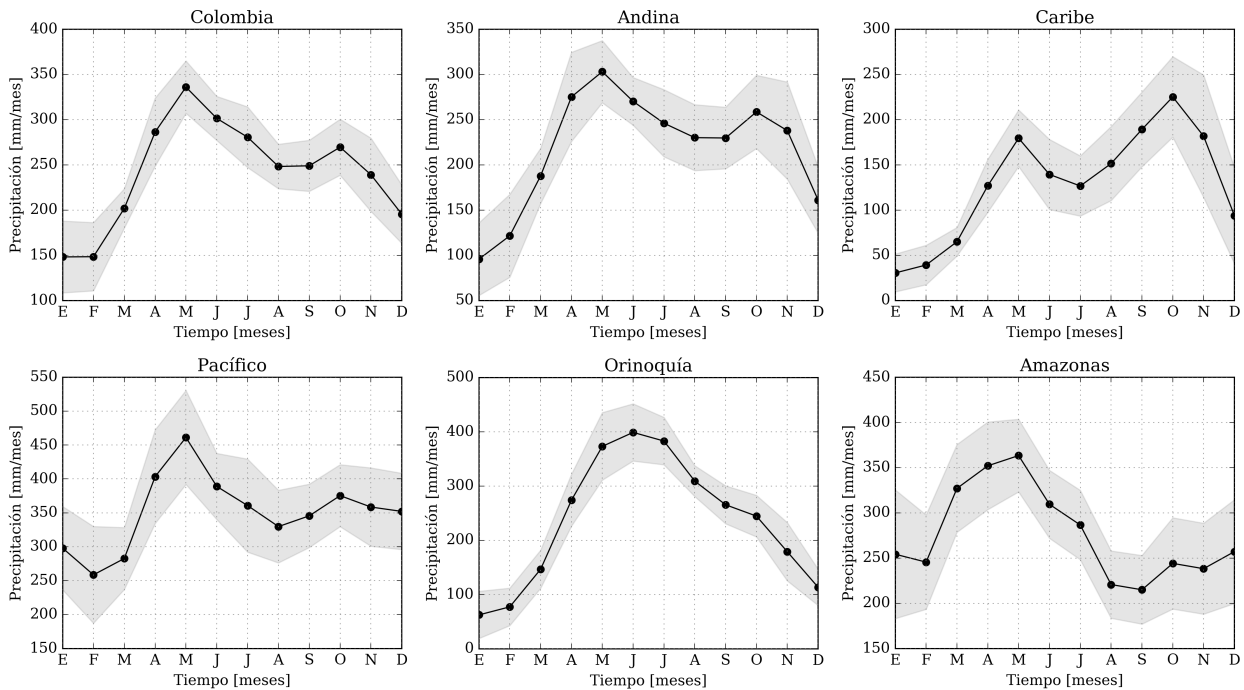


Figura 3-6: Ciclo anual de las series de precipitación de cada una de las regiones.

Para las regiones Orinoquía y Amazonas, se observa un comportamiento unimodal, caracterizado en el caso de la región Orinoquía por un pico de abril a septiembre y valores menores en los demás meses del año. En la región Amazonas, el pico es un poco más corto y va de los meses de marzo a junio aproximadamente, mientras que de julio a febrero se observan condiciones más secas en la región. Con respecto a la serie integrada sobre todo Colombia, se observa un comportamiento bimodal de la precipitación un poco similar al descrito para la región Andina, pero con el pico de septiembre a noviembre aún más atenuado, lo cual se explica debido a que a pesar de que la región Caribe presenta máximos durante este trimestre, las regiones Pacífico, Orinoquía y en especial Amazonas presentan valores bajos en estos meses, haciendo que el promedio baje un poco en estos meses.

El ciclo anual de la precipitación en las diferentes regiones del país está altamente asociado a la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que es la banda

de alta convección que se forma como resultado de la convergencia de los vientos alisios del norte y del sur y cuya localización oscila durante el año debido al ciclo anual de temperaturas superficiales que responde a los cambios de insolación durante el año (Poveda, 2004).

3.2.2. Varianza explicada en diferentes bandas espectrales

En la Figura 3-7 se presentan los mapas de la varianza explicada en las bandas semianual, anual e interanual del espectro de Fourier de cada uno de los pixeles de la precipitación del TRMM. Se observa que casi todo el territorio cubierto por las regiones Andina, Caribe y Pacífico tienen la mayor parte de su varianza explicada en la banda semianual, lo que implica que presentan picos de precipitación cada 6 meses, tal como se observa en el ciclo anual bimodal de estas tres regiones presentado en la Figura 3-6. Un comportamiento opuesto se observa en las regiones Orinoquía y Amazonas, las cuales tienen la mayor parte de su varianza explicada en la banda anual, lo que implica que en estas regiones los picos de precipitación tienen un periodo de un año, siendo coherente con el ciclo unimodal observado para estas regiones en la Figura 3-6.

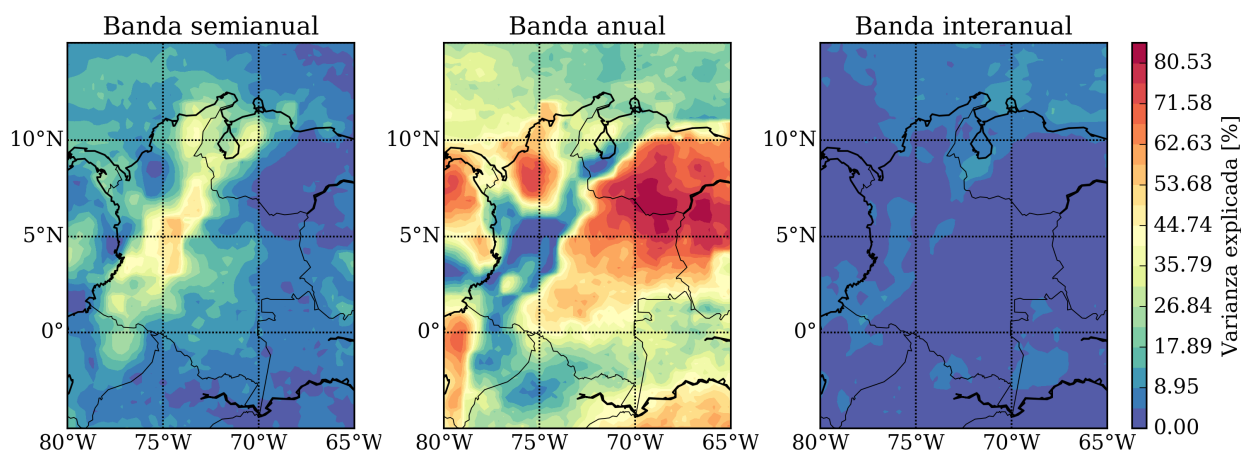


Figura 3-7: Varianza explicada por las bandas semianual, anual e interanual del espectro de Fourier de la precipitación del TRMM.

Con respecto a la banda interanual, que se refiere a la que se encuentra entre un periodo de 3 a 7 años, se observa que la varianza explicada es mucho menor a las bandas semianual y anual en todo el país. Sin embargo, se alcanzan a identificar algunas zonas con mayor importancia de esta banda, principalmente sobre la región más al norte del país y sobre gran parte de la región Andina, mientras que en las regiones Orinoquía y Amazonas la variabilidad explicada en esta banda es muy baja y las bandas anual y semianual alcanzan a explicar un muy alto porcentaje de la varianza.

En la Figura 3-8 se presenta la varianza explicada del espectro de Fourier de las series de

precipitación estandarizadas de cada una de las regiones climáticas y de la serie sobre todo Colombia. Allí se observa que en todas las regiones se identifica la mayor parte de la varianza explicada en la banda entre los 3 y los 7 años aproximadamente, que coincide con el periodo de oscilación del fenómeno ENSO. Por otro lado, se observa una banda importante alrededor de los 2 años y cerca a los 10 años, las cuales pueden estar asociados con la ocurrencia de fenómenos macroclimáticos con periodo de oscilación bienal y decadal.

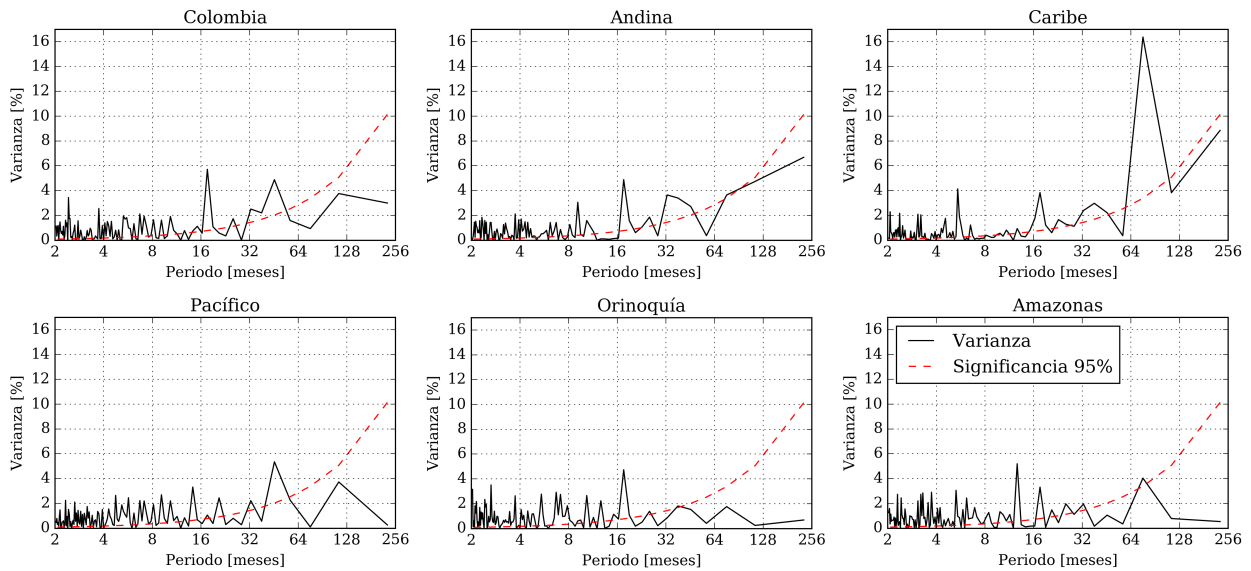


Figura 3-8: Varianza explicada del espectro de Fourier de las series de precipitación estandarizadas de cada una de las regiones.

3.2.3. Persistencia de anomalías

La persistencia de las anomalías permite cuantificar la memoria de la precipitación en cada una de las regiones del país. En la Figura 3-9 se presenta la autocorrelación de las series de precipitación estandarizada de cada región.

En la Figura 3-9 es posible observar que las anomalías de precipitación tienen una memoria moderada en el caso de las regiones Caribe y Andina, en las cuales se obtienen correlaciones estadísticamente significativas hasta por seis o cinco meses respectivamente. Por otro lado, regiones como la Pacífico, en la cual sólo se obtienen autocorrelaciones significativas hasta en un mes de rezago y las regiones Amazonas y Orinoquía reflejan una muy baja relación de las anomalías de precipitación con los meses anteriores

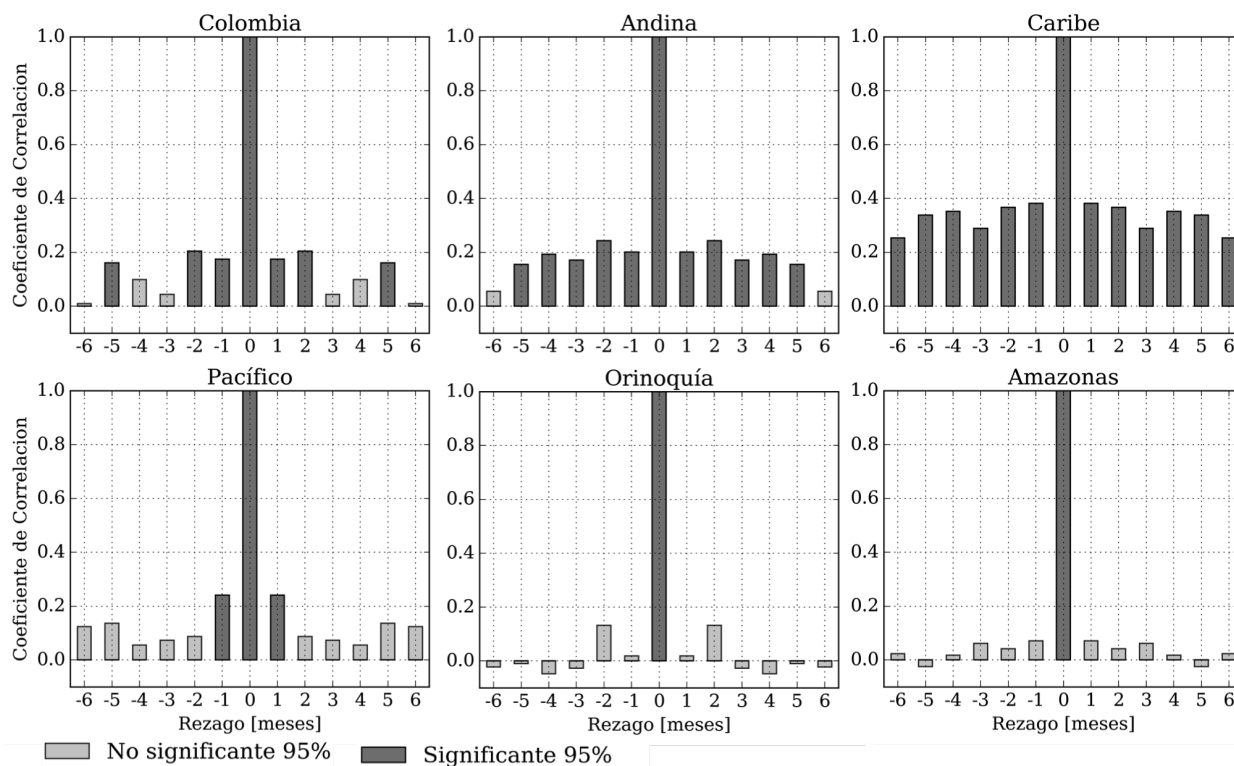


Figura 3-9: Autocorrelación de anomalías de precipitación en las regiones climáticas de Colombia.

En cuanto a la serie para todo Colombia, se observa que la autocorrelación decae en el tercer y cuarto mes pero presenta un leve aumento en el quinto mes, en el cual se tienen valores que apenas alcanzan a superar el nivel de significancia estadística. La única región con autocorrelaciones lo suficientemente altas para considerar que se podría aportar predictibilidad de las anomalías de los próximos meses observando el comportamiento de los meses anteriores es la Caribe, la cual alcanza valores de correlación cercanos a 0.4, mientras que en las demás regiones las autocorrelaciones significativas se encuentran apenas alrededor de 0.2.

3.3. Influencia de fenómenos macroclimáticos

En el planeta ocurren distintos fenómenos que pueden tener una influencia sobre la climatología en Colombia. En esta sección se analiza la influencia del comportamiento de diferentes variables macroclimáticas sobre el país, a través de la identificación de relaciones paramétricas y no paramétricas de estas variables e índices con la precipitación en las regiones delimitadas en el país. De igual forma, se analiza la respuesta de la precipitación a diferentes fases de los fenómenos y se hace un seguimiento a las anomalías del macroclima que pueden explicar reducciones o aumentos de precipitación en la región.