



Revista EIA

ISSN: 1794-1237

revista@eia.edu.co

Escuela de Ingeniería de Antioquia
Colombia

Hurtado Montoya, Andrés Felipe; Mesa Sánchez, Óscar José
CAMBIO CLIMÁTICO Y VARIABILIDAD ESPACIO – TEMPORAL DE LA
PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA
Revista EIA, vol. 12, núm. 24, julio-diciembre, 2015, pp. 131-150
Escuela de Ingeniería de Antioquia
Envigado, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149244222008>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

CAMBIO CLIMÁTICO Y VARIABILIDAD ESPACIO – TEMPORAL DE LA PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA



ANDRÉS FELIPE HURTADO MONTOYA¹

ÓSCAR JOSÉ MESA SÁNCHEZ²

RESUMEN

Se revisan los estudios existentes sobre el impacto del cambio climático en la precipitación en Colombia. Se argumenta a favor del análisis de las observaciones y se resaltan las limitaciones de los modelos para predecir el impacto futuro. A partir de la reconstrucción histórica de la precipitación en Colombia, conformada por 384 mapas de precipitación mensual en el periodo 1975-2006 a una resolución espacial de 5 minutos de arco, se estudia la variabilidad espacio – temporal de una de las principales variables del ciclo hidrológico. El trabajo investigativo realizado sobre la serie de mapas disponibles consistió en la estimación y análisis de Funciones Ortogonales Empíricas, Componentes Principales y pruebas estadísticas de homogeneidad para la detección de cambios o tendencias en el tiempo de precipitación mensual en Colombia. El estudio avanza en el entendimiento de la variabilidad espacio - temporal del recurso hídrico en el país, así como en la identificación de señales y efectos del cambio climático. Se termina con una breve reflexión sobre los problemas de investigación derivados del cambio climático.

PALABRAS CLAVE: precipitación; reconstrucción histórica; variabilidad espacio – temporal; cambio climático.

CLIMATE CHANGE AND SPACE-TIME VARIABILITY OF THE PRECIPITATION IN COLOMBIA

ABSTRACT

The previous studies about the impact of climate change in Colombian precipitation are reviewed. Arguments in favor of the analysis of observed quantities are presented and limitations of climate models to predict future changes in precipitation are highlighted. The spatial and temporal variability of precipitation, one of the main variables of the water cycle, is studied. For that, it was developed a reanalysis of the precipitation field in Colombia, comprising 384 fields of monthly precipitation in the period 1975-2006 at a spatial resolution of 5 minutes of arc. The research carried out with the available fields was based on the estimation and analysis of Empirical Orthogonal Functions, Principal Components and statistical tests to detect changes or trends over time of monthly precipitation in Colombia. The study advance the

¹ Ingeniero civil Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Especialista Turbomáquinas, Ingeniería Mecánica-Civil- Eléctrica, Universidad Eafit. M.Sc.Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

² Ingeniero civil, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Colombia. MCs. Ingeniería Civil y Ph.D. Ingeniería Civi., University of Mississippi, Estados Unidos. Profesor titular Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.



Autor de correspondencia: Hurtado-Montoya, A.F. (Andrés Felipe). Isagen. Carrera 30 # 10 C – 280 Transversal Inferior, Medellín, Antioquia, Colombia / Tel: (574) 325 68 88 / Correo electrónico: afhurtado@isagen.com.co

Historia del artículo:

Artículo recibido: 17-II-2015 / Aprobado:

Disponible online: 30 de enero de 2016

Discusión abierta hasta noviembre de 2016



understanding of spatial and temporal variability of the water resources in the country, as well as in identifying signs and effects of climate change. A brief discussion about research problems arising from climate change is presented at the end.

KEYWORDS: Precipitation; Reanalysis; Spatial and Temporal Variability; Climate Change.

AS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS E A VARIABILIDADE ESPAÇO – TEMPORAL DA CHUVA TEMPO NA COLÔMBIA

RESUMO

Revisam-se os estudos existentes sobre o impacto das alterações climáticas sobre a precipitação na Colômbia. Ele defende a análise das observações e limitações dos modelos são destacados para prever o impacto futuro. A partir da reconstrução histórica de precipitação na Colômbia, que compreende 384 mapas de precipitação mensal no período de 1975 a 2006 em uma resolução espacial de 5 minutos de arco, é estudado a variabilidade espaço hidrológico. A pesquisa realizada sobre o número de mapas disponíveis consistiu da estimativa e análise de funções ortogonais empíricas, componentes principais e testes estatísticos de homogeneidade para a detecção de alterações ou tendências ao longo do tempo precipitação mensal na Colômbia. O estudo avança na compreensão da variabilidade espaço – temporal dos recursos hídricos no país, bem como na identificação de sinais e efeitos da mudança climática. Ele termina com uma breve reflexão sobre os problemas de pesquisa de mudanças climáticas.

PALAVRAS-CHAVE: precipitação; reconstrução histórica; mudança espaço – temporal; mudança climática.

1. INTRODUCCIÓN

Predecir el efecto del cambio climático sobre la hidrología de Colombia, más concretamente sobre la precipitación, no es un asunto de poca monta. Para ilustrar, solo en el sector eléctrico estudios recientes para la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME, Macías y Andrade, 2014) estiman que los impactos de la disminución de la precipitación implican un incremento en la inversión anual de US\$ 290 millones anuales para el período 2013-2050. Esta cifra se basa en estimaciones de modelos globales para escenarios de emisiones balanceados y pesimistas regionalizados con modelos de alta resolución (Ideam, Ruiz, 2010). Pero no solo el impacto es de magnitud económica, el problema científico de tal predicción es muy complejo, tales modelos no necesariamente son acertados. El foco de este trabajo es el impacto del cambio climático en la precipitación, aunque el cambio climático global impacta bastantes más aspectos como la temperatura, el nivel del mar, la erosión costera, los páramos,

las enfermedades transmitidas por vectores, la biodiversidad, la agricultura y otros más (Mesa, 2007).

En la sección 2 se presenta una revisión resumida de los estudios anteriores sobre el impacto del cambio climático global en Colombia. Como se verá, las conclusiones de este estudio concuerdan en lo fundamental con estos estudios previos cuando se basan en observaciones, pero difieren con algunos de los estudios apoyados en modelos.

En la sección 3 se hace una revisión de la metodología de predicción del cambio, para lo cual se hace un breve análisis y se discute la confiabilidad de los modelos globales usados por la comunidad científica, en particular en lo referente a la capacidad para reproducir los registros históricos de precipitación en Colombia. Se busca demostrar que es más adecuado mirar la tendencia observada en las variables, en este caso precipitación que apoyarse en modelos que, aunque adecuados para la temperatura, tienen incertidumbres grandes para la precipitación tropical en un terreno complejo como Colombia.

En la sección 4 se describe la información usada en el estudio y en la sección 5 la metodología. Los resultados principales se presentan en la sección 6 y se finaliza con las conclusiones en la sección 7.

El entendimiento de la variabilidad espacio temporal de las variables hidrológicas y en particular de la precipitación es un reto de gran importancia por las implicaciones ambientales, sociales, económicas y culturales de la distribución del recurso hídrico en cualquier país. Por otra parte, el análisis de los procesos hidrológicos bajo un contexto de cambio climático, además de incorporar mayor complejidad a dichos procesos, conlleva la necesidad de sumar esfuerzos hacia el entendimiento de la hidrología nacional con miras a una mejor gestión del recurso. Ese es el principal objetivo de este trabajo, el cual se centra en el uso de información de precipitación y de técnicas matemáticas con el fin de identificar e interpretar evidencias de cambio climático en Colombia.

Los registros hidrológicos en Colombia son en general escasos, tanto por su calidad, como por su longitud y cobertura espacial. A esta limitación se suma la complejidad geográfica y climática. El resultado es un desafío especial para el conocimiento de la hidrología a escalas espaciales y temporales adecuadas para aplicaciones fundamentales como el planeamiento para el desarrollo sostenible del territorio y de sus recursos hidráulicos, la prevención de desastres, un mejor conocimiento de la influencia de los fenómenos macro-climáticos lo que permite desarrollar a su vez mejores predicciones o para evaluar los posibles impactos del cambio climático global. (Hurtado y Mesa, 2014).

Con el fin de determinar evidencias y efectos del cambio climático en la hidrología colombiana, en este trabajo se estudia la variabilidad espacio temporal de la precipitación en todo el país a partir de la reconstrucción histórica (1975-2006) de los campos de precipitación mensual propuesta por Hurtado y Mesa (2014).

El uso de mapas o campos distribuidos de precipitación se justifica ante las limitaciones de la

información puntual y su inadecuada distribución a lo largo y ancho del país. Además, aprovechando de la reconstrucción histórica de una de las principales variables del ciclo hidrológico, el estudio de tendencias y homogeneidad temporal que puedan indicar manifestaciones de cambio climático es de gran interés para el planeamiento del recurso hídrico en el país y la prevención de desastres.

2. ESTUDIOS PREVIOS

La climatología de la precipitación en Colombia está descrita en diversos trabajos (Trojer, 1959; Snow, 1976; Oster, 1979; Eslava, 1993; Mesa, Poveda y Carvajal, 1997; Mejía *et al.*, 1999; Poveda, 2004; Hurtado y Mesa, 2014). El control principal es el paso, dos veces al año, de la zona de convergencia intertropical que marca las temporadas lluviosas de abril-mayo y septiembre-noviembre en la mayor parte del territorio y las temporadas con menor precipitación de diciembre-febrero y junio-agosto. La distribución espacial está marcada por las fuentes de humedad en el Caribe, Pacífico y la Amazonia, por la topografía y los vientos predominantes. La variabilidad interanual está controlada fundamentalmente por el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur en el Pacífico tropical (Poveda y Mesa, 1997; Poveda, 2004; Poveda, Álvarez y Rueda, 2011).

Varios estudios han encontrado evidencias de cambio climático en Colombia usando diversas técnicas estadísticas, usando variables con longitudes de registros diferentes. Los principales son Smith *et al.* (1996), Mesa, Poveda y Carvajal (1997), Quintana-Gómez (1999), Pabón (2003), Vuille *et al.* (2003), Ochoa y Poveda (2008), Cantor (2011), Cantor y Ochoa (2011) y Carmona y Poveda (2014). En resumen, estos estudios identifican tendencias crecientes en la temperatura y la temperatura mínima en un número significativo de estaciones; tendencias mezcladas en la precipitación dependiendo de las estaciones, con porcentajes de estaciones semejantes para cada tendencia y un 20 % sin tendencia estadísticamente significativa para series de hasta 40 años de registros. Para estaciones de precipitación

con registros más largos, la mayoría (63 %) muestra tendencia creciente y sólo 16 % tendencia decreciente. No se identifica una patrón geográfico claro para ubicar zonas con una determinada tendencia, excepto en la llanura del Pacífico que tiene la mayor tendencia creciente definida, explicada por una tendencia creciente del influjo de humedad del Pacífico y el Chorro del Chocó.

Estas conclusiones se confirman en el reporte del IDEAM, Mayorga, Hurtado y Benavides (2011), en el cual se analizaron 310 estaciones pluviométricas con registros mensuales en el período 1970-2010 utilizando el programa RCLIMDEX desarrollado por el grupo de trabajo CCI/CLIVAR (*Climate and Ocean: Variability, Predictability and Change*), parte del Programa Mundial de Investigación Climática de la Organización Meteorológica Mundial y la Unesco para la detección de cambio climático como un esfuerzo internacional coordinado para disponer de índices calculados con la misma metodología que se puedan integrar internacionalmente (Peterson, 2005). De las 310 estaciones de precipitación, 71 % muestran tendencia creciente, 7 % sin tendencia y 22 % tendencia decreciente. Igualmente se confirma la conclusión relacionada con la temperatura creciente, con incremento del orden de 0,17 °C por década. Es importante citar del informe:

... es notorio el aumento generalizado de la precipitación en el país, se destaca la zona noroccidental (Antioquia y Chocó), Vichada, el Piedemonte de Putumayo y la isla de Providencia, donde se observa el incremento más significativo. Lo contrario ocurre en la isla de San Andrés, en la vertiente oriental de la Cordillera Oriental (Arauca y Casanare) y en amplias áreas del Alto Cauca, donde se observa una disminución de la precipitación. La mayor disminución ocurre en el suroccidente del territorio (Peterson, 2005).

Contrasta el anterior resumen con la siguiente cita del estudio de la UPME:

Según estos análisis, que contaron con información de 1971 al año 2000 de todas las estaciones de medición del país, se encontró una

tendencia negativa en las precipitaciones en una gran parte de la región Andina, sur de la región Pacífica y Piedemonte Llanero de la Orinoquía. De igual manera, se encontró un aumento de las precipitaciones en la región Caribe, resto de la Pacífica y la Amazonia (UPME, Macías y Andrade, 2014: p. 36).

Más adelante volvemos sobre una posible explicación para esta inconsistencia.

Hay que mencionar que las tendencias observadas pueden obedecer a otras causas además del calentamiento global debido al aumento de los gases de efecto invernadero; como la deforestación y la urbanización entre otras. Hay varios trabajos que han estudiado el efecto de las islas de calor en las tendencias observadas en los registros de temperatura (Hansen *et al.*, 2010; Hausfather *et al.*, 2013) y la conclusión general es que el calentamiento por efecto invernadero es real.

El impacto de la deforestación debe también considerarse. Por ejemplo, Salazar (2011) estima mediante un experimento numérico que un posible cambio futuro drástico en la cobertura en la zona amazónica, traería reducción en las precipitaciones en Colombia de un orden de magnitud de 300 mm/año.

El calentamiento de los Andes colombianos ha llevado a la extinción completa de ocho glaciares tropicales y los seis nevados que subsisten pierden hielo a tasas aceleradas (Rabatel *et al.*, 2012). Los páramos, ecosistemas únicos y estratégicos para abastecer de agua varias ciudades, entre ellas Bogotá y Medellín, también están siendo amenazados por el calentamiento y otras actividades antrópicas (Ruiz, *et al.*, 2008).

El calentamiento también significa aumento de la presión de vapor de saturación en el aire de acuerdo a la ecuación de Clausius-Clapeyron. Globalmente se ha observado que tal aumento ha ido acompañado de incremento de la evaporación y por tanto de la humedad absoluta para mantener aproximadamente constante la humedad relativa (Stevens y Bony, 2013). Unas cuantas series de

evaporación de tanque y de humedad relativa confirman esta observación para Colombia (Mesa *et al.*, 1997). Las consecuencias de esto son importantes para comprender los mecanismos físicos asociados al impacto del calentamiento en la precipitación y el caudal de los ríos.

El trabajo de Mesa *et al.* (1997) reporta que buena parte de las series de caudal en las cuencas Magdalena-Cauca tienen tendencia decreciente. Recientemente, Carmona y Poveda (2014) confirman y/o refuerzan esta conclusión sobre las tendencias a partir de su análisis de las mismas series con nuevos años de observaciones y de otras series no analizadas en el trabajo inicial. El número de estaciones con tendencia decreciente es mayor (de 61 % al 100 % dependiendo de la longitud del registro, el primer valor para registros de 25 años y el último para registros de más de 50 años) que el número de estaciones que muestra tendencia creciente (0 % a 34 %). Es notoria la tendencia regional creciente para los caudales del Atrato y el San Juan, que muestran tendencias crecientes y que coinciden con zonas de alta tendencia creciente en la precipitación.

Otra línea de trabajo ha sido el uso de los modelos globales del clima (*GCM*, por su sigla en inglés): Pabón (2005); Ideam, Ruiz (2007 y 2010) y Colombia (2010). Estos modelos representan adecuadamente buena parte de los procesos físicos, aunque no la totalidad, en particular la convección tropical y la topografía, esenciales para la lluvia en Colombia. Además la resolución espacial no es en general la adecuada para estudios regionales. En general existe la posibilidad de subsanar estas deficiencias mediante el uso de los modelos de meso-escala que tienen resolución espacial más fina y representan mejor los procesos convectivos. Esta metodología, conocida como afinado de escala (*downscaling* en inglés) ha avanzado pero no está exenta de dificultades. Vamos a presentar los resultados principales de los estudios basados en estas estrategias y en la sección siguiente se analizará su fundamento con mayor detalle.

Es conveniente citar textualmente al Ideam y Ruiz (2010: p. 10) para presentar los resultados de los modelos globales de baja resolución:

Para lluvia y con el uso de los modelos globales de baja resolución, Pabón (2005) afirma que la precipitación anual se reduciría en algunas regiones y aumentarían en otras. En las regiones en las que hay cierto grado de coincidencia en la mayoría de los modelos y las tendencias actuales acerca de un incremento son: el Pacífico Norte y Central, Medio Magdalena, Sabana de Bogotá, Cuencas de los ríos Sogamoso, Catatumbo, Arauca, Piedemonte Llanero, Orinoquía central, Amazonía Central y Piedemonte Amazónico, lugares para los cuales el incremento de la lluvia comparado con el período típico 1961-1990 se podrían ubicar entre el 10 y 15 % para el 2050 y entre el 15 y 25 % para el año 2080. Para las demás regiones, el estudio dice que es difícil llegar a un resultado concreto ya que los distintos modelos presentan resultados contradictorios.

Es decir, según esta cita, para varias regiones, como por ejemplo la Pacífica, hay coincidencia entre los resultados de los modelos y las tendencias observadas en los registros de las estaciones pluviométricas. No hay consistencia para Arauca y Casanare y para varias otras regiones los resultados de los modelos no son consistentes.

Existe una página en internet, <http://www.climatewizard.org/>, que permite visualizar los resultados de los modelos usados por el IPCC para predecir los impactos del cambio climático bajo diferentes escenarios de emisiones. En la **Figura 1** se presenta el mapa correspondiente al cambio en la precipitación para Colombia en el escenario A1B para el promedio de los modelos. Como se ve para toda Colombia, excepto la zona más al norte, hay aumento del orden del 10 %. Si se examinan los modelos individualmente o incluso las predicciones más bajas (20 %) la tendencia general se mantiene, aunque las magnitudes de los cambios disminuyen en general para la mayor parte de Colombia donde la tendencia sigue siendo

positiva y la zona norte de decrecimiento aumenta en extensión y en magnitud.

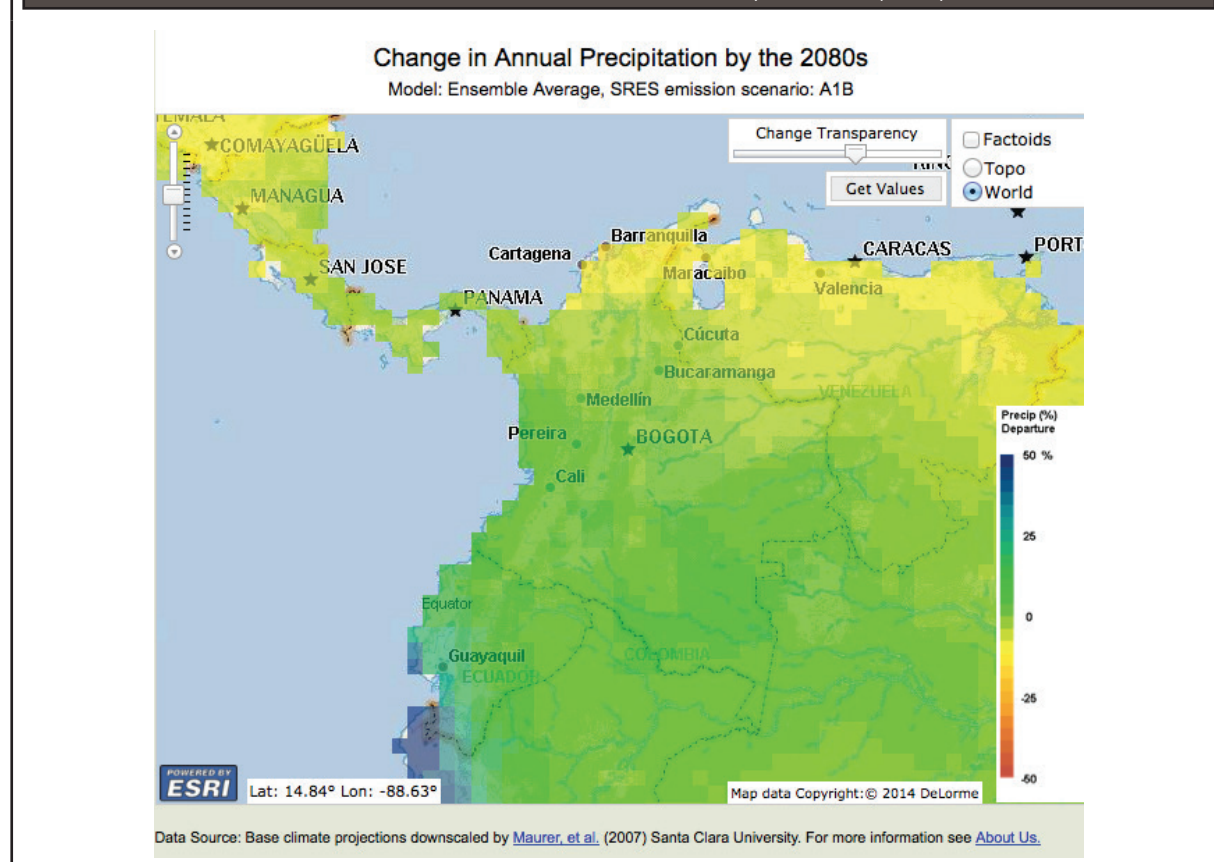
Los modelos de alta resolución que usaron Pa-bón (2005), Ideam y Ruiz (2007), Ideam y Ruiz (2010), y Colombia (2010) fueron el modelo regional Precis (Providing Regional Climates for Impacts Studies) del Reino Unido y el modelo global GSM- MRI (Global Spectral Model) del Japón. Los resultados obtenidos se pueden resumir citando la 2ª Comunicación:

Las zonas que en promedio, para el fin de siglo XXI, presentarían las mayores reducciones de precipitación estarían ubicadas en los departamentos de Huila, Putumayo, Nariño, Cauca, Tolima, Córdoba, Bolívar y Risaralda donde las lluvias se reducirían cerca al 15% con respecto a la climatología 1971-2000. Asimismo, es posible que se

presenten aumentos de la precipitación cercanos al 10%, los cuales se ubicarían en amplias zonas de Chocó. Desde el punto de vista de los escenarios más pesimistas (A2, por ejemplo), las reducciones más significativas de lluvia a lo largo del siglo XXI, se presentarían en Córdoba, Cauca, Bolívar, Caldas, Sucre, Valle, Antioquia, Nariño y Risaralda, donde llovería entre 70 y 80% de las precipitaciones registradas durante el periodo 1971-2000 (o sea, reducciones entre 20% y 30%).

Sin embargo, de entrada llaman la atención algunas contradicciones. La consistencia mínima requerida es que durante el período histórico los resultados de los modelos correspondan con las observaciones. Mientras que las tendencias en la precipitación que se deducen de modelos globales de baja resolución son consistentes con las tendencias

Figura 1. Cambio en la precipitación anual para 2080. Promedio de los modelos globales usados en los estudios del IPCC. Escenario de emisiones A1B. La escala gráfica en porcentaje se encuentra en la parte derecha. Calculado mediante el llamado climate wizard (Girvetz et al., 2014).



observadas en los registros históricos, no hay consistencia entre las predicciones de los modelos de alta resolución y los modelos de baja resolución. Esta sola observación descalifica los resultados de los modelos de alta resolución. No es lógico que en un afinado de escala (*downscaling*) se cambien las tendencias.

Apoyados en estos resultados del IDEAM, la UPME ha analizado la vulnerabilidad del sector eléctrico colombiano, que en promedio se abastece en un 70% mediante hidro-electricidad (UPME, ACON-OP-TIM, 2013). Los caudales mensuales que alimentan cada embalse se proyectaron utilizando las tendencias decrecientes de la precipitación. Como era de esperar, en concordancia con la tendencia en la precipitación de tales estudios, se encontró una disminución generalizada para los tres escenarios de cambio climático analizados (A2, B2 y A1B). Conviene citar textualmente el análisis que hacen de esos resultados:

Si bien los resultados obtenidos coinciden en el hecho de que habrá una reducción de la oferta hídrica de los embalses, en muchos casos los cambios porcentuales de los caudales mensuales son exagerados, llegando a tenerse reducciones mayores a 50 % con respecto a la condición actual, valores que se consideran poco probables teniendo en cuenta que los análisis de tendencia de las series registradas de caudal, no muestran todavía evidencia estadística suficiente para demostrar que exista alguna tendencia lineal hacia la disminución de los caudales.

Sobra decir que de tales estudios se desprenden políticas y acciones que tienen claras consecuencias prácticas.

Recientemente se publicó la Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático (IDEAM et. al, 2015). La metodología empleada toma el promedio de los resultados de los modelos globales del proyecto CMIP5 (*Couple Model Intercomparison Project Version 5*) para varios escenarios de emisiones futuras de gases de efecto invernadero (RCP2.6, RCP4.6, RCP6.0 y RCP8.5), más detalles sobre modelos y escenarios en IPCC (2014). La metodología de promedio usada es la llamada REA (*Reliability Ensam-*

ble Average) tomando como periodo de referencia 1976-2005. En resumen los resultados de precipitación para el horizonte 2011-2100 indican reducción del 10 al 40 % para la región Caribe y la Amazonia; incremento entre 10 y 30 % para el centro y norte de la región Andina, con mayores aumentos en el Eje Cafetero, el altiplano Cundiboyacense y la cuenca alta del río Cauca. En la Orinoquia y el resto del país los cambios no son significativos. Es notoria la diferencia con los estudios anteriores del IDEAM y la falta de análisis del porqué de tales discrepancias.

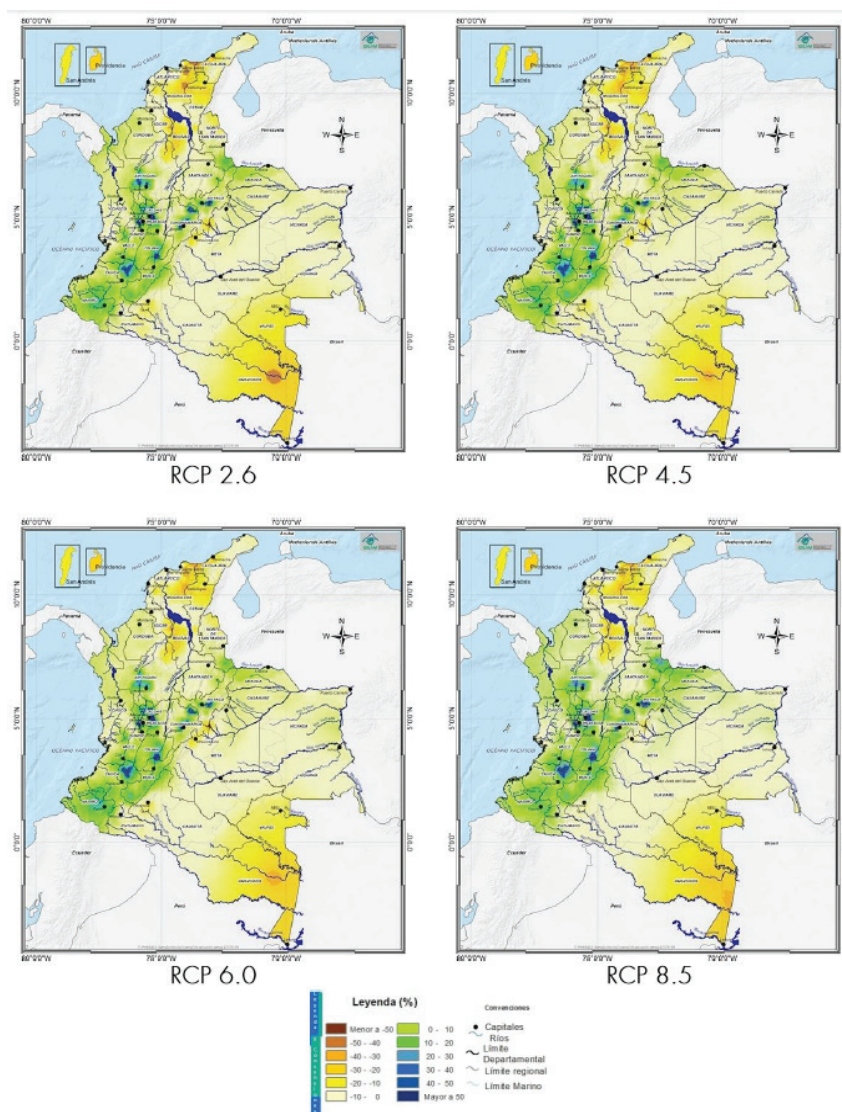
La metodología de promedio REA usada en esta tercera comunicación (Tebaldi y Nutti, 2007) parece adecuada para combinar resultados de modelos diferentes bajo el mismo escenario, pero no para mezclar escenarios distintos. La filosofía de la metodología es dar mayor ponderación a los modelos con mejor calificación. La clave es cómo definir la calificación. Para el caso, la calificación parece obedecer a la reproducción de la climatología y la convergencia de los modelos hacia el futuro (IDEAM et. al, 2015, p. 9). Además, la metodología produce un estimativo de la incertidumbre de la predicción. Esto es un avance significativo con respecto a la segunda comunicación. Sin embargo, en el informe no se presentan detalles que permitan analizar a mayor profundidad los resultados. Por ejemplo, la incertidumbre reportada en las tablas sobre cambios en el porcentaje de precipitación para las diferentes regiones es del orden del 1 %, valor que no está soportado y que no parece correcto. Por ejemplo en la Figura 16 reportan, según el título, la validación cruzada de la precipitación para el período 2011-2040. Los ejes están marcados uno como predicción y otro como medición. Es evidente que o el período es otro o los ejes están mal rotulados. Pero la dispersión que se observa de la gráfica es bastante mayor de la que indicaría una precisión del 1 %. En particular reportan un error cuadrático medio de 558 mm, con errores de magnitud comparable para valores observados entre 400 y 4000 mm y mucho mayores para las estaciones más lluviosas.

De manera semejante, si se examinan las Figuras 77 y siguientes donde se muestra comparación de la serie observada con los resultados de los modelos para el periodo histórico se puede concluir que los errores de los modelos son de mayor magnitud a la que se desprende del valor de precisión para las predicciones. Vale citar

En general se observa que los datos ajustados de los modelos presentan un comporta-

miento aceptable en comparación con los datos observados para el periodo de referencia 1976-2005; sin embargo, se destaca el hecho de que, al menos para Colombia, los modelos no representaron bien eventos extremos de la variabilidad climática observada; por ello, se puede inducir que para el análisis de, por ejemplo, eventos ENSO para el clima futuro no hay una tendencia clara a aumento o disminución de la precipitación (excepto para el norte de Colombia), y com-

Figura 2. Cambio porcentual (%) de la precipitación en el periodo 2011-2040 frente al periodo 1976-2005 para Colombia según los RCP IDEAM (2015).



parando los RCP entre sí, no presentan diferencias significativas modeladas en los volúmenes de precipitación (IDEAM et al. 2015, p. 157).

En la **Figura 2** se presenta el cambio porcentual (%) de la precipitación en el periodo 2011-2040 frente al periodo 1976-2005 para Colombia según los RCP.

3. METODOLOGÍA DE PREDICCIÓN

En respuesta al calentamiento el ciclo hidrológico también cambia. Una atmósfera más caliente significa mayor enfriamiento radiativo de la troposfera, que es una función creciente de la temperatura. La mayor emisión de radiación infrarroja corresponde al balance requerido para compensar la mayor radiación absorbida. En la medida que el enfriamiento se equilibra con cambios en la nubosidad o en la absorción de radiación por el vapor del agua se tendrán cambios en la precipitación. Regionalmente, los vientos van a determinar donde hay un incremento o un decrecimiento. Si los vientos cambian poco, en comparación con la humedad que transportan, las regiones húmedas van a importar más agua y serán más húmedas, mientras que las secas serán más secas (Mitchell, Wilson y Cunnington, 1987; Wentz, *et al.*, 2007; Soden y Held, 2006). Las palabras usadas para describir estas tendencias son «los ricos se enriquecen y los pobres se empobrecen aún más». O traduciendo al lenguaje hidrológico, las zonas más lluviosas serán todavía más y las secas más secas. Dada esta observación general, que se apoya en las tendencias observadas a nivel global y en una argumentación física clara, lo que razonablemente se puede esperar para Colombia es el aumento de la precipitación como consecuencia del calentamiento global. En esta lógica también tienen sentido detalles que se han mencionado, como que la zona Pacífica sea la región con mayor magnitud de aumento en la precipitación y que la zona cercana a la Guajira sea la única región en Colombia para la que se predice una tendencia decreciente por los modelos globales de baja resolución.

Una primera aproximación de la magnitud de estos cambios viene de la ecuación de Clapeyron para expresar la dependencia de la presión de vapor de saturación en la temperatura y consideraciones de balance energético (Stevens y Bony, 2009),

$$\Delta P \cong \Delta R + \frac{\beta}{T_s} (P - E) \Delta \ln T_s,$$

donde ΔR es el cambio en la tasa neta de enfriamiento de la atmósfera, P y E miden la precipitación y evaporación en unidades de flujo de entalpía, T_s es la temperatura de la superficie y β es aproximadamente igual a la relación entre la entalpía de vaporización y la constante de los gases de vapor de agua. La ecuación permite explicar los cambios en la precipitación que predicen los diferentes modelos a pesar de su complejidad y modular la Confianza en las predicciones regionales sobre el cambio de la precipitación derivado de los escenarios de calentamiento global, como por ejemplo los experimentos para determinar la sensibilidad ante el doble de concentración de CO₂. El último término enfatiza el acoplamiento entre los patrones globales de circulación y la precipitación. Este análisis nuevamente refuerza lo expresado en el párrafo anterior.

Existen algunos trabajos previos sobre validación de los resultados de los modelos climáticos globales (Vélez, Ochoa y Poveda, 2014) contra las observaciones de precipitación. La validación no es satisfactoria. También en un trabajo previo, Acevedo (2009) encontró correlaciones bastante pobres entre los campos de precipitación en Colombia y los resultados de 4 modelos globales del IPCC (ECHAM5, CCSM3, HADGEM1 y MIROC 3.2 HIRES).

No se ha hecho, y es fundamental que se haga, una comparación sistemática de los campos de precipitación calculados por los modelos globales del IPCC con las observaciones en el periodo histórico. Dicha evaluación es fundamental para la interpretación de las predicciones ante los diferentes escenarios futuros de cambio climático.

Para concluir sobre los modelos siguen siendo válidas las palabras de Mesa (2007: p. 117), según

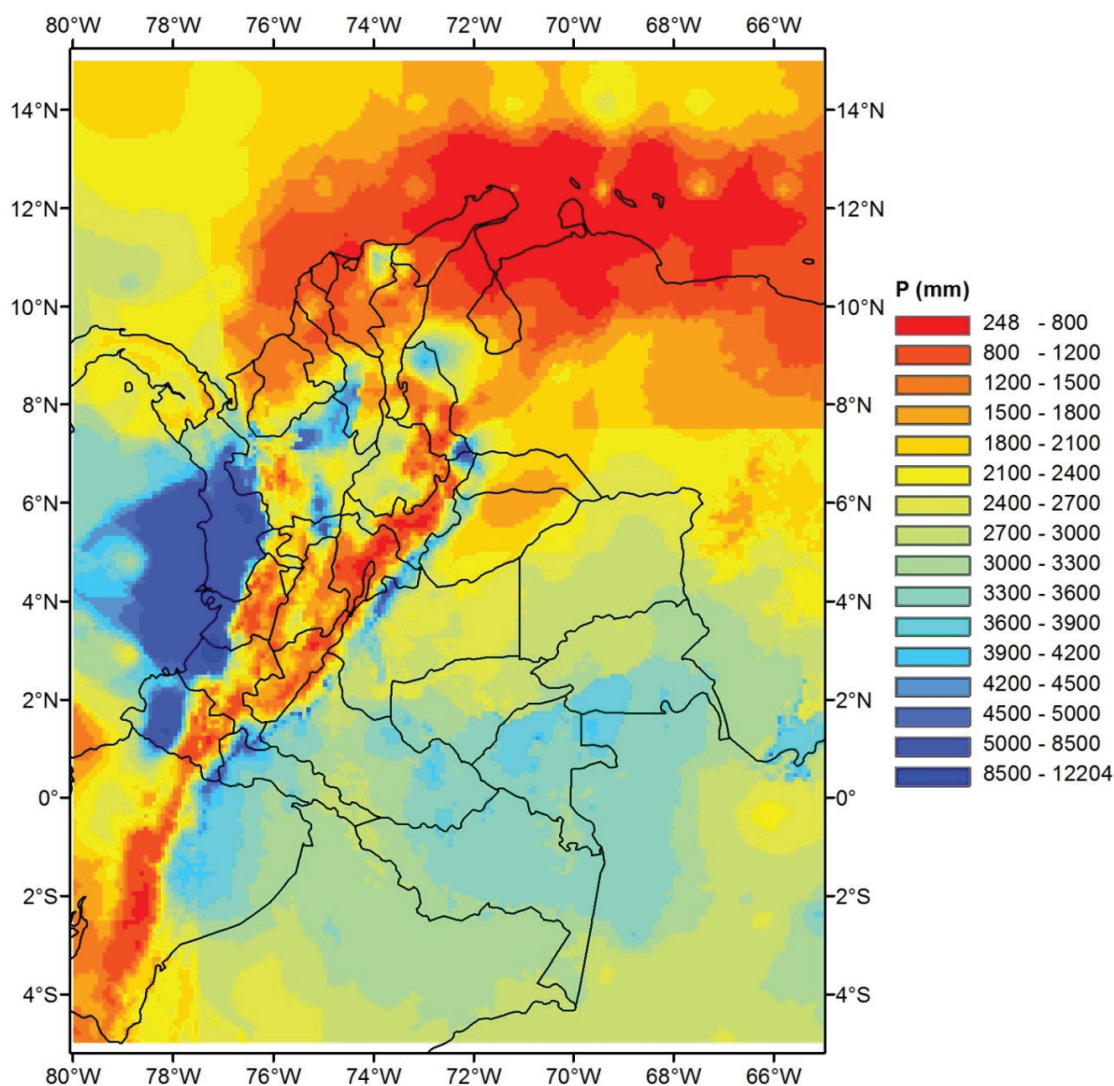
las cuales, «hay una marca histórica muy grande en la comunidad climática que ha llevado a inflar el papel de los modelos. Sin desconocer su utilidad e importancia, los modelos tienen serios problemas de comprobación, complicación, escala y determinismo».

Los problemas de comprobación se refieren a la imposibilidad de verificación por la cantidad de parámetros ajustables.

La dificultad de complicación se refiere a la excesiva incorporación de componentes y procesos que los ha hecho tan inescrutables como la misma naturaleza.

Los modelos son muy dependientes de la escala. Por la escala, algunos fenómenos como la turbulencia y los cambios de estado no se representan sino que se parametrizan. Pero esos fenómenos, mal representados, son de primer orden desde el punto de vista práctico, como queda claro en el caso de los huracanes.

Figura 3. Mapa de precipitación media multianual, correspondiente al periodo 1975-2006 (Hurtado y Mesa, 2014).



Parte del problema viene de una concepción determinista ingenua. No se ha asimilado la necesidad de procesos estocásticos. Ni siquiera para la interpretación de resultados. Hay procesos a ciertas escalas que aunque no se pueden despreciar para estudiar fenómenos a otras escalas, su efecto aparece como un ruido aleatorio. Un ruido con estructura espacial y temporal, derivada de la física del problema y de su no-linealidad (Palmer, 2014).

4. DATOS

La información base para la realización de este estudio corresponde a la base de datos de mapas mensuales históricos de precipitación en el territorio colombiano propuesta por Hurtado y Mesa (2014), la cual cubre el periodo 1975-2006 (384 mapas) a una resolución espacial de 5 minutos de arco.

La metodología con la cual se calcularon los mapas consistió en una integración óptima de la información puntual a escala mensual (2.270 estaciones), la topografía y de series mensuales de campos distribuidos provenientes de mediciones satelitales y de estudios de datos asimilados, disponibles en diferentes periodos de tiempo y a variadas resoluciones espaciales.

La incorporación de la topografía en la estimación de los mapas de precipitación consistió en la implementación de un modelo de interpolación partiendo de la hipótesis y metodología originales del modelo PRISM (Daly *et al.*, 1994), la cual consiste en considerar el efecto topográfico como el principal factor para explicar la variabilidad espacial de la precipitación. El desarrollo del modelo consistió básicamente en representar adecuadamente el óptimo pluviográfico, la variabilidad interestacional y la cantidad de agua precipitada según la información puntual.

En Hurtado y Mesa (2014) y Hurtado (2009) se encuentra el procedimiento y características de la base de datos y en la **Figura 3** se muestra el mapa de precipitación multianual obtenido a partir de los 384 mapas de precipitación mensual en el periodo 1975-2006.

5. METODOLOGÍA

Con base en las Funciones Ortogonales Empíricas (FOE), las Componentes Principales (CP) calculadas sobre los campos mensuales distribuidos de precipitación disponibles, análisis espectral empleando la transformada en ondas y pruebas estadísticas de homogeneidad, se analizaron características importantes de la variabilidad espacio temporal de la precipitación en el territorio colombiano. Los campos de precipitación fueron estudiados a nivel mensual y a una resolución espacial de 15 minutos de arco debido a las limitantes computacionales. Con el fin de remover el ciclo anual, las series correspondientes a cada píxel fueron estandarizadas como la desviación de los valores de precipitación estimados $P_k(t, i, j)$ con respecto al promedio mensual de largo plazo $\mu_k(i, j)$ y escalados por la desviación estándar mensual $\sigma_k(i, j)$:

$$p_k(t, i, j) = \frac{P_k(t, i, j) - \mu_k(i, j)}{\sigma_k(i, j)}$$

donde i, j denota la ubicación del píxel, k denota los meses ($k = 1, 2, \dots, 12$) y t hace referencia a los meses del periodo de registro. La remoción del ciclo permite estudiar la variabilidad de la precipitación y su relación con fenómenos climáticos visibles en la escala interanual, tales como el ENSO o el cambio climático.

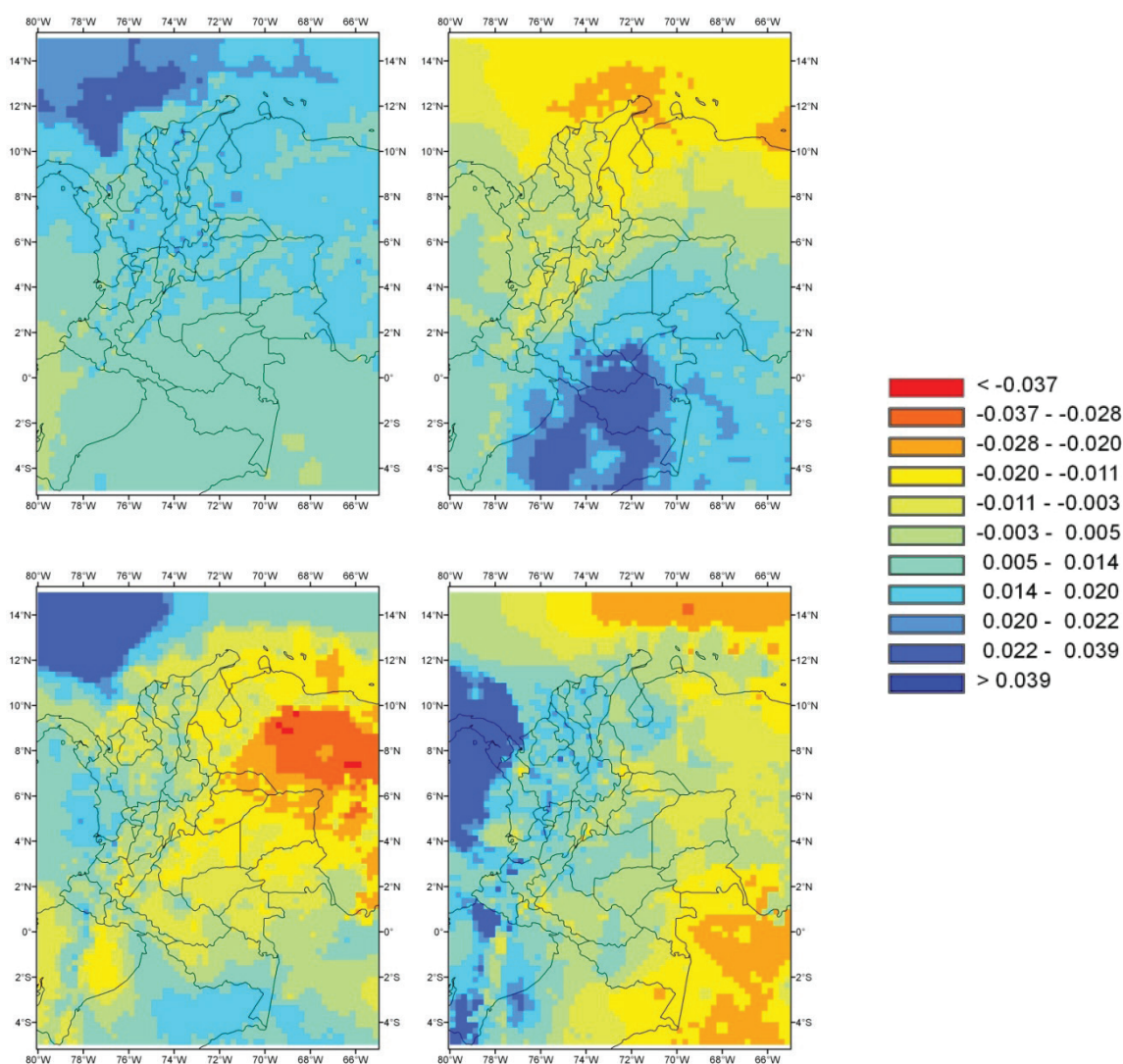
5.1. FOE, CP y análisis espectral

Un análisis detallado sobre el planteamiento matemático de las FOE y las CP puede ser consultado en el texto de Peixoto y Oort (1992). El estudio de las CP se realizó mediante un análisis espectral utilizando la transformada de Onditas. Ya que un proceso físico puede ser descrito tanto en el dominio del tiempo (donde se representan valores de una función f como función del tiempo t), como en el dominio de la frecuencia (el proceso es definido por su amplitud F como función de la frecuencia w) es posible estudiar la variabilidad de una serie asociada a diferentes periodos o frecuencias, lo cual permite identificar procesos cíclicos y demás características fundamentales

asociadas a las señales que presentan las series (Hoyos, 1999). La descomposición en el espacio de las frecuencias, de las contribuciones a la varianza total de cada componente (espectro de potencias) puede obtenerse mediante la transformada de Fourier y de onditas. La transformada de Fourier es una herramienta excelente para señales estacionarias en las cuales permite localización frecuencial, sin embargo, es importante la localización en el tiempo cuando el proceso ana-

lizado no exhibe estacionariedad, lo cual es obtenido mediante la transformada de onditas, la cual localiza temporal y frecuencialmente las señales de las series estudiadas y permite el estudio de fenómenos transitorios, se acerca al estudio del comportamiento no lineal presente en la mayoría de los fenómenos físicos y permite asociar los picos espectrales con fenómenos físicos con mayor claridad (Hoyos, 1999). Este análisis consiste en

Figura 4. Funciones Ortogonales Empíricas. FOE 1 (superior e izquierda), FOE 2 (superior y derecha), FOE 3 (inferior e izquierda) y FOE 4 (inferior y derecha).



identificar la variabilidad de la precipitación en el tiempo asociada a fenómenos macroclimáticos.

5.2. Análisis de homogeneidad

Con base en las pruebas de Mann Whitney para cambio en la media y t-simple para tendencia se estudió la homogeneidad de las series de precipitación estimadas en cada píxel de los mapas. El análisis se realizó para un nivel de confiabilidad del 95 % sobre las series anuales.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. FOE, CP y análisis espectral

En la **Figura 4** se muestran la distribución espacial de las cuatro primeras FOE, las cuales explican el 40,7 % de la varianza de la precipitación. El primer y segundo modo son los más representativos ya que explican el 17,7 y 13,1 % de la varianza, respectivamente, mientras que el tercer y cuarto modos explican el 5,6 y 4,3 %, respectivamente. Modos mayores a estos explican un pequeño porcentaje de la varianza de las series mensuales de precipitación.

La FOE que presenta el rango más característico corresponde a la número 2 (**Figura 4**), en la cual se observan valores positivos en el sureste y negativos en la noroeste, dipolo que indica un comportamiento opuesto en la variabilidad de la precipitación y que está relacionado con la barrera climática que impone el sistema montañoso de los Andes. Esta característica y su relación con la cordillera de los Andes también se presenta al analizar la variabilidad espacio temporal del NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) y específicamente su FOE 1 (Roldán *et al.*, 2008). La FOE 1 no presenta un patrón de variabilidad definido y las FOE 3 y 4 también presentan dipolos que están influenciados por el sistema de los Andes.

Las FOE estimadas sobre las campos originales de precipitación, es decir, sin la remoción del ciclo anual por medio de la estandarización (análisis no mostrado en este trabajo), además de mostrar la influencia del sistema montañoso de la cordillera de los Andes en la variabilidad espacial de la precipitación, muestra gran similitud entre la primera FOE y el

mapa de precipitación media multianual de Colombia (**Figura 2**), identificándose zonas características como la región Pacífica y el Piedemonte Llanero.

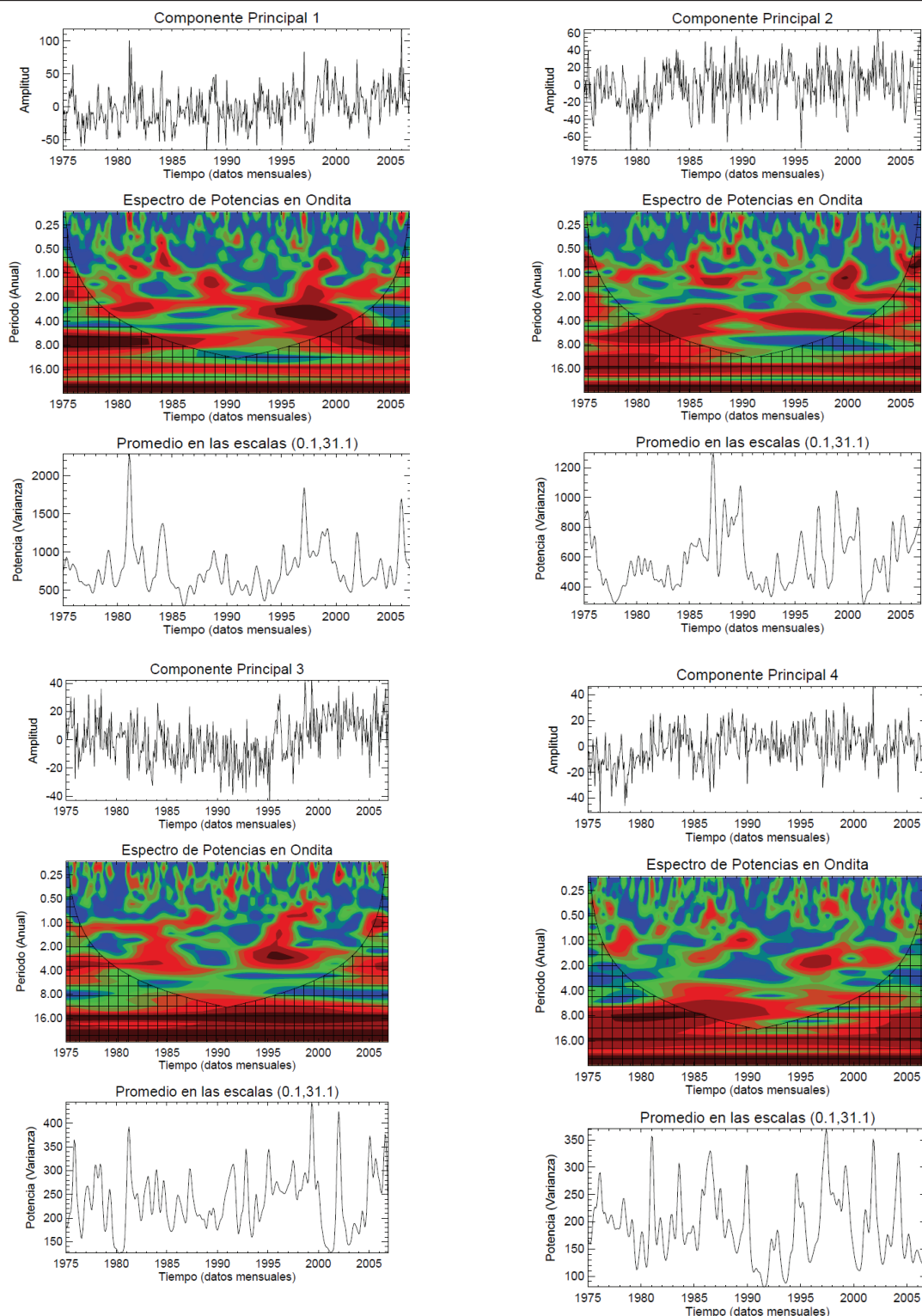
En la **Figura 5** se muestran las series de tiempo correspondientes a las 4 primeras CP, además, de las transformadas en onditas y del promedio en las escalas de los espectros de potencia. La transformada en onditas muestra que el periodo asociado a la ocurrencia del fenómeno ENSO (2-7 años) es el que explica la mayor parte de la variabilidad de la precipitación en la zona de estudio. Además, por medio de la transformada en onditas se puede apreciar la influencia de años caracterizados por la ocurrencia de fuertes eventos -La NIÑA y El NIÑO- en la variabilidad de la precipitación, como los correspondientes a la segunda mitad de la década de los años noventa. La banda asociada al periodo de 2 años, presente principalmente en la CP 1 también puede estar relacionada con la Oscilación Cuasi - Bienal. Al observar las series de tiempo del promedio en las escalas (series de tiempo de varianza promediada), se aprecian rasgos de no estacionariedad en las mismas, tales como cambios y/o tendencias crecientes en la varianza de las CP1 y CP3, principalmente, la cual podría estar relacionada con la fenomenología propia del ENSO y su relación con el cambio climático.

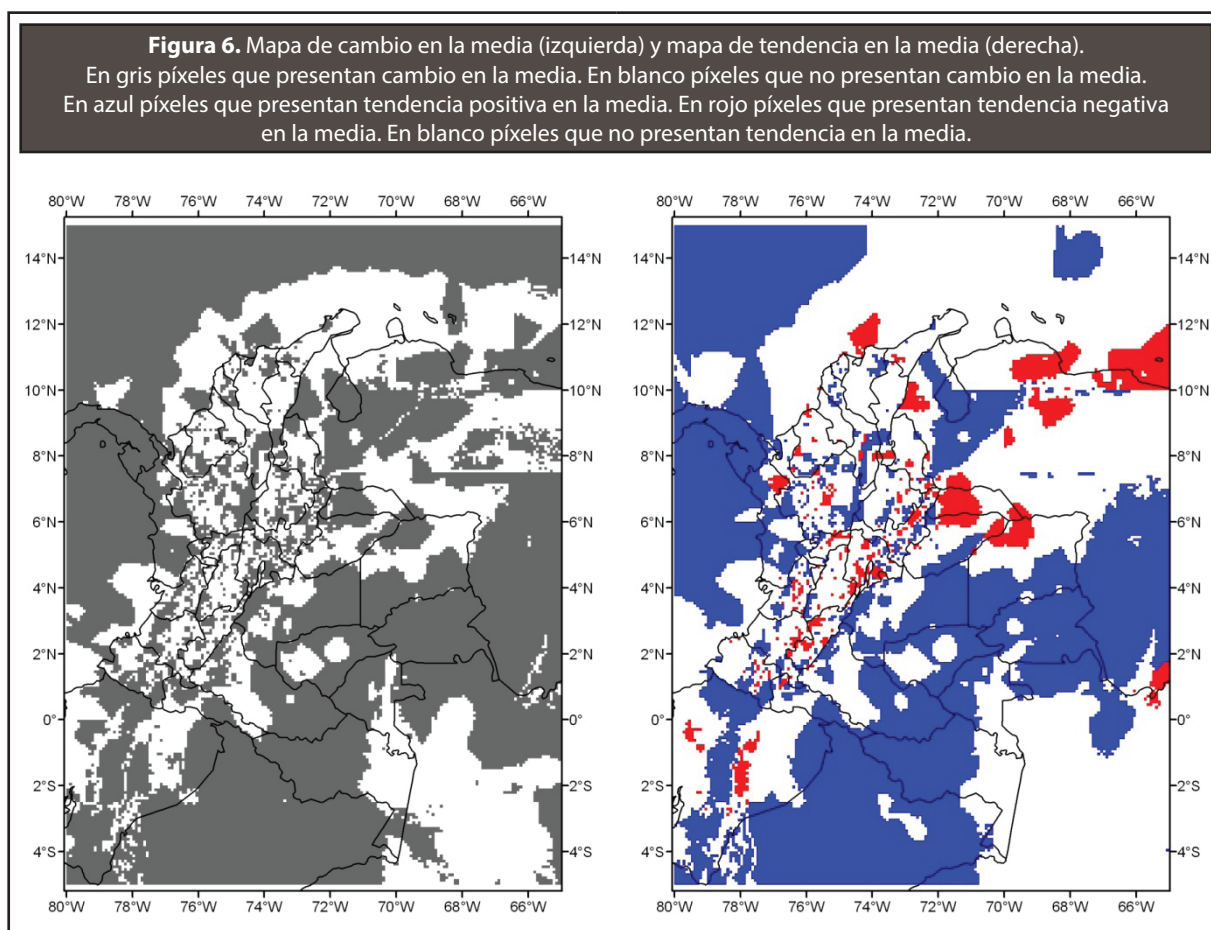
6.2. Análisis de homogeneidad

En la **Figura 6** se muestran los mapas de cambio y tendencia estimados. Teniendo en cuenta que en este estudio se aplicaron dos pruebas estadísticas, en trabajos futuros se justifican análisis más detallados que involucren pruebas de independencia y muchas más pruebas de homogeneidad con el fin obtener conclusiones más confiables en términos estadísticos.

En la **Figura 6** se puede apreciar que en la mayor parte de la zona de estudio las series presentan cambio en la media o tendencia en la misma. Además, en la mayoría de los casos en los cuales se presenta una tendencia en la media, esta es positiva, sugiriendo mayores cantidades anuales de precipitación. Tendencias negativas se presentan en algunos puntos sobre la cordillera de los Andes y el norte de la zona de estudio.

Figura 5. Evolución en el tiempo de las cuatro primeras CP de la precipitación en el territorio colombiano, espectro de potencias según la transformada en ondas y su promedio en las escalas de tiempo.





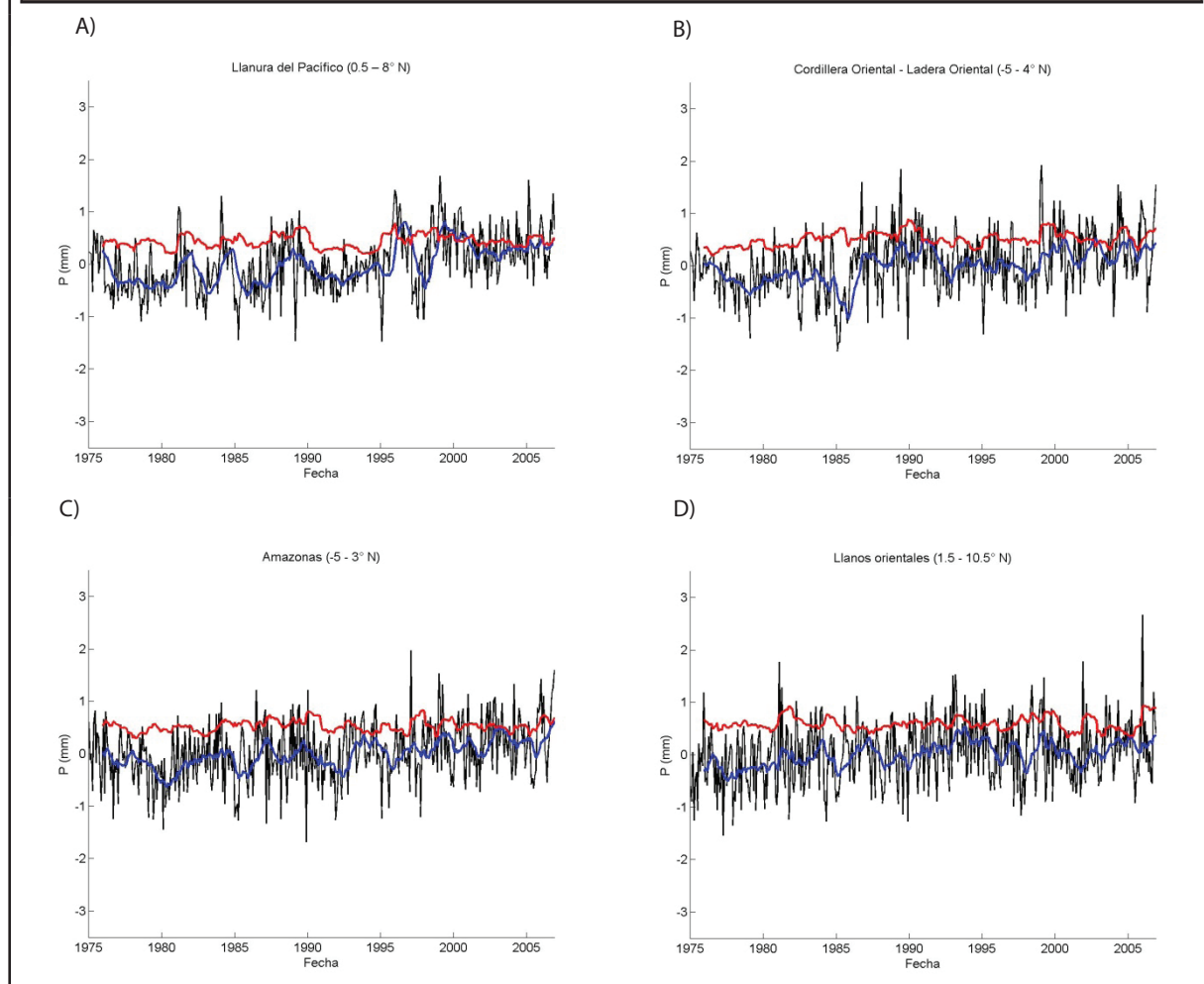
Aunque la presencia de estas características en las series de precipitación estimadas pueden ser consecuencia directa de cambio climático, se debe tener en cuenta que hay un grado de incertidumbre significativo inherente al tamaño de las muestras (32 años), que la información primaria (puntual) y secundaria (mapas espaciales) con la cual fue construida la base de datos utilizada en este estudio presenta problemas de medición y estimación y que dicha base de datos también tiene asociada una incertidumbre que depende en gran parte del número de estaciones de precipitación del país.

Con el fin de realizar un análisis regional y no en cada uno de los píxeles, se obtuvieron series de tiempo (estandarizadas) en 22 regiones dentro de la zona de estudio. En la **Figura 7** se presentan algunas. Dichas series se obtuvieron promediando en cada mes los valores de lluvia de los píxeles que conforman determinada región. Además, se

construyeron las series de tiempo de media y desviación móvil de 12 meses con el fin de visualizar cambios y/o tendencias en la media y varianza de las series.

En general, los valores promedios de precipitación en cada una de las regiones no presentan cambios ni tendencias en las medias, lo cual se confirmó con las pruebas de cambio en la media y tendencia descritas anteriormente. Sin embargo, en la Llanura del Pacífico entre los $0,5^{\circ}$ N y 8° N y en la ladera oriental de la cordillera Oriental entre los 5° S y 4° N se aprecian cambios positivos en la media, mientras que en la región amazónica y en los Llanos Orientales se observan tendencias positivas en la media. Estas observaciones requieren de mayor investigación con el fin de dar explicación a las variaciones de la precipitación en el tiempo y su posible asociación con el cambio climático.

Figura 7. Series de precipitación media. a) Llanura del Pacífico entre los 0,5° N y 8° N. b) Ladera oriental de la cordillera Oriental entre los 5° S y 4° N. c) Amazonas. d) Llanos Orientales. Los promedios y desviaciones móviles se muestran en azul y rojo respectivamente.



7. CONCLUSIONES

Las observaciones de precipitación en Colombia muestran una tendencia creciente en prácticamente toda Colombia, con excepción del Alto Cauca, Arauca y Casanare.

Los modelos climáticos globales de baja resolución empleados por el IPCC predicen un incremento generalizado de la precipitación en Colombia para el fin de siglo, excepto por la región más al norte cerca de la Guajira donde predicen un decrecimiento del orden del 10 %.

El afinado de escala (*downscaling*) realizado por el IDEAM (Pabón, 2005; IDEAM y Ruiz, 2007; IDEAM y Ruiz, 2010; y Colombia, 2010) no es consistente y predice las tendencias contrarias a las observaciones y a los modelos de baja resolución. Sin embargo, a diferencia de los anteriores, los resultados de la tercera comunicación (IDEAM *et al.*, 2015) son más consistentes con las observaciones y los modelos globales. Hace falta una comparación sistemática de los campos de precipitación calculados por los modelos globales del IPCC con las observaciones en el periodo histórico. A nuestro juicio, en lo referente a la precipitación, las predicciones

de los modelos ante los diferentes escenarios futuros de cambio climático y la consecuente toma de decisiones de adaptación o mitigación no tienen la suficiente base científica.

Las consecuencias que obtiene la UPME para la vulnerabilidad del sector eléctrico son lógicas, según la predicción del IDEAM, pero no corresponden a lo observado y dada la inconsistencia de los estudios del IDEAM merece una revisión de fondo. En general, de tales estudios no es confiable deducir políticas o acciones con consecuencias prácticas.

Si se comparan los resultados del nuevo informe del IDEAM (2015) con los de la 2ª comunicación y con el análisis de la UPME, se obtienen inconsistencias ya que los resultados son contradictorios, lo cual confirma el alto grado de incertidumbre que actualmente se tiene en cuanto a los efectos hidrológicos del cambio climático en Colombia.

Debido a la incertidumbre asociada al estudio del cambio climático, a las limitaciones de los modelos globales en representar la dinámica climática e hidrológica en la mediana y pequeña escala, mientras se avanza lo más confiable siguen siendo las tendencias observadas en las estaciones de medición que en las predichas por modelos, sobre todo cuando no hay concordancia.

Los resultados del nuevo informe del IDEAM descalifican en gran medida los resultados e información base del estudio presentado por la UPME en el 2013.

La predicción del impacto del cambio climático en el ciclo hidrológico (precipitación, evaporación, caudales) es un problema práctico y teórico trascendental, para lo cual el país y sus instituciones debería dedicar muchos más recursos. En particular, de manera semejante a como se convoca un panel de científicos a nivel internacional para producir los reportes del IPCC, en Colombia se debería también tener nuestro reporte, que incorpore el trabajo del IDEAM, pero que se someta al rigor de la revisión por pares y que incluya otros enfoques.

Respecto al análisis de la homogeneidad de los 384 campos mensuales de precipitación, los posibles cambios y tendencia en la media se deben

considerar en un estudio más detallado, partiendo de pruebas de independencia y empleando muchas más pruebas de homogeneidad con el fin obtener conclusiones estadísticamente más confiables.

Los dipolos encontrados mediante el análisis de las FOE representan una clara evidencia del papel del sistema montañoso de la cordillera de los Andes en la variabilidad espacial de la precipitación en Colombia, debido a su interacción con las diversas fuentes de humedad y que este actúa como una barrera climática que delimita los efectos que sobre la precipitación tienen diversos fenómenos macroclimáticos.

Por medio de un análisis de homogeneidad empleando la prueba de cambio en la media de Mann-Whitney y la prueba t simple para tendencia, se muestran evidencias de aumento en la precipitación principalmente en las regiones Pacífica, de la Orinoquía y la cuenca amazónica. En la mayor parte de la región andina no se presentan cambios ni tendencias en la media y en los casos en que se presenta tendencia no es fácil generalizar si se trata de un aumento o disminución de la precipitación en el periodo analizado.

La base de datos de precipitación utilizada, que corresponde a 32 años con información de precipitación mensual en todo el país, permitió avanzar en el entendimiento de la variabilidad espacio temporal de la precipitación en el territorio colombiano, así como identificar señales de cambio climático en el país.

AGRADECIMIENTO

Se reconoce y agradece el soporte de la Universidad Nacional de Colombia y de los proyectos COLCIENCIAS GRECIA y COLCIENCIAS 502/2010.

REFERENCIAS

- Acevedo-Aristizábal, L. A. (2009). *Estimación hidrológica bajo escenarios de cambio climático en Colombia*. (Tesis de Maestría en Ingeniería-Recursos Hidráulicos). Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

- Álvarez-Villa, O. D.; Vélez, J. I. y Poveda, G. (2011). Improved Long-Term Mean Annual Rainfall Fields for Colombia. *International Journal of Climatology*, 31(14), November, pp. 2194-2212.
- Bony, S.; *et al.* (2013). Robust Direct Effect of Carbon Dioxide on Tropical Circulation and Regional Precipitation. *Nature Geoscience*, 6(6), April, pp. 447-451.
- Cantor, D. C. (2011). *Evaluación y análisis espaciotemporal de tendencias de largo plazo en la hidroclimatología colombiana*. (Tesis de Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos). Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Cantor, D. C. y Ochoa, A. (2011). Señales de cambio climático en series de lluvia en Antioquia. *IX Congreso Colombiano de Meteorología y Conferencia Internacional "200 años de la meteorología y de la climatología en América Latina*. Bogotá, Colombia.
- Carmona, A. M. y Poveda, G. (2014). Detection of long-term trends in monthly hydro-climatic series of Colombia through Empirical Mode Decomposition. *Climatic Change*, 123(2), January, pp. 301-313.
- Colombia. (2010). *2a Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático*. Bogotá.
- Daly, C.; Neilson, R. P. y Phillips, D. L. (1994). A Statistical-Topographic Model for Mapping Climatological Precipitation Over Mountainous Terrain. *Journal of Applied Meteorology*, 33, pp. 140-158.
- Eslava, J. A. (1993). Climatología y diversidad climática de Colombia. *Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 18(71), Marzo, pp. 507-538.
- Girvetz, E.H.; *et al.* (2009) Applied Climate-Change Analysis: The Climate Wizard Tool. *PLoS ONE*. [en línea] Disponible en: http://aquila.usm.edu/fac_pubs/1113
- Hansen, J. (2010). Global surface temperature change. *Review of Geophysics*. [en línea] Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2010RG000345/full>
- Hausfather, Z. *et al.* (2013). Quantifying the Effect of Urbanization on U.S. Historical Climatology Network Temperature Records, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118, pp. 481-494.
- Hoyos, C.D. (1999). *Algunas aplicaciones de la transformada de Fourier y la descomposición en ondas a señales hidrológicas y sísmicas*. (Trabajo dirigido de grado). Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Hurtado-Montoya, A. F. y Mesa-Sánchez, O.J. (2014). Reconstrucción de los campos de precipitación mensual en Colombia. *DYNA*, 81(186), pp. 251-258.
- Hurtado, A. F. (2009). *Estimación de los campos mensuales históricos de precipitación en el territorio colombiano*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- IDEAM, *et al.* (2015). *Escenarios de cambio climático para precipitación y temperatura para Colombia 2011-2100. Herramientas científicas para la toma de decisiones – estudio técnico completo : 3ª. Comunicación Nacional de Cambio Climático*. Bogotá D.C.: IDEAM. 279 p.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Mayorga, R., *et al.* (2011). *Evidencias de cambio climático en Colombia con base en información estadística*. Bogotá D.C.: IDEAM. 34 p.
- Mejía J.F., *et al.* (1999). Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. *DYNA*, 127, pp. 7-26.
- Mesa, O. J.; Poveda, G. y Carvajal L. F. (1997). *Introducción al clima de Colombia*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia. 390 p.
- Mesa-Sánchez, O.J. (2007). *¿Adónde va a caer este Globo? Acerca del futuro de la Tierra*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. 328 p.
- Mitchell, J. F. B.; Wilson, C. A. y Cunningham, W. M. (1987). On CO2 Climate Sensitivity and Model Dependence of Results. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 113(475), January, pp. 293-322.
- Ochoa, A. y Poveda, G. (2008). *Distribución espacial de las señales de cambio climático en Colombia*. En: XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena de Indias, 2-6 de septiembre.

- Ochoa-Jaramillo, A. y Cantor-Gómez, D. (2011). *Tendencias de largo plazo en cinco índices de estabilidad atmosférica en Colombia*. En: IX Congreso Colombiano de Meteorología y Conferencia Internacional, «200 años de la meteorología y de la climatología en América Latina». Bogotá D.C., 23-25 de marzo.
- Oster, R. (1979). *Las precipitaciones de Colombia*. Colombia Geográfica, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 6(2), 147 p.
- Pabón, J. D. (2003). Cambio climático global y su manifestación en Colombia. *Cuadernos de Geografía* XII, 12(1-2), julio, pp. 111-119.
- Pabón, D. (2005). *Escenarios de cambio climático para territorio colombiano*. Documento INAPPDF-B/GECC/I. Universidad Nacional de Colombia y Conservación Internacional. Bogotá, Colombia.
- Palmer, T. N. (2014). *More Reliable Forecasts with less Precise Computations: a Fast-Track Route to Cloud-Resolved Weather and Climate Simulators?* Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 372(2018), June.
- Peixoto, J. P. y Oort, A. H. (1992). *Physics of Climate*. New York: American Institute of Physics. 520 p.
- Peterson, T. C. (2005). Climate Change Indices. *WMO Bulletin*, 54(2), pp. 83-86.
- Poveda, G. y Mesa, O.J. (1997). Feedbacks Between Hydrological Processes in Tropical South America and Large-Scale Oceanic-Atmospheric Phenomena. *Journal of Climate*, 10(10), October, pp. 2690-2702.
- Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Rev. Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 28(107), pp. 201-222.
- Poveda, G., y Álvarez, D. M. (2012). El colapso de la hipótesis de estacionariedad por cambio y variabilidad climática: implicaciones para el diseño hidrológico en ingeniería. *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*, (36), enero, pp. 65-76.
- Poveda G.; Alvarez D. M. y Rueda O. A. (2011). Hydro-Climatic Variability Over the Andes of Colombia Associated with ENSO: a Review of Climatic Processes and Their Impact on One of the Earth's Most Important Biodiversity Hotspots. *Clim Dynam*, 36(11), pp. 2233-2249.
- Quintana-Gómez, R. A. (1999). Trends of Maximum and Minimum Temperatures in Northern South America. *Journal of Climate*, 12(7), July, pp. 2104-2112.
- Rabatel, A., et al. (2012). Review article of the current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *Cryosphere Discuss*, 6(4), pp. 2477-2536.
- Reichler, T. y Kim, J. (2008). How Well Do Coupled Models Simulate Today's Climate? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89, pp. 303-311.
- República de Colombia. (2010). *2ª. Comunicación Nacional ante la Convención Marco de Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático*. Bogotá.
- Roldán, E.; Mesa, J. C. y Poveda, G. (2008). Análisis de la variabilidad espacio temporal del NVDI en Colombia y en la cuenca Amazónica. En: *VIII Congreso de meteorología y conferencia internacional «Cambio climático, recursos naturales y desarrollo sostenible»*, Chocó, Colombia.
- Ruiz, D., et al. (2008). Changing Climate and Endangered High Mountain Ecosystems in Colombia. *Science of the Total Environment*, 398(1-3), pp. 122-132.
- Ruiz-Murcia, J. F. e IDEAM (2007). *Escenarios de cambio climático, algunos modelos y resultados de lluvia para Colombia bajo el escenario A1B*. Bogotá D.C.: IDEAM. 55 p.
- Ruiz-Murcia, J.F. e IDEAM (2010). *Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución. Panorama 2011 - 2100*. Bogotá D.C.: IDEAM. 89 p.
- Salazar, J. F. (2011). *Regulación biótica del ciclo hidrológico en múltiples escalas*. (Tesis de Doctorado en Ingeniería). Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Smith, R.A., et al. (1996). En búsqueda de señales del cambio climático en Colombia. En: *IV Congreso Colombiano de Meteorología, Sociedad Colombiana de Meteorología*, Bogotá.
- Snow, J.W. (1976). The Climate of Central and Northern South America. *Climates of Central and South America. Schwerdtfeger W. (ed)*, pp. 295-403.

- Soden, B. J. y Held, I. M. (2006). An Assessment of Climate Feedbacks in Coupled Ocean-Atmosphere Models. *Journal of Climate*, 19(14), July, pp. 3354-3360.
- Stevens, B., y Bony, S. (2013a). Water in the Atmosphere. *Physics Today*, 66(6), pp. 29-34.
- _____. (2013b). What are Climate Models Missing. *Science*, 340(6136), May, pp. 1053-1054.
- Tebaldi, C. y Knutti, R. (2007). The Use of the Multi-Model Ensemble in Probabilistic Climate Projections. [en línea] *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. Disponible en: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/365/1857/2053>
- Trojer, H. (1959). Fundamentos para una zonificación meteorológica y climatológica del trópico y especialmente de Colombia. *Cenicafé X*, (8), pp. 287-371.
- UPME, Macías, A. M. y Andrade, J. (2014). *Estudio de generación eléctrica bajo escenario de cambio climático*. Bogotá D.C. 107 p.
- UPME, ACON-OPTIM, (2013). Estudio para determinar la vulnerabilidad y las opciones de adaptación del sector energético colombiano frente al cambio climático. *Producto No. 3. Informe final*. UPME-0223-290-dic/2013-V1. 416 p.
- Vélez, A.; Ochoa, A. y Poveda, G. (2014). Validación de temperaturas medias mensuales del Eta/HadCM3 en Colombia para el escenario 20C3M. En: *60 Reunión anual de la Sociedad Interamericana de Horticultura Tropical & V Congreso Colombiano de Horticultura*. Memorias electrónicas. Medellín.
- Vuille, M., et al. (2003). 20th Century Climate Change in the Tropical Andes: Observations and Model Results. *Climatic Change*, 59, July, pp. 75-99.
- Wentz, F. J., et al. (2007). How Much More Rain Will Global Warming Bring? *Science*, 317(5835), July, pp. 233-235.

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /
PARA CITAR ESTE ARTIGO /**

Hurtado-Montoya, A.F.; Mesa-Sánchez, O.J. (2015). Cambio climático y variabilidad espacio – temporal de la precipitación en Colombia. *Revista EIA*, 12(24), Julio-diciembre, pp. 131-150. [Online]. Disponible en: DOI: <http://dx.doi.org/10.14508/reia.2015.12.24.131-150>