

Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia

Carlos Andrés Bonilla-Ovallos*, Oscar José Mesa

Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Medellín, Colombia

Resumen

La predicción de los posibles cambios en la precipitación como resultado del cambio climático global, la deforestación y otras perturbaciones antrópicas, es un problema práctico y científico de gran complejidad y enormes consecuencias. La estrategia tradicional ha sido recurrir a modelos climáticos globales acoplados de océano y atmósfera. Sin embargo, aunque tales modelos han significado avances importantes en la representación del clima pasado y presente, no están exentos de dificultades, especialmente en lo concerniente a la estimación de la precipitación en un país montañoso y tropical como Colombia. Para avanzar en el conocimiento de la confiabilidad de tales predicciones se evaluó la precipitación histórica en algunos modelos del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP5) mediante la comparación sistemática de dicha precipitación con la precipitación observada tomada de los registros de la base de datos del modelo hidrológico nacional propuesto por **Hurtado** (2009). Se evaluaron diferentes medidas de error, entre ellas, las del error medio absoluto, la raíz del error medio cuadrático, el índice de concordancia, el error sistemático (*bias*), y los coeficientes de correlación y de determinación. Los resultados de la evaluación estacional y regional cuestionan la credibilidad de las predicciones de la precipitación de los modelos de circulación general (MCG) para Colombia, lo cual llama a la reflexión sobre su uso y resalta la importancia de profundizar en la investigación sobre el tema, en aras de contribuir a la adopción de las decisiones pertinentes. Por último, debe hacerse énfasis en la necesidad de un programa nacional de investigación para responder a la acuciante pregunta del impacto del cambio climático sobre la precipitación en Colombia. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Modelos globales de circulación; Precipitación histórica en Colombia; CMIP5; Métrica de error en modelos.

Validation of the precipitation estimated by CMIP5 climate models in Colombia

Abstract

The prediction of possible changes in precipitation in the coming years and decades due to global climate change associated with the greenhouse effect, deforestation and other anthropic perturbations is a highly complex practical and scientific problem of huge consequences. The traditional strategy has focused on the use of coupled atmosphere-ocean general circulation models, and while such models have demonstrated important improvements for representing past and present climate, they are not without limitations. In particular, the estimation of precipitation in a tropical and mountainous country like Colombia has proved to be very difficult. In order to check the credibility of such predictions, we evaluated the historical precipitation in some of the models of the fifth phase of the Coupled Models Intercomparison Project (CMIP5) through a systematic comparison with observed precipitation as registered in the database of the national hydrologic model proposed by **Hurtado** (2009), mostly based on rain gauge observations. We evaluated different error measures: the mean absolute error, the mean squared error, the concordance index, the systematic error (*bias*), the correlation coefficient and the coefficient of determination. The results of the seasonal and regional assessments question the credibility of precipitation prediction through general circulation models (GCM), and give an insight on the use of derived data for relevant decision-making, which emphasizes the need for a national research program to answer to the important question of the impact of climate change on Colombian precipitation patterns. © 2017. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: General circulation models; Historical precipitation in Colombia; CMIP5; Model-observations comparison.

*Correspondencia:

Carlos Andrés Bonilla Ovallos, cabonillao@unal.edu.co; **Recibido:** 31 de octubre de 2016; **Aceptado:** 24 de febrero de 2017

Introducción

El cambio climático global y sus implicaciones sobre variables locales como la precipitación, la temperatura y el nivel del mar, se han consolidado como un asunto de especial importancia dentro de la comunidad científica. En torno a ello, se busca proveer la predicción necesaria para la toma de decisiones y la gobernanza de asuntos cruciales para la sociedad como la agricultura, el abastecimiento de agua potable, la gestión, la prevención del riesgo de desastres y la generación de energía hidroeléctrica. Además se requiere, en la medida de lo posible, minimizar la incertidumbre de dichas predicciones (IDEAM & Rodríguez, 2012; Hurtado & Mesa, 2015; Urrea, Ochoa, & Mesa, 2016).

Los efectos del cambio climático pueden estudiarse mediante la aplicación de técnicas estadísticas a partir de los valores observados, o mediante la implementación de modelos globales del clima (GCM por sus siglas en inglés) que representan los procesos físicos fundamentales de la atmósfera, el océano, la criosfera y la superficie de la tierra, e intentan - sujetos a limitaciones para la representación de fenómenos de pequeña escala - simular numéricamente las dinámicas del sistema climático (IDEAM & Rodríguez, 2010; Hurtado & Mesa, 2015; Petisco, 2008). Entre los fenómenos no incorporados mediante parametrizaciones se encuentran la convección y los efectos orográficos a escala pequeña e intermedia (Mesa, 2007, pág. 113ss), que debe decirse, resultan de suma importancia para la precipitación en Colombia. Hay un sesgo histórico 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 problemas de comprobación, complicación, escala y determinismo.

Al respecto conviene citar el Quinto Reporte del IPCC en el Capítulo sobre evaluación de los modelos (Falto, et al., 2013, págs. 743 y 765), en el cual reconocen que la capacidad de los modelos climáticos para simular la temperatura superficial ha mejorado en muchos, pero no en todos los aspectos, que la simulación de los patrones de precipitación de gran escala ha mejorado, aunque los modelos continúan con resultados menos buenos para la precipitación que para la temperatura, y que a escala regional la precipitación no se simula bien, en particular debido a las dificultades de observación.

Como consecuencia, es fundamental evaluar los resultados de tales modelos contra las observaciones antes de proceder a usarlos directamente.

En Colombia, ambas opciones han sido utilizadas en diversos estudios y los resultados de los mismos son detallados rigurosamente por Hurtado y Mesa (2015).

En resumen, se presenta consistencia entre los diferentes estudios realizados mediante técnicas estadísticas (Cantor & Ochoa, 2011; Carmona & Poveda, 2014; IDEAM, Mayorga, Hurtado, & Benavides, 2011; Mesa, Poveda, & Carvajal, 1997) y entre estos y los resultados derivados de modelos de baja resolución revisados por Pabón (2005),

citados por Hurtado y Mesa (2015, p. 9). Tendencias crecientes (71%) de la precipitación anual acumulada para el noroccidente del país, Vichada y el piedemonte del Putumayo; y decrecientes (22%) para el suroccidente del país, sectores del medio Magdalena, Boyacá y sectores de Guainía (IDEAM, et al., 2011), son hasta cierto punto consistentes con las tendencias crecientes que para el Pacífico norte y central, el medio Magdalena, la sabana de Bogotá, las cuencas de los ríos Sogamoso, Catatumbo, Arauca, el piedemonte llanero, la Orinoquía central, la Amazonia central y el piedemonte Amazónico reportaron (IDEAM, et al., 2011; Pabón, 2005). Además, son consistentes con las visualizaciones del periodo histórico que a partir de los modelos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) pueden visualizarse en la página: <http://www.climtewizard.org/> y fueron revisadas por Hurtado y Mesa (2015).

Sin embargo, los resultados derivados de modelos de alta resolución como el PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies del Reino Unido) y el GSM-MRI (Global Spectra Model del Japón), presentan diferencias con los resultados anteriormente mencionados (Hurtado & Mesa, 2015). A saber, (IDEAM & Rodríguez, 2010; IDEAM & Ruiz, 2010; Pabón, 2005), señalan que para proyecciones de escenarios de emisión pesimistas como el A2: “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 el 70% y 80% de las precipitaciones registradas durante el periodo 1971-2000”, contrario a lo que señalan Hurtado y Mesa (2015) sobre las predicciones realizadas en <http://www.climatewizard.org/>:

“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.”

Sumado a lo anterior, en el último estudio sobre el caso, condensado en la 3a comunicación nacional de cambio climático, (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLETA, 2015) mediante una metodología que consiste en promediar los resultados del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados fase 5 (CMIP5), encontraron resultados más acordes a los encontrados con el uso de modelos de baja escala y las técnicas estadísticas antes mencionadas, por ende, diferentes a los encontrados con modelos de alta resolución.

El Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP) ha tenido a lo largo del tiempo diferentes fases que han sido iniciativa del Programa Mundial de Investigaciones del Clima (WCRP) y cuyo objetivo ha sido avanzar en la comprensión del clima pasado, presente y futuro mediante

la implementación de MCGs; pero los MCGs no son siempre exactos, y lo prueban algunos estudios publicados que revelan que los modelos usados por el IPCC no describen el clima con una precisión similar y que no se desempeñan exitosamente para todas las regiones del globo (**IDEAM & Rodríguez, 2010**), por ende su uso, directo, o su uso en ejercicios de afinado de escala estadísticos o dinámicos - alternativa para subsanar las limitaciones se mencionó tienen para representar procesos en determinadas escalas - debe ser de especial atención.

A excepción de los ejercicios de validación de los experimentos del WCRP-MIP realizados por **Rodríguez e IDEAM (2010, 2012)**, no se tienen estudios detallados sobre estas bases de datos.

La validación de los resultados sobre precipitación y temperatura de los modelos del CMIP5 realizada por **Rodríguez e IDEAM (2012)** consistió en la comparación de esta base de datos y los datos de los proyectos CMAP y ERA40, mediante métricas como el BIAS, RMSE, la correlación, las distribuciones espaciales y la representación del ciclo anual, para seleccionar un conjunto de modelos cuyo mejor comportamiento o desempeño los hiciera modelos potencialmente útiles para reducciones de escala.

Rodríguez & IDEAM (2012), encontraron que la mayoría de los modelos tienden a simular las altas precipitaciones del Pacífico colombiano, pero no en la Amazonía, y que algunos modelos sobrestiman en gran proporción la lluvia hacia la parte norte del país. Que el error en la simulación de la precipitación decrece para el trimestre JJA y que en general los modelos representan bien el ciclo anual de la precipitación para las regiones naturales de Colombia, exceptuando los modelos HadGEM-CC y HadGEM-ES. También que los mayores errores y las menores correlaciones tienen lugar en la Amazonía, mientras para el Caribe se presenta la situación inversa. También destacan el comportamiento de los modelos CNR-CM5, FGOALS-g2, MPI-ESM-LR, GFDLCM3, HadCM3, CanCM4 (para el nivel anual y estacional), y los modelos GFDL-ESM2M, GFDLCM2G, MPI-ESM-LR, HadCM3 y CNR-CM5 para la representación del ciclo anual.

Este trabajo tiene como objetivo la validación de la precipitación en el período histórico de algunos modelos del CMIP5 con el fin de incrementar los conocimientos y las percepciones que sobre esta base de datos se tiene, para orientar la toma de decisiones en asuntos que requieren gobernanza frente al cambio climático, lo que debe hacerse con la cautela que la incertidumbre de los mismos precise. Para ello, se propone una validación espacial y estacional, cuya metodología, resultados y conclusiones se presentan en las posteriores secciones del mismo.

Materiales y Métodos

Base de datos MHN. La base de datos MHN, creada por (**Hurtado, 2009; Hurtado & Mesa, 2014**), es una base de datos de precipitación de libre acceso que integra de manera

óptima la información de los pluviómetros distribuidos sobre el territorio colombiano, con información de mediciones satelitales e información derivada de estudios globales de reconstrucciones disponibles en diferentes periodos de tiempo y variadas resoluciones espaciales, que además, y dada la función determinante de la topografía para el territorio colombiano, contó con la implementación de una variante del modelo PRIMs que considera la existencia de un óptimo pluviográfico (**Hurtado, 2009**), rasgo característico del gradiente altitudinal que se asocia a los ramales de la cordillera de los Andes (**Mesa, Poveda y Carvajal, 1997; Poveda, 2004**).

Está compuesta por 384 mapas de distribución espacial de la precipitación mensual para el periodo 1975-2006 a una resolución espacial de 5° de Arco, con límites definidos entre los 5°S-15°N y los 80°W-65°W.

Las fuentes de datos usadas para su construcción fueron: 2270 estaciones pluviométricas, la mayoría de ellas de la red del IDEAM; las bases de datos Global Precipitation Climatology Project GPCP-V2, la National Centers for Environmental Prediction (NCEP)/National Center for Atmospheric Research (NCAR), la Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y la Geostationary Satellite System (GOES); y un modelo digital de terreno (MDT) con una resolución de 30 segundos de arco para el estudio de la topografía (**Hurtado, 2009, Hurtado & Mesa, 2014**).

WCRP CMIP5. El Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados es un proyecto que produce un conjunto de datos de múltiples modelos y para múltiples variables en procura de avanzar en el conocimiento de la variabilidad del clima y el cambio climático. Su objetivo es el planteamiento de escenarios y la corrida de modelos para así obtener una gama de climas que se usan en estudios del clima y de efectos del cambio climático e influyen en la agenda política (**Taylor, Stouffer, & Meehl, 2012**). A saber, fueron insumos importantes para la elaboración del AR5 de la variabilidad climática y el cambio climático que realizó el IPCC en 2008.

En general los modelos están conformados por una componente oceánica y una atmosférica (AOGCMs), un modelo de tierra (EMICs) de complejidad intermedia y en algunos casos componentes biogeoquímicos (ESMs) que consideran los importantes flujos de carbono entre el océano, la atmósfera y los reservorios terrestres (**Taylor, et al., 2012**).

Los experimentos del CMIP5 comprenden diferentes tipos de corridas dentro de los cuales se tiene las corridas siglo XXI, que consisten en corridas sometidas a forzamientos por emisiones y concentraciones específicas (rutas representativas de control RCPs) y corridas siglo XX que cubren el periodo histórico comprendido entre (1850-2005), forzadas por los cambios en las composiciones atmosféricas observados (**Taylor, et al., 2012**).

Para la validación, como se mencionó anteriormente, se tomaron las salidas de precipitación del experimento histórico de algunos modelos del CMIP5 (Tabla 1) disponibles en http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/data_portal.html.

Tabla 1. Modelos objeto de validación, centro de modelación encargado y resolución espacial característica.

Modelo	Centro o grupo de modelación encargado	Resolución espacial [°] (lon * lat)
CMCC-CMS	Centro Euro-Mediterraneo Per I Cambiamenti Climatici.	1,88*1,88
FGOALS-G2	LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academic of Sciences and CESS, Tsinghua University.	2,81*2,81
HadCM3	Met Office Hadley Center.	3,75*2,47
HadGEM2-AO	Met Office Hadley Center.	1,88*1,24
HadGEM2-CC	Met Office Hadley Center.	1,88*1,24
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Center.	1,88*1,24
INMCM4	Institute of Numerical Mathematics.	2,00*1,50
IPSL-CM5A-LR	Insitut Pierre-Simon Laplace.	3,75*1,88
IPSL-CM5B-LR	Insitut Pierre-Simon Laplace.	3,75*1,88
IPSL-CM5A-MR	Insitut Pierre-Simon Laplace.	2,25*1,26
MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technologic.	1,41*1,41
MIROC-ESM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technologic, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies.	2,81*2,81
MIROC-ESM-CHEM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technologic, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies.	2,81*2,81
MPI-ESM-LR	Max-Planck-Institut fur Meteorologie	1,88*1,88
MPI-ESM-MR	Max-Planck-Institut fur Meteorologie	1,88*1,88
MPI-ESM-P	Max-Planck-Institut fur Meteorologie	1,88*1,88

(Koutroulis, Grillakis, Tsanis, & Papadimitriou, 2015)

La longitud de las series tomadas, así como la espacialidad fue condicionada por las características ya mencionadas de la base de datos MHN.

Metodología

Dadas las diferentes resoluciones espaciales de los modelos objeto de validación, inicialmente se ajustó la resolución de la base de datos de MHN a la resolución particular de cada modelo, para lo cual se promediaron tantos pixeles de la primera como la resolución de los segundos lo demandasen. El periodo de tiempo de validación fue 1975-2005.

Una vez igualadas las resoluciones se procedió con el análisis píxel-píxel comprendido dos fases. La primera fase consistió en la estimación de los mapas de ciclos anuales para identificar cuales modelos representaban la distribución media mensual de la precipitación sobre el territorio colombiano y cuáles no, estimándose a su vez el número de pixeles para el que había sobrestimación o subestimación. La segunda fase por su parte consistió en la estimación del coeficiente de correlación de Pearson y medidas del error como el error medio absoluto (MAE), la raíz del error medio cuadrático (RMSE), el error sistemático, sesgo o BIAS, el índice de concordancia (d_r) (Willmott, Robeson & Matsuura, 2012), el coeficiente de determinación(r^2). Las

correlaciones se estimaron para las series sin estandarizar, para las series estandarizadas, para las series trimestrales y para las series de los ciclos anuales de cada píxel. En la tabla 2 se presentan las ecuaciones de dichas medidas del error.

La comparación de los resultados de un modelo particular P_i , con las observaciones O_i se apoya en las características centrales de los errores del modelo $P_i - O_i$. Es el caso del error medio absoluto, MAE y de la raíz del error medio cuadrático, $RMSE$. Para evitar la cancelación de los errores por exceso y defecto la primera usa el valor absoluto y la segunda el cuadrado. La diferencia entre ambas es que los errores más grandes pesan más en la segunda. En ambos casos un modelo es mejor mientras menor sea el indicador, con valor óptimo 0.

Para tener una idea del sesgo en la predicción, el indicador BN considera el promedio de los valores conservando el signo y no puede mirarse aislado de los dos anteriores por causa de la mencionada cancelación. Un valor de cero indica ausencia de sesgo en promedio, no necesariamente ausencia de error. El coeficiente de correlación r , mide el grado de asociación lineal entre la serie observada y simulada por el modelo, está acotada entre -1 y 1, ambos valores indican relación lineal perfecta y 0 indica ausencia de relación lineal. Para comparar valores observados y simulados se esperan

Tabla 2. Medidas del error usadas para la comparación. P_i es el valor simulado en el mes i , el valor observado es O_i , y $MAD = \frac{1}{n} \sum |O - \bar{O}|$ es la desviación absoluta media de las observaciones.

Medida del error	Ecuación	Valor óptimo
Error medio absoluto (mm)	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i - O_i $	0
Raíz del error medio cuadrático (mm)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$	0
Índice de concordancia (adimensional)	$d_r = \begin{cases} 1 - \frac{MAE}{2MAD}, & MAE \leq 2MAD \\ \frac{2MAD}{MAE} - 1, & MAE > 2MAD \end{cases}$	1
Error sistemático, sesgo o BIAS (mm)	$BN = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)$	0
Coefficiente de correlación de Pearson (adimensional)	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}}$	1
Coefficiente de determinación (adimensional)	r^2	1

valores positivos y lo más cercanos a 1 posible. Sin embargo, un buen coeficiente de correlación no significa un buen modelo, porque este indicador no revela la escala ni la tendencia central de cada serie. En otras palabras, este indicador requiere que se mire a los anteriores que sí consideran esas características de las series. De manera semejante, el coeficiente de determinación, r^2 mide la fracción de la varianza de las observaciones explicada por el modelo.

El índice de concordancia d_r , mide la suma de la magnitud de las diferencias entre las observaciones y las predicciones del modelo (MAE) en comparación con la suma de las desviaciones de un modelo perfecto más las desviaciones de las observaciones (MAD), ambas con la media observada (Willmott, Robeson & Matsuura, 2012). Nótese que las desviaciones de un modelo perfecto respecto a la media observada son iguales a las desviaciones de las observaciones (MAD), esto explica el 2 en el denominador. La motivación de comparar MAE con $2MAD$ viene de interpretar $MAE = \sum |P_i - O_i| = \sum |(P_i - \bar{O}) - (O_i - \bar{O})|$. El valor de este indicador para un modelo perfecto es 1. Un valor de 0,5 significa que la suma de las magnitudes de los errores es la mitad de la suma de las desviaciones de un modelo perfecto más las desviaciones de las observaciones. Un valor de 0 indica que la suma de la magnitud de los errores es equivalente a la suma de las desviaciones de un modelo perfecto más las desviaciones de las observaciones. Los valores negativos del indicador significan que la suma de la magnitud de los errores es mayor que el doble de MAD .

Para los modelos que mejor se desempeñaron de acuerdo con los anteriores criterios y medidas del error, se realizó un análisis estacional-regional que consistió en la estimación de medias trimestrales para cada una de las regiones naturales de Colombia (Caribe, Andina, Orinoquía, Amazonía y Pacífica). Se estimó también el error relativo entre las estimaciones de los modelos y la media trimestral obtenida mediante un filtro por polígonos realizado a la base de datos MHN.

Resultados

La fase 1 del análisis píxel a píxel permitió identificar los modelos con menor error en la distribución espacial de la precipitación mensual del periodo 1975-2005. Si bien ningún modelo representa rigurosamente dicha distribución para todos los meses, pues la mayoría presentan problemas en la representación de los meses de Junio, Julio y Agosto, debe mencionarse que el modelo CMCC-CMS es el modelo que mejor lo hace. Otros modelos como el INMCM4, el MIROC5, MIROC-4h y los modelos MPI-ESMLR, MPI-ESM-P y MPI-ESM-MR, la representan medianamente bien y, el modelo HadCM3 representa pobremente la distribución. Los modelos restantes no la representan bien y algunos no exhiben ninguna variabilidad espacial de la precipitación, como es el caso de los modelos IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5B-LR e IPSL-CM5A-MR. Los modelos MIROC5 y MIROC-4h sobrestiman la precipitación sobre la zona centro de la región Andina. Todos los modelos representan mal la lluvia en el Pacífico.

En la fase 2 se encontró que en general las correlaciones exhiben un patrón regional bien definido, pues para la mayoría de los modelos se encontraron correlaciones significativas mayores a 0,5 para los pixeles ubicados en los departamentos de Córdoba, Sucre, Bolívar, Arauca y para partes de Vichada, partes de Antioquía (en especial en el golfo de Urabá) y partes de los Santanderes. Las correlaciones más bajas se ubicaron en el suroccidente del país, en la Amazonía, en el Pacífico y en el sur de la Región Andina. Los modelos CMCC-CMS, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, HadGEM2-CC, INMCM4, MIROC5, MIROC-4h, MPI-ESM-LR, MPIESM-P y MPI-ESM-MR, presentaron para las zonas mencionadas, correlaciones cercanas a 0.8 y en algunos casos mayores. La figura 1 muestra la distribución de las correlaciones mayores a 0,5 para los seis mejores modelos. Teniendo en cuenta que los modelos HadGEM2-(AO, ES y CC) y los modelos MPI-ESM-(LR, MR y P) presentan comportamientos muy similares, se escogió uno que representase cada uno de estos grupos. La figura 2

muestra ejemplos de la representación del ciclo anual para algunos pixeles ubicados en las zonas mejor correlacionadas. Los demás modelos no presentaron correlaciones altas y en el caso de MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, IPSLCM5A-LR, IPSL-CM5B-LR, IPSL-CM5A-MR presentaron correlaciones muy bajas. Como era de esperarse debido a la suavización, las correlaciones entre las series observadas y simuladas a escala trimestral y entre los ciclos anuales aumentaron para las zonas mencionadas, así como también el área de las regiones con buena correlación. Las correlaciones de las series estandarizadas, en ningún píxel y para ningún modelo sobrepasaron el rango -0.25 a 0.25, lo que muestra la dificultad de predecir la precipitación sobre una región tropical montañosa como Colombia.

En cuanto a las medidas del error debe decirse que se encontró un MAE mayor a 50 mm por mes para la mayoría del país, ubicándose dentro del intervalo 50-100 mm por mes para las zonas que se mencionó presentaban mejores correlaciones. Cómo era de esperarse y dado que los modelos

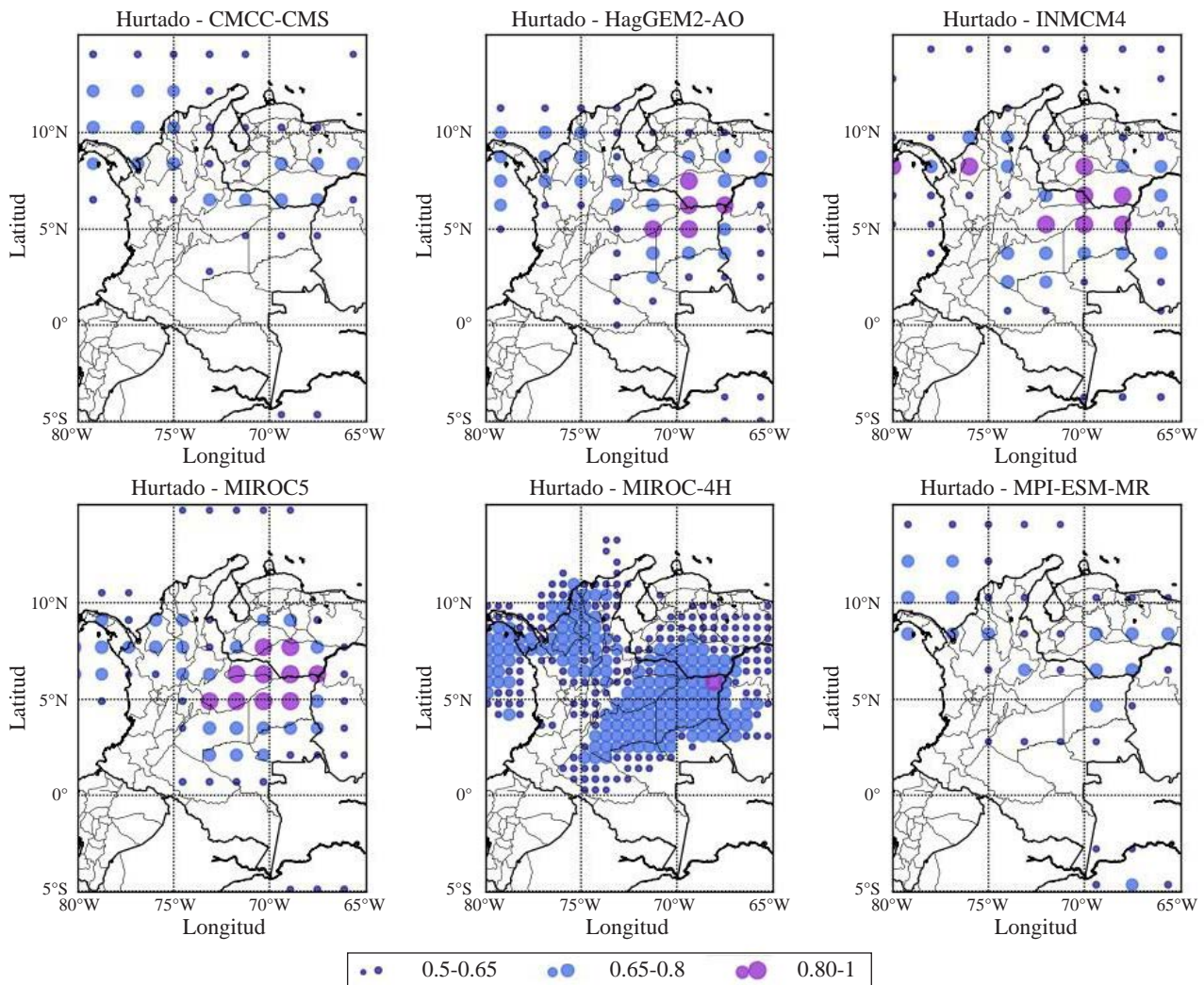


Figura 1. Correlaciones significativas mayores que 0,5 entre MHN y los modelos mejor correlacionados.

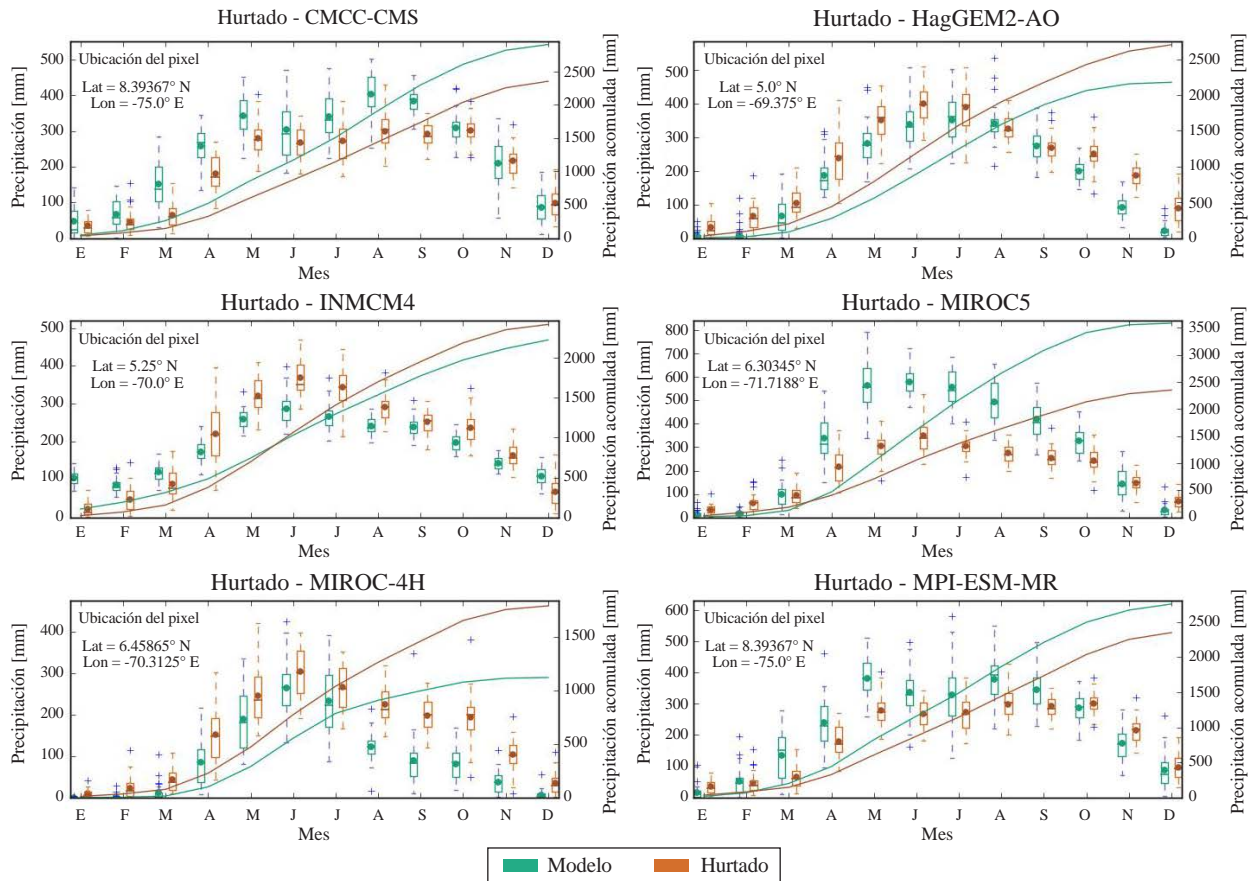


Figura 2. Ejemplo de ciclos anuales de pixeles ubicados en las regiones mejor correlacionadas para los mejores modelos. Curva de masa asociada.

no representaban bien la lluvia sobre el Pacífico, los mayores valores del *MAE* se encontraron en esa región del país. El comportamiento del *RMSE* tuvo un comportamiento similar al anterior, encontrándose valores que oscilaban entre 25-50 mm por mes para las zonas mejor correlacionadas. Los modelos con mejor desempeño fueron los mismos. Los modelos FGOALS-G2, IPSLCM5A(B)-LR e IPSL-CM5-LR, presentaron valores del *MAE* y *RMSE* mayores a 100 mm por mes para todo el país.

Los valores del índice de concordancia (d_c) en general fueron menores a 0,5 para gran parte del país y para casi todos los modelos, pero valores en el intervalo 0,6-0,75 se presentaron en la zona noroccidental y la zona de los llanos orientales para los mejores modelos mejor correlacionados, es decir, errores bajos. Los modelos FGOALS-G2, HadCM3, IPSL-CM5A(B)-LR e IPSL-CM5-LR, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-P y MPI-ESM-MR, presentaron valores generalizados menores al 0,5 para este índice, es decir todavía más malos. En general se presentaron valores negativos del d_c , en el Pacífico y para el caso de los modelos MIROC5 y MIROC-4h, en la región Andina, lo que refleja errores mayores al doble de la desviación absoluta. Los valores del error BIAS oscilaron entre -50 y 50 mm para

la mayoría del territorio nacional en los modelos mejor de mejor desempeño, presentándose subestimación para la mayoría del territorio y sobrestimación para la zona Andina y parte del Caribe. Las subestimaciones más altas se presentaron en la llanura Pacífica. Las figuras 3-6 presentan la distribución de estas medidas del error para los modelos mejor correlacionados.

Con el análisis regional-estacional se identificaron los modelos y los trimestres que representan mejor la precipitación en determinada región natural. Para el caso de la Región Pacífica no se tiene un buen desempeño de los modelos, pues a excepción de los modelos MIROC5 y MIROC-4h y para los trimestres SON y JJA respectivamente, no se tienen errores relativos pequeños. Para la Región Orinoquía se identificaron porcentajes de error relativamente bajos para las estimaciones de los modelos CMCC-CSM, HadGEM2-AO, INMCM4 y MIROC5 para los trimestres de MAM, JJA y SON. En el caso de la Región Caribe, la media trimestral mejor representada es la de MAM por los modelos CMCC-CSM, HadGEM2-AO, MIROC5 y MIROC-4h aunque el trimestre SON es bien estimado por CMCC-CSM, HadGEM2-AO y MIROC5. Para la Región Andina solo se tienen estimaciones aceptables por parte

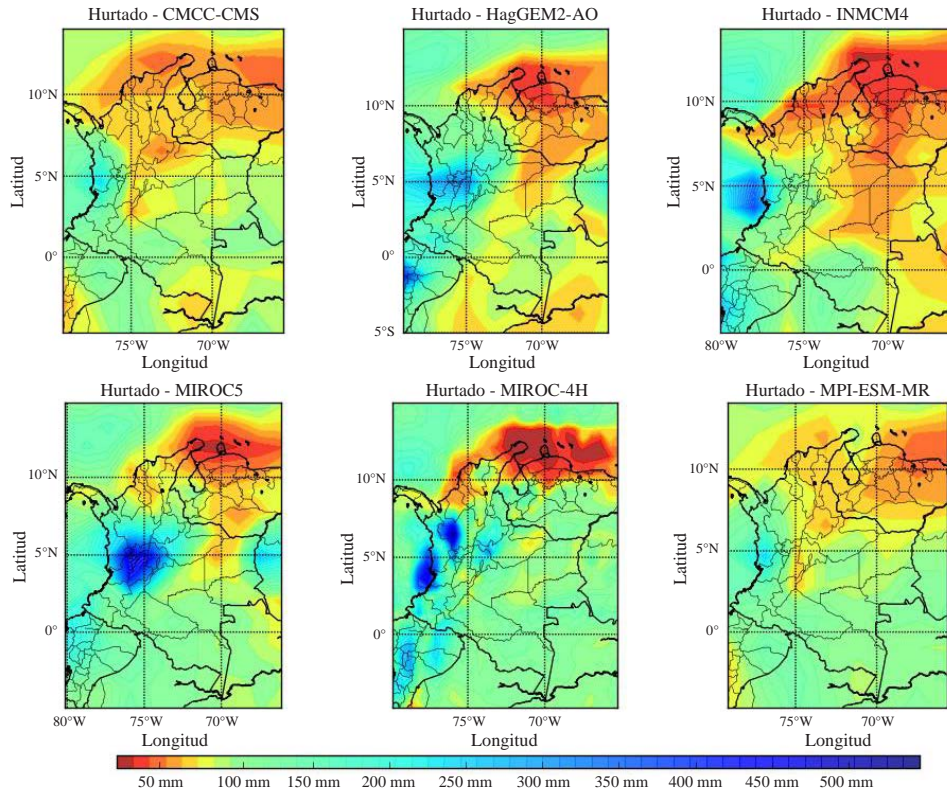


Figura 3. MAE para los mejores modelos.

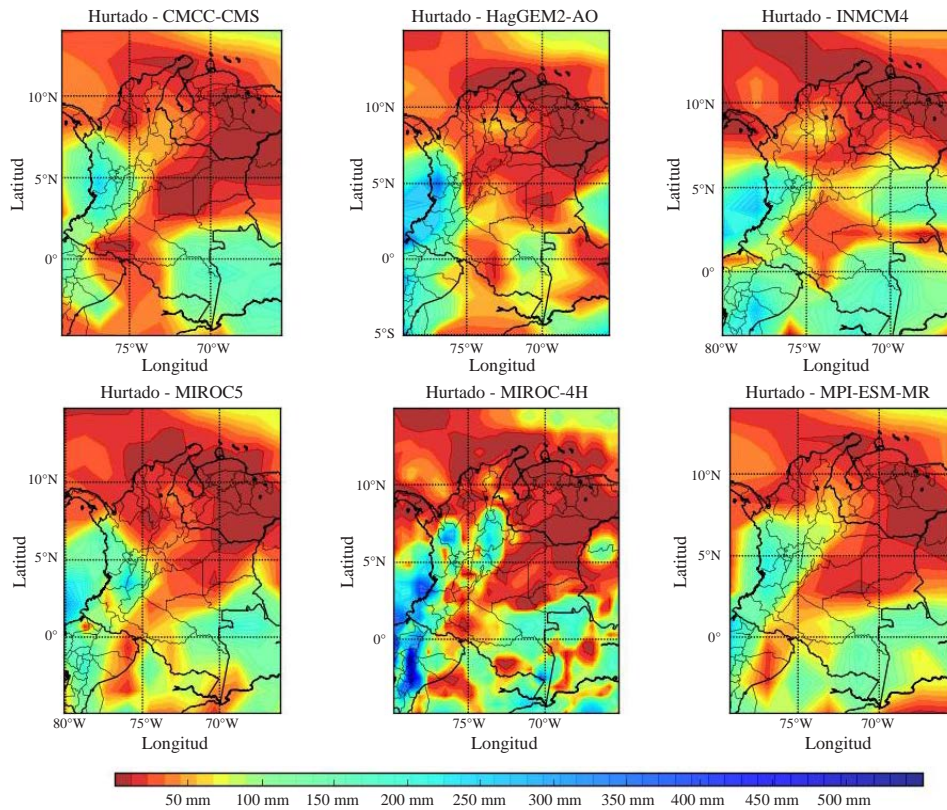


Figura 4. RMSE para los mejores modelos.

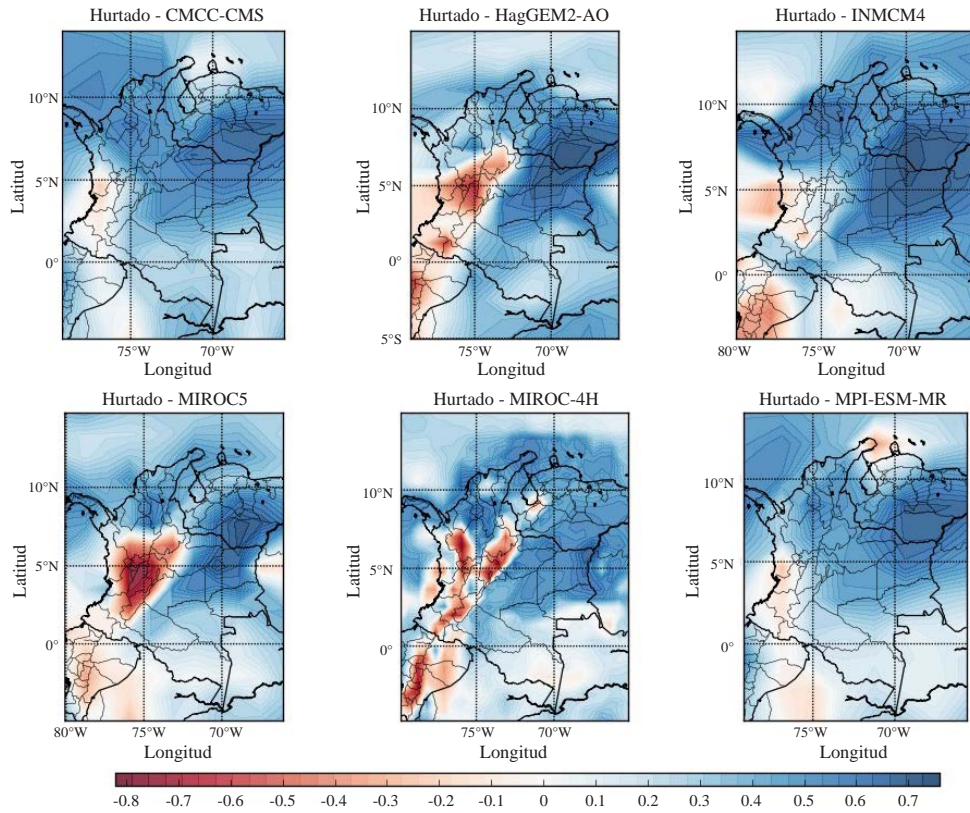


Figura 5. d_r para los mejores modelos.

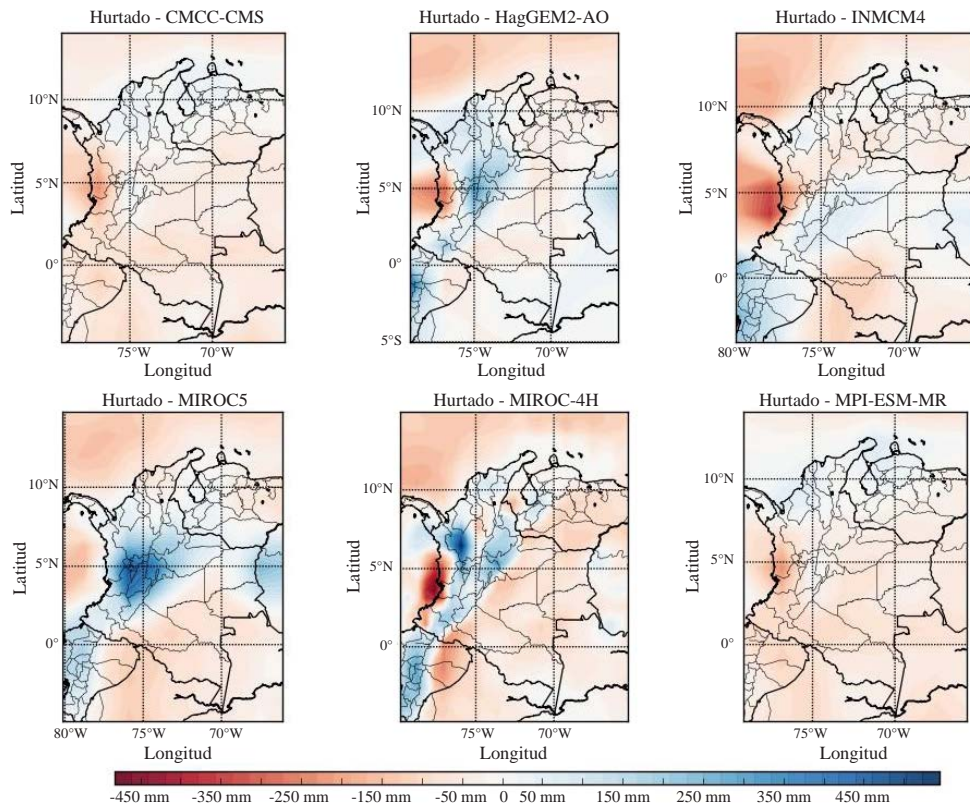


Figura 6. Error BIAS para los mejores modelos.

del modelo CMCC-CMS para los trimestres MAM, JJA y SON. Y para la Región Amazónica el modelo HadGEM2-AO presenta buenas estimaciones para los cuatro trimestres. La figura 7 presenta las medias trimestrales regionales y el total anual estimado por los mejores modelos y la base de datos MHN.

Se considera que el hecho de que las correlaciones significativas más altas se hayan presentado en la zona noroccidental del país y en las zonas de la Orinoquía, permite pensar que los modelos tienen fuertes deficiencias en la representación de la topografía y quizá de los procesos convectivos, determinantes de la precipitación del país.

Aunque hay consistencia entre los errores medios absolutos, las raíces del error medio cuadrático, los valores del BIAS y del índice d_r , y se puedan considerar aceptables para las regiones que presentaron buenas correlaciones, no puede decirse en rigor que los modelos tengan un buen desempeño o realicen una buena representación de la precipitación sobre el territorio nacional durante el período histórico. Y el hecho de que sumado a eso ningún modelo sea suficientemente bueno en cuanto a la representación de las medias trimestrales para todas las Regiones naturales, es una señal clara de la incertidumbre.

Aunque algunos de los resultados reseñados sobre el estudio de **IDEAM & Rodríguez (2012)** se comparten en este estudio, como por ejemplo que los errores más bajos se tengan en la zona Caribe y que allí mismo tengan lugar las correlaciones más altas, no es fácil hacer comparaciones entre ambos estudios pues las bases de datos usadas para la validación son diferentes, aunque provienen de las mismas observaciones.

Podría decirse que algunos modelos representan bien el ciclo anual de la precipitación en algunos pixeles de la región Caribe y Orinoquía en cuanto a las inflexiones entre temporadas secas y húmedas, pero la figura 2 claramente muestra que la media anual acumulada representada por las curvas de masa no es similar en algunos casos.

Llegados a este punto es importante resaltar que es mejor el estudio de las tendencias observadas en la información primaria que el uso de modelos globales que simulan la precipitación en un territorio tan complejo como el colombiano (**Mesa & Hurtado, 2015**). Lo anterior seguirá siendo válido hasta que se disminuya la incertidumbre en los MGCs. Aparte, también deben evaluarse para Colombia las corridas de otros experimentos del CMIP5, tales como la AMIP, HistoricaNat, HistoricalGHG e HistoricalMisc,

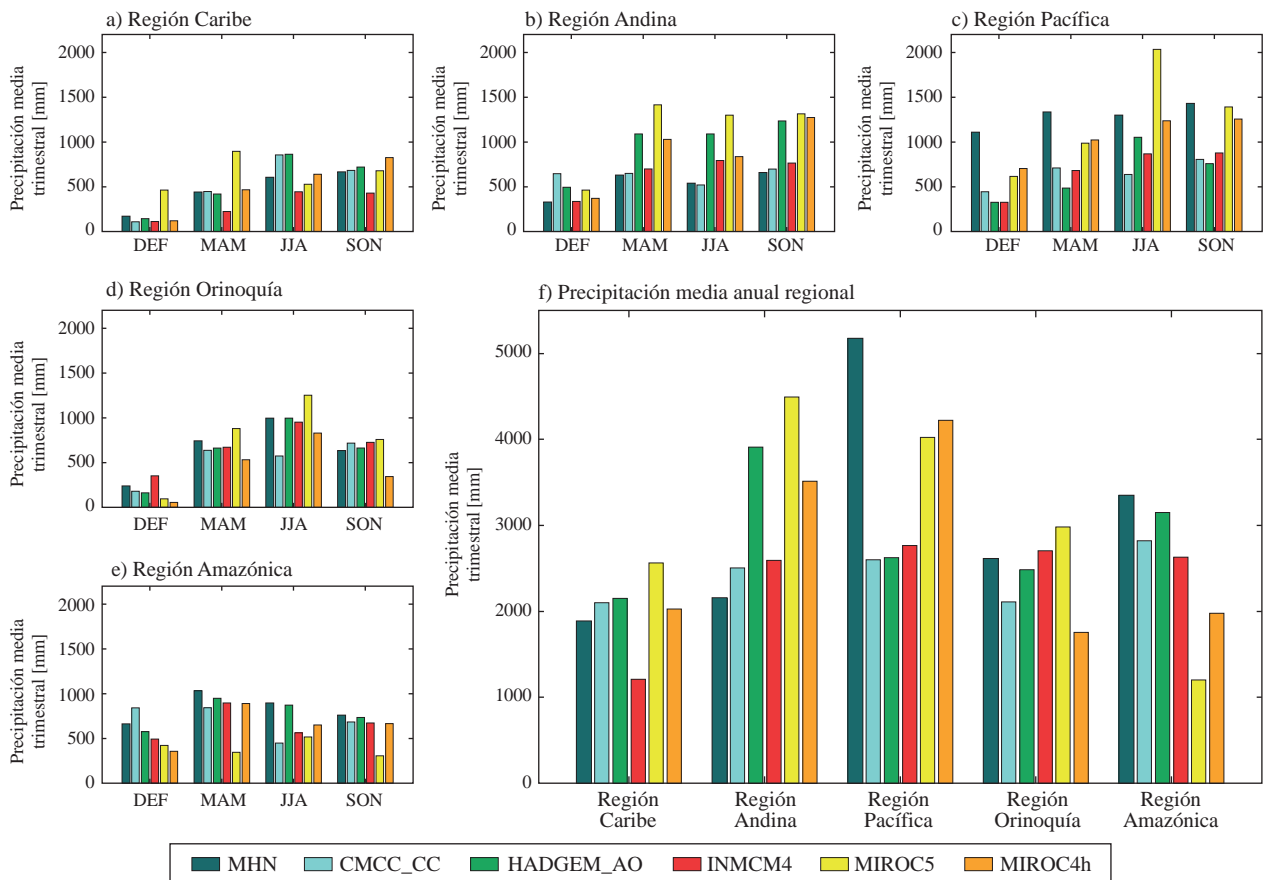


Figura 7. Precipitación media trimestral (a,b,c,d,e) y precipitación media anual (f) de cada región natural en Colombia según la base de datos MHN y según los modelos del CMIP5 que mejor se desempeñaron.

puesto que incluyen otros forzamientos, como la temperatura del mar, que eventualmente pueden producir mejores correlaciones, dado el conocido efecto del fenómeno ENSO sobre la hidrología de Colombia.

Conclusiones

Ninguno de los modelos del CMIP5 evaluados representa adecuadamente el ciclo anual de precipitación en el territorio colombiano. El modelo que más cercano está de hacerlo es el modelo CMCC-CMS.

Los modelos CMCC-CMS, HadGEM2-AO, HadGEM2-ES, HadGEM2-CC, INMCM4, MIROC5, MIROC-4h, MPI-ESM-LR, MPIESM-P y MPI-ESM-MR presentan correlaciones significativas entre las observaciones y las simulaciones, con valores mayores a 0,6 para la zona norte de la Orinoquía y para la zona Caribe excluyendo su parte más norte, y correlaciones cercanas a 0,8 para los ciclos anuales pixel-pixel. En consecuencia, se representan aceptablemente los ciclos anuales en dichos píxeles. Sin embargo, las correlaciones para las series estandarizadas, en ningún píxel y para ningún modelo sobrepasaron el rango -0,25 a 0,25, lo que muestra la dificultad de predecir la precipitación sobre una región tropical montañosa como Colombia.

Las medidas del error usadas presentan los resultados más favorables para las regiones que presentan también las mejores correlaciones, aunque no son buenas en general. El índice de concordancia por ejemplo es inferior a 0,5 y negativo en algunas regiones.

No existe una representación generalizada de las medias trimestrales para las regiones naturales para ningún modelo. La región Orinoquía es a la que corresponden las mejores estimaciones para los trimestres MAM, JJA y SON por los modelos CMCC-CMS, HadGEM2-AO, INMCM4 y MIROC5.

El uso de estos modelos para la toma de decisiones no es recomendable y es necesario persistir en un esfuerzo de mayor envergadura para acercarnos a respuestas útiles a la pregunta trascendental sobre cuál será el impacto del cambio climático sobre la precipitación de Colombia.

Se sugiere la conformación de un panel nacional de expertos que enfrente con toda su dimensión la pregunta y produzca informes de consenso que sirvan de apoyo para que los responsables de las decisiones cuenten con la mejor información posible. Están en juego asuntos de mucha trascendencia, con importantes implicaciones no solo económicas, sociales y ambientales sino también científicas. La participación debe ser amplia, los criterios deben ser los de la ciencia: comprobación con observaciones y rigor conceptual. La magnitud y trascendencia del asunto merece la creación de un programa nacional de investigación, construido a partir de las fortalezas existentes y abiertas a la cooperación internacional.

Conflicto de intereses

Los autores del presente artículo manifestamos que no existe conflicto de intereses a nivel personal, comercial, académico, político o financiero.

Referencias

- Cantor, D., & Ochoa, A.** (2011). Señales de cambio climático en series de lluvia en Antioquia. <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.1573.0326>
- Carmona, A. M., & Poveda, G.** (2014). Detection of long-term trends in monthly hydro-climatic series of Colombia through Empirical Mode Decomposition. *Climatic Change*, **123** (2): 301-313. article. <http://doi.org/10.1007/s10584-013-1046-3>
- Flato, G., J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S.C. Chou, W. Collins, P. Cox, F. Driouech, S. Emori, V. Eyring, C. Forest, P. Gleckler, E. Guilyardi, C. Jakob, V. Kattsov, C. Reason and M. Rummukainen.** (2013). Evaluation of Climate Models. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Hurtado, A.** (2009). *Estimación de los campos mensuales históricos de precipitación en el territorio colombiano*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Hurtado, A. F., & Mesa, O. J.** (2015). Cambio climático y variabilidad espacio-temporal de la precipitación en Colombia. *Revista EIA*, **12** (24): 131-150
- Hurtado, A. F. & Mesa, O. J.** (2014) Reanalysis of monthly precipitation fields in Colombian territory. *Dyna*, **81** (186): 251-258.
- IDEAM, Mayorga, R., Hurtado, G., & Benavides, H.** (2011). Evidencias de cambio climático en Colombia con base en información estadística. *Ideam-Meteo*. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Evidencias+de+Cambio+Clim%C3%A1tico+en+Colombia+con+base+en+informaci%C3%B3n+estad%C3%ADstica.pdf/1170efb4-65f7-4a12-8903-b3614351423f>
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLETERÍA.** (2015). *Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011- 2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*. Bogotá.
- IDEAM, & Rodríguez, A.** (2010). Evaluación de los modelos globales del clima utilizados para la generación de escenarios de cambio climático con el clima presente en Colombia. *Ideam-Meteo*.
- IDEAM, & Rodríguez, A.** (2012). Evaluación de las simulaciones de precipitación y temperatura de los modelos climáticos globales del proyecto CMIP5 con el clima presente en Colombia. *Ideam-Meteo*, 34. Retrieved from <http://fs03eja1.cornmagdalena.com.co/nuevaweb/Niveles/Definiciones.pdf>
- IDEAM, & Ruíz, J. F.** (2010). Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (PANORAMA 2011-2100). *Ideam-Meteo*.
- Koutroulis, A. G., Grillakis, M. G., Tsanis, I. K., & Papadimitriou, L.** (2015). Evaluation of precipitation and temperature simulation performance of the CMIP3 and CMIP5 historical experiments. *Climate Dynamics*, 1-18. <http://doi.org/10.1007/s00382-015-2938-x>

- Legates, D. R., & McCabe, G. J.** (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydro-climatic model validation. *Water resources research*, **35** (1): 233-241.
- Mesa, O.J.** (2007). *¿Adónde va a caer este Globo? Acerca del futuro de la Tierra*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. 328 p.
- Mesa, O., Poveda, G., & Carvajal, L.** (1997). *Introducción al clima de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Pabón, J. D.** (2005). Escenarios de Cambio climático para territorio colombiano. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia y Conservación Internacional.
- Petisco, E.** (2008). *Método de regionalización de precipitación basado en análogos*.
- Poveda, G.** (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, (28).
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A.** (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*. **93** (4), 485-498. <http://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Urrea, V., Ochoa, A., & Mesa, O.** (2016). Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el periodo 1981-2014. Lima.
- Willmott, C. J., Robeson, S. M., & Matsuura, K.** (2012). A refined index of model performance. *International Journal of Climatology*. **32** (13): 2088-2094. <http://doi.org/10.1002/joc.2419>