



Sociedad Colombiana
de Ingenieros



Sociedad Tolimense
de Ingenieros

**XXIII Seminario
Nacional
DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA**

**XXIII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E
HIDROLOGÍA.
IBAGUÉ, 15 AL 17 DE AGOSTO DE 2018.**

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LOS MODELOS
CLIMÁTICOS DEL CMIP3 Y CMIP5 PARA PREDECIR EL NIÑO Y
SUS EFECTOS SOBRE LA PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA**

Eisinhower Rincón, Angéla M. Rendón, Juan F. Salazar.

*Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA) – Universidad de Antioquia, Medellín,
Antioquia, Colombia, eisinhower.rincon@udea.edu.co, angela.rendon@udea.edu.co,
juan.salazar@udea.edu.co*

RESUMEN:

Los modelos climáticos son herramientas esenciales para la predicción de impactos del cambio climático. En Colombia, es fundamental que dichos modelos predigan los efectos hidrológicos de El Niño. En este estudio realizamos una evaluación cuantitativa de la capacidad de los modelos del CMIP3 y CMIP5 para representar la ocurrencia de El Niño y sus efectos sobre la hidrología colombiana. Encontramos que ambas generaciones de modelos tienen una capacidad limitada para predecir la ocurrencia de El Niño según el índice ONI. Sin embargo, tanto CMIP3 como CMIP5 representan, de manera asincrónica, algunos de los principales efectos de El Niño sobre la precipitación, con una alta variabilidad de resultados entre los distintos modelos. En general, el promedio de los modelos es más cercano a las observaciones que los modelos individuales. Nuestros resultados evidencian importantes retos para la modelación de los efectos hidrológicos del cambio climático en Colombia.

ABSTRACT

Climate models are essential tools to for predicting the climate change impacts. In Colombia, it is key that this models predict thehydrological effects associated with El Niño. In this study we conducted a cuantitative evaluation about the performance of CMIP3 and CMIP3 models to represent the occurrence of El Niño and its effects over colombian hydrology. We found that both model generations have a limited capacity to predict the El Niño according to the ONI. However, both CMIP3 and CMIP5 represent, asynchronously, some of the main effects of the El Niño over precipitation with high dispersion between the models. In general, the model ensemble is closer to the observations in both generations. Our results suggest that important challenges in modelling hydrological effects of climate change still remains.

PALABRAS CLAVE: CMIP3, CMIP5, El Niño effects, Climate Change

Mayor Información

**Comisión Técnica Permanente
de Ingeniería de Recursos Hídricos**

57 (1) 5550520 logistica@sci.org.co



INTRODUCCIÓN

El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) es el fenómeno climático dominante que afecta las condiciones del tiempo atmosférico en todo el planeta (Philander, 1983; Poveda & Mesa, 1997; Vos et al., 1999; Changnon, 1999; Poveda et al., 2004, 2006, 2011; Hoyos et al., 2013; Arias et al., 2015; Hardiman 5 et al., 2017). Cada día se tiene más claridad de la importancia de mejorar nuestra capacidad para predecir el ENSO y sus impactos asociados como parte activa de los procesos de toma de decisiones, particularmente aquellos que tienen que ver con sectores de la agricultura, agua y la salud, así como para el diseño de estrategias de adaptación relacionadas con el ENSO y el cambio climático (Vorösmarty, 2000; McPhaden et al., 2006; Lobell et al., 2008; Zebiak et al., 2015). Sin embargo, los modelos climáticos más recientes han mostrado poca capacidad para representar el ENSO y sus impactos en el ambiente (e.g. AchutaRao & Sperber, 2006; Guilyardi, 2006; Jin et al., 2008; Hirota & Takayabu, 2013; Bellenger et al., 2014; Jha et al., 2014; Sierra et al., 2015).

Las proyecciones climáticas del Proyecto de Intercomparación de Modelos (CMIP, por sus siglas en inglés) son la principal herramienta para el estudio del cambio climático en el planeta y estos se han usado en distintas partes para cuantificar los impactos asociados al cambio climático (Vera et al., 2006; Salazar et al., 2007; Seth et al., 2010; Hirabayashi et al., 2013; Cai et al., 2014, 2015b; Kim et al., 2014; Steinhoff et al., 2014; Lee & Wang, 2014; IDEAM et al., 2015; Wang et al., 2017). Aunque no hay evidencia suficiente para asociar cambios en el ENSO debidos al cambio climático, investigaciones recientes sugieren que la posibilidad de aumentos en la frecuencia de ocurrencia del ENSO en el futuro bajo condiciones de cambio climático (Lenton et al., 2008; Kim et al., 2014; Cai et al., 2014, 2015a,b; Wang et al., 2017).

Estudiar y cuantificar la capacidad que tienen las dos fases más recientes del proyecto CMIP (CMIP3 y CMIP5) para representar el ENSO es fundamental dado que, aunque se han reportado mejoras entre generaciones (Yin et al., 2013; Sierra et al., 2015; Bellenger et al., 2014), CMIP5 aún tiene una capacidad limitada para representar las fases extremas del ENSO (Bellenger et al., 2014). Ganar mayor confianza en la representación del ENSO es fundamental, particularmente, regiones como el noroeste de Suramérica, que ha sido identificada como una de las más vulnerables al cambio climático (Magrin et al., 2014) y donde el ENSO tiene una influencia marcada en los patrones de precipitación (Poveda & Mesa, 1997; Poveda et al., 2004).

Países como Colombia han sido fuertemente afectados por la ocurrencia de fases extremas del ENSO, por ejemplo El Niño 1991-1992 colapsó el sistema energético del país (Poveda et al., 2003; Santa María et al., 2009), provocando grandes pérdidas económicas para distintos sectores. Por lo tanto, en este trabajo realizamos una evaluación de la representatividad de los modelos CMIP3 y CMIP5 en representar los patrones hidrológicos asociados al ENSO y la frecuencia de ocurrencia de acuerdo con el ONI.

Mayor Información

DATOS Y MÉTODOS

Para evaluar la ocurrencia temporal del ENSO usamos Índice del Niño Oceánico (ONI, por sus siglas en inglés), el cual es ampliamente usado por la NOAA y las autoridades Colombianas para determinar condiciones extremas del ENSO. El ONI está disponible en la siguiente dirección online: http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php para su descarga. Por otra parte, la información de precipitación se obtuvo de distintas bases de datos. Las bases de datos usadas con su respectiva referencia se encuentran en la tabla 1.

Tabla 1.- Bases de datos utilizadas

Nombre	Resolución	Fecha	Referencia
TRMM	0.25°	1998-2016	Huffman et al. (2007)
MSWEP	0.25°	1979-2016	Beck et al. (2017)
GPCP	2.5°	1979-2018	Adler et al. (2003)
GPCC	0.5°	1901-2014	Schneider et al. (2014)

La información de los modelos CMIP3 y CMIP5 se obtuvo desde el Programa de Diagnóstico e Intercomparación de Modelos (PCDMI, por sus siglas en inglés) a través de la siguiente dirección online: <https://esgf-node.llnl.gov/>. De estos modelos se utilizaron las variables precipitación y temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés). La precipitación simulada se comparó con la observada a partir del coeficiente de correlación y diferencias mensuales. Por otra parte, el ONI se cuantificó para cada modelo a partir de la SST como el promedio el promedio móvil de tres meses sobre la región Niño 3.4 (5N–5S, 120W–170W). Las fases de El Niño se definen como valores del ONI mayores a +0.5°C por 5 al menos 5 meses consecutivos. Luego, a partir de diagramas de Taylor (Taylor, 2001) se cuantificó la correspondencia entre el ONI simulado y el observado.

RESULTADOS

La figura 1 muestra la serie temporal ONI observada y modelada. Se puede ver claramente que la envolvente muestra una alta variabilidad respecto a lo observado. Por otra parte, un hecho interesante es que el promedio de todos los modelos (ensemble de aquí en adelante) suaviza la ocurrencia de picos en ambas generaciones. Esto sugiere entonces que los ensemble de CMIP3 y CMIP5 no son una estimación confiable del ONI. La figura 1 no muestra una mejora clara entre CMIP3 y CMIP5

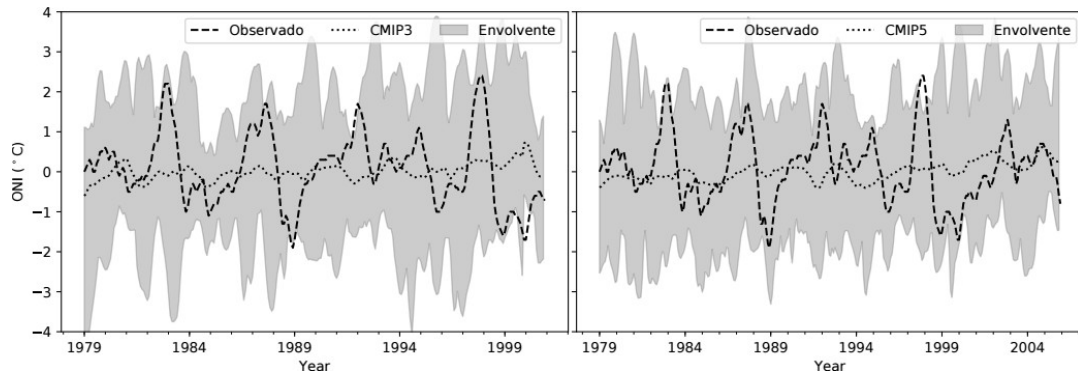


Figura 1.- Serie temporal de ONI observado y modelado.

Aunque la envolvente deja ver franja grande de variabilidad en la figura 1, con la figura 2 se analiza individualmente como se comporta cada modelo. Esta figura muestra que no existe un modelo que represente significativamente bien la variabilidad temporal del ONI. Los mejores modelos son HADCM3 de CMIP3 y MPI-ESM-P de CMIP5. Cabe destacar que HADCM3 fue el mejor en CMIP3, pero reduce notablemente su representatividad en CMIP5.

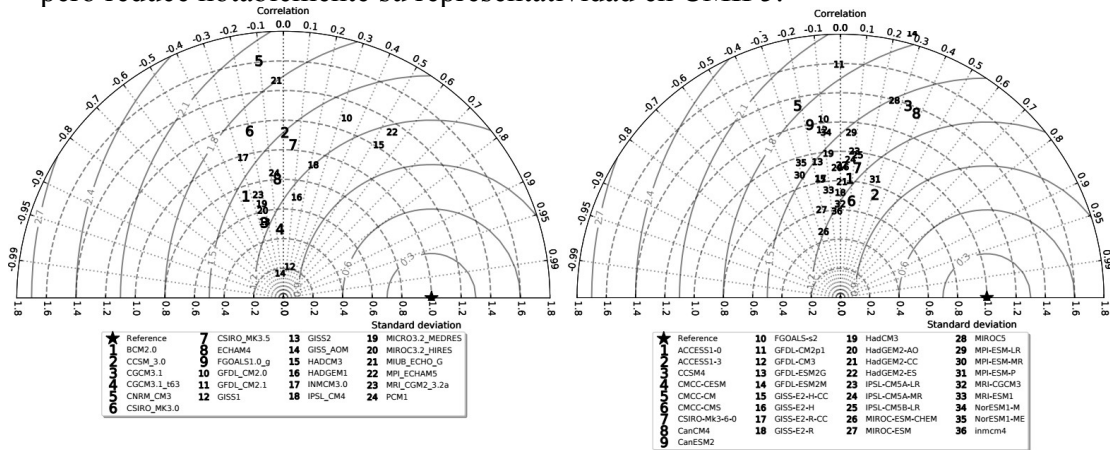


Figura 2.- Diagramas de Taylor que cuantifican la correspondencia entre el ONI observado y modelado.

La mayoría de modelos de CMIP3 y CMIP5 producen correlaciones negativas, lo que indica una asincronía entre el ONI observado y el modelado. Las correlaciones más altas encontradas en CMIP3 fueron entre 0.5 y 0.6 para los modelos HADCM3 y MPI ECHAM5, mientras que para CMIP5 la mayor correlación está por debajo de 0.4 y corresponde al modelo CanCM4.

Algunos modelos muestran una desviación estándar cercana a la observada (e.g. INMCM3.0 y CSIRO MK3.5 de CMIP3 y HadGEM2-ES y IPSL-CM5B-LR de CMIP5), pero la mayoría de ellos, tanto CMIP3 como CMIP5 están por debajo de lo observado. De hecho GISS1 y GISS-AOM de CMIP3 producen la desviación estándar más pequeña (alrededor del 20% de la observada), indicando poca o nula variabilidad temporal. Además, los modelos GISS en CMIP5 producen desviaciones más cercanas a lo observado, lo que sugiere una mejora intergeneracional.

En la figura 3 se puede ver un interesante efecto contrastante en la precipitación sobre NSA. Durante Diciembre-Enero-Febrero (DEF) y Marzo-Abril-Mayo (MAM), las anomalías de precipitación causadas por El Niño son predominantemente negativas sobre Colombia, mientras que sobre la costa Pacífica de Ecuador son mayoritariamente positivas. Este efecto se analiza más a fondo en Rincon et al. (2018, preparado para subir).

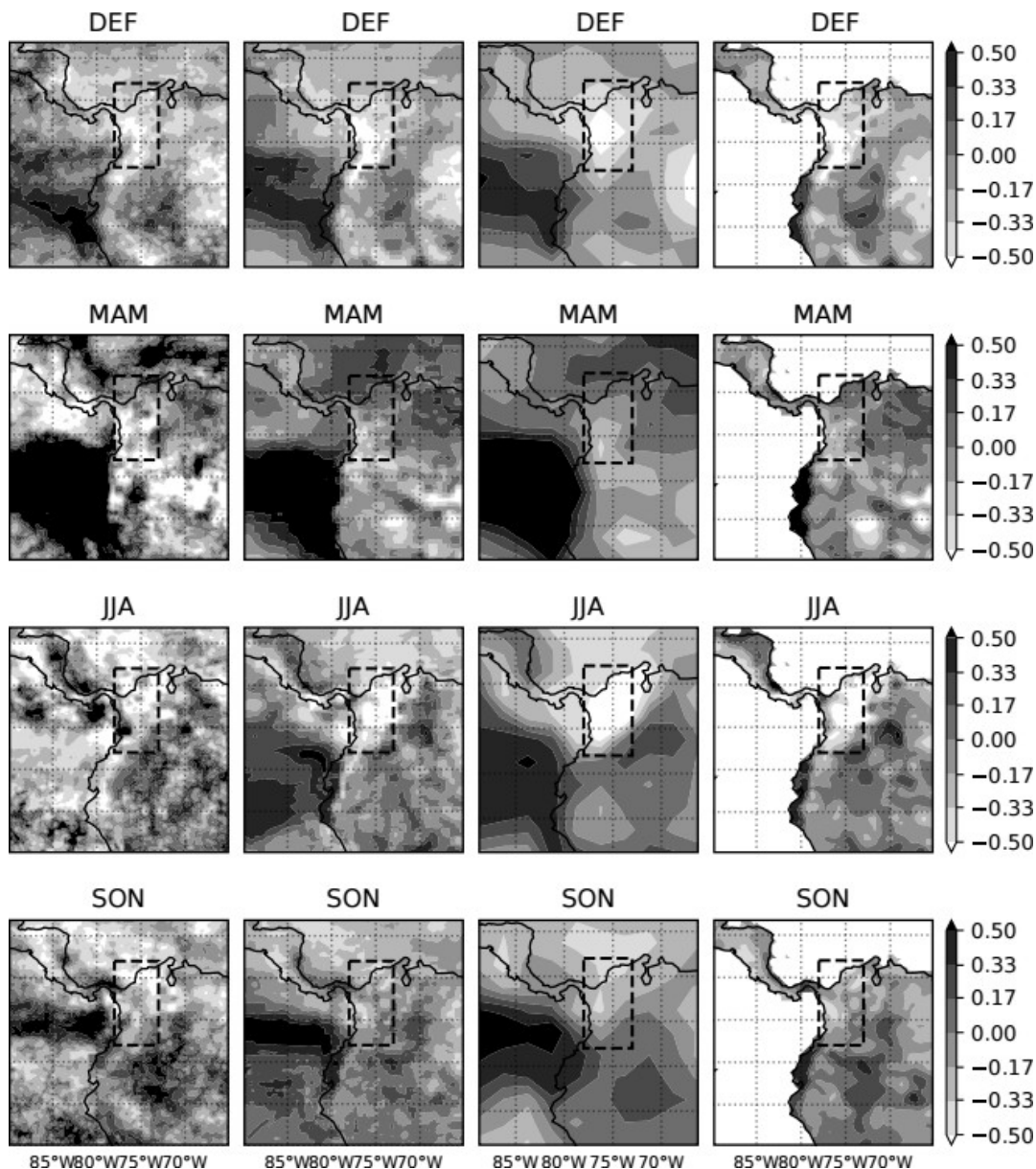


Figura 3.- Diferencias estacionales de mapas compuestos de El Niño para diferentes bases de datos. La columna 1 es TRMM, la segunda MSWEP, la tercera GPCP y la cuarta GPCP.

Colombia se caracteriza por tener un ciclo bimodal de precipitación sobre la región Andina, característica que todas las bases de datos capturan (Figura 4 a,b). Además, se puede ver que las anomalías de lluvia sobre dicha región son principalmente negativas durante la época de El Niño (Figuras 4 c,d). El ensemble tanto de CMIP3

Mayor Información

como de CMIP5 captura en buena medida el comportamiento bimodal de la precipitación en dicha zona y además, con tendencia a subestimar la precipitación en los meses más secos (DEFM) (Figuras 4 a,b).

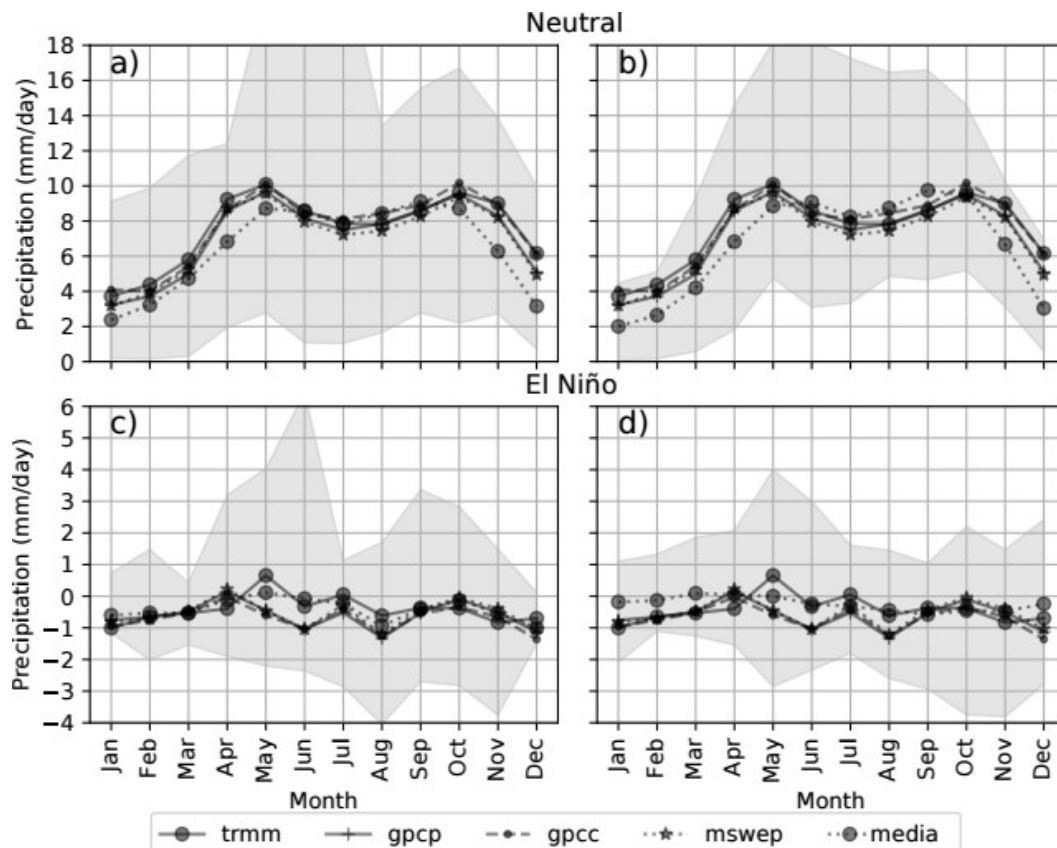


Figura 4.- Ciclo anual de precipitación sobre la región central de Colombia observado y modelado.

La envolvente de los modelos indica una alta variabilidad entre cada modelos (Figuras 4 a,b). Al analizar el rendimiento de los modelos durante El Niño se puede observar que CMIP3 representa mejor la precipitación que CMIP5 (Figura 4 d). Dado el efecto tan importante que tiene El Niño sobre los recursos hídricos en Colombia, subestimar la lluvia, principalmente en épocas de sequía (DEF, Figura 4d) es una limitante fuerte en la generación actual de modelos. En términos generales no se encontró una mejora de CMIP3 a CMIP5.

A pesar de las limitantes mostradas anteriormente, la mayoría de modelos muestran un ciclo anual de lluvias altamente correlacionado con el observado, inclusive durante condiciones El Niño (Figura 5). Las mejores (peores) correlaciones fueron encontradas en CMIP5 (CMIP3). En CMIP5 por ejemplo se puede ver que el modelo MIROC5 representa significativamente bien dicha bimodalidad, con coeficientes de correlación mayores que 0.9. Por otra parte, los modelos GISS muestran la más baja correlación para CMIP3, aunque notablemente hubo una mejora en CMIP5. La correlación más baja para CMIP5 corresponde al modelo CMCC-CESM, tanto para el estado Neutral como El Niño.

Mayor Información

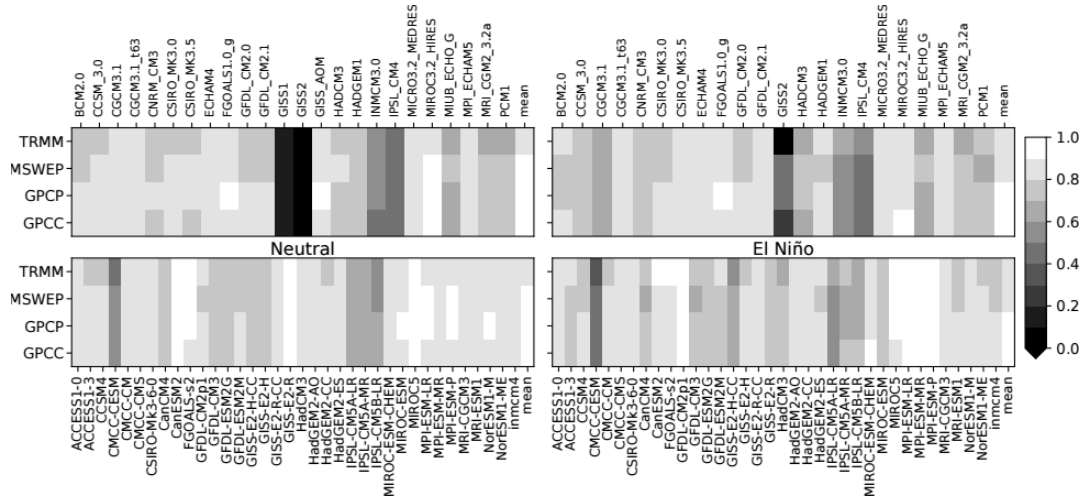


Figura 5.- Correlaciones entre ciclos anuales observados y modelados sobre la región central de Colombia. El panel superior corresponde a CMIP3 y el panel inferior a CMIP5.

Sin embargo, aunque los modelos capturen bien la estacionalidad, la envolvente deja entrever que existen diferencias entre modelos. Para ello, en la figura 6 se muestra una diferencia mensual entre los valores de lluvia modelados y observados.

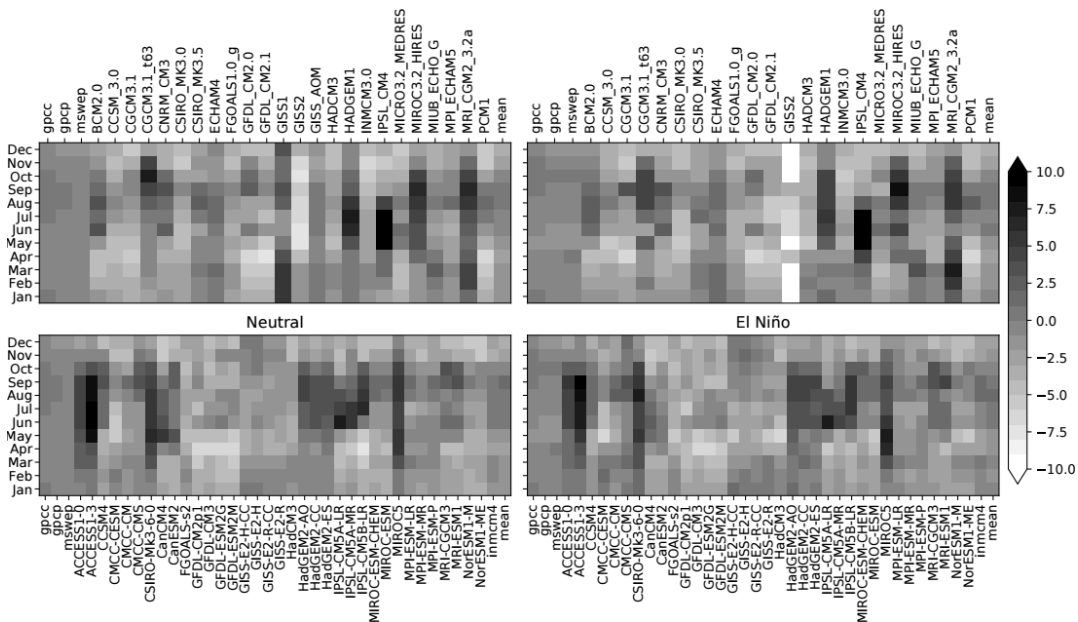


Figura 6.- Diferencias mensuales entre base de datos de referencia (TRMM) y las demás bases de datos, modelos y ensemble. El panel superior corresponde a CMIP3 y el inferior a CMIP5

De esta figura se ve claramente una subestimación de la precipitación durante todo el año por la mayoría de modelos. Este patrón es común en CMIP3 y CMIP5 tanto para condiciones Neutrales como para las condiciones El Niño. Sin



embargo, algunos modelos individuales muestra un patrón opuesto. El modelo MIROC5 de CMIP5 por ejemplo sobreestima la precipitación sobre Colombia, principalmente en los meses secos (DEF).

El análisis de correlación temporal y las diferencias mensuales muestran que el modelo MIROC5 reproduce bien las anomalías de precipitación causadas por El Niño sobre Colombia con un error sistemático (subestimación), el cual debería ser introducido en las proyecciones de cambio climático.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo realizamos una evaluación de los modelos de circulación actual. Mostramos que estos modelos climáticos tienen una capacidad limitada para representar la fase cálida del ENSO a través del ONI. El ensemble tanto de CMIP3 como de CMIP5 no es una buena estimación del ONI puesto que la agregación estadística de todos los modelos tiende a suavizar los picos máximos y mínimos de este índice. En general, la mayoría de modelos tienden a simular un ONI desfasado temporalmente con el observado, en algunos casos aumentando su frecuencia, disminuyéndola o simplemente sin mostrar ningún tipo de variabilidad interanual.

A pesar del comportamiento asincrónico, algunos modelos tienden a simular el efecto sobre la precipitación bajo condiciones El Niño. Particularmente el ensemble, quién tiene un mejor rendimiento respecto a los demás modelos. Sin embargo, la subestimación de la lluvia que presenta a lo largo del año deja claro que existen falencias por subsanar en la actual generación de modelos. En general, nuestros resultados muestran que no existe una mejora significativa entre CMIP3 y CMIP5, por lo cual persisten retos importantes en términos de modelación hidrológica y climática.

REFERENCIAS

AchutaRao, K., & Sperber, K. R. (2006). “ENSO simulation in coupled ocean-atmosphere models: are the current models better?”. *Climate Dynamics*, 27(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s00382-006-0119-7>

Adler, R. F., Huffman, G. J., Chang, A., Ferraro, R., Xie, P.-P., Janowiak, J., ... Nelkin, E. (2003). “The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979–Present)”. *Journal of Hydrometeorology*, 4(6), 1147–1167. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2003\)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2003)004<1147:TVGPCP>2.0.CO;2)

Arias, P. A., Martínez, J. A., & Vieira, S. C. (2015). “Moisture sources to the 2010–2012 anomalous wet season in northern South America”. *Climate Dynamics*, 45(9–10), 2861–2884. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2511-7>

Beck, H. E., van Dijk, A. I. J. M., Levizzani, V., Schellekens, J., Miralles, D. G., Martens, B., & de Roo, A. (2017). “MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 589–615. <https://doi.org/10.5194/hess-21-589-2017>

Bellenger, H., Guilyardi, E., Leloup, J., Lengaigne, M., & Vialard, J.

Mayor Información



(2014). “ENSO representation in climate models: from CMIP3 to CMIP5”. *Climate Dynamics*, 42(7–8), 1999–2018. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1783-z>

Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M., van Rensch, P., Collins, M., Vecchi, G., ... Jin, F.-F. (2014). “Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming”. *Nature Climate Change*, 4(2), 111–116. <https://doi.org/10.1038/nclimate2100>

Cai, W., Santoso, A., Wang, G., Yeh, S.-W., An, S.-I., Cobb, K. M., ... Wu, L. (2015). “ENSO and greenhouse warming”. *Nature Climate Change*, 5(9), 849–859. <https://doi.org/10.1038/nclimate2743>

Changnon, S. A. (1999). “Impacts of 1997-98 El Niño - Generated Weather in the United States”. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(9), 1819–1827. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<1819:IOENOG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<1819:IOENOG>2.0.CO;2)

Guilyardi, E. (2006). “El Niño-mean state - Seasonal cycle interactions in a multi-model ensemble”. *Climate Dynamics*, 26(4), 329–348. <https://doi.org/10.1007/s00382-005-0084-6>

Hardiman, S., Dunstone, N., Scaife, A., Bett, P. E., Li, C., Lu, B., ... Stephan, C. C. (2017). “The asymmetric response of Yangtze river basin summer rainfall to El Niño/La Niña”. *Environmental Research Letters*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa172>

Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., ... Kanae, S. (2013). “Global flood risk under climate change”. *Nature Climate Change*, 3(9), 816–821. <https://doi.org/10.1038/nclimate1911>

Hirota, N., & Takayabu, Y. N. (2013). “Reproducibility of precipitation distribution over the tropical oceans in CMIP5 multi-climate models compared to CMIP3”. *Climate Dynamics*, 41(11–12), 2909–2920. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1839-0>

Hoerling, M. P., Kumar, a, & Zhong, M. (1997). “El Niño, La Niña, and the nonlinearity of their teleconnections”. *Journal of Climate*. 10(8), 1769–1786. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<1769:ENOLNA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<1769:ENOLNA>2.0.CO;2)

Hoyos, N., Escobar, J., Restrepo, J. C., Arango, A. M., & Ortiz, J. C. (2013). “Impact of the 2010–2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: The human toll of an extreme weather event”. *Applied Geography*, 39, 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.11.018>

Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K. P., & Stocker, E. F. (2007). “The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales”. *Journal of Hydrometeorology*, 8, 38–55. <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JHM560.1>.doi:10.1175/JHM560.1

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA. (2015). “Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Estudio Técnico Completo : Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático”. Bogotá.

Jha, B., Hu, Z.-Z., & Kumar, A. (2014). “SST and ENSO variability and

Mayor Información



change simulated in historical experiments of CMIP5 models”. *Climate Dynamics*, 42(7–8), 2113–2124. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1803-z>

Jin, E. K., Kinter, J. L., Wang, B., Park, C. K., Kang, I. S., Kirtman, B. P., ... Yamagata, T. (2008). “Current status of ENSO prediction skill in coupled ocean-atmosphere models”. *Climate Dynamics*, 31(6), 647–664. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0397-3>

Kim, S. T., Cai, W., Jin, F.-F., Santoso, A., Wu, L., Guilyardi, E., & An, S.-I. (2014). “Response of El Niño sea surface temperature variability to greenhouse warming”. *Nature Climate Change*, 4(9), 786–790. <https://doi.org/10.1038/nclimate2326>

Lee, J.-Y., & Wang, B. (2014). “Future change of global monsoon in the CMIP5”. *Climate Dynamics*, 42(1–2), 101–119. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1564-0>

Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S., & Schellnhuber, H. J. (2008). “Tipping elements in the Earth’s climate system”. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(6), 1786–1793. <https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105>

Philander, S. G. H. (1983). “Meteorology: Anomalous El Niño of 1982–83”. *Nature*, 305(5929), 16–16. <https://doi.org/10.1038/305016a0>

Poveda, G., & Mesa, O. J. (1997). “Feedbacks between Hydrological Processes in Tropical South America and Large-Scale Ocean–Atmospheric Phenomena”. *Journal of Climate*, 10(10), 2690–2702. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010<2690:FBHPIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010<2690:FBHPIT>2.0.CO;2)

Poveda, G., Álvarez, D. M., & Rueda, Ó. 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”. *Climate Dynamics*, 36(11–12), 2233–2249. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y>

Poveda, G., Mesa, O. J., Salazar, L. F., Arias, P. a., Moreno, H. a., Vieira, S. C., ... Alvarez, J. F. (2004). “The Diurnal Cycle of Precipitation in the Tropical Andes of Colombia”. *Monthly Weather Review*, 133(1), 228–240. <https://doi.org/10.1175/MWR-2853.1>

Poveda, G., Mesa, O., & Waylen, P. (2003). “Nonlinear Forecasting of River Flows in Colombia Based Upon ENSO and Its Associated Economic Value for Hydropower Generation”. In *Climate and water* (Vol. 16, pp. 351–371). Dordrecht: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-1250-3>

Poveda, G., Waylen, P. R., & Pulwarty, R. S. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(1), 3–27. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.10.031>

Rincon E., Rendón A.M., Salazar J. F. (2018). Ability of CMIP3 and CMIP5 models to predict ENSO phases and their asymmetric impact on precipitation in northwestern South America. Prepared to submitted to *Climate Dynamics*.

Salazar, L. F., Nobre, C. A., & Oyama, M. D. (2007). “Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America”. *Geophysical Research Letters*, 34(9), 2–7. <https://doi.org/10.1029/2007GL029695>

Mayor Información



Santa María, M., Von Der Fehr, N.-H., Millán, J., Benavides, J., Gracia, O., & Schutt, E. (2009). “El Mercado De La Energía Eléctrica En Colombia : Características , Evolución”. Bogotá. Retrieved from <http://hdl.handle.net/11445/171>

Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Ziese, M., & Rudolf, B. (2014). “GPCC’s new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle”. *Theoretical and Applied Climatology*, 115(1–2), 15–40. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0860-x>

Seth, A., Rojas, M., & Rauscher, S. A. (2010). “CMIP3 projected changes in the annual cycle of the South American Monsoon”. *Climatic Change*, 98(3), 331–357. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9736-6>

Sierra, J. P., Arias, P. a, & Vieira, S. C. (2015). “Precipitation over Northern South America and Its Seasonal Variability as Simulated by the CMIP5 Models”. *Advances in Meteorology*, 2015, 1–22. <https://doi.org/10.1155/2015/634720>

Steinhoff, D. F., Monaghan, A. J., & Clark, M. P. (2014). “Projected impact of twenty-first century ENSO changes on rainfall over Central America and northwest South America from CMIP5 AOGCMs”. *Climate Dynamics*, 44, 1329–1349. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2196-3>

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

Vera, C., Silvestri, G., Liebmann, B., & González, P. (2006). “Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models”. *Geophysical Research Letters*, 33(13), 2–5. <https://doi.org/10.1029/2006GL025759>

Vos, R., Labastida, E. De, & Bank, I. D. (1999). “Economic and Social Effects of El Niño in Ecuador , 1997-1998”. Health (San Francisco).

Wang, G., Cai, W., Gan, B., Wu, L., Santoso, A., Lin, X., ... McPhaden, M. J. (2017). “Continued increase of extreme El Niño frequency long after 1.5 °C warming stabilization”. *Nature Climate Change*, 7(8), 568–572. <https://doi.org/10.1038/nclimate3351>

Wang, G., Cai, W., Gan, B., Wu, L., Santoso, A., Lin, X., ... McPhaden, M. J. (2017). “Continued increase of extreme El Niño frequency long after 1.5 °C warming stabilization”. *Nature Climate Change*, 7(8), 568–572. <https://doi.org/10.1038/nclimate3351>

Yin, L., Fu, R., Shevliakova, E., & Dickinson, R. E. (2013). “How well can CMIP5 simulate precipitation and its controlling processes over tropical South America?”. *Climate Dynamics*, 41(11/12), 3127–3143. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1582-y>