

Artículo original

Implicaciones metodológicas e inconsistencias de la Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático de Colombia

Methodological implications and inconsistencies of Colombia's Third National Communication on Climate Change

Paola A. Arias^{1,*}, Laura D. Villegas¹, Oscar J. Mesa², José D. Pabón³,
Jacobó Arango⁴, Santiago Arango-Aramburo², Dolors Armenteras⁵, Lina Berrouet⁶,
Rolando Barahona⁷, Janet Barco⁸, Yuley Cardona², Yesid Carvajal-Escobar⁹,
Lina I. Ceballos-Bonilla¹⁰, Wilmar L. Cerón¹¹, Jaime H. Escobar¹²,
Catalina González¹³, Isabel C. Hoyos¹⁴, Natalia Hoyos¹², Carlos Jaramillo¹⁵,
Giovanni Jiménez-Sánchez¹⁶, J. Alejandro Martínez¹⁷, Germán Poveda²,
Benjamín Quesada¹⁸, Estela Quintero-Vallejo¹⁹, Ángela M. Rendón¹,
Daniel Ruiz-Carrascal²⁰, Alejandro Salazar²¹, Juan F. Salazar¹, Adriana Sánchez²²,
Sara C. Vieira¹, Juan Camilo Villegas⁶, Clara Villegas-Palacio², Manuel D. Zuluaga²

Citación: Arias PA, Villegas LD, Mesa OJ, *et al.* Implicaciones metodológicas e inconsistencias de la Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático de Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 46(180):769-794, julio-septiembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/racefyn.1705>

Editor: Andrés Cárdenas Rozo

***Correspondencia:**

Paola A. Arias; paola.arias@udea.edu.co

Recibido: 18 de junio de 2022

Aceptado: 7 de septiembre de 2022

Publicado en línea: 23 de septiembre de 2022



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

¹ Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA), Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

² Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, Colombia

³ Departamento de Geografía, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, Bogotá, D.C., Colombia

⁴ Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Palmira, Colombia

⁵ Grupo de Ecología del Paisaje y Modelación de Ecosistemas, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, Bogotá, D.C., Colombia

⁶ Grupo de Investigación en Ecología Aplicada, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

⁷ Departamento de Producción Animal, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, Colombia

⁸ Facultad de Ingeniería, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia

⁹ Escuela de Recursos Naturales y del Ambiente (EIDENAR), Universidad del Valle, Cali, Colombia

¹⁰ Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), Proyecto del Área Metropolitana Del Valle de Aburrá, Medellín, Colombia

¹¹ Departamento de Geografía, Facultad de Humanidades, Universidad del Valle, Cali, Colombia

¹² Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia

¹³ Departamento de Ciencias Biológicas, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

¹⁴ Facultad de Ciencias Básicas y Tecnologías, Programa de Física, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

¹⁵ Smithsonian Tropical Research Institute, Ciudad de Panamá, Panamá

¹⁶ Fuerza Aérea Colombiana, Bogotá, Colombia

¹⁷ Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

¹⁸ Programa de Ciencias del Sistema Tierra, Grupo de Investigación en Interacciones Clima-Ecosistemas (ICE), Facultad de Ciencias Naturales, Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia

¹⁹ Facultad de Ciencias y Biotecnología, Universidad CES, Medellín, Colombia

²⁰ Department of Ecology, Evolution and Environmental Biology, Columbia University in the City of New York, USA,

²¹ Facultad de Ciencias Ambientales y Forestales, Universidad Agrícola de Islandia, Reykjavík, Islandia

²² Programa de Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad del Rosario, Bogotá, Colombia

Resumen

Las Comunicaciones Nacionales sobre Cambio Climático (CNCC) son un mecanismo para que los países informen sus avances en mitigación y adaptación, y constituyen uno de los elementos de base para la política sobre cambio climático a escala nacional. Colombia ha emitido tres CNCC. La tercera plantea un escenario que considera las proyecciones de diversos modelos incluidos en la quinta fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (*Coupled Model Intercomparison Project*, CMIP), el cual se estima como el promedio de las proyecciones correspondientes a las cuatro trayectorias de concentración representativa (*Representative Concentration Pathways*, RCP) presentadas en el quinto reporte de evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Cada una de estas RCP representa una trayectoria de concentración de gases de efecto invernadero (GEI) para un escenario particular de crecimiento poblacional, económico y tecnológico que conduce a una posible trayectoria de evolución del sistema climático. En este estudio se comparan las proyecciones presentadas en la Tercera CNCC con las obtenidas directamente de los modelos empleados. Nuestros resultados demuestran que al utilizarse un promedio de RCP se pierden escenarios alternos que podrían ser importantes a la hora de considerar posibles futuros diferentes y anulan la utilidad de plantear diversas trayectorias de emisiones de GEI. Más aun, una comparación entre la Segunda y la Tercera CNCC muestra proyecciones de precipitación opuestas para diferentes regiones del país, lo cual es de particular importancia, pues el escenario de cambio climático planteado en la Tercera CNCC sirve de referencia para la toma de decisiones en materia de cambio climático a nivel nacional.

Palabras clave: Cambio climático; Comunicaciones nacionales de cambio climático (CNCC); Proyecciones climáticas, Escenario de cambio climático de Colombia; CMIP5.

Abstract

The National Communications on Climate Change (NCCC) are a mechanism for countries to report on their progress in mitigation and adaptation, and are a basis for climate change policy at the national level. Colombia has issued three NCCCs. The third CNCC presents a scenario that considers projections from various models included in the fifth phase of the Coupled Model Comparison Project (CMIP). This scenario is estimated as the average of the projections corresponding to the four Representative Concentration Pathways (RCPs) presented in the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Each of these RCPs represents a greenhouse gas (GHG) concentration trajectory for a particular scenario of population, economic and technological growth, leading to a possible trajectory of climate system evolution. Our article compares the projections presented in the Third CNCC with those obtained directly from the models used. Our results show that by using an average RCP, alternative scenarios that could be important in considering different possible futures are lost, negating the usefulness of proposing different GHG emission trajectories. Moreover, a comparison between the Second and Third CNCC shows opposite precipitation projections for different regions of the country. This is particularly important because the climate change scenario proposed in the Third CNCC is a reference scenario for climate change decision-making at the national level. (No está incluido el resumen en inglés)

Keywords: Climate change; National Communications on Climate Change; Climate projections; Climate change scenario for Colombia; CMIP5.

Introducción

El más reciente reporte del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) indica que la temperatura promedio global ha aumentado alrededor de 1,1 °C (datos de 2020) con respecto al período preindustrial (1850-1900), lo que ha generado un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos climáticos y meteorológicos extremos en diversas regiones del planeta (IPCC, 2021). Estos cambios son atribuibles a la actividad humana, principalmente a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producto de la quema de combustibles fósiles y de cambios en los usos del suelo (IPCC, 2021). Por ello, el IPCC resalta la urgencia de generar reducciones fuertes, rápidas y sostenidas de las emisiones globales de GEI (IPCC, 2021, 2022b).

Las Comunicaciones Nacionales sobre Cambio Climático (CNCC) son el mecanismo de reporte designado por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) para que las partes (o países que la conforman) informen al mundo

sus avances en la implementación de la Convención en términos de mitigación y adaptación al cambio climático, y así reúnan la información disponible para orientar la planificación y elaboración de políticas que permitan mejorar la respuesta nacional ante este fenómeno (**IDEAM et al.**, 2017).

Cada uno de los países adscritos a la CMNUCC asume, entre otros, el compromiso de presentar regularmente estas comunicaciones como instrumentos que permitan evaluar la vulnerabilidad de cada país ante el cambio climático, así como hacer un seguimiento de las emisiones de GEI provenientes de cada uno de los sectores, lo que constituye un insumo fundamental para las decisiones a nivel nacional e internacional en materia de cambio climático (**IDEAM**, 2001).

Colombia ratificó el acuerdo de la CMNUCC en 1994 (**IDEAM**, 2001) y hasta la fecha ha presentado tres CNCC publicadas en el 2001, el 2010 y el 2017. Estos informes nacionales siguen los lineamientos aportados por los reportes de evaluación del IPCC, que, a nivel general, ofrecen información sobre los inventarios nacionales de emisiones de GEI, las acciones de mitigación, la reducción de la vulnerabilidad, la adaptación y la educación, así como las dificultades que se hayan presentado en la elaboración de cada una de las CNCC (**IDEAM**, 2001, 2010; **IDEAM et al.**, 2015a, 2015b, 2017).

La Primera CNCC de Colombia estuvo limitada por la disponibilidad de información y tecnología, y la dificultad para aplicar los protocolos del IPCC en el contexto del país (**IDEAM**, 2001). En su elaboración se utilizó información de escenarios generada mediante reducción de escala (*downscaling*) con métodos estadísticos de los resultados del promedio de siete de los modelos incluidos en el Tercer Reporte de Evaluación del IPCC (AR3) bajo el escenario A1 del Reporte Especial sobre Escenarios de Emisiones (**IPCC**, 2000), es decir, el escenario moderado de **Hulme & Sheard** (1999). Dicho escenario se acerca al de duplicación de concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono frente a los niveles preindustriales. En esta CNCC se consideraron, además, las simulaciones provenientes del Modelo de la Comunidad Climática, versión 3 (CCM3) (**Kiehl et al.**, 1998), modelo que produjo información para el escenario de duplicación de la concentración de dióxido de carbono (**Eslava & Pabón**, 2001; **Pabón et al.**, 2001), con incrementos graduales hasta llegar a 550 ppmv para finales del siglo XXI, en comparación con el periodo de referencia de 1961 a 1990. El **IDEAM** (2001) presentó una síntesis de los cambios en la temperatura media anual y en la precipitación anual obtenidos en 24 regiones del país bajo los escenarios mencionados. La Primera CNCC también presentó información de eventuales escenarios de ascenso del nivel del mar para estimar el impacto potencial en las zonas costeras e insulares.

Las dos siguientes CNCC constituyeron un avance en el análisis de las proyecciones de cambio climático en Colombia. La Segunda CNCC se basó en el Cuarto Reporte de Evaluación (AR4) del IPCC y la Tercera en el Quinto Reporte de Evaluación (AR5) (**IDEAM**, 2010; **IDEAM et al.**, 2015a, 2015b, 2017). En la Segunda CNCC se consideró la reducción de escala de modelos regionales con base en las proyecciones de seis modelos de circulación general (MCG) bajo diferentes escenarios (**Tabla 1**). Las dos CNCC son consistentes en cuanto a las proyecciones de cambio en la temperatura media anual, pero presentan notables contradicciones en las proyecciones de precipitación para el siglo XXI en el país. Por ejemplo, en algunas regiones del territorio colombiano se obtuvieron resultados con un signo de cambio en la lámina total anual de precipitación opuesto entre las dos CNCC publicadas: la segunda proyectó disminuciones de precipitación sobre parte de la región Andina superiores al 10 % para el periodo 2011-2040 y reducciones mayores (20-30 %) en algunas zonas de esta región para el periodo 2071-2100 (**IDEAM**, 2010), en tanto que en la tercera se proyectaron reducciones de 10 a 40 % en las regiones Caribe y Amazonas y aumentos de hasta 30 % en algunas zonas de la región Andina para los tres periodos considerados (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100) (**IDEAM et al.**, 2017).

La Tercera CNCC de Colombia plantea un escenario de cambio climático que considera las proyecciones de diversos MCG incluidos en la quinta fase del Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP5) (**Tabla 2**). Este escenario considera los

Tabla 1. Modelos empleados en la Segunda CNCC de Colombia (IDEAM, 2010).

Condiciones iniciales Modelos de baja resolución	Modelo para reducción de escala dinámico	Resolución (km)	Escenario	Periodo analizado
Clima presente				
ERA40	Precis	25 x 25	Clima presente	1971-2000
CCM3	GSM-MRI	20 x 20	Clima presente	1979-1998
CAM	WRF	4 x 4	Año de referencia	1990
Clima futuro				
HadAM3P	Precis	25 x 25	A2	2011-2100
HadAM3P	Precis	25 x 25	B2	2011-2100
ECHAM4	Precis	25 x 25	A2 (Sulfato)	2071-2100
ECHAM4	Precis	25 x 25	B2 (Sulfato)	2071-2100
HadAM3Q	Precis	25 x 25	A1B (Sulfato)	2071-2100
CAM	WRF	4 x 4	A2	Cada 10 años 2020-2100
CCM3	GSM-MRI	20 x 20	A1B	2080-2090

promedios de las proyecciones para las cuatro trayectorias de concentración representativa (RCP) presentadas en el AR5 (IDEAM *et al.*, 2017). Estas RCP (RCP 2,6, RCP 4,5, RCP 6,0 y RCP 8,5) plantean diferentes trayectorias de concentración atmosférica de GEI, que obedecen a trayectorias climáticas futuras bajo diversos crecimientos poblacionales, económicos y tecnológicos y conllevan diferentes forzamientos radiativos para finales de este siglo (Masui *et al.*, 2011; Riahi *et al.*, 2011; Thomson *et al.*, 2011; van Vuuren *et al.*, 2011a, 2011b). Por ejemplo, la RCP 2,6 corresponde a la de menores emisiones de GEI, con una concentración de 490 ppm de CO₂eq para el año 2100, e indica un forzamiento radiativo de 3,1 W/m² para mediados del siglo XXI, el cual disminuye a 2,6 W/m² en el 2100. Esta RCP plantea: (i) una reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a partir del 2020 hasta llegar a cero en el 2100; (ii) una reducción de emisiones de metano (CH₄) hasta aproximadamente la mitad de los niveles del 2020, y (iii) una reducción de las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) hasta aproximadamente el 10 % de los niveles observados en el periodo 1980-1990. Estas reducciones obedecen a emisiones negativas en el sector energético derivadas de la captura y el almacenamiento de carbono y la migración del uso de combustibles fósiles a energías renovables y nucleares, e implican sistemas socio-ambientales más sostenibles (van Vuuren *et al.*, 2011a, 2011b).

En contraste, la RCP 8,5 corresponde a la ruta con mayores emisiones de GEI, con una concentración de 1.370 ppm de CO₂eq en el 2100, e indica un forzamiento radiativo de 8,5 W/m² para el 2100. Esta RCP plantea un aumento de las emisiones de GEI para el 2100 igual al triple de las emisiones observadas en el 2000; no incluye metas específicas de mitigación, y proyecta un crecimiento poblacional continuo, con alta desigualdad social, lo que genera expansión urbana y pérdida de áreas boscosas. Además, representa un escenario con una gran dependencia de combustibles fósiles como el carbón debido a su bajo costo y al limitado avance tecnológico (Riahi *et al.*, 2011). Las trayectorias RCP 4,5 y RCP 6,0 corresponden a escenarios intermedios entre los dos mencionados (Masui *et al.*, 2011; Thomson *et al.*, 2011).

Por tal razón, es necesario evaluar las proyecciones presentadas en la Tercera CNCC de Colombia y el escenario de cambio climático generado a partir de ellas, máxime cuando el IPCC ha publicado su Sexto Reporte de Evaluación (AR6) (IPCC, 2021, 2022a, 2022b),

Tabla 2. Generalidades de los modelos considerados en la Tercera CNCC de Colombia y en este estudio para el análisis de temperatura superficial del aire (tas) y precipitación (pr). En negrilla se resaltan los modelos identificados con la mejor representación de estas variables para el país (Arias et al., 2021b), es decir, aquellos modelos que representan adecuadamente el ciclo anual y la distribución espacial de estas variables. Además, se indican los modelos con simulaciones CORDEX disponibles para el dominio CAM44.

Modelo	Resolución horizontal (Lon x Lat)	Simulaciones CMIP5		Simulaciones CORDEX	
		tas	pr	tas	pr
bcc-csm1-1	2,8125° × 2,8125°	X	X		
bcc-csm1-1-m	1,125° × 1,125°	X			
CCSM4	1,25° × 0,9°	X	X		
CESM1-CAM5	1,25° × 0,9°	X			
CSIRO-MK3.6.0	1,875° × 1,875°	X	X	X	X
FIO-ESM	2,875° × 2,875°	X	X		
GFDL-CM3	2,5° × 2°	X	X		
GFDL-ES-M2G	2,5° × 2°	X			
GISS-E2-H	2,5° × 2°	X	X		
GISS-E2-R	2,5° × 2°	X	X		
HadGEM2-AO	1,875° × 1,25°	X	X		
HadGEM2-ES	1,875° × 1,25°	X		X	
IPSL-CM5A-LR	3,75° × 1,875°	X	X		
IPSL-CM5A-MR	2,5° × 1,25°	X	X	X	X
MIROC-ESM	2,8125° × 2,8125°	X	X		
MIROC-ESM-CHEM	2,8125° × 2,8125°	X	X		
MIROC5	1,4° × 1,4°	X	X	X	X
MRI-CGCM3	1,12° × 1,12°	X	X		
NorESM1-M	2,5° × 1,9°	X		X	
NorESM1-ME	2,5° × 1,9°	X	X		

que considera una gama más amplia de escenarios socioeconómicos, conocidos como Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (*Shared Socioeconomic Pathways, SSP*) (Riahi et al., 2017).

Para avanzar en el análisis de las proyecciones de cambio climático para Colombia, en el presente estudio se compararon las proyecciones correspondientes al escenario de cambio climático planteado en la Tercera CNCC de Colombia con las proyecciones obtenidas de los modelos CMIP5 para cada una de las RCP planteadas en el AR5 (Collins et al., 2013). Además, se analizaron las simulaciones históricas durante el período 1979-2005 provenientes de los 20 modelos CMIP5 de temperatura superficial del aire y los 15 de precipitación usados en la Tercera CNCC (IDEAM et al., 2017). Estas simulaciones se evaluaron a partir de diversas bases de datos con observaciones o reanálisis climáticos empleados como referencia. Además, se analizaron las proyecciones para los tres períodos considerados en la Tercera CNCC a partir de cada una de las cuatro RCP, y se compararon con el promedio multiscenario, así como con las proyecciones presentadas en la Tercera CNCC. A manera de análisis exploratorio del efecto de la reducción de escala

en las simulaciones climáticas, se compararon las provenientes de los MCG con aquellas provenientes del experimento *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX) (Giorgi & Gutowski, 2015) para los modelos con información disponible en la región de análisis.

Datos y metodología

Datos observacionales

Los datos de referencia para la evaluación de las simulaciones históricas de los modelos CMIP5 incluyeron la información mensual de temperatura del aire en superficie provenientes del reanálisis climático ERA5 (Hersbach *et al.*, 2020), con una resolución horizontal de 30 km para el período 1979-2005, y la de precipitación proveniente de las estimaciones satelitales de la Misión de Medición de Lluvia Tropical (*Tropical Rainfall Measuring Mission*, TRMM) (Huffman *et al.*, 2007), con una resolución horizontal de 0,25 ° para el período 1998-2005. Estos datos se sometieron a interpolación bilineal con la resolución horizontal de cada uno de los modelos CMIP5 considerados (Tabla 2) para estimar los sesgos de cada modelo con respecto a la base de datos de referencia.

Es importante resaltar que el objetivo principal de este estudio no fue la evaluación del desempeño de los diferentes modelos en sus simulaciones históricas para Colombia, aunque sí se buscaba presentar un contexto general sobre qué tan adecuados son para hacer proyecciones ante escenarios de cambio climático. Trabajos anteriores se han enfocado en la evaluación del desempeño de estos modelos para la simulación del clima en la región (Yin *et al.*, 2013; Palomino-Lemus *et al.*, 2015, 2017; Sierra *et al.*, 2015, 2018, 2021; Bonilla-Ovallos & Mesa Sánchez, 2017; Pabón-Cacedo *et al.*, 2020; Arias *et al.*, 2021b; Ortega *et al.*, 2021). En muchos de estos estudios se emplearon datos de referencia provenientes de reanálisis climáticos, estimaciones satelitales y productos interpolados para evaluar el desempeño de los modelos, en tanto que algunos pocos recurrieron a la información de estaciones *in situ*. Por ejemplo, Arias *et al.* (2021b) evaluaron estas simulaciones con respecto a las estaciones del IDEAM y encontraron que los 49 modelos CMIP5 evaluados fueron capaces de simular adecuadamente el ciclo anual de la temperatura superficial del aire en las estaciones consideradas (457 estaciones para el período 1979-2005). Sin embargo, presentaron mayores sesgos en la simulación del ciclo anual de precipitación para las estaciones del IDEAM consideradas (1.710 estaciones para el período 1979-2005), lo que coincide con la evaluación de Bonilla-Ovallos & Mesa-Sánchez (2017), quienes también consideraron registros de estaciones del IDEAM para la evaluación de 16 modelos CMIP5.

Simulaciones y proyecciones CMIP5

Se utilizaron 20 modelos CMIP5 para la temperatura superficial del aire y 15 para la precipitación, con el fin de lograr comparaciones lo más cercanas posible a lo presentado en la Tercera CNCC de Colombia a partir de los mismos modelos. Las simulaciones y proyecciones de estos modelos se obtuvieron del *World Climate Research Programme* (WCRP: <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/>). El promedio multimodelo, que considera la totalidad de los modelos con simulaciones disponibles para cada variable, se estimó mediante interpolación bilineal de la resolución horizontal más gruesa entre modelos (2,8°x 2,8°) (Tabla 2).

En el análisis de proyecciones se consideraron tres períodos futuros: 2011-2040 (corto plazo), 2041-2070 (mediano plazo) y 2071-2100 (largo plazo) siguiendo una metodología similar a la usada en la Tercera CNCC de Colombia. Por lo tanto, se empleó el mismo número de modelos considerado en la evaluación de sesgos de las simulaciones históricas y el mismo procedimiento de cambio de resolución y estimación del promedio multimodelo. Este procedimiento se siguió para las cuatro RCP presentadas en el AR5 (RCP 2,6, RCP 4,5, RCP 6,0 y RCP 8,5). Además, se estimó un promedio multiescenario para cada uno de los períodos considerados y se comparó con las proyecciones de la Tercera

CNCC en ambas variables. Este conjunto multiescenario se obtuvo mediante el promedio de los promedios multimodelo de las cuatro RCP. Los cambios proyectados se estimaron con respecto al promedio multimodelo (considerando los mismos modelos) para el período histórico 1976-2005.

Simulaciones CORDEX

Las proyecciones provenientes del escenario de cambio climático planteado en la Tercera CNCC se compararon con las proyecciones de modelos incluidas en el experimento CORDEX (Giorgi & Gutowski, 2015), correspondientes a simulaciones de modelos regionales con condiciones iniciales y de frontera provenientes de modelos CMIP5. Para la comparación entre las simulaciones CORDEX y sus modelos originales, se obtuvieron los datos de cinco de ellas para temperatura del aire en superficie y tres modelos para precipitación, cuidando de que coincidieran con los modelos utilizados en los promedios multimodelo de la Tercera CNCC (Tabla 2). La cantidad de modelos CORDEX es mucho menor a la cantidad de modelos CMIP5 debido a la limitada disponibilidad de estas simulaciones. Estos datos se tomaron del WCRP (<https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/search/cordex-ipsl/>). En este análisis empleamos el dominio CAM44 (Central América) después de un remapeo para llevar los datos de coordenadas del modelo a una malla regular, y de un procedimiento similar para llevar las bases de datos de referencia a la resolución horizontal de cada modelo. Posteriormente, se estimaron los promedios multimodelo mediante una interpolación bilineal a 0,44°. Los cambios proyectados se obtuvieron con respecto al promedio de los mismos modelos para el período histórico 1976-2005.

Simulaciones históricas de la temperatura superficial del aire y la precipitación

Temperatura superficial del aire. La figura 1 muestra los campos espaciales de promedios trimestrales de temperatura superficial del aire para el reanálisis ERA5 (paneles superiores) y el promedio del promedio de los 20 modelos CMIP5 considerados (paneles centrales), así como los sesgos de este promedio multimodelo con respecto al reanálisis (paneles inferiores). Los promedios trimestrales del ERA5 para el periodo histórico 1979-2005 (Figura 1a) exhibieron temperaturas más bajas (<20 °C) sobre la cordillera de los Andes y la Sierra Nevada de Santa Marta, temperaturas medias (21 °C - 27 °C) en la región Pacífica, y temperaturas más altas (23 °C - 29 °C) en las regiones Caribe, Orinoquía y Amazonas. Según el ERA5, las mayores temperaturas en la región Caribe se observaron de diciembre a febrero (DEF) y de marzo a mayo (MAM), y en las regiones Orinoquía y Amazonas en

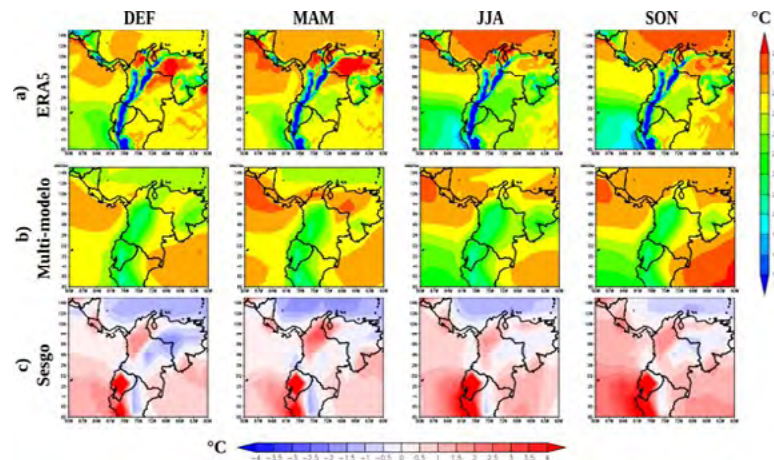


Figura 1. Promedio trimestral multianual de temperatura superficial del aire (°C) para: **a)** el reanálisis ERA5 y **b)** el promedio de 20 modelos CMIP5 para el periodo 1979-2005. **c)** Sesgo de temperatura, estimado como el promedio de las diferencias entre la climatología de la simulación histórica de cada modelo y la climatología de ERA5

DEF. A lo largo del año, las mayores temperaturas se registraron en La Guajira, en tanto que las más bajas se observaron a lo largo de la cordillera de los Andes y en la Sierra Nevada de Santa Marta.

El promedio multimodelo de las simulaciones históricas (**Figura 1b**) muestra las temperaturas más bajas (21 °C – 24 °C) en la región Andina, y temperaturas similares para la región Pacífico, con un máximo de 26 °C. Las regiones Caribe, Orinoquía y Amazonas presentaron valores entre los 24 °C y los 29 °C. Las temperaturas más altas para el Caribe y la Orinoquía se simularon en MAM, en tanto que para el Amazonas se registraron en Septiembre a Noviembre (SON). Los sesgos del promedio multiescenario (**Figura 1c**) muestran sobreestimaciones de los modelos en áreas de la región andina del orden de 1 a 2 °C, lo que revela la dificultad de los modelos para representar las temperaturas en esta región, lo que podría asociarse con una inadecuada representación orográfica debido a la baja resolución espacial de estos modelos (Sheridan *et al.*, 2010; Gao *et al.*, 2017; Posada-Marín *et al.*, 2019). En contraste, los sesgos negativos de hasta 1,5 °C en la Orinoquía y el Caribe indican la dificultad de los modelos considerados para representar las altas temperaturas de estas regiones. La discusión de tales diferencias se presenta en detalle en Arias *et al.* (2021b), quienes evaluaron el desempeño de modelos CMIP5 con respecto al reanálisis ERA5 y a las estaciones del IDEAM.

Precipitación. La **figura 2** presenta los promedios trimestrales de precipitación provenientes de la TRMM y del promedio de las simulaciones históricas de los 15 modelos CMIP5 considerados para esta variable (promedio multimodelo), así como su sesgo con respecto a las estimaciones satelitales. En DEF, las estimaciones de la TRMM (**Figura 2a**) mostraron bajas precipitaciones en la región Caribe, con valores entre 0 y 4 mm/día, seguidas de la región Orinoquía, con valores de 2 a 6 mm/día. La región Andina presentó tasas de precipitación entre 4 y 8 mm/día, mientras que la región Amazonía presentó valores entre 6 y 12 mm/día, siendo más altos hacia el sur. La región con mayores precipitaciones durante el primer trimestre del año fue la Pacífica, con valores entre 9 y 18 mm/día, incluida la parte oceánica más próxima al continente. En MAM, los valores más bajos siguieron presentándose en el Caribe colombiano (3-7 mm/día), seguido de las regiones Andina (4-9 mm/día), Orinoquía (7-11 mm/día), Amazonas (9-13 mm/día) y Pacífica, la cual presenta los valores más altos en todo el dominio analizado (10-18 mm/día). En junio-agosto (JJA) se mantuvieron los valores bajos del Caribe (0-6 mm/día) y se observaron precipitaciones bajas sobre la cordillera de los Andes (1-8 mm/día), seguida por Amazonas (7-10 mm/día) y Orinoquía (9-13 mm/día). Se mantuvieron los valores más altos sobre la región

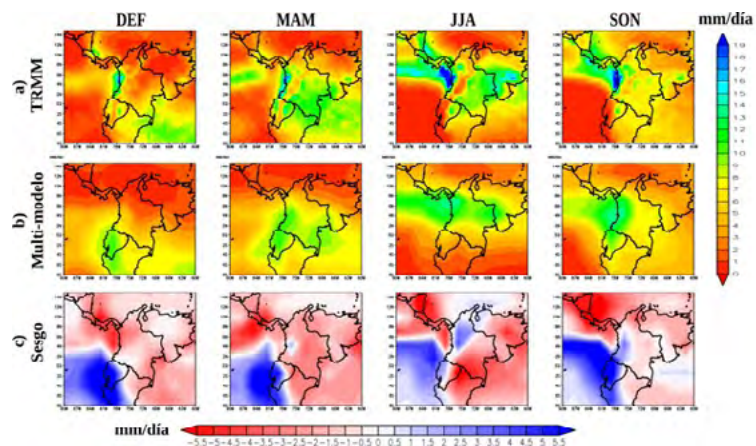


Figura 2. Promedio trimestral multianual de precipitación (mm/día) para: **a)** estimados satelitales de TRMM (1998-2005) y **b)** el promedio de 15 modelos CMIP5 (1979-2005). **c)** Sesgo de precipitación estimado como el promedio de las diferencias entre la climatología de la simulación histórica de cada modelo y la climatología de TRMM

Pacífica, con más de 19 mm/día, incluida la parte oceánica, es decir, las precipitaciones más altas de todo el ciclo anual. En SON, la mayor parte del país presentó valores bajos de precipitación (2-9 mm/día), siendo mayores en la alta Guajira y los Andes, y más altos en la región Pacífica y el Pacífico tropical, con valores similares a los del trimestre anterior. Se observa, entonces que, a nivel general, las estimaciones satelitales de la TRMM registraron las menores precipitaciones en la región Caribe y los Andes colombianos y las más altas en la región Pacífico.

Sin embargo, es importante señalar que el régimen de precipitación en Colombia exhibe una alta complejidad debido a los múltiples procesos hidroclimáticos que se observan en la región, así como a las características topográficas debido a la presencia de los tres ramales de la cordillera de los Andes, la diversidad de fuentes de humedad atmosférica provenientes de regiones oceánicas (Pacífico oriental, Mar Caribe y Atlántico norte) y continentales (cuencas de los ríos Magdalena, Orinoco y Amazonas), la migración latitudinal de la zona de convergencia intertropical, la influencia de fenómenos de interacción océano-atmósfera como El Niño-Oscilación del Sur y de las variaciones de temperaturas sobre el mar Caribe y el océano Atlántico, y el papel activo de la vegetación, entre otros (Mejía *et al.*, 1999; Jaramillo-Robledo & Chaves-Córdoba, 2000; Poveda, 2004; Poveda & Mesa, 1999, 2000; Poveda *et al.*, 2005, 2006, 2011; Bedoya-Soto *et al.*, 2019; Posada-Marín *et al.*, 2019; Urrea *et al.*, 2019; Cai *et al.*, 2020; Espinoza *et al.*, 2020; Arias *et al.*, 2021a; Loaiza-Cerón *et al.*, 2021; Vallejo-Bernal *et al.*, 2021).

El promedio multimodelo (Figura 2b) arrojó bajas precipitaciones en todo el país en DEF, con valores entre 0 y 7 mm/día para el centro, norte y nororiente del territorio, y de 5 a 9 mm/día para las regiones de Amazonas, sur de la región Andina y Pacífico. En MAM, las precipitaciones más bajas se registraron en el Caribe, entre 0 y 7 mm/día, mientras que en el resto del país oscilaron entre 7 y 12 mm/día, siendo mayores en el centro y sur de la región Pacífica y el oriente de la región Amazónica. En JJA, las precipitaciones simuladas al sur y al norte del país fueron de 1 a 8 mm/día, siendo más altas hacia el interior del territorio. En la Orinoquía, los valores fluctuaron entre 9 y 13 mm/día, en tanto que al centro y norte de las regiones Andina y Pacífica se obtuvieron valores entre 9 y 15 mm/día. En SON, las precipitaciones más bajas se presentaron en el Caribe, con valores desde los 2 mm/día sobre el océano y la zona continental. En las regiones Orinoquía y Amazonas, los valores simulados estuvieron entre los 6 y los 9 mm/día al oriente de la Orinoquía. Las regiones Andina y Pacífico obtuvieron valores de 10 a 15 mm/día, siendo más altas en el centro de la región Pacífica, con valores de hasta 17 mm/día sobre el océano.

Las diferencias entre el promedio multimodelo y el de la TRMM (Figura 2c) evidencian sesgos negativos para todo el territorio en DEF, principalmente en la región Pacífica, incluida su zona oceánica, y al oriente de la región de la Amazonía, lo que indica que hay dificultades en los modelos considerados para representar la precipitación en estas zonas, las cuales estarían asociadas con la resolución espacial de los conjuntos de datos que se comparan: las observaciones son representativas de escalas espaciales más finas mientras que los modelos, al tener resoluciones más gruesas, no reflejan las señales de menor escala, por ejemplo, aquellas relacionadas con la topografía que pueden generar gradientes verticales de temperatura y aumentos locales de precipitación (Sheridan *et al.*, 2010; Gao *et al.*, 2017; Posada-Marín *et al.*, 2019).

Durante MAM, los sesgos negativos más altos se presentaron para la región de la Orinoquía y al suroccidente del país, principalmente, lo que evidencia una subestimación en los datos arrojados por los modelos. Los sesgos positivos se presentaron en el centro de la región Pacífico, donde las simulaciones sobreestimaron la precipitación con respecto a los datos satelitales. Durante JJA, las diferencias negativas se dieron al sur del país, sobre la región Amazónica y parte de la Orinoquía, lo que indica que las simulaciones subestimaron la precipitación registrada por la TRMM, en tanto que las diferencias positivas se dieron en el centro y norte de la región Andina, donde las simulaciones sobreestimaron la precipitación con respecto a la TRMM. En SON, las mayores diferencias negativas se dieron en la región Caribe, mientras que las diferencias positivas se presentaron al sur de

las regiones Andina y Pacífico, donde las simulaciones sobreestimaron la precipitación en comparación con las estimaciones satelitales. Estos patrones de sesgo son similares a los discutidos por Arias *et al.* (2021b), quienes consideran 49 modelos CMIP5. Por su parte, Bonilla-Ovalle & Mesa-Sánchez (2017) señalaron que los modelos CMIP5 (16 modelos) arrojaron subestimaciones de precipitación en las regiones Pacífico y Amazónica y sobreestimaciones en los Andes.

Proyecciones de temperatura superficial del aire y precipitación para el siglo XXI

Temperatura superficial del aire. La figura 3 presenta los cambios proyectados de temperatura superficial del aire para finales de siglo (2071-2100) según el promedio multimodelo para cada una de las cuatro RCP consideradas. Las figuras 1S y 2S del material suplementario, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1705/3284>, presentan los cambios proyectados para inicios (2011-2040) y mediados (2041-2070) de siglo, respectivamente. Los cambios proyectados se estimaron en comparación con las simulaciones del periodo histórico 1976-2005. Se resalta que el promedio multimodelo fue muy concordante entre los modelos en cuanto a los aumentos de temperatura en todo el territorio colombiano a lo largo del siglo XXI, independientemente del horizonte de proyección o la temporada del año, lo que indica que se trata de una característica sólida. Para inicios de siglo se proyectan aumentos de temperatura por debajo de los 1,6 °C en todo el territorio colombiano (Figura 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1705/3284>), así como para mediados de este siglo en todo el territorio colombiano, con los mayores incrementos en las RCP 4,5 y RCP 8,5 (Figura 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1705/3284>). Para finales de siglo, el promedio multimodelo proyecta menores incrementos de temperatura para la RCP 2,6 (Figura 3a), con aumentos de 1,6 a 2,4 °C. Los incrementos proyectados aumentan conforme se agudiza el forzamiento radiativo, y son muy similares en las RCP 4,5 (Figura 3b) y RCP 6,0

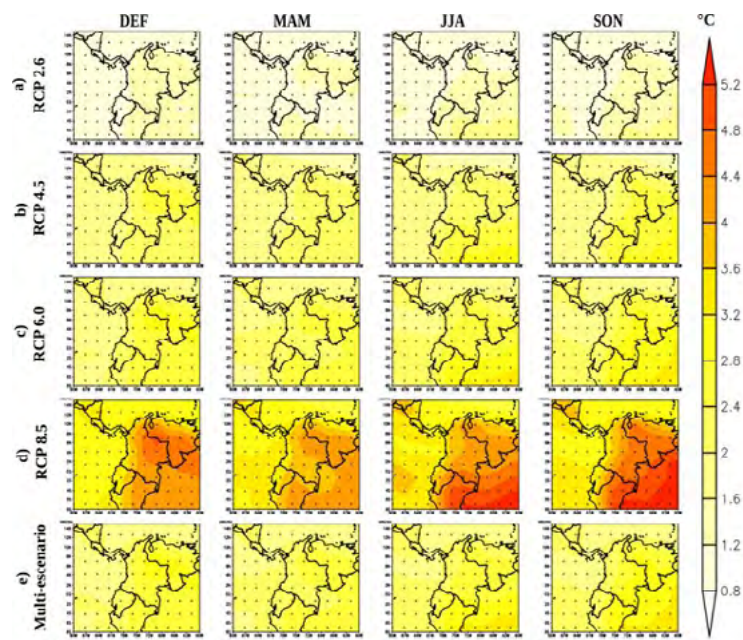


Figura 3. Cambios proyectados de temperatura superficial del aire (°C) para el período 2071-2100 (largo plazo) con respecto al período histórico (1976-2005) y para el promedio multimodelo de las cuatro RCP consideradas: **a)** RCP 2,6; **b)** RCP 4,5; **c)** RCP 6,0, y **d)** RCP 8,5. Las regiones punteadas en a), b), c) y d) indican un consenso del 80 % entre modelos en el signo del cambio proyectado. **e)** Cambios proyectados según el promedio multiescenario (e.g., de las cuatro RCP). En e), los puntos indican consenso del 80 % entre la RCP en el signo del cambio proyectado.

(Figura 3c): entre 2,4 y 3,6 °C. Los mayores incrementos de temperatura se presentan en la RCP 8,5 (Figura 3d), con aumentos de temperatura de 3,2 a 4,0 °C en las regiones Pacífico, Andina y Caribe, de 3,2 a 4,8 °C en la región de la Orinoquía (principalmente en los trimestres DEF y SON), y de 3,2 a 4,4 °C en la región de la Amazonía (principalmente durante JJA y SON) (Figura 3d).

La figura 3e muestra que los cambios proyectados para el promedio de las cuatro RCP son similares a lo planteado en la Tercera CNCC de Colombia. Se observa que el promedio multiescenario atenúa particularmente los cambios proyectados en las RCP menos optimistas, en especial los cambios planteados en la RCP 8,5. Las proyecciones del promedio multiescenario propuesto por la Tercera CNCC se asemejan a las de la RCP 6,0, lo cual constituye una subestimación considerable del riesgo climático, dado que la RCP 8,5 entrega resultados que deben considerarse como una herramienta fundamental en la cuantificación del riesgo climático en el corto y mediano plazos (Schwalm *et al.*, 2020), en especial para un país como el nuestro con una alta vulnerabilidad social y ecológica en todas sus regiones (Roncancio *et al.*, 2020).

Para ilustrar mejor lo que implica un escenario proyectado a partir del promedio de las diversas RCP (promedio multiescenario), la figura 4a presenta la evolución temporal de la temperatura superficial del aire promedio en Colombia durante el periodo 1979-2005 según el promedio multimodelo para las simulaciones históricas, y durante el periodo 2005-2100 según el promedio multimodelo para cada una de las RCP consideradas y el promedio multiescenario. Se observa que la temperatura promedio en Colombia presenta un comportamiento de aumento a lo largo del siglo XXI para todas las RCP, como lo ilustran, además, las figuras 1S y 2S, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1705/3284>, y la figura 3. Sin embargo, las tendencias de aumento varían considerablemente entre las RCP, con temperaturas que alcanzarían un promedio de 28 °C

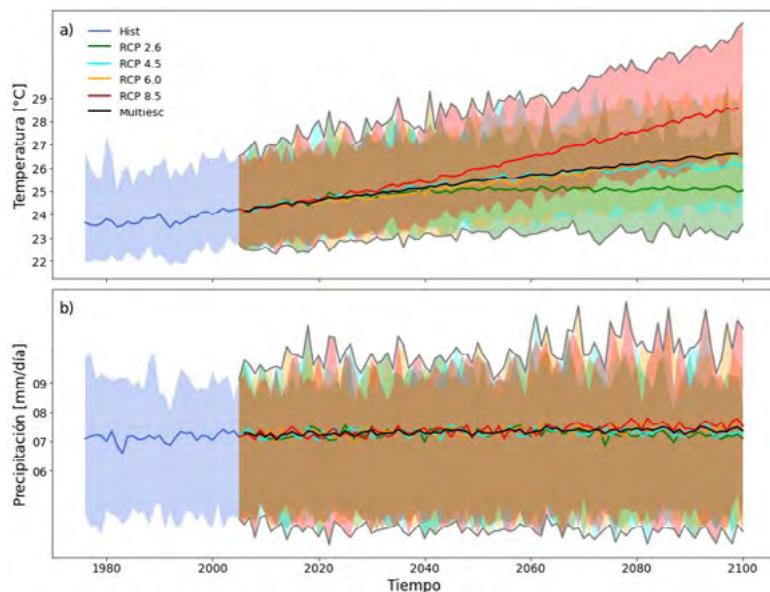


Figura 4. Series de tiempo de: **a)** temperatura superficial del aire (°C) y **b)** precipitación (mm/día) promedio en Colombia durante el periodo 1979-2100 según los promedios multimodelo y multiescenario de los modelos CMIP5 considerados (20 para temperatura y 15 para precipitación). La serie de tiempo para el periodo 1979-2005 corresponde al promedio multimodelo de las simulaciones históricas (línea azul). Las series de tiempo para el periodo 2005-2100 corresponden al promedio multimodelo para cada una de las RCP consideradas (RCP 2,6 en línea verde, RCP 4,5 en línea turquesa, RCP 6,0 en línea naranja y RCP 8,5 en línea roja). Para comparación, se presenta la serie de tiempo correspondiente al promedio multiescenario (línea negra). Las áreas sombreadas representan la envoltura correspondiente a la simulación histórica o la RCP respectiva.

en el 2100 según la RCP 8,5, en tanto que la RCP 2,6 proyecta temperaturas promedio de aproximadamente 24,5 °C para finales de siglo. El promedio multiescenario muestra un comportamiento cercano al proyectado por las RCP 4,5 y 6,0, aunque más similares a la RCP 6,0, con temperaturas promedio de 25 °C para el año 2100.

Precipitación. La **figura 4b** presenta la serie de tiempo de los cambios proyectados en la precipitación promedio en Colombia. Se observa un leve incremento en la precipitación promedio para todas las RCP, con mayores aumentos para la RCP 8,5 a finales del siglo XXI, aunque el cambio proyectado no excede la variabilidad anual histórica. Con respecto a la distribución espacial, la **figura 5** presenta los cambios de precipitación proyectados para finales de siglo (2071-2100) según el promedio multimodelo bajo las cuatro RCP. Las **figuras 3S y 4S**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1705/3284>, presentan los cambios proyectados para inicios (2011-2040) y mediados (2041-2070) de siglo, respectivamente. Para inicios de siglo, el promedio multimodelo proyecta incrementos de precipitación en el occidente de Colombia y el oriente del Pacífico que no sobrepasan 1 mm/día, en tanto que las disminuciones observadas en JJA y SON en la Orinoquía tienen un valor de -0,6 mm/día, con distribuciones espaciales que varían trimestralmente entre las RCP (**Figura 3S**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1705/3284>). Los cambios proyectados para el período 2041-2070 muestran incrementos de precipitación con una distribución espacial, a nivel general, similar a los observados en el corto plazo, pero con disminuciones sobre la Orinoquía de hasta -1,0 mm/día. En general, los mayores incrementos de precipitación proyectados se dan en el oriente del Pacífico (**Figura 4S**, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/1705/3284>).

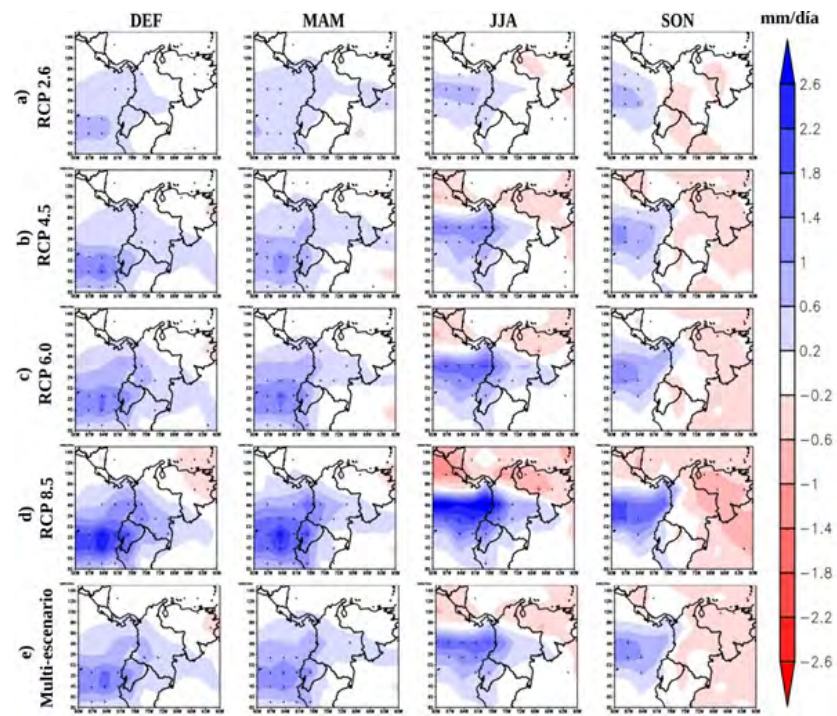


Figura 5. Cambios proyectados de precipitación (mm/día) para el período 2071-2100 (largo plazo) con respecto al período histórico (1976-2005) en el promedio multimodelo de las cuatro RCP consideradas: **a)** RCP 2,6, **b)** RCP 4,5, **c)** RCP 6,0, y **d)** RCP 8,5. Las regiones punteadas en a), b), c) y d) indican consenso del 80 % entre modelos en el signo del cambio proyectado. **e)** Cambios proyectados para el promedio de las cuatro RCP. En e), los puntos indican consenso del 80 % entre las RCP en el signo del cambio proyectado.

En la **figura 5** se observan diferencias mayores en el largo plazo que para los horizontes prospectivos de corto y mediano plazo. En DEF se observan incrementos de precipitación en todo el dominio por debajo de 1 mm/día en todas las RCP, excepto para la RCP 8,5, con valores que alcanzan 1,4 mm/día en el centro y sur de la región Pacífico. En MAM los mayores cambios se dan también en el centro y sur del Pacífico en la RCP 8,5, con valores de 1,4 mm/día, pero con menor extensión que la observada durante DEF. En JJA, se observan diferencias negativas en la región Caribe, alcanzando valores de -1,4 mm/día en la RCP 8,5, en tanto que las mayores diferencias positivas se dan en el centro y sur de las regiones Andina y Pacífico, alcanzando valores de 2,6 mm/día en la costa pacífica. Por su parte, en SON se proyectan cambios negativos en la precipitación, principalmente al sur de las regiones Pacífico y Andina para la RCP 2,6, en la Orinoquía y parte de la región Andina en la RCP 4,5, al oriente de la Orinoquía y sur del Pacífico para la RCP 6,0, y al centro y oriente de la Orinoquía y sur del Amazonas para la RCP 8,5, donde se alcanzan valores de -1,4 mm/día. En las proyecciones de largo plazo los modelos coinciden en cuanto a los aumentos de precipitación de hasta 1,4 mm/día en la zona suroccidental del país bajo la RCP 8,5.

Los cambios de precipitación proyectados correspondientes al promedio multiescenario (**Figura 5e**) muestran un patrón espacial similar al exhibido por cada una de las cuatro RCP, aunque los valores estimados se asemejan a los de la RCP 6,0, similares a lo observado para la temperatura (**Figura 3e**). Al promediar las proyecciones de precipitación en el territorio colombiano, se observó una menor variación entre las RCP en comparación con lo encontrado para la temperatura (**Figura 4a**). Esto se debe a la compensación en el promedio de las proyecciones opuestas de incremento de precipitación para el centro-occidente del país y oriente del Pacífico (**Figura 4b**) y de disminución para el oriente y sur del país (**Figura 5**), así como a una posible subestimación de la variabilidad espacial (**Arnell & Gosling, 2013**). Este patrón espacial de cambios de precipitación proyectados en Colombia también se observa en el promedio multiescenario presentado en la figura 12 de la Tercera CNCC (**IDEAM et al., 2017**).

Efecto de la reducción de escala

El escenario de cambio climático planteado en la Tercera CNCC para Colombia aplica la reducción estadística de escala mediante el uso de estaciones meteorológicas (**IDEAM et al., 2017**). La reducción de escala es una metodología ampliamente empleada para la regionalización de simulaciones y proyecciones de cambio climático (**Doblas-Reyes et al., 2021**), como se constata en las CNCC de 35 países revisadas en este artículo (**Tabla 1S**, <https://www.raccefn.co/index.php/raccefn/article/view/1705/3284>). Lo anterior se debe a que los MCG empleados para las proyecciones globales presentan escalas horizontales gruesas (del orden de 100 a 200 km) y, además, generalmente exhiben sesgos marcados en su representación de la diversidad de los climas regionales. Los sesgos encontrados en la representación del clima presente mediante los MCG utilizados en el presente artículo (**Figuras 1 y 2**) evidencian las dificultades que tienen este tipo de modelos para representar la temperatura del aire en superficie y la precipitación en Colombia, algo que se ha reportado y analizado previamente con más detalle en múltiples estudios (**Yin et al., 2013; Palomino-Lemus et al., 2015, 2017; Sierra et al., 2015; Bonilla-Ovallos & Mesa-Sánchez, 2017; Posada-Marín et al., 2019; Arias et al., 2021b; Ortega et al., 2021**).

Como un acercamiento al efecto de la reducción de escala en las proyecciones obtenidas, se comparó el promedio histórico de cinco de los modelos CMIP5 para temperatura utilizados en la Tercera CNCC y sus simulaciones CORDEX correspondientes (**Tabla 2**). La **figura 6** muestra que tanto las simulaciones CORDEX como las de los modelos globales CMIP5 sobreestimaron la temperatura del aire en superficie, principalmente en las regiones de la Orinoquía y la Amazonía. Los sesgos en torno a dichas regiones son de mayor magnitud para el conjunto CORDEX (**Figura 6e**), con valores de hasta 6,5 °C, en comparación con los sesgos del conjunto CMIP5 (**Figura 6d**), que llegan hasta los 2 o 3 °C. Las proyecciones de estos modelos CORDEX para finales de siglo (**Figura 5S**, <https://www.raccefn.co>).

co/index.php/raccefyn/article/view/1705/3284) indican que, en general, los aumentos de temperatura de mayor magnitud se proyectan para las regiones de la Amazonía y la Orinoquía (con un calentamiento de hasta 5,2 °C), y que, particularmente para el conjunto CORDEX, se proyectan aumentos de magnitud similar al sur de la región Caribe.

Para la precipitación, este análisis se hizo mediante el uso de simulaciones CORDEX disponibles correspondientes a tres de los modelos empleados en la Tercera CNCC (Tabla 2). La figura 7 muestra que los sesgos de ambos promedios tuvieron una distribución espacial similar y subestimaron la precipitación en las regiones de la Amazonía, la Orinoquía y el Caribe, en tanto que la sobreestimaron en los Andes. En la región Pacífico se observa que, mientras el promedio de CMIP5 sobreestimó la precipitación, el promedio de CORDEX la subestimó tanto en la zona continental como en el océano. Las proyecciones de estos modelos para finales del siglo XXI (Figura 6S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1705/3284>) muestran aumentos superiores a los 3,8 mm/día en el océano Pacífico y disminuciones de 2,2 mm/día al noroccidente del país durante JJA en el promedio de CMIP5, y disminuciones superiores a 3,8 mm/día en los Andes colombianos con el conjunto CORDEX, principalmente en los últimos dos trimestres del año. Además, en DEF se observa una disminución proyectada en las precipitaciones al sur de la región Pacífico de alrededor de 3 mm/día.

Las simulaciones CORDEX consideradas muestran que no necesariamente se obtienen mejoras en las representaciones de las variables y sus patrones espaciales al emplear una reducción de escala, ya que se observaron mayores sesgos en la representación del clima de referencia para el territorio colombiano con las simulaciones CORDEX que con los correspondientes modelos CMIP5. Cabe resaltar que la resolución de las simulaciones CORDEX utilizadas fue de 0,44 ° (48,9 km, aproximadamente). En el caso de Colombia recientemente se hicieron algunos estudios utilizando modelos con resoluciones más finas (Oglesby *et al.*, 2016; Martínez *et al.*, 2019, 2022; Posada-Marín *et al.*, 2019; Manciu *et al.*, 2020). Específicamente, Oglesby *et al.* (2016) encontraron una representación adecuada de las zonas con topografía baja y regiones insulares con una resolución de 12 km,

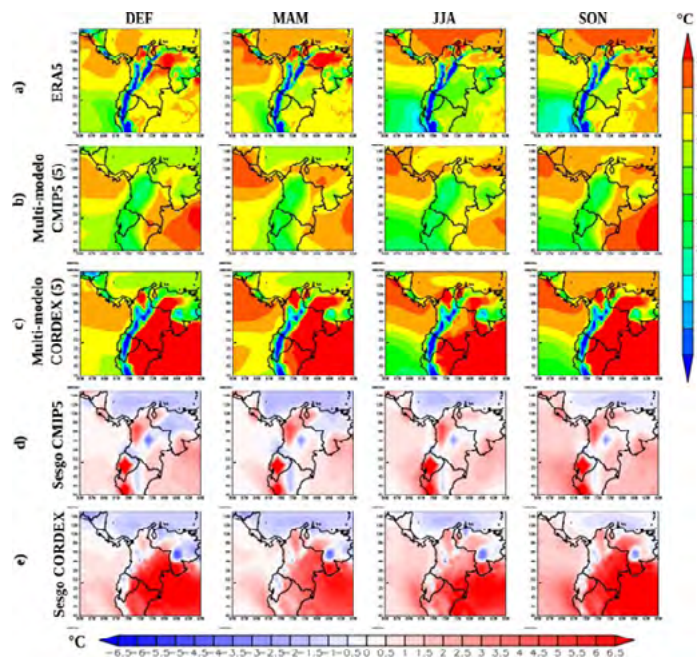


Figura 6. Climatología trimestral de temperatura superficial del aire (°C) para **a)** ERA5, **b)** simulaciones históricas de los cinco modelos CMIP5 CORDEX (Tabla 2), **c)** promedio de las simulaciones CORDEX de estos modelos, y **d)** y **e)** sus sesgos con respecto a ERA5

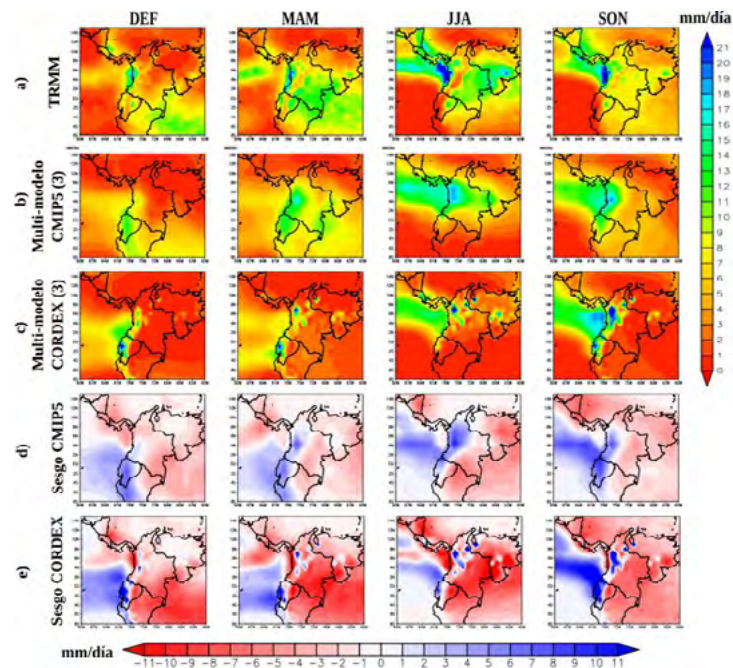


Figura 7. Climatología trimestral de precipitación (mm/día) para **a)** TRMM, **b)** simulaciones históricas de los tres modelos CMIP5 CORDEX (**Tabla 2**), **c)** promedio de las simulaciones CORDEX de estos modelos, y **d)** y **e)** sus sesgos con respecto a TRMM.

en tanto que para las zonas con topografía compleja es necesario el uso de resoluciones de alrededor de 4 km. Ello resalta la necesidad de desarrollar ejercicios de reducción de escala dinámica que mejoren la representación de la precipitación (**Bonilla-Ovallos & Mesa-Sánchez, 2017; Posada-Marín et al., 2019; Pabón-Caicedo et al., 2020; Arias et al., 2021b**) y la temperatura del aire en superficie (**Gutowski et al., 2020; Pabón-Caicedo et al., 2020**), máxime en regiones topográficamente complejas como Colombia.

En general, se espera que las mejoras en el desempeño de los modelos regionales, objetivo de los experimentos CORDEX, provean mayor confianza en su representación de escenarios históricos de temperatura y precipitación y las proyecciones de cambio en el futuro. En este sentido, el desarrollo y la evaluación de más simulaciones regionales, conjuntamente con su representación de proyecciones climáticas, es una tarea que debe sumarse a las actividades que podrían proporcionar mayor información sobre el rango de cambios posibles en el clima colombiano.

Comparación con la Tercera Comunicación Nacional de Colombia

Con el objeto de analizar la evolución de los escenarios de cambio climático para Colombia en las diferentes CNCC, en nuestro artículo se consideró una revisión exhaustiva de la Segunda y la Tercera CNCC comparando sus metodologías y resultados. Para la temperatura, la Segunda CNCC (**IDEAM, 2010, pp 2007-2011**) y la Tercera CNCC (**IDEAM et al., 2017, pp 25-28**) concuerdan en los aumentos de sus promedios multiescenario para los periodos 2011-2040 y 2041-2070. Sin embargo, en el largo plazo (2071-2100) se encuentran diferencias entre ambas: en la Segunda se proyectan los mayores aumentos de temperatura en la región Andina y el Caribe (3-4 °C), con mayores cambios en Tolima y Norte de Santander (>4 °C) (**IDEAM, 2010, figura 4.7**). Por su parte, la Tercera CNCC arroja aumentos de menor magnitud proyectados en las regiones Andina y Caribe (0,5-1,5 °C), en tanto que para el resto del país se proyectan aumentos de temperatura media de alrededor de 3,0 °C (**IDEAM et al., 2017, figura 11**). Al comparar las proyecciones bajo cada RCP, la Tercera CNCC y este artículo concuerdan en lo proyectado en el corto plazo (2011-2040) y,

aunque se obtienen magnitudes similares de los cambios proyectados en el mediano y largo plazo, difieren en la distribución espacial de los cambios de temperatura, ya que mientras los máximos aumentos de la Tercera CNCC se dan en la región Andina y el oriente del país (parte de Vichada, Arauca y Casanare), con hasta 5,0 °C de calentamiento proyectado (IDEAM *et al.*, 2015a, figura 25), los máximos aumentos de temperatura determinados en nuestro estudio se observan en toda la región de la Orinoquía y la Amazonía (>5,2 °C) (Figura 3). Llama la atención que pese a que la Tercera CNCC muestra aumentos de temperatura proyectados en la región Andina, con magnitudes superiores a los proyectados en otras regiones bajo todas las RCP, el promedio multiescenario exhibe los menores aumentos en esta región (IDEAM *et al.*, 2017, figura 11; IDEAM *et al.*, 2015a, figura 92).

En cuanto a la precipitación, la Segunda CNCC (IDEAM, 2010, pp 2007-2011) y la Tercera CNCC (IDEAM *et al.*, 2017, pp 25-28; IDEAM *et al.*, 2015a, pp 224-226) no concuerdan en cuanto a las proyecciones de sus promedios multiescenario. En particular, la Segunda CNCC proyecta disminuciones de aproximadamente 10 % de la precipitación en la mayor parte de la región Andina para el período 2011-2040, y reducciones de 20 a 30 % en algunos de los departamentos de esta región para el período 2071-2100 (IDEAM, 2010, figura 4.8), mientras que en la Tercera CNCC se proyectan reducciones de 10 a 40 % en el Caribe y la Amazonía y aumentos de hasta 30 % en algunas zonas de la región Andina en los tres horizontes temporales considerados (IDEAM *et al.*, 2017, figura 12). Por otra parte, la Tercera CNCC presenta aumentos de precipitación de 10 a 40 % en la región Andina consistentes en todas las RCP y disminuciones de hasta 40 % en las regiones Caribe, Orinoquía y Amazonía (IDEAM *et al.*, 2015a, figura 84), en tanto que en nuestro estudio se determinaron cambios de precipitación (aumentos generalizados en DEF y MAM, y reducciones en la mayor parte del territorio nacional en SON) que se incrementan en la medida en que avanzamos hacia finales del siglo XXI (Figuras 3S y 4S, <https://www.raccefn.co/index.php/raccefn/article/view/1705/3284>) (Figura 5). Además, las proyecciones analizadas en este artículo sugieren los cambios más marcados hacia finales de siglo en la RCP 8,5, especialmente aumentos de precipitación en la región Pacífica (>2,6 mm/día) y disminuciones en la Orinoquía (-1,4 mm/día) y el Caribe (-1,8 mm/día) (Figura 5). También llama la atención en la Tercera CNCC que los cambios de precipitación en el corto plazo (2011-2040) proyectados según el promedio multiescenario tengan magnitudes similares a los cambios proyectados en el mediano (2041-2070) y largo (2071-2100) plazo (IDEAM *et al.*, 2017, figura 12). Esto es algo que no está respaldado por los promedios de los modelos CMIP5 analizados en este artículo (Figura 5) (Figuras 3S y 4S, <https://www.raccefn.co/index.php/raccefn/article/view/1705/3284>).

Discusión

El IPCC tiene como objetivo proporcionar una base científica a los gobiernos para la toma de decisiones sobre cambio climático, sus implicaciones y posibles riesgos futuros, así como presentar opciones de adaptación y mitigación. Las CNCC son un elemento fundamental en el proceso de toma de decisiones en materia de cambio climático en cuanto a adaptación y mitigación (IDEAM, 2001), por lo que es crítico que las metodologías empleadas para su elaboración sigan los lineamientos establecidos por el IPCC, como lo recomienda la CMNUCC en su decisión 17/CP.8 (CMNUCC, 2003).

En este artículo se hace una revisión de las proyecciones de temperatura media del aire y de precipitación media en las diferentes CNCC de Colombia; se encontraron proyecciones de precipitación opuestas entre la Segunda y la Tercera CNCC para las regiones Andina y Caribe. Estas proyecciones de precipitación contradictorias para la región Andina tienen graves implicaciones en la estimación del riesgo de desastres en una región altamente deforestada y vulnerable (ecológica y socialmente) (Hoyos *et al.*, 2013), con los niveles más altos de erosión del suelo en el país (<http://www.ideam.gov.co/web/siac/erosion>).

La Tercera CNCC plantea un escenario de cambio climático para Colombia estimado a partir del promedio aritmético de las proyecciones obtenidas para cuatro trayectorias de desarrollo socioeconómico (RCP) diferentes que dan lugar a una gama diferente de

emisiones de GEI. En este artículo se evidencia que la obtención de un escenario mediante un promedio aritmético de proyecciones bajo diferentes escenarios socioeconómicos no está conceptual ni metodológicamente fundamentado. Utilizar un escenario promedio tiene sentido cuando los escenarios son indistinguibles. Para el problema en cuestión, cada uno de los escenarios es cualitativamente distinguible y, además, conducen a realizaciones bien diferenciadas de la evolución del clima. De esta manera, el uso del promedio de las proyecciones correspondientes a diferentes escenarios elimina la posibilidad de evaluar la posible respuesta del sistema climático ante diferentes forzamientos radiativos y concentraciones de GEI, evaluación que es la razón fundamental para considerar diferentes escenarios en el proyecto CMIP (ver FAQ 12.1 en **Collins et al.**, 2013).

Las proyecciones de temperatura media en Colombia varían significativamente entre las cuatro RCP planteadas en el quinto informe del IPCC (**Figuras 1S y 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1705/3284>) (**Figuras 3 y 4a**). Además, pese a que la Tercera CNCC muestra aumentos de temperatura proyectados para la región Andina con magnitudes superiores a los proyectados en otras regiones, bajo todas las RCP el promedio multiescenario exhibe los menores aumentos en esta región (**IDEAM et al.**, 2017, figura 11; **IDEAM et al.**, 2015a, figura 92), lo que puede repercutir en aspectos agrícolas, sociodemográficos, de política pública y de biodiversidad, entre otros. Por ejemplo, la atenuación de los cambios de temperatura proyectados bajo las RCP de mayores emisiones mediante un promedio de RCP podría inducir cambios importantes en los usos del suelo, por ejemplo por la exacerbación de sequías e incendios y la muerte de la vegetación (**Allen et al.**, 2010). Por otra parte, el promedio aritmético de la precipitación proyectada para diferentes escenarios afecta notoriamente la representatividad obtenida debido a la alta dispersión de las proyecciones de esta variable.

Esto indica que los promedios multiescenario para la estimación de proyecciones de cambio climático no se debería aplicar, dado que constituyen un error conceptual y metodológico. Cada RCP está condicionada por distintos factores de índole económica, política, demográfica y tecnológica, así como de tipos de uso del suelo y de uso y obtención de energía (IPCC, 2014), incluidas decisiones de alimentación de la población (**Thomson et al.**, 2011) a tono con las características de diferentes conjuntos y resultado de procesos no lineales y complejos que no se podrían sumar o promediar. Promediar las RCP confunde las señales de cada una y distorsiona el posible impacto que realmente puede tener el cambio climático sobre un territorio, especialmente porque el escenario peor representado por los promedios de escenarios es el correspondiente a la RCP 8,5, lo cual constituye una considerable subestimación de la amenaza climática, dada la importancia de considerar los escenarios de mayores emisiones de GEI en la toma de decisiones (**McInerney et al.**, 2012; **Schwalm et al.**, 2020). Es importante enfatizar que subestimar esta amenaza presenta graves implicaciones para la toma de decisiones, ya que la RCP 8,5 es la ruta más cercana a las emisiones actuales y, posiblemente, a las emisiones observadas a mediados de siglo (**Schwalm et al.**, 2020).

Cabe señalar que no se ha encontrado ningún artículo en la literatura científica, ni en las CNCC de otros países (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1705/3284>), que estime promedios multiescenario. Hacerlo constituye, entonces, una amenaza a la adecuada elección de alternativas ante el cambio climático para el país, dada su alta vulnerabilidad social, ambiental y económica (**Patt et al.**, 2010; **Magrin et al.**, 2014; **Roncancio et al.**, 2020; **Castellanos et al.**, 2022), pues se puede promover la implementación de medidas de adaptación inadecuadas e insuficientes, poniendo en riesgo vidas humanas, la riqueza ecosistémica de la nación (IPCC, 2014) y su desarrollo económico (**Bruckner**, 2012). Por ejemplo, en el informe conjunto de la Plataforma Intergubernamental de la Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos (IPBES) y el IPCC (**Otto-Portner et al.**, 2021), se subraya la incidencia de la variabilidad climática sobre el funcionamiento de los ecosistemas y su capacidad de contribuir al bienestar de la sociedad. Las respuestas de ambos sistemas, el ecológico y el social, así como sus interacciones, dependen de la magnitud de los eventos considerados, por lo tanto, una mayor incertidumbre en los escenarios

abordados derivará en medidas inadecuadas para la mitigación o adaptación frente a esta amenaza. Existe aún el reto de analizar para Colombia el efecto de las diferentes RCP sobre los escenarios de cambio de la biodiversidad y su contribución al bienestar, de forma que puedan considerarse para el ordenamiento del territorio (**Chaves *et al.*, 2021**).

Algunas regiones colombianas son particularmente vulnerables a desastres, especialmente las poblaciones humanas establecidas en zonas con alta frecuencia y magnitud de desastres relacionados con el clima, muchas de las cuales presentan, además, una gran vulnerabilidad social y económica (**Banco Mundial, 2012; UNDP, 2010**). Esto genera impactos que afectan la calidad de vida de los habitantes de estas regiones, especialmente en las zonas rurales afectadas también por el desplazamiento interno y la migración (**UNDP, 2010; McAdam, 2016; Salazar *et al.*, 2018**). Es fundamental, entonces, contar con herramientas rigurosas de apoyo a la gestión territorial que orienten la adecuada toma de decisiones basada en análisis de riesgos presentes y futuros y permitan planificar acciones e inversiones en las diferentes regiones del país.

Todo lo anterior representa un llamado de atención sobre el escenario promedio planteado en la Tercera CNCC para la toma de decisiones relacionadas con la adaptación y mitigación orientadas a la reducción de la vulnerabilidad ante el cambio climático en Colombia, pues, dada la alta vulnerabilidad del país, el uso de un escenario de este tipo puede generar subestimaciones del riesgo climático actual y futuro para sus poblaciones humanas y ecosistemas (**Magrin *et al.*, 2014; Castellanos *et al.*, 2022**). En este sentido, son necesarios nuevos estudios que utilicen técnicas de corrección de sesgos de los promedios multimodelo a partir de conjuntos de datos observacionales de referencia, con el fin de proporcionar proyecciones climáticas sólidas para los estudios de impacto climático que requieren información de alta resolución horizontal.

En el Informe Especial del IPCC presentado en el 2018 (**IPCC, 2018**) se discuten los impactos de un aumento de la temperatura media global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales (periodo comprendido entre 1850 y 1900) sobre la disponibilidad y la calidad del agua, la aparición de eventos hidrometeorológicos extremos, y las afectaciones a otras especies y ecosistemas, particularmente en los trópicos, incluyendo su deterioro y extinción, entre otros. El informe evidencia que el riesgo asociado con el aumento de las temperaturas globales en 1,5 °C es inferior al asociado con un calentamiento de 2,0 °C (**Hoegh-Guldberg *et al.*, 2018**), lo que realza la importancia de analizar detalladamente las proyecciones asociadas con cada RCP de forma individual y no mediante su promedio aritmético, tal como se corroboró en el más reciente reporte de evaluación del IPCC (AR6) (**IPCC, 2021, 2022a**). Además, es importante señalar que, al igual que en los diferentes informes del IPCC, en las CNCC se debe involucrar el concepto de incertidumbre, elemento fundamental para la toma de decisiones.

No sobra reiterar que el reto de anticipar los efectos del cambio climático en un país complejo como Colombia es inmenso y requiere la cooperación de todos los sectores capaces de aportar. Este desafío requiere investigación que solo puede llevarse a cabo con la financiación adecuada. La importancia social y económica de esta tarea es reconocida, pero necesita materializarse. Es claro que la elaboración de una CNCC requiere una gran cantidad de recursos humanos y técnicos dada la complejidad de los aspectos que se abordan y que van más allá del análisis de simulaciones y proyecciones de cambio climático. Las CNCC de Colombia han mostrado un avance notable en cuanto a la claridad y el detalle metodológico empleado, así como a la integralidad de los diferentes aspectos abordados. La academia y la sociedad civil podrían ser grandes aliadas en la elaboración de estos documentos. Esta es una invitación para que la Cuarta CNCC de Colombia considere la participación de un mayor número de científicas y científicos del país que representen los grupos de investigación con experiencia en el uso e implementación de modelos climáticos y sus simulaciones, así como en el análisis de riesgo y los procesos de toma de decisiones, para que aporten tanto en el planteamiento de metodologías como en la obtención y el análisis de resultados.

En este sentido, la elaboración de un escenario de cambio climático requiere un análisis desde muchas disciplinas en las que nuestra academia tiene experiencia y puede apoyar las labores lideradas por el Gobierno Nacional. El alto número y la amplia diversidad disciplinaria de las autoras y autores de este artículo es una muestra de la consolidación de una comunidad científica nacional que puede participar en la elaboración de una próxima CNCC, no solo en lo que tiene que ver con los aspectos físicos del clima en el país, sino también con el análisis del impacto, la vulnerabilidad, la adaptación y la mitigación frente al cambio climático a escala nacional. En este sentido, existen numerosas instituciones universitarias y de investigación en Colombia con reconocida trayectoria nacional e internacional que pueden apoyar y generar alianzas para esta labor. Más aun, el conocimiento tradicional de las comunidades debería ser incorporado en estos documentos.

De otro lado, las CNCC de Colombia podrían verse enormemente fortalecidas con la revisión por pares externos, como ocurre, por ejemplo, con los Reportes de Evaluación del IPCC, que son revisados por pares de múltiples disciplinas y experticias mediante un proceso transparente y abierto. Sin duda, la incorporación de estos componentes en la elaboración de las CNCC sería una manera de robustecerlas, lo que es fundamental en la gestión del cambio climático en un país de tan alta vulnerabilidad como Colombia.

Por último, debe resaltarse la necesidad de: (i) generar información y conocimiento climático; (ii) traducir este conocimiento en información relevante para el proceso de toma de decisiones; (iii) transferir esta información a los beneficiarios y usuarios finales en formatos y medios que sean compatibles con sus plataformas, y (iv) poner esta información al servicio de los usuarios para su implementación en los procesos de toma de decisiones, así como en la formulación de planes y políticas (Grossi & Dinku, 2022).

Conclusión

En este estudio se comparan las tres CNCC de Colombia publicadas en el 2001, el 2010 y el 2017. Las CNCC son un mecanismo para que los países informen sobre sus avances en mitigación y adaptación, y constituyen un elemento de base para las políticas frente al cambio climático a escala nacional. Por lo tanto, la información presentada en ellas es un insumo fundamental que tiene impacto en las políticas sectoriales a nivel nacional (por ejemplo, en el campo energético) y aportan al planteamiento e implementación de estrategias orientadas al cumplimiento de los objetivos de la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático, el Acuerdo de París y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, así como en la preparación para afrontar los efectos del cambio climático en nuestro país.

Nuestro análisis y la comparación de la información sobre los escenarios de cambio climático generada para la Segunda y la Tercera CNCC de Colombia evidencian coincidencias entre ambos documentos, así como diferencias que necesitan ser aclaradas para la implementación efectiva de políticas climáticas en el país. Específicamente, se observaron resultados en regiones del territorio nacional cuyo signo de cambio en la lámina total anual de precipitación es opuesto. Estas contradicciones pueden inducir errores en la evaluación del riesgo frente al cambio climático y, por ende, en la formulación y la implementación de estrategias locales y regionales de adaptación en las diferentes dimensiones (biofísica, recursos hídricos, salud humana, riesgo de desastres, y sectores productivos, entre otros) de las regiones y territorios del país, todas ellas urgentes y fundamentales, particularmente en la gestión integral de recursos hídricos y ecosistemas y de los riesgos asociados.

En la exploración de la Tercera CNCC se estableció que el único escenario planteado se consolidó a partir de las proyecciones de diversos modelos CMIP5 estimado como el promedio de las proyecciones correspondientes a las cuatro RCP del quinto reporte de evaluación del IPCC. Cada una de estas RCP representa una trayectoria de concentración de GEI para un escenario particular de crecimiento poblacional, económico y tecnológico, que conduce a una posible trayectoria de evolución del sistema climático. Con el análisis individual de las diversas RCP fue posible demostrar que al utilizar un escenario estimado como promedio aritmético de estas RCP, se pierde la oportunidad de evaluar posibles

condiciones futuras, anulando la utilidad de plantear diversas trayectorias de emisiones de GEI y eliminando, así, la posibilidad de que los formuladores de política dispongan de un umbral de incertidumbre para adoptar sus decisiones sobre las acciones de adaptación al cambio climático.

La revisión exhaustiva de más de 35 CNCC de diferentes países del mundo evidenció que la aproximación del “promedio multiescenario” no es una práctica implementada anteriormente para la obtención de un escenario de cambio climático. Más aún, la metodología usada en la Tercera CNCC de Colombia va en contra de lo analizado y sugerido por el IPCC. Lo anterior es de particular importancia, pues el escenario de cambio climático planteado en esa Tercera CNCC es un escenario de referencia para la toma de decisiones en materia de cambio climático a nivel nacional, además de constituir la información base para muchas investigaciones, para la evaluación de los riesgos territoriales y sectoriales frente al cambio climático, y para diversas aplicaciones en los proyectos de diseño, implementación y consultoría que orientan la adaptación al cambio climático en el país.

Cabe señalar la complejidad que entraña preparar la información sobre los posibles climas del futuro o los escenarios de cambio climático, así como la rigurosidad que debe observarse en su elaboración, aspectos que pueden abordarse en el marco de programas de largo aliento que comprometan la participación de los organismos estatales pertinentes, la academia y la sociedad civil. La academia colombiana cuenta con científicas y científicos con amplio conocimiento en las temáticas abordadas en las CNCC y probada disposición a colaborar en esta materia.

Información suplementaria

Ver información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1705/3284>

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Universidad de Antioquia, proyecto CODI PRG2017-16264, y por MINCIENCIAS, programa No. 80740-490-2020. Agradecemos a todas las instituciones a las que pertenecen los autores del manuscrito, así como a los dos revisores anónimos y al editor por sus comentarios y sugerencias para mejorarlo.

Contribución de los autores

PAA: diseño de la investigación; LDV: procesamiento y análisis de los datos y elaboración de las figuras. Todos los autores aportaron a la escritura y la discusión del manuscrito y están de acuerdo con su contenido final.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Allen, C.D., Macalady, A.K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D., Hogg, E.H., Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.-H., Allard, G., Running, S.W., Semerci, A., Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660-684.
- Arias, P.A., Garreaud, R., Poveda, G., Espinoza, J.C., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., Viale, M., Scaff, L., van Oevelen, P.J. (2021a). Hydroclimate of the Andes. Part II: Hydroclimate variability and sub-continental patterns. *Frontiers in Earth Science*, 8(505467), 1-25. doi: 10.3389/feart.2020.505467

- Arias, P.A., Ortega, G., Villegas, L.D., Martínez, J.A.** (2021b). Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: persistent biases and improvements. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 100, 75-96, DOI: 10.17533/udea.redin.20210525
- Arnell, N.G., Gosling, S.N.** (2013). The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale. *Journal of Hydrology*, 486, 351-364.
- Banco Mundial.** (2012). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas. Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento / Banco Mundial Región de América Latina y El Caribe.
- Bedoya-Soto, J.M., Aristizábal, E., Carmona, A.M., Poveda, G.** (2019). Seasonal Shift of the Diurnal Cycle of Rainfall Over Medellín's Valley, Central Andes of Colombia (1998-2005). *Frontiers in Earth Science*, 7. doi: 10.3389/feart.2019.00092
- Bonilla-Ovallos, C.A., Mesa-Sánchez, O.J.** (2017). Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(158), 107-118. doi: 10.18257/raccefyfyn.427
- Bruckner, M.** (2012). Climate change vulnerability and the identification of least developed countries. United Nations, Department of Economics and Social Affairs.
- Cai, W., McPhaden, M.J., Grimm, A.M., Rodrigues, R.R., Taschetto, A.S., Garreaud, R.D., Dewitte, B., Poveda, G., Ham, Y.G., Santos, A., Ng, B., Anderson, W., Wang, G., Geng, T., Jo, H.S., Marengo, J.A., Alves, L.M., Osman, M., Li, S., Wu, L., Karamperidou, C., Takahashi K., Vera C.** (2020). Climate impacts of El Niño-Southern Oscillation on South America. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 215-231. doi:10.1038/s43017-020-0040-3
- Castellanos, E., Lemos, M.F., Astigarraga, L., Chacón, N., Cuvi, N., Huggel, C., Miranda, L., Moncassim Vale, M., Ometto, J.P., Peri, P.L., Postigo, J.C., Ramajo, L., Roco, L., Rusticucci, M.** (2022). Central and South America. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Chaves, M. E., Gómez, S.R., Ramírez, W., Solano, C.** (Eds.). (2021). Evaluación Nacional de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos de Colombia. Resumen para Tomadores de Decisión. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo y el Centro Mundial de Monitoreo para la Conservación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de la República Federal de Alemania. Bogotá D. C., Colombia. <http://hdl.handle.net/20.500.11761/35942>
- CMNUCC.** (2003). Informe de la Conferencia de las Partes sobre su octavo periodo de sesiones, celebrado en Nueva Delhi del 23 de octubre al 1 de noviembre de 2002 (p. 2). Descargado de <http://rcc.marn.gov.sv/xmlui/bitstream/handle/123456789/97/17cp8.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.L., Fichefet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W.J., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Tebaldi, C., Weaver, A.J., Wehner, M.** (2013). Chapter 12 - Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. IPCC Working Group I Contribution to AR5. Eds. IPCC, Cambridge: Cambridge University Press
- Doblas-Reyes, F.J., Sörensson, A.A., Almazroui, M., Dosio, A., Gutowski, W.J., Haarsma, R., Hamdi, R., Hewitson, B., Kwon, W.T., Lamptey, B.L., Maraun, D., Stephenson, T.S., Takayabu, I., Terray, L., Turner, A., Zuo, Z.** (2021). Linking Global to Regional Climate Change. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change}, Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.), Cambridge University Press. In Press.
- Eslava, J.A., Pabón, J.D.** (2001). Proyecto "Proyecciones climáticas e impactos socioeconómicos del cambio climático en Colombia". *Meteorología Colombiana*, 3, 1-8.
- Espinoza, J. C., Garreaud, R., Poveda, G., Arias, P.A., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., Viale, M., Scaff, L.** (2020). Hydroclimate of the Andes. Part I: main climatic features. *Frontiers Earth Sciences*, 8, 64. doi:10.3389/feart.2020.00064
- Gao, L., Bernhardt, M., Schulz, K., Chen, X.** (2017). Elevation correction of ERA-Interim temperature data in the Tibetan Plateau. *International Journal of Climatology*, 37, 3540-3552. <https://doi.org/10.1002/joc.4935>

- Giorgi, F., Gutowski, W.J.** (2015). Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. *Annual Review of Environment and Resources*, 40(1), 467-490. doi: 10.1146/annurev-environ-102014-021217
- Grossi, A., Dinku, T.** (2022). Enhancing national climate services: How systems thinking can accelerate locally led adaptation. *Perspective*, 5(1), 74-83. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.12.007>
- Gutowski, W.J., Ullrich, P.A., Hall, A., Leung, L.R., O'Brien, T.A., Patricola, C. M., Zarzycki, C.** (2020). The Ongoing Need for High-Resolution Regional Climate Models: Process Understanding and Stakeholder Information. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(5), E664–E683. doi: 10.1175/BAMS-D-19-0113.1
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biaviti, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Thépaut, J.-N.** (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society*, 146, 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K.L., Engelbrecht, F., Guiot, J., Hijioka, Y., Mehrotra, S., Payne, A., Seneviratne, S.I., Thomas, A., Warren, R., Zhou, G.** (2018). Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.
- 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.
- 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(1), 38-55.
- Hulme, M., Sheard, N.** (1999). Escenarios de Cambio Climático para Países de los Andes del Norte, Unidad de Investigación Climática (Climate Research Unit – CRU), Norwich, Reino Unido, 6pp
- IDEAM.** (2001). Colombia Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Colombia. Trade Link Ltda. Descargado de <http://www.ideam.gov.co/documents/40860/219937/primer-comunicacion--nacional/b99663bb-9023-47d1-b54a-41f74cca0b1e>
- IDEAM.** (2010). República de Colombia Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Bogotá, Colombia. Editorial Scripto Ltda. Descargado de <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Segunda%20comunicacion%20nacional%20Espanol%20Colombia.pdf>
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, y CANCELLEERÍA.** (2015a). 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, Colombia. Unatintamedios. ISBN 978-958-8902-56-2. Descargado de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022963/escenarios_cambioclimaticodepartamental/Estudio_tecnico_completo.pdf
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, y CANCELLEERÍA.** (2015b). Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional - Regional: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (pp. 9). ISBN 978-958-8902-57-9. Descargado de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022965/documento_nacional_regional.pdf
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, y CANCELLEERÍA.** (2017). Tercera Comunicación Nacional De Colombia a La Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (CMNUCC). Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLEERÍA, FMAM. Bogotá D.C., Colombia. Descargado de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023731/TCNCC_COLOMBIA_CMNUCC_2017_2.pdf

- IPCC.** (2000). Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Nebojsa Nakicenovic y Rob Swart, Eds.). Cambridge; New York: Cambridge University Press. (OCLC: ocm44652561)
- IPCC.** (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)] (pp. 9 y 13). IPCC, Ginebra, Suiza, 157 pp. Descargado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- IPCC.** (2018). Summary for Policymakers. In Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. ([Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)])
- IPCC.** (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3-32, doi:10.1017/9781009157896.001
- IPCC.** (2022a). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press
- IPCC.** (2022b). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.001. In Press
- Jaramillo-Robledo, A., Chaves-Córdoba, B.** (2000). Distribución de la precipitación en Colombia mediante conglomeración estadística. *Cenicafé*, 51(2), 102-113.
- Kiehl, J.T., Hack, J.J., Bonan, G.B., Boville, B.A., Williamson, D.L., Rasch, P.J.** (1998). The National Center for Atmospheric Research Community Climate Model: CCM3, *Journal of Climate*, 11(6), 1131-1149.
- Loaiza-Cerón, W, Kayano, M.T., Andreoli, R.V., Avila-Diaz, A., de Souza, I.P, Souza R.A.F.** (2021). Pacific and Atlantic Multidecadal Variability Relations with the Choco and Caribbean Low-Level Jets during the 1900–2015 Period. *Atmosphere*, 12(9), 1120. <https://doi.org/10.3390/atmos12091120>
- Magrin, G.O., Marengo, J., Boulanger, J.P., Buckeridge, M.S., Castellanos, E., Poveda, G., Scarano, F.R., Vicuña, S.** (2014). Central and South America. In: Barros, V.R., et al., Eds., Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Part B: Regional Aspects, Cambridge University Press, Cambridge, 1499-1566
- Manciu, A., Krause, A., Rammig, A., Quesada, B.** (2020). Impacts of land cover changes and global warming on climate in Colombia using the regional climate model WRF, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-7093, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-7093>
- Martínez, J.A., Arias, P.A., Castro, C., Chang, H.I., Ochoa-Moya, C.A.** (2019). Sea surface temperature-related response of precipitation in northern South America according to a WRF multi-decadal simulation. *International Journal of Climatology*, 39(4), 2136-2155. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.5940>
- Martínez, J.A., Arias, P.A., Junquas, C., Espinoza, J.C., Condom, T., Dominguez, F., Morales, J.S.** (2022). The Orinoco low-level jet and the cross-equatorial moisture transport over tropical South America: lessons from seasonal WRF simulations. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, <https://doi.org/10.1029/2021JD035603>, in press.

- Masui, T., Matsumoto, K., Hijioka, Y., Kinoshita, T., Nozawa, T., Ishiwatari, S., Kato, E., Shukla, P.R., Yagamata, Y., Kainuma, M.** (2011). An emission pathway for stabilization at 6 Wm⁻² radiative forcing. *Climatic Change*, 109(1-2), 59-76. doi: 10.1007/s10584-011-0150-5
- McAdam, J.** (2016). Climate Change-related Displacement of Persons. In: The Oxford Handbook of 2 International Climate Change Law [Gray, K.R., R. Tarasofsky, and C. Carlarne, (eds.)], Oxford 3 University Press, Oxford, p. pp. 519.
- McInerney, D., Lempert, R., Keller, K.** (2012). What are robust strategies in the face of uncertain climate threshold responses? *Climatic change*, 112(3), 547-568.
- Mejía, J.F., Mesa, O.J., Poveda, G., Vélez, J.I., Hoyos, C.D., Mantilla, R.I., Barco, J., Cuartas, A., Montoya, M.I., Botero, B.A.** (1999). Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. *Dyna*, 127, 7-26.
- Oglesby, R., Rowe, C., Grunwaldt, A., Ferreira, I., Ruiz, F., Campbell, J., Alvarado, L., Argenal, F., Olmedo, B., del Castillo, A., Lopez, P., Matos, E., Nava, Y., Perez, C., Perez, J.** (2016). A High-Resolution Modeling Strategy to Assess Impacts of Climate Change for Mesoamerica and the Caribbean. *American Journal of Climate Change*, 5(2), 202-228. doi: 10.4236/ajcc.2016.52019
- Ortega, G., P.A. Arias, P.A., Villegas, J.C., Marquet, P.A., Nobre, P.** (2021). Present-day and future climate over Central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. *International Journal of Climatology*, 41(15), 6713-6735. doi: 10.1002/joc.7221
- Otto-Portner, H., Scholes, B., Agard, J., Archer, J., Arneth, E., Bai, X., Barnes, D., Burrows, M., Chan, L., Cheung, W.L., Diamond, S., Donatti, C., Duarte, C., Eisenhauer, N., Foden, W., Gasalla, M.A., Handa, C., Hickler, T., Hoegh-Guldberg, O., Ichii, K., Ngo, H.T.** (2021). IPBES-IPCC co-sponsored workshop report synopsis on biodiversity and climate change. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4782538>
- Pabón J.D., Eslava J.A., Pelkowski J., Montoya G.J., Vega E.E.** (2001). Resultados de la simulación del clima por CCM3. *Meteorología Colombiana*, 4, 61-64.
- Pabón-Caicedo, J.D., Arias, P.A., Carril, A.F., Espinoza, J.C., Fita-Borrel, L., Goubanova, K., Lavado, W., Masiokas, M., Solman, S., Villalba, R.** (2020). Observed and projected hydroclimate changes in the Andes. *Frontiers Earth Sciwncwa*, 8, 61. doi:10.3389/feart.2020.00061
- Pabón-Caicedo, J.D., Eslava-Ramírez, J.A., Gómez-Torres, R.E.** (2001). Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 4, 47-59. (Bogotá, D.C. – Colombia).
- Palomino-Lemus, R., Córdoba-Machado, S., Gámiz-Fortis, S.R., Castro-Díez, Y., Esteban-Parra, M.J.** (2015). Summer precipitation projections over northwestern South America from CMIP5 models. *Global Planetary Change*, 131, 11-23.
- Palomino-Lemus, R., Córdoba-Machado, S., Gámiz-Fortis, S.R., Castro-Díez, Y., Esteban-Parra, M.J.** (2017). Climate change projections of boreal summer precipitation over tropical America by using statistical downscaling from CMIP5 models. *Environmental Research Letters*, 12 124011.
- Patt, A.G., Tadross, M., Nussbaumer, P., Asante, K., Metzger, M., Rafael, J., Goujon, A., Brundrit, G.** (2010). Estimating least-developed countries' vulnerability to climate-related extreme events over the next 50 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(4), 1333-1337. doi: 10.1073/pnas.0910253107
- Posada-Marín, J.A., Rendón, A.M., Salazar, J.F., Mejía, J.F., Villegas, J.C.** (2019). WRF downscaling improves ERA-Interim representation of precipitation around a tropical Andean valley during El Niño: implications for GCM-scale simulation of precipitation over complex terrain. *Climate Dynamics*, 52(5), 3609-3629. doi: 10.1007/s00382-018-4403-0
- Poveda, G.** (2004). La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 28, 201-222.
- Poveda, G., Álvarez, D.M., 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. *Climate Dynamics* 36 (11-12), 2233-2249. doi:10.1007/s00382-010-0931-y
- Poveda, G., Jaramillo, L., Vallejo, L.F.** (2014). Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers. *Water Resources Research*, 50(1), 98-118. doi: <https://doi.org/10.1002/2013WR014087>

- Poveda, G., Mesa, O.** (1999). La Corriente de Chorro Superficial del Oeste (“del CHOCÓ”) y otras dos corrientes de chorro atmosféricas sobre Colombia: Climatología y Variabilidad durante las fases del ENSO. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 23, 517-528.
- Poveda, G., Mesa, O.J.** (2000). On the existence of Lloró (the rainiest locality on Earth): Enhanced ocean-land-atmosphere interaction by a low-level jet. *Geophysical Research Letters*, 27(11), 1675-1678. doi: <https://doi.org/10.1029/1999GL006091>
- Poveda, G., Mesa, O.J., Salazar, L.F., Arias, P.A., Moreno, H.A., Vieira, S.C., Alvarez, J.F.** (2005). The Diurnal Cycle of Precipitation in the Tropical Andes of Colombia. *Monthly Weather Review*, 133(1), 228-240. doi: 10.1175/MWR-2853.1
- Poveda, G., Waylen, P.R., Pulwarty, R.** (2006). Modern climate variability in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 234, 3-27. doi: 10.1016/j.palaeo.2005.10.031
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., Rafaj, P.** (2011). RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109(1-2), 33-57. doi: 10.1007/s10584-011-0149-y
- Riahi, K., van Vuuren, D.P., Kriegler, E., Edmonds, J., O’Neill, B.C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J.C., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Tavoni, M.** (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009
- Roncancio, D., Cutter, S., Nardocci, A.** (2020). Social vulnerability in Colombia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101872. doi: 10.1016/j.ijdr.2020.101872
- Salazar, A., Sánchez-Andrade, A., Villegas, J.C., Salazar-Villegas, J.F., Ruiz-Carrascal, D., Sitch, S., Restrepo, J.D., Poveda, G., Feeley, K., Mercado, L., Arias, P.A., Sierra, C., Uribe, M., Pérez, J., Rendón, A.M., Murray-Tortarolo, G., Mercado-Bettin, D., Posada-Marín, J., Zhuang, Q., Qianlai, X., Dukes, J.** (2018). The ecology of peace: Preparing Colombia for new political and planetary climates. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(9), 525-531, doi:10.1002/fee.1950
- Schwalm, C. R., Glendon, S., Duffy, P.B.** (2020). RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(33), 19656-19657. doi: 10.1073/pnas.2007117117
- Sheridan, P., Smith, S., Brown, A., Vosper, S.** (2010). A simple height-based correction for temperature downscaling in complex terrain. *Meteorological Applications*, 17: 329-339. <https://doi.org/10.1002/met.177>
- Sierra, J.P., Arias, P.A., Durán-Quesada, A.M., Tapias, K.A., Vieira, S.C., Martínez, J.A.** (2021) The Choco low-level jet: past, present and future. *Climate Dynamics*, 56, 2667-2692. doi: 10.1007/s00382-020-05611-w
- 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*, 1-23. doi: 10.1155/2015/634720
- Sierra, J.P., Arias, P.A., Vieira, S.C., Agudelo, J.** (2018). How well do CMIP5 models simulate the low-level jet in western Colombia? *Climate Dynamics*, 51(5-6), 2247-2265. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-017-4010-5>
- Thomson, A.M., Calvin, K.V., Smith, S.J., Kyle, G.P., Volke, A., Patel, P., Edmonds, J.A.** (2011). RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*, 109(1-2), 77-94, doi: 10.1007/s10584-011-0151-4
- UNDP** (United Nations Development Program). (2010). Mainstreaming climate change in Colombia screening for risks and opportunity. Decargado de: www.undp.org/content/dam/aplaws/publication/en/publications/environment-energy/www-ee-library/climate-change/mainstreaming-climatechange-in-colombia/CC%20risk%20Mainstreaming%20Climate%20Change%20in%20ColombiaEN.pdf
- Urrea, V., Ochoa, A., Mesa, O.** (2019). Seasonality of rainfall in Colombia. *Water Resources Research*, 55, 4149-4162, <https://doi.org/10.1029/2018WR023316>
- Vallejo-Bernal, S.M., Urrea, V., Bedoya-Soto, J.M., Posada, D., Olarte, A., Cárdenas-Posso, Y., Ruiz-Murcia, F., Martínez, M.T., Petersen, W., Huffman, G.J., Poveda, G.** (2021). Ground Validation of TRMM 3B43 V7 Precipitation Estimates over Colombia. Part I: Monthly and Seasonal Timescales. *International Journal of Climatology*, 41(4), 601–624, doi: 10.1002/joc.6640

- Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, Smith, S.J., Rose, S. K.** (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1), 5. doi: 10.1007/s10584-011-0148-z
- Van Vuuren, D.P., Stehfest, E., den Elzen, M.G.J., Kram, T., van Vliet, J., Deetman, S., Isaac, M., Goldewijk, K.K., Hof, A., Beltran, A.M., Oosternrikj, R., van Ruijven, B.** (2011). RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. *Climatic Change*, 109(1-2), 95-116, doi: 10.1007/s10584-011-0152-3
- 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, doi: 10.1007/s00382-012-1582-y