

# Anexo A

## WP1.1.2. Evaluación de los efectos relacionados con el cambio climático a nivel local

Impactos del cambio climático en los eventos extremos de precipitación y temperatura en Centroamérica y el norte de Suramérica: un estudio de caso de un valle interandino.

### Contenido

---

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Metodología y Datos</b>	<b>3</b>
2.1	Definición de eventos extremos . . . . .	3
2.2	Definición del área de estudio . . . . .	4
2.3	Datos climáticos de referencia . . . . .	5
2.4	Selección de modelos de Circulación General y escenarios SSP . . . . .	5
2.5	Desempeño de los modelos de circulación general en la representación de los índices de precipitación y temperatura extrema . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Resultados</b>	<b>7</b>
3.1	Evaluación del desempeño en los índices de temperatura y precipitación . . .	7
3.2	Proyecciones futuras siglo XXI índices de temperatura y precipitación . . .	9
3.3	Proyecciones de los índices de extremos de temperatura y precipitación para el siglo XXI para la región de Antioquia . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>17</b>

# 1. Introducción

El Valle de Aburrá y su región vecina enfrentan el reto de afrontar el cambio climático y su variabilidad asociada. A medida que los patrones climáticos cambian, sus consecuencias se extienden a través de los ecosistemas, las economías y las comunidades, planteando amenazas significativas a la habitabilidad de la región y la estabilidad de los servicios vitales de los ecosistemas. Especialmente preocupantes son los efectos sobre los recursos hídricos esenciales para el abastecimiento de agua potable, la generación hidroeléctrica y el mantenimiento del suelo. Esta situación se ve exacerbada por la alta vulnerabilidad de América Latina y el Caribe a los extremos climáticos, impulsada por factores como el bajo desarrollo socioeconómico y una alta dependencia económica de la agricultura (Collins et al., 2013; Marengo et al., 2014; Reyer et al., 2017; Seneviratne et al., 2021).

Informes recientes de la Organización Meteorológica Mundial destacan las tendencias históricas que indican un aumento de la intensidad y frecuencia de los extremos cálidos, una disminución de los extremos fríos y una intensificación significativa de las precipitaciones intensas en Sudamérica (CLIMA and TE, 2021). Además, las proyecciones sugieren un aumento de las temperaturas extremas cálidas diarias y de las precipitaciones intensas, predominantemente en regiones tropicales, a lo largo del siglo XXI (Seneviratne et al., 2021). Estos cambios observados y proyectados han modulado y se espera que modulen variaciones en el sistema ambiental y social, aumentando la vulnerabilidad de ecosistemas y comunidades frente a dichos efectos del cambio climático.

En este contexto, los índices de extremos climáticos que se basan en diversas variables ambientales son ampliamente utilizados para describir y analizar los cambios observados en los patrones de extremos climatológicos, permitiendo evaluar fluctuaciones de eventos extremos en términos de su duración, intensidad y frecuencia de ocurrencia (Data, 2009; Zhang et al., 2011).

Aunque los estudios destinados a analizar las proyecciones de cambio en el sistema ambiental en distintas escalas espaciales y temporales, así como sus posibles efectos sobre ecosistemas, actividades productivas y comunidades específicas, son valiosos para identificar las variaciones en sus dinámicas y patrones, es importante tener en cuenta que los métodos empleados para llevar a cabo tales análisis pueden incidir en los resultados y, por ende, en el conocimiento adquirido (Giorgi, 2010). En los análisis de los efectos del cambio climático sobre el sistema ambiental está ampliamente difundido el uso de modelos de circulación general para simular los patrones climáticos en el periodo observado y realizar predicciones de los posibles cambios del sistema ambiental bajo diferentes escenarios.

De esta manera, el Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP, por sus siglas en inglés) define una serie de experimentos estándar de simulación numérica que buscan mejorar el conocimiento del cambio climático en diferentes periodos temporales, los cuales pueden ser moduladas por variabilidad natural o por forzamientos radiativos (Meehl et al., 2005). Los modelos que conforman el CMIP en sus diferentes fases presentan diversas características, por lo que el marco de comparación propuesto por el CMIP permite robustecer los resultados obtenidos a partir de los ejercicios de modelación climática. Junto con el CMIP y sus diferentes fases se ha desarrollado otro conjunto de proyectos de

Índice	Nombre del índice	Unidad	Variable
TX90p	Porcentaje de días donde la temperatura máxima diaria es mayor que el percentil 90	%	Temperatura máxima
TX10p	Porcentaje de días donde la temperatura máxima diaria es menor que el percentil 10	%	Temperatura máxima
TN90p	Porcentaje de días donde la temperatura mínima diaria es mayor que el percentil 90	%	Temperatura mínima
TN10p	Porcentaje de días donde la temperatura mínima diaria es menor que el percentil 10	%	Temperatura mínima
DTR	Rango diario de temperaturas: diferencia media entre TX y TN	°C	Temperatura máxima y mínima
WSDI	Índice de duración de los periodos cálidos: recuento anual de días con al menos seis	días/año	Temperatura máxima
TXx	Valor máximo de la temperatura máxima diaria	°C	Temperatura máxima
TXn	Valor mínimo de la temperatura máxima diaria	°C	Temperatura máxima
TNn	Valor máximo de la temperatura mínima diaria	°C	Temperatura mínima
TNx	Valor mínimo de la temperatura mínima diaria	°C	Temperatura mínima

comparación adicionales, como el Proyecto de Comparación de Modelos de Alta resolución (HighResMIP, por sus siglas en inglés; Haarsma et al., 2016), el cual se compone de modelos con una mayor resolución espacial y busca evaluar los impactos de la misma en la modelación de los procesos climáticos.

## 2. Metodología y Datos

### 2.1. Definición de eventos extremos

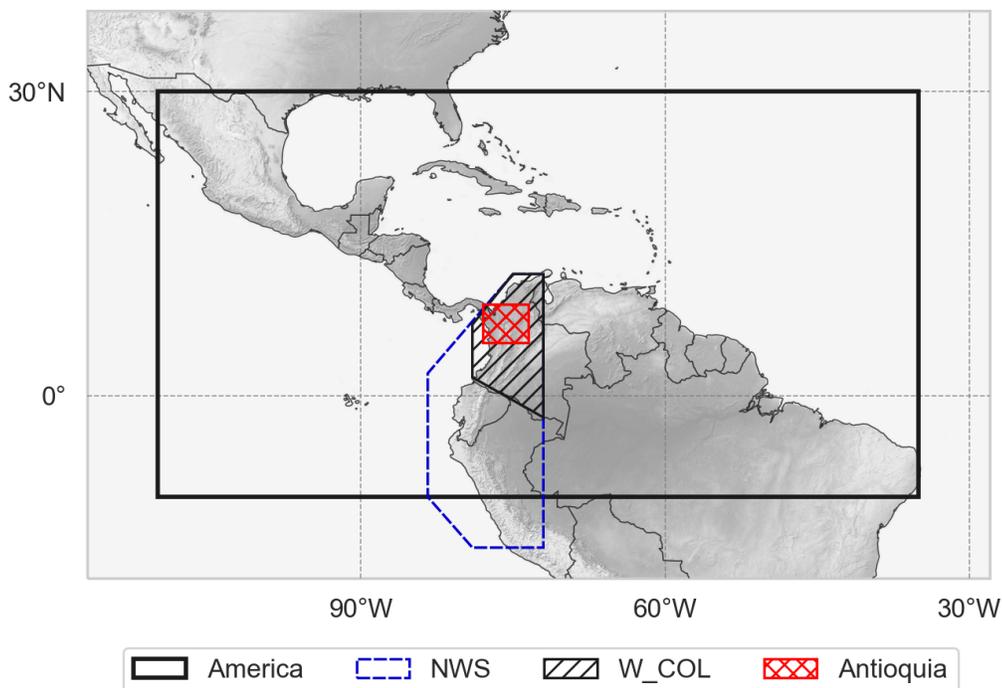
Para la definición de eventos extremos, se utilizaron los índices del Equipo de Expertos en Detección e Índices del Cambio Climático (ETCCDI; disponible en <https://www.wcrp-climate.org/etccdi>), los cuales son ampliamente utilizados para monitorear cambios en extremos de temperatura y precipitación en América Latina y el Caribe. Estos indicadores se basan en un enfoque no paramétrico, lo que permite representar fenómenos meteorológicos extremos que ocurren con frecuencia en períodos específicos. Además, estos índices facilitan la comprensión de los cambios en estos fenómenos. En este estudio, los índices que se juzgaron adecuados para la región de estudio se derivaron a partir de datos diarios de temperaturas máximas (TX) y mínimas (TN), así como de precipitaciones (PR).

## 2.2. Definición del área de estudio

Para llevar a cabo esta investigación, se han delimitado diversas regiones de estudio, considerando su influencia en el análisis de los resultados. La primera de ellas, denominada América, abarca la totalidad de la región de estudio. Siguiendo las definiciones del IPCC (Iturbide et al., 2020), se seleccionó la región de referencia conocida como NWS (Noroeste de Suramérica), que incluye el oeste de Colombia y la zona de interés del Valle de Aburrá. La tercera región de estudio corresponde al polígono W\_COL (Oeste de Colombia), que parte de la definición de la región NWS del IPCC (Iturbide et al., 2020), pero excluye el territorio ecuatoriano y peruano originalmente contemplado. Finalmente la región de estudio denominada como Antioquia, corresponde a un polígono dentro de Colombia que contiene al departamento del mismo nombre y la región de interés del Valle de Aburrá.

Región	Nombre	Vértices				
América	Centro América y Norte de Sur América	110W 30N	110W 10,0S	35.0W 30N	35.0W 10,0S	
NWS	Noroeste de Sur América	75 W 12N	83.4W 2,2N	83.4W 10S	72.0W 10,0S	72W 12N
W_COL	Oeste de Colombia	75 W 12N	79.0W 7,0N	79.0W 1,8N	72.0W 2,15S	72W 12N
Antioquia	Antioquia	78 W 9N	78.0W 5,2S	73.5W 9,0N	73.5W 5,20S	

**Tabla 1:** Ubicación de los vértices que delimitan las zonas de estudio.



**Figura 1:** Representación gráfica de las zonas delimitadas para los extremos de precipitación y temperatura en América. Las fronteras generales de la región de estudio *América* se destacan en negro, mientras que la región *NWS* (Northwestern South America), según la definición del IPCC (Iturbide et al., 2020), se muestra con una línea azul punteada. La zona *W\_COL* (Western Colombia) está delineada en negro con achurado, y el área específica de *Antioquia* se resalta con un contorno rojo y achurado. Para este estudio la región *NWS* corresponderá a la intersección entre polígonos de *América* con el polígono definido originalmente por el IPCC (Iturbide et al., 2020).

### 2.3. Datos climáticos de referencia

Se utilizaron como referencia los datos diarios de temperatura máxima y mínima provenientes del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Reanalysis v5-ERA5 (Hersbach et al., 2020) y los datos diarios de precipitación del Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations-CHIRPS v.2.0 (Funk et al., 2015). Para el caso de ERA5 el periodo considerado como histórico corresponde a 1979-2014, mientras que para CHIRPS, se utilizó el periodo de 1981-2014.

### 2.4. Selección de modelos de Circulación General y escenarios SSP

Para este estudio, se utilizaron diversas fuentes de información, entre las que se incluyen los experimentos del HighResMIP, del sexto proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6), así como el subescalamiento estadístico de los modelos del CMIP6 del proyecto NEX-GDDP-CMIP6 (NASA Earth Exchange Global Daily

Downscaled Projections; Thrasher et al., 2022). En un principio, se consideró también la posibilidad de emplear los resultados del experimento del CORDEX (Giorgi and Gutowski Jr, 2015) del quinto proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5); sin embargo, tras una evaluación inicial, se descartó esta fuente de información debido a los sesgos presentados en la representación de las variables analizadas.

Se evaluaron las simulaciones históricas de los modelos dinámicos de alta resolución frente a los estimados por ERA5 para la temperatura mínima y máxima, y de CHIRPS para la precipitación, para cada uno de los periodos históricos considerados. Por otro lado, para analizar las proyecciones climáticas, se utilizaron los escenarios con forzamiento radiativo de 4.5 y 8.5 W/m<sup>2</sup>. Estos análisis abarcaron todo el siglo XXI, centrándose especialmente en dos horizontes temporales: el mediano (2041-2060) y el largo plazo (2081-2100).

## 2.5. Desempeño de los modelos de circulación general en la representación de los índices de precipitación y temperatura extrema

En este estudio, se empleó el índice Eficiencia de Kling-Gupta (KGE, Gupta et al., 2009; Kling et al., 2012) para evaluar la congruencia espacio-temporal entre los datos de precipitación/temperatura de referencia y las estimaciones de los modelos. Con un valor KGE ideal de 1.0, la evaluación del desempeño global de las simulaciones se basó en tres métricas igualmente importantes: correlación lineal (CORR), ratio de sesgo (BR) y variabilidad relativa (RV).

- Correlación (CORR): Esta métrica mide la coherencia temporal de los índices de precipitación y temperatura, con una puntuación perfecta de 1 y una falta de correlación indicada por 0 (Ecuación 2).
- Coeficiente de sesgo (BR, Bias Ratio): Utilizado para medir la sobrestimación (BR > 1) o la subestimación (BR < 1) en comparación con las observaciones (Ecuación 3).
- Variabilidad relativa (RV, Relative Variability): Esta métrica proporciona una medida relativa de la dispersión con un valor óptimo en la unidad (1).

$$KGE = 1 - \sqrt{(1 - CORR)^2 + (1 - BR)^2 + (1 - RV)^2} \quad (1)$$

$$Correlation (CORR) = \frac{\sum (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2 \sum (S_i - \bar{S})^2}} \quad (2)$$

$$Bias Ratio (BR) = \frac{\bar{S}}{\bar{O}} \quad (3)$$

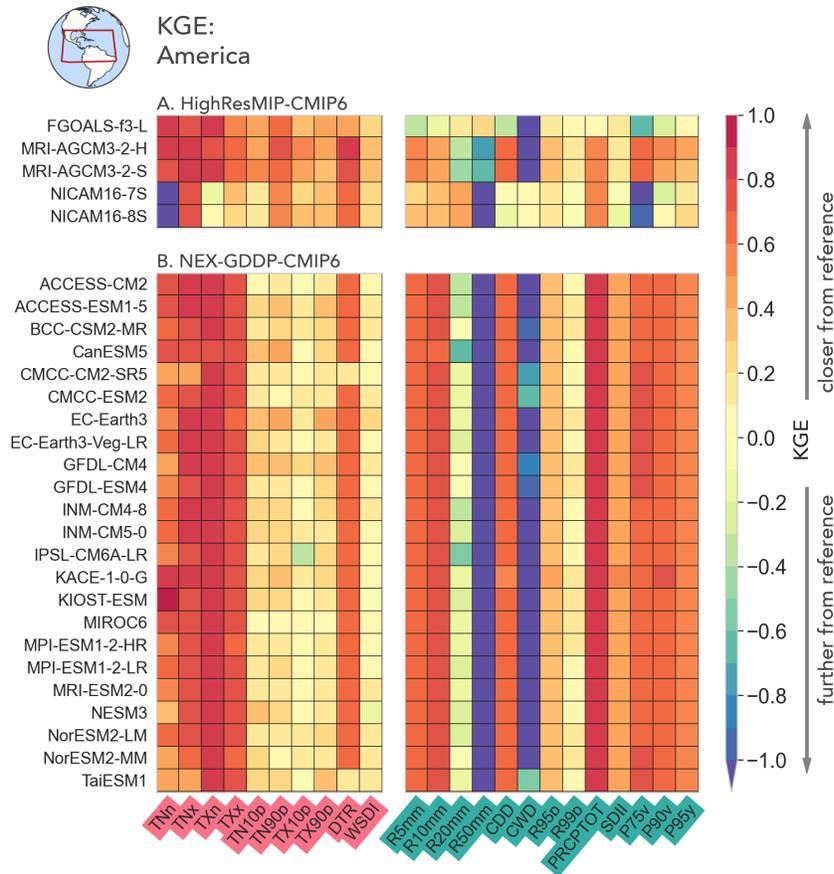
Partiendo del supuesto de que los modelos que logren una representación histórica más precisa en comparación con las bases de referencia serán capaces de ofrecer simulaciones

más precisas del comportamiento climático en el siglo XXI, se procedió a clasificar el desempeño de las simulaciones históricas de los modelos. Para ello, se aplicó un método de clasificación exhaustivo que evaluó el rendimiento de los modelos utilizando valores medios regionales de KGE para temperaturas y precipitaciones extremas en comparación con conjuntos de datos de referencia como ERA5 y CHIRPS. Los modelos se clasificaron en una escala del 1 (mejor) al 28 (peor), y la puntuación acumulada de cada modelo y Media Multimodelo (MMM) se derivó de estas clasificaciones. Además, dado que el desempeño medio varía según la región geográfica analizada y promediada, este procedimiento se aplicó considerando diferentes regiones de estudio.

### **3. Resultados**

#### **3.1. Evaluación del desempeño en los índices de temperatura y precipitación**

La Figura 2 muestra el rendimiento de los modelos en la simulación de índices de temperatura y precipitación para la región de Centroamérica y Norte de Suramérica. Se observa un contraste en el rendimiento entre los modelos para estos parámetros. Los modelos del proyecto NEX-GDDP-CMIP6 exhiben una similitud en el rendimiento, posiblemente debido al proceso común de subescalamiento, el cual está incluyendo sesgos adicionales. En términos de precipitación, estos modelos superan a los del HighResMIP-CMIP6, especialmente en los índices de R50mm y CWD. Para la precipitación, los modelos muestran un buen rendimiento en el conteo de días anuales con lluvia baja, pero mayores sesgos en umbrales más altos. En cuanto a la temperatura, los modelos del HighResMIP-CMIP6 tienen la representación más precisa en general, especialmente MRI-AGCM3-2-H y MRI-AGCM3-2-S, que muestran un rendimiento sólido en varios índices y regiones.



**Figura 2:** Evaluación del rendimiento del sesgo KGE (Gupta et al., 2009; Kling et al., 2012) para modelos pertenecientes a los proyectos HighResMIP-CMIP6 y NEX-GDDP-CMIP6 en su representación histórica de los índices de temperatura y precipitación. Para llevar a cabo esta evaluación, se emplearon datos de referencia provenientes de ERA5 (1979-2014) y CHIRPS (1981-2014) para el cálculo de los índices de temperatura y precipitación, respectivamente. Los resultados del KGE se presentan para las regiones de *América* (A), *NWS* (B), *W\_COL* (C) y *Antioquia* (D), definidas en la Figura 1.

El algoritmo de clasificación desarrollado permitió determinar los modelos con un rendimiento destacado en las simulaciones históricas de índices de precipitación y temperatura extrema en varias regiones (referirse al informe de Diciembre del 2023 que discute las regiones de estudio). Los modelos asociados al proyecto NEX-GDDP-CMIP6, especialmente BCC-CSM2-MR, TaiESM1, GFDL-CM4 y MPI-ESM1-2-HR, destacaron en los índices de precipitación. En cuanto a los índices de temperatura, los modelos MRI-AGCM3-2-H y MRI-AGCM3-2-S del proyecto HighResMIP-CMIP6, junto con EC-Earth3, ACCESS-ESM1-5 y KACE-1-0-G del proyecto NEX-GDDP-CMIP6, mostraron un desempeño notable. Los detalles se encuentran en la Figura 3.

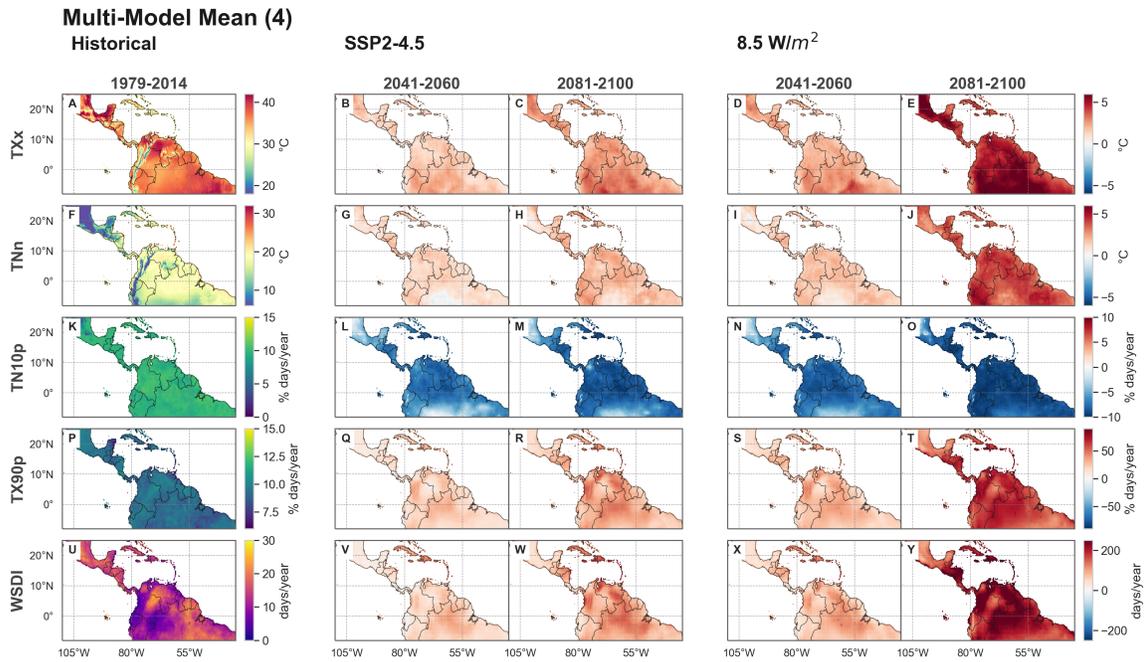
Fuente	Modelo	América			NWS			W_COL			Antioquia		
		General	Índices Temp.	Índices Precip.	General	Índices Temp.	Índices Precip.	General	Índices Temp.	Índices Precip.	General	Índices Temp.	Índices Precip.
HighResMIP-CMIP6	FGOALS-F3-L	24	7	26	26	14	26	27	18	27	24	13	24
	MRI-AGCM3-2-H	11	1	22	9	1	24	15	1	26	26	8	27
	MRI-AGCM3-2-S	16	2	24	20	2	28	24	3	28	25	3	28
	NICAM16-7S	28	16	28	28	23	27	28	23	25	28	28	25
	NICAM16-8S	27	11	27	26	19	25	25	20	24	27	27	25
NEX-GDDP-CMIP6	ACCESS-CM2	23	22	21	22	21	18	22	19	19	23	21	20
	ACCESS-ESM1-6	6	4	15	12	5	17	11	2	18	9	1	19
	BCC-CSM2-MR	1	8	2	1	11	1	1	8	1	1	12	1
	CanESM5	25	12	25	24	8	23	23	9	23	21	4	23
	CMCC-CM2-SR5	19	28	7	13	28	6	16	28	7	15	26	11
	CMCC-ESM2	10	19	9	14	13	14	16	14	17	16	13	18
	EC-Earth3	6	3	17	3	3	8	2	5	11	2	6	3
	EC-Earth3-Veg-LR	21	13	20	7	9	9	6	11	9	10	16	9
	GFDL-CM4	2	6	3	2	7	2	3	13	4	3	10	4
	GFDL-ESM4	5	15	4	10	18	10	19	27	12	17	25	13
	INM-CM4-8	12	9	16	19	10	20	13	7	14	14	6	17
	INM-CM5-0	13	10	18	21	6	22	18	6	21	11	5	16
	IPLI-CM6A-LR	26	19	23	25	25	21	26	24	22	22	15	22
	KACE1-0-G	4	4	11	6	4	12	4	4	13	6	2	12
	KIOST-ESM	9	21	6	15	17	13	8	17	6	7	23	5
	MIROC6	20	27	8	16	27	11	21	22	14	18	19	15
	MPI-ESM1-2-HR	17	24	13	8	24	5	7	24	2	4	17	2
	MPI-ESM1-2-LR	14	14	14	18	21	15	5	10	8	5	9	8
	MRI-ESM2-0	18	26	12	16	15	16	14	16	14	19	22	14
	NESM3	14	23	10	11	25	7	10	26	3	11	19	10
	NorESM2-LM	22	17	19	22	20	19	20	12	20	20	11	21
	NorESM2-MM	8	25	5	5	16	3	9	15	10	8	18	6
	TaiESM1	3	18	1	4	12	4	12	21	5	13	24	7

**Figura 3:** Ranking de los modelos pertenecientes a los proyectos HighResMIP-CMIP6 y NEX-GDDP-CMIP6 en términos de su representación histórica de los índices de temperatura y precipitación, evaluados mediante el índice KGE (Figura 2). Este ranking se estableció para las distintas regiones estudiadas (consulte Figura 1), considerando tanto el rendimiento General (es decir, índices de temperatura y precipitación combinados) como el rendimiento individual de los índices de temperatura y precipitación respectivamente. Las posiciones en el ranking se asignaron del 1 al 28, siendo la posición 1 la de mejor rendimiento, en cada una de las categorías evaluadas.

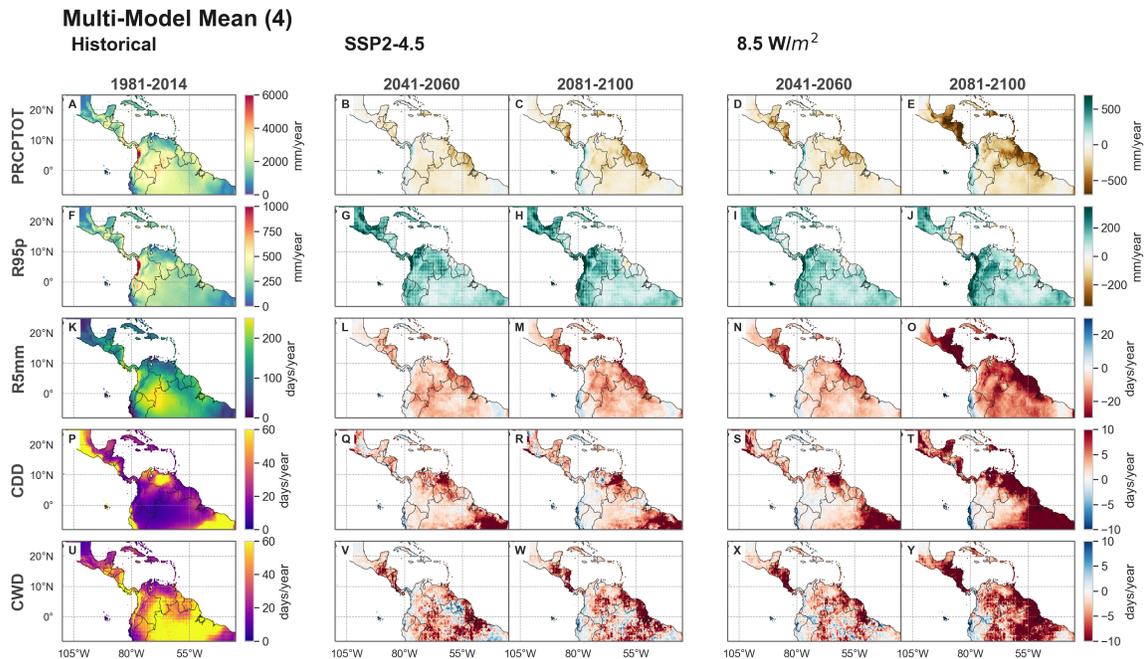
### 3.2. Proyecciones futuras siglo XXI índices de temperatura y precipitación

Los resultados de las proyecciones de temperatura máxima y mínima en general señalan un aumento de la intensidad y frecuencia de los extremos cálidos, acompañado de una disminución de los extremos fríos. La de Figura 4 muestra los cambios proyectados para los distintos escenarios en comparación con las simulaciones históricas de los modelos (primera columna). Las proyecciones climáticas para el escenario SSP2-4.5 (segunda y tercer columna Figura 4) a lo largo del siglo XXI indican un aumento constante tanto en las temperaturas máximas como mínimas, reflejando tendencias a medio y largo plazo. Se prevé que el porcentaje de días con temperaturas mínimas por debajo del percentil 10 pueda disminuir entre un 5 y un 10%, según el análisis de series históricas. Por el contrario, la proporción de días que superan el percentil 90 para la temperatura máxima podría aumentar hasta en un 50% para finales de siglo. Además, las proyecciones sugieren un aumento sustancial en la duración de los períodos cálidos, superando los 100 días en el norte de América del Sur y América Central en comparación con las condiciones actuales, lo que indica un aumento en los eventos extremos de clima cálido.

En escenarios con un forzamiento radiativo de 8.5 W/m<sup>2</sup> (cuarta y quinta columna de Figura 4), emergen patrones similares, indicando un cambio hacia condiciones de clima cálido más extremas en América del Sur y América Central. Estas condiciones, caracterizadas por períodos prolongados de altas temperaturas, representan amenazas adicionales para el bienestar ambiental y social de la región.



**Figura 4:** Proyecciones de futuros cambios en los índices de eventos de temperaturas extremas, conforme a la Media Multimodelo (MMM), para los índices TXx, TNn, TN10p, TX90p y WSDI en el escenario SSP2-4.5 (segunda y tercera columna) y 8.5 W/m<sup>2</sup> (cuarta y quinta columna). Las variaciones de los campos medios se presentan para los períodos 2041-2060 y 2081-2100, en relación al período de referencia (1979-2014).



**Figura 5:** Proyecciones de futuros cambios en los índices de eventos de precipitación extrema, conforme a la Media Multimodelo (MMM), para los índices PRCPTOT, R95p, R5mm, CDD y CWD en el escenario SSP2-4.5 (segunda y tercera columna) y 8.5 W/m<sup>2</sup> (cuarta y quinta columna). Las variaciones de los campos medios se presentan para los períodos 2041-2060 y 2081-2100, en relación al período de referencia (1979-2014).

En el caso de las precipitaciones extremas, las proyecciones climáticas en el escenario SSP2-4.5 (segunda y tercer columna Figura 5) sugieren disminuciones en la precipitación total (PRCPTOT) en el norte de América del Sur y América Central. Sin embargo, en el oeste de Colombia, se proyectan cambios hacia un aumento de la precipitación acumulada tanto a medio como a largo plazo. Esta disminución en la precipitación anual total no está relacionada con la reducción de eventos extremos ya que los modelos proyectan aumentos en la precipitación cuando se supera el percentil 95 (R95p). Estos patrones indican que a lo largo del siglo XXI pueden ocurrir condiciones con menor precipitación acumulada, pero también puede haber un aumento en la intensidad de eventos de precipitación extrema. También se sugiere que el número de días con precipitación por encima de 5 mm (R5mm) disminuya a lo largo del siglo en el norte de América del Sur. Lo anterior podría asociarse correctamente con el aumento proyectado en el número consecutivo de días secos y la disminución proyectada en el número de días consecutivos húmedos en la región.

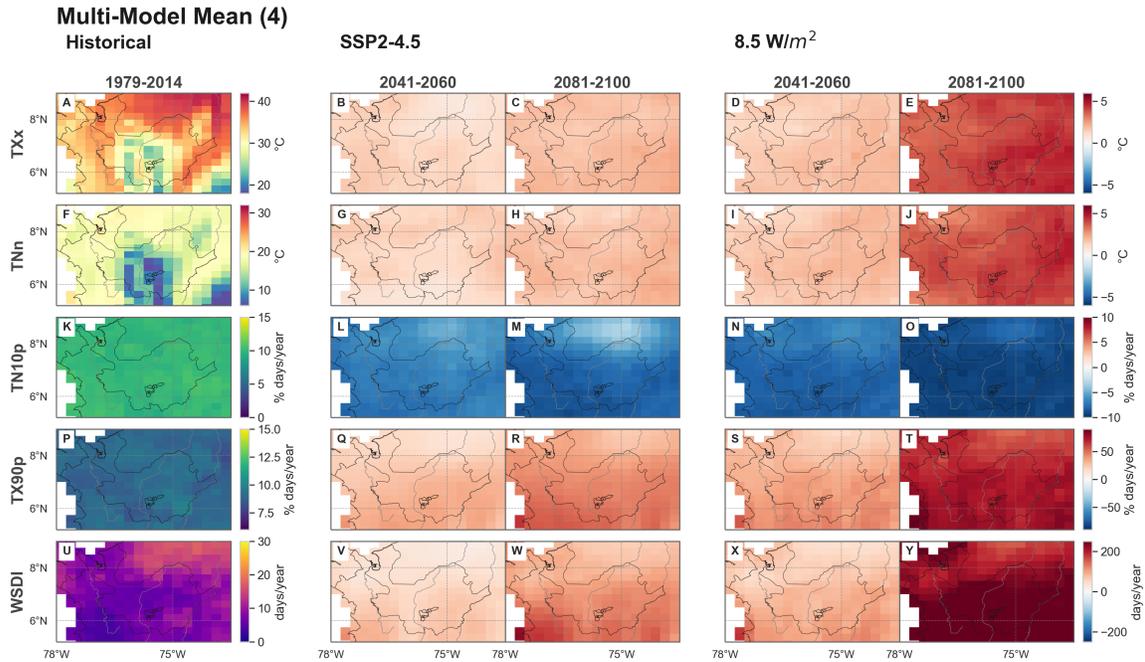
En los escenarios con un forzamiento radiativo de  $8.5 \text{ W/m}^2$  (cuarta y quinta columna Figura 5), la señal del cambio en los índices de precipitación extrema mantiene los mismos patrones. Sin embargo, la magnitud de estas variaciones se ve amplificada. Estos resultados sugieren disminuciones en las cantidades anuales de precipitación y más días secos consecutivos, pero aumentos en la intensidad de eventos de precipitación extrema al aumentar la precipitación en eventos cuando se supera el percentil 95 (R95p) del periodo histórico.

### **3.3. Proyecciones de los índices de extremos de temperatura y precipitación para el siglo XXI para la región de Antioquia**

En esta sección, se presentan los resultados derivados de las proyecciones de extremos de temperatura y precipitación, basados en la Media Multimodelo (MMM) de un conjunto de modelos con un mejor desempeño en la representación histórica de los indicadores de extremos climáticos. Las figuras ilustran las diferencias entre los campos medios de los horizontes temporales (2041-2060 y 2081-2100) en relación con los periodos históricos de evaluación (1979-2014 para temperatura y 1981-2014 para precipitación).

Para la temperatura, las proyecciones futuras de la Región de Antioquia en el modelo MMM indican condiciones más cálidas. Estas condiciones muestran un aumento tanto a medida que avanza el tiempo como en función de los diversos escenarios de cambio climático evaluados. Este incremento de temperaturas se manifiesta de manera generalizada tanto en los días cálidos (TXx) como en las noches frías (TNn). Además, se observa un aumento en la ocurrencia de días cálidos (TX90p) y una disminución en las noches frías (TN10p) con respecto al periodo base de 1979-2014. Es importante señalar que los registros históricos de temperatura extremos reflejan claramente la influencia de la orografía en esta variable, lo que se traduce en magnitudes menores. Al analizar las proyecciones del escenario SSP 2-4.5, se observa un cambio generalizado de alrededor de  $1^\circ\text{C}$  para el periodo 2041-2060 y de  $2^\circ\text{C}$  para 2081-2100 tanto para el índice TXx como el TNn. Estos resultados contrastan con las proyecciones del escenario de Forzamiento  $8.5 \text{ W/m}^2$ , que muestra un aumento en la región de estudio de aproximadamente  $2^\circ\text{C}$  para

2041-2060 y de 3 a 4°C para el período 2081-2100.

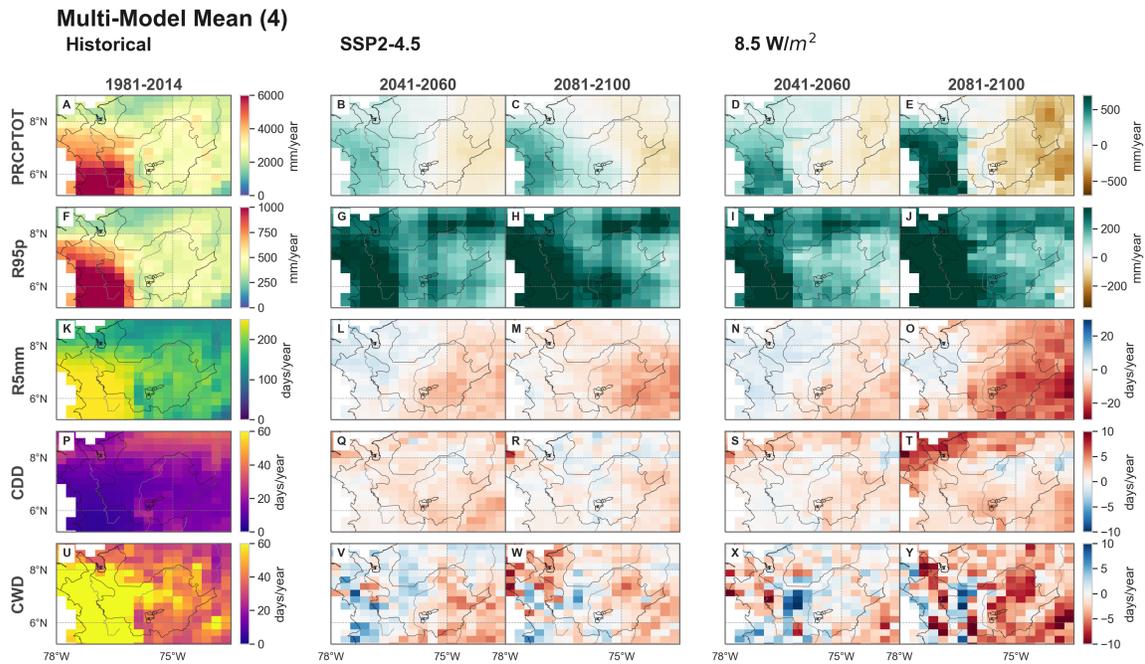


**Figura 6:** Proyecciones de futuros cambios en los índices de eventos de temperaturas extremas, conforme a la Media Multimodelo (MMM), para los índices TXx, TNn, TN10p, TX90p y WSDI en el escenario SSP2-4.5. Las variaciones con respecto a los campos medios se presentan para los períodos 2041-2060 y 2081-2100, en la segunda y tercera columna, respectivamente, en relación al período de referencia (1979-2014).

De manera similar, la reducción en la frecuencia de las noches frías (TN10p) se agrava con el paso del tiempo. En el escenario SSP 2-4.5, se prevé una disminución del 5 % y del 10 % en el porcentaje de días del año de estos eventos para mediados y finales del siglo XXI, respectivamente. Por otro lado, en el escenario con mayores forzamientos se anticipan cambios superiores al 10 % a partir de mediados del siglo. Los hallazgos revisten una importancia significativa, considerando que los valores promedio de TN10p en el período de referencia rondan el 10 % de los días al año, lo que implica que, en promedio, no se registraron noches frías, tal como se estableció en el período de referencia. En cuanto a los días cálidos (TX90p), el escenario SSP2-4.5 proyecta un incremento del 20-30 % en la frecuencia de estos eventos para la primera mitad y el final del siglo XXI, respectivamente, en comparación con el periodo base. Además, se anticipa un aumento del 30 % para el período 2041-2060 y un incremento superior al 50 % para el período 2081-2100 bajo el escenario de forzamiento 8.5 W/m<sup>2</sup>.

Por último, el índice de olas de calor (WSDI) indica un aumento significativo en su frecuencia anual. Según el promedio histórico de los modelos, en la región andina y costa del Pacífico, ocurren menos de 10 días al año, mientras que al norte son alrededor de 20 días al año. Las proyecciones del escenario SSP2-4.5 indican un aumento de alrededor de 20 días por año para el periodo 2041-2060 y de 100 días al año para el período 2081-2100. Por otro lado, el escenario de Forzamiento 8.5 W/m<sup>2</sup> proyecta un incremento de aproximadamente 50 días al año para mediados de siglo y más de 150 días al año para finales de siglo.

Las temperaturas más elevadas y los eventos de extremos cálidos son más frecuentes en los valles del Cauca y Magdalena, extendiéndose hacia la costa Caribe. Estas áreas experimentan cambios menores en los índices de temperatura extremos. Por otro lado, la región montañosa de nuestra zona de estudio es precisamente en dónde se presentan las mayores alteraciones proyectadas debido al cambio climático en términos de temperatura.



**Figura 7:** Proyecciones de futuros cambios en los índices de eventos de precipitación extrema, conforme a la Media Multimodelo (MMM), para los índices PRCPTOT, R95p, R5mm, CDD y CWD en el escenario SSP2-4.5. Las variaciones con respecto a los campos medios se presentan para los períodos 2041-2060 y 2081-2100, en la segunda y tercera columna, respectivamente, en relación al período de referencia (1981-2014).

En la zona de estudio, los patrones de precipitación muestran una variabilidad significativa entre diferentes regiones, especialmente entre la costa del Pacífico, la zona montañosa de los Andes y la costa caribeña (Figura 7). Los registros históricos y las simulaciones de modelos indican que la costa del Pacífico de Colombia experimenta lluvias intensas y frecuentes, con altas acumulaciones anuales, mientras que la región andina muestra una intensidad y frecuencia de precipitación intermedia (Figura 7-primera columna). Por el contrario, la costa caribeña muestra menos variabilidad con menos eventos extremos, acumulaciones anuales más bajas y más días sin precipitación.

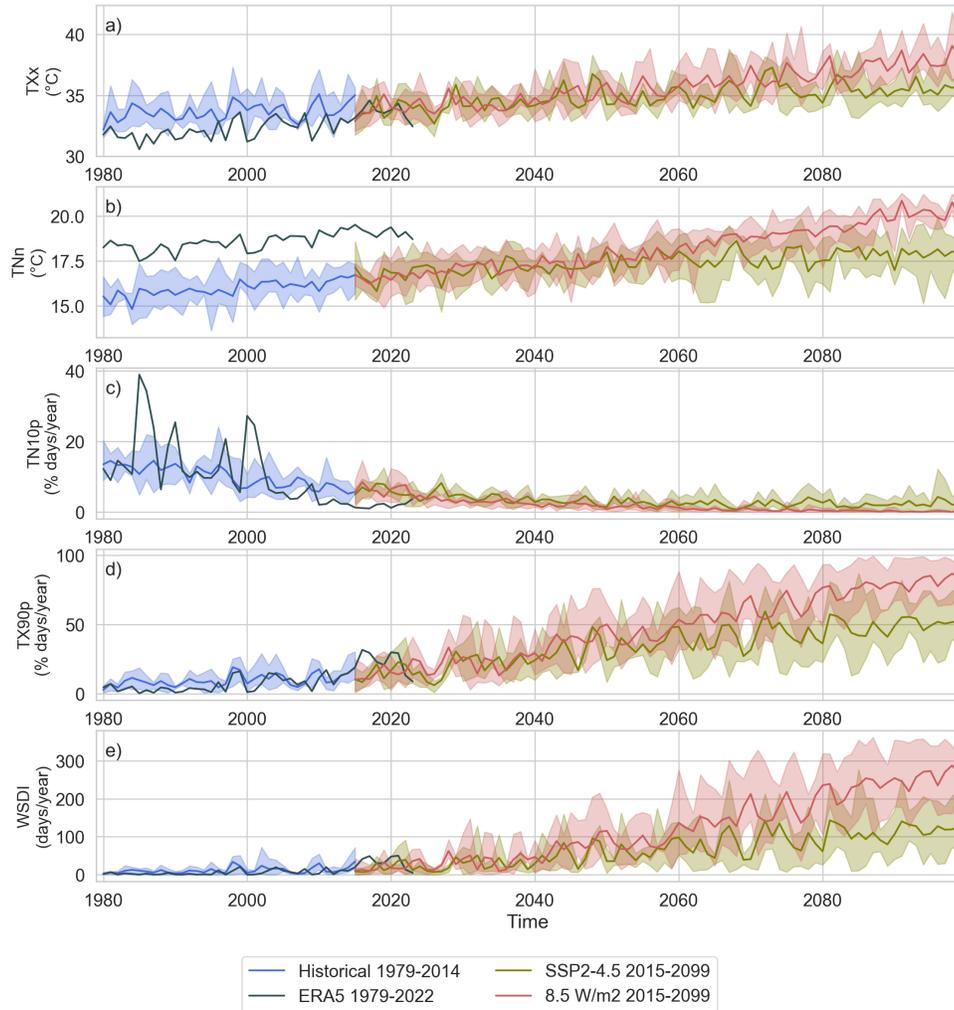
Las proyecciones sugieren cambios futuros contrastantes en los patrones de precipitación, especialmente entre la región del Pacífico y el resto del área delimitada. Ambos escenarios consultados anticipan un aumento del total anual de precipitación (PRCPTOT) sobre el Pacífico, extendiéndose hacia el sur, mientras se espera una reducción hacia el norte desde el Valle del Magdalena. Cerca del Valle de Aburrá, el escenario SSP2-4.5 (Figura 7-segunda y tercer columna) pronostica aumentos moderados, mientras que el escenario 8.5W/m<sup>2</sup> (Figura 7-cuarta y quinta columna) predice ligeras disminuciones para mediados de siglo y reducciones más significativas para el largo plazo.

Se proyecta que los eventos de precipitación intensa aumentarán en toda la región de estudio (R95p, total de precipitación diaria que supera el percentil 95 en relación al periodo de referencia), con cambios particularmente pronunciados bajo un mayor forzamiento radiativo. Cerca del Valle de Aburrá, ambos escenarios anticipan aumentos significativos en la precipitación intensa con el tiempo, siendo de mayor magnitud para el escenario de 8.5 W/m<sup>2</sup>.

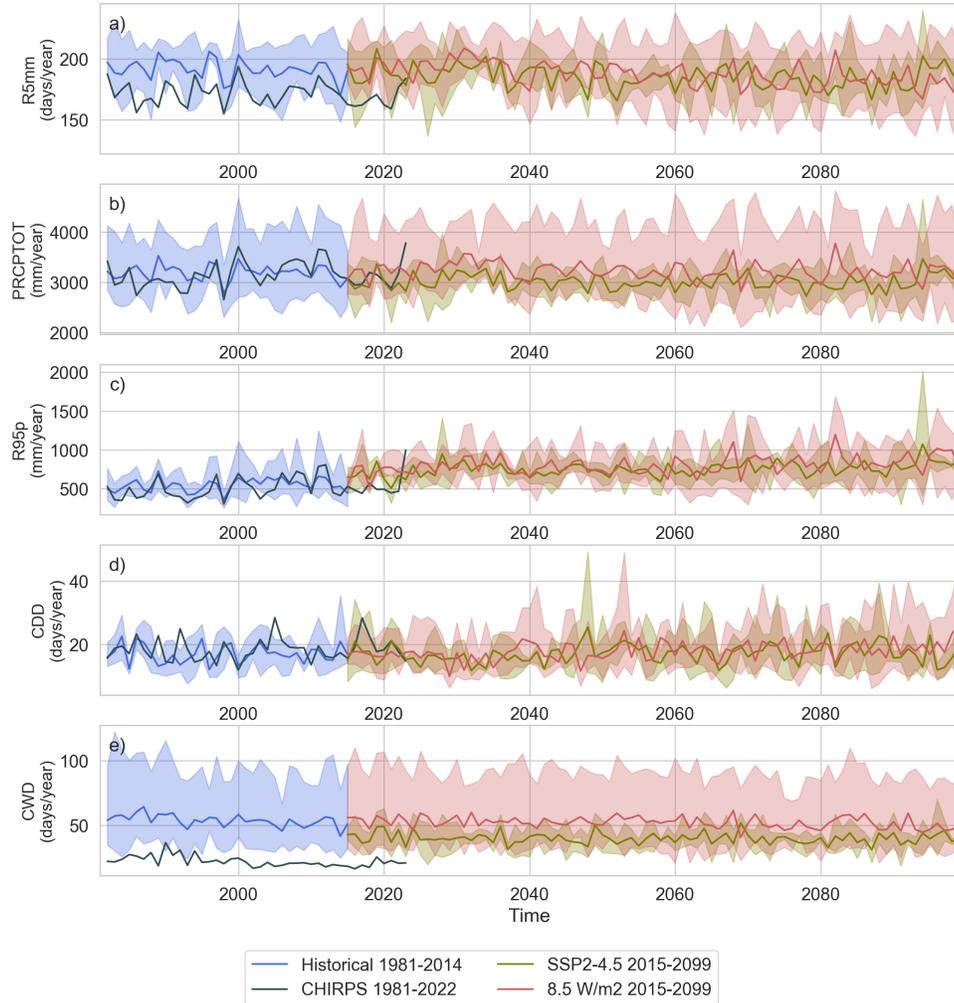
En cuanto al recuento anual de días con precipitaciones apreciables (R5mm, que se refiere a la precipitación diaria igual o superior a 5 mm), se prevén diferencias notables entre la región del Pacífico y el resto del área estudiada. Se espera que la región andina, especialmente el Valle del Magdalena, experimente una reducción en el número de días con precipitaciones apreciables, mientras que la región del Pacífico podría ver un ligero aumento. Las proyecciones para el Valle de Aburrá indican una disminución en el número de días con precipitación apreciable en ambos escenarios, con mayores reducciones esperadas bajo un mayor forzamiento radiativo.

Con el objetivo de analizar las fluctuaciones de los índices a lo largo del periodo de estudio (1979-2100) en la región de Antioquia (recuadro rojo en figura 1), se calcularon promedios de los índices en toda el área estudiada, generando así series temporales. Las figuras 8 y 9 exhiben las variaciones temporales de los índices seleccionados durante el Siglo XXI, contrastándolas con el periodo de referencia.

Durante el periodo histórico, tanto el promedio multimodelo como el reanálisis ERA5 indican un ligero incremento en los índices TXx y TNn en la región de Antioquia. Este aumento sugiere un aumento en los valores máximos y mínimos de la temperatura máxima y la temperatura mínima, respectivamente (8). Al observar el intervalo comprendido entre 2015 y 2060, ambos escenarios analizados exhiben un aumento de ambos índices, con fluctuaciones en valores muy similares. Sin embargo, hacia finales de siglo, los mayores valores se alcanzan en el escenario de mayores emisiones (forzamiento 8.5 W/m<sup>2</sup>). Al analizar los índices TN10p, TX90p y WSDI durante el histórico, se observaron fluctuaciones muy similares entre el promedio multimodelo y ERA5. De estos índices, TX90p (porcentaje de días donde la temperatura máxima es superior al percentil 90) y WSDI (conteo anual de días con al menos seis días consecutivos donde la temperatura máxima es superior al percentil 90) presentan un aumento a lo largo del periodo analizado, siendo más relevante en las proyecciones. WSDI en el histórico no muestra muchos días/año que superan el percentil 90, sin embargo, desde el 2015 se evidencia un aumento sustancial. Para el periodo 2060-2099 el índice muestra una gran diferencia en el número de días al año dependiendo del escenario, observando valores cercanos a 120 días/año para final de siglo en el escenario SSP2-4.5 en contraste con 290 días/año que se alcanzan en el escenario de mayores emisiones. Por otro lado, el índice TN10p, relacionado con el porcentaje de días donde la temperatura mínima es inferior al percentil 10, experimenta una disminución tanto en el periodo histórico como en las proyecciones. Además, para finales de siglo, el forzamiento 8.5 W/m<sup>2</sup> no registra días donde la temperatura mínima sea inferior al percentil 10, sugiriendo un aumento en ambas temperaturas.



**Figura 8:** Series de tiempo de los índices de temperatura. La serie de tiempo para el periodo 1979-2014 corresponde al promedio multimodelo de las simulaciones históricas (línea azul). La línea negra corresponde al índice calculado con la base de datos de referencia (ERA5). Las series de tiempo para el período 2015-2099 corresponden al promedio multimodelo para cada una de las SSP consideradas (SSP 2-4.5 en línea verde y SSP 5-8.5 en línea rosado). Las áreas sombreadas representan la envolvente correspondiente a la simulación histórica o la SSP respectiva.



**Figura 9:** Series de tiempo de los índices de precipitación. La serie de tiempo para el periodo 1979-2014 corresponde al promedio multimodelo de las simulaciones históricas (línea azul). La línea negra corresponde al índice calculado con la base de datos de referencia (CHIRPS). Las series de tiempo para el período 2015-2099 corresponden al promedio multimodelo para cada una de las SSP consideradas (SSP 2-4.5 en línea verde y SSP 5-8.5 en línea rosado). Las áreas sombreadas representan la envolvente correspondiente a la simulación histórica o la SSP respectiva.

Los índices de precipitación no muestran cambios tan marcados a lo largo del periodo analizado (Figura 9). Durante el periodo histórico, CHIRPS muestra valores de menor magnitud para el índice CWD (días húmedos consecutivos) en comparación con la media multimodelo. Para los índices PRCPTOT, R95p y CDD ambas series presentan valores que fluctúan en el mismo rango. En las proyecciones, los dos escenarios exhiben valores muy similares en cada índice analizado, aún así, la mayoría de los índices presentan los mayores aumentos en el escenario SSP5-8.5 para final de siglo. Al analizar las series de cada índice, se observan algunos periodos donde los mayores valores se exhiben en el escenario SSP2-4.5 (escenario intermedio), sin embargo, la mayoría se evidencian en el escenario de mayores emisiones. El índice R95p (precipitación total anual cuando la precipitación diaria supera el percentil 95) muestra un cambio importante a lo largo del periodo analizado. En el

histórico, se observan valores de precipitación total anual alrededor de 400 mm/año y 700 mm/año, mientras que hacia finales del siglo XXI, se proyecta un aumento a acumulados cercanos a 1000 mm/año.

## 4. Conclusiones

Los resultados sugieren que los modelos dinámicos de alta resolución representan adecuadamente los índices de extremos climáticos en la región del norte de Suramérica, sin embargo, los modelos tienden a exhibir un mejor desempeño en la simulación de los extremos de temperatura mínima y máxima con respecto a los indicadores basados en precipitación, lo cual es consistente con las limitaciones en la representación de la precipitación por parte de los modelos. Por otro lado, el desempeño de los modelos analizados, principalmente en los índices de extremos de precipitación, está fuertemente modulado por el dominio espacial seleccionado, donde se obtienen desviaciones más marcadas con respecto a la referencia en dominios que tienden a ser más reducidos y centrados en regiones con topografía compleja.

Con respecto a los patrones de los índices de extremos climáticos en las simulaciones históricas, los patrones espaciales representan adecuadamente los atributos climatológicos de la región, como es el caso de una mayor duración de periodos cálidos en regiones con regímenes más cálidos como la cuenca del Orinoco y el noreste de Brasil, junto con una mayor duración de los días secos consecutivos en regiones con regímenes más secos como en los Llanos Venezolanos.

Las proyecciones climáticas para el mediano y largo plazo indican el cambio hacia condiciones más cálidas en la región, con aumentos tanto en las temperaturas mínimas como en las máximas como incrementos en la duración de los periodos cálidos a lo largo del norte de Suramérica. Adicionalmente, los cambios proyectados en los indicadores de extremos de precipitación indican disminuciones en los acumulados de precipitación anuales en gran parte del dominio, a excepción del oeste de Colombia, junto con aumentos en el acumulado de precipitación cuando se supera el percentil 95, es decir durante eventos de precipitación extremos. Lo anterior se asocia con la ocurrencia de eventos extremos de precipitación más intensos en el territorio, que junto a las condiciones más cálidas proyectadas a través de los índices de temperatura mínima y máxima, incrementan la vulnerabilidad de la región frente a los extremos climáticos, los cuales se espera se potencien a lo largo del siglo XXI.

Las proyecciones basadas en la Media Multimodelo (MMM) de modelos de circulación general indican un futuro marcado por el aumento de temperaturas en la Región de Antioquia. Este incremento se manifiesta tanto en los días cálidos como en las noches frías, con un aumento en la ocurrencia de días cálidos y una disminución en las noches frías en comparación con el periodo histórico. Además, se observa una disminución en la frecuencia de noches frías, especialmente hacia finales del siglo XXI, y el aumento significativo en la frecuencia de extremos cálidos. Estos cambios son más pronunciados en las zonas bajas de los valles del Cauca y Magdalena, así como en la costa Caribe, mientras que las áreas montañosas de la región muestran las mayores alteraciones proyectadas en términos de temperatura. Estas proyecciones destacan la necesidad de tomar medidas de

adaptación y mitigación para hacer frente a los desafíos del cambio climático en la región.

Para el caso de los índices de precipitación extrema, el cambio climático podría generar una tendencia hacia una mayor concentración de las precipitaciones en un menor número de eventos, que son además más intensos. Esta tendencia plantea una serie de preocupaciones y desafíos, ya que podría dar lugar a diversas consecuencias negativas, como un aumento en el riesgo de inundaciones repentinas debido a la intensidad de las lluvias, períodos más prolongados de sequía que afectan a la disponibilidad de agua y aumentan el riesgo de incendios forestales. Estos cambios en los patrones de precipitación requieren una atención cuidadosa y medidas de adaptación adecuadas para mitigar sus impactos en las comunidades y los ecosistemas.

---

## Referencias

- CLIMA, T. and TE, W. (2021). State of the climate in latin america and the caribbean.
- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichefet, T., Friedlingstein, P., Gao, X., Gutowski, W. J., Johns, T., Krinner, G., et al. (2013). Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility.
- Data, C. (2009). Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. *World Meteorological Organization*.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., et al. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, 2(1):1–21.
- Giorgi, F. (2010). Uncertainties in climate change projections, from the global to the regional scale. In *EPJ Web of conferences*, volume 9, pages 115–129. EDP Sciences.
- Giorgi, F. and Gutowski Jr, W. J. (2015). Regional dynamical downscaling and the cordex initiative. *Annual review of environment and resources*, 40:467–490.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., and Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and nse performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2):80–91.
- Haarsma, R. J., Roberts, M. J., Vidale, P. L., Senior, C. A., Bellucci, A., Bao, Q., Chang, P., Corti, S., Fučkar, N. S., Guemas, V., et al. (2016). High resolution model intercomparison project (highresmip v1. 0) for cmip6. *Geoscientific Model Development*, 9(11):4185–4208.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., et al. (2020). The era5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730):1999–2049.
- Iturbide, M., Gutiérrez, J. M., Alves, L. M., Bedia, J., Cimadevilla, E., Cofiño, A. S., Cerezo-Mota, R., Di Luca, A., Faria, S. H., Gorodetskaya, I., et al. (2020). An update of ipcc climate reference regions for subcontinental analysis of climate model data: definition and aggregated datasets. *Earth System Science Data Discussions*, 2020:1–16.
- Kling, H., Fuchs, M., and Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of hydrology*, 424:264–277.
- Marengo, J. A., Chou, S. C., Torres, R., Giarolla, A., Alves, L. M., and Lyra, A. (2014). Climate change in central and south america: recent trends, future projections, and impacts on regional agriculture. *CCAFS Working Paper*.
- Meehl, G. A., Covey, C., McAvaney, B., Latif, M., and Stouffer, R. J. (2005). Overview of the coupled model intercomparison project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(1):89–93.

- Reyer, C. P., Adams, S., Albrecht, T., Baarsch, F., Boit, A., Canales Trujillo, N., Cartsburg, M., Coumou, D., Eden, A., Fernandes, E., et al. (2017). Climate change impacts in latin america and the caribbean and their implications for development. *Regional Environmental Change*, 17:1601–1621.
- Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskander, I., Kossin, J., Lewis, S., et al. (2021). Weather and climate extreme events in a changing climate (chapter 11).
- Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Melton, F., Lee, T., and Nemani, R. (2022). Nasa global daily downscaled projections, cmip6. *Scientific data*, 9(1):262.
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., Trewin, B., and Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6):851–870.