



# AICCA

Proyecto Adaptación a los impactos del  
cambio climático en recursos hídricos en los Andes

## ESCENARIOS DE VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA CUENCA DEL LAGO DE TOTA

**Autor: Ing. MSc. Guillermo Eduardo Armenta Porras  
Profesional Meteorólogo – Proyecto AICCA Colombia**

*Supervisión Administrativa  
Miguel Vera  
Líder Técnico Nacional-Proyecto AICCA*

*Supervisión Técnica  
José Franklyn Ruiz Murcia  
Subdirección de Meteorología - IDEAM*

Septiembre de 2019

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	4
METODOLOGÍA.....	6
Información climática utilizada .....	6
RESULTADOS .....	13
Selección de modelos.....	13
Escenarios de precipitación.....	14
Escenarios de temperatura media .....	15
Escenarios de temperatura máxima .....	22
Escenarios de temperatura mínima .....	22
CONCLUSIONES .....	29
REFERENCIAS.....	30

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas seleccionadas, que poseen información suficiente y confiable en la zona de estudio. ....	6
Figura 2. Pixeles de la base de datos CHIRPS para la cuenca del lago de Tota. ....	7
Figura 3. Dominios de simulación del proyecto “Generación de información climática en alta resolución espacial para el norte de Suramérica y el Caribe utilizando el modelo WRF” de la Universidad Nacional de Colombia. ....	8
Figura 4. Comportamiento interanual de la precipitación histórica del periodo 1981-2018 (en azul), y proyectada bajo el “Escenario seco” (en amarillo) y bajo el “Escenario húmedo” (en rojo) para el periodo 2026-2050. ....	16
Figura 5. Climatología anual de la precipitación histórica (izquierda), y futura bajo el “Escenario seco” (centro) y bajo el “Escenario húmedo” (derecha). ....	17
Figura 6. Cambio porcentual anual de la precipitación futura bajo el “Escenario seco” (izquierda) y bajo el “Escenario húmedo” (derecha). ....	18
Figura 7. Comportamiento interanual de la temperatura media histórica del periodo 1981-2016 (en azul), y proyectada bajo el “Escenario seco” (en amarillo) y bajo el “Escenario húmedo” (en rojo) para el periodo 2026-2050.....	19
Figura 8. Climatología anual de la temperatura media histórica (izquierda) y futura bajo el “Escenario seco” (centro) y bajo el “Escenario húmedo” (derecha).....	20
Figura 9. Cambio anual de la temperatura media (°C) futura bajo el “Escenario seco” (izquierda) y bajo el “Escenario húmedo” (derecha). ....	21
Figura 10. Comportamiento interanual de la temperatura máxima histórica del periodo 1981-2016 (en azul), y proyectada bajo el “Escenario seco” (en amarillo) y bajo el “Escenario húmedo” (en rojo) para el periodo 2026-2050.....	23
Figura 11. Climatología anual de la temperatura máxima histórica (izquierda) y futura bajo el “Escenario seco” (centro) y bajo el “Escenario húmedo” (derecha).....	24
Figura 12. Cambio anual de la temperatura máxima (°C) futura bajo el “Escenario seco” (izquierda) y bajo el “Escenario húmedo” (derecha). ....	25
Figura 13. Comportamiento interanual de la temperatura mínima histórica del periodo 1981-2016 (en azul), y proyectada bajo el “Escenario seco” (en amarillo) y bajo el “Escenario húmedo” (en rojo) para el periodo 2026-2050.....	26
Figura 14. Climatología anual de la temperatura mínima histórica (izquierda) y futura bajo el “Escenario seco” (centro) y bajo el “Escenario húmedo” (derecha).....	27
Figura 15. Cambio anual de la temperatura mínima (°C) futura bajo el “Escenario seco” (izquierda) y bajo el “Escenario húmedo” (derecha). ....	28

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha sido reconocido como un desafío para el desarrollo de los países y el bienestar de ecosistemas y sociedades. Según el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) producen el aumento de la temperatura media a nivel global, lo cual altera el sistema climático y ocasiona impactos tales como el aumento del nivel del mar, cambios en los patrones de la precipitación y una mayor intensidad y frecuencia de los eventos extremos de origen climático (IPCC, 2014).

Por otro lado, cuando se habla de variabilidad climática, ésta se refiere a cambios temporales originados por la interacción de los factores que determinan el clima, los cuales generan alteraciones en estas características predominantes del mismo. Estos cambios son periódicos y normales, ya que se presentan cuando hay fluctuaciones en la radiación del sol, la temperatura oceánica, el viento, entre otros factores, y se pueden presentar en escalas temporales que van desde unos cuantos días hasta varios meses y años. Los eventos El Niño y La Niña, por ejemplo, son fenómenos de variabilidad climática que perturban las condiciones predominantes del clima en el planeta, ocasionando principalmente alteraciones en los patrones interanuales de precipitación.

En el contexto del cambio climático, para poder entender cómo podrían cambiar las variables climáticas bajo distintos niveles de concentración de gases de efecto invernadero de origen antropogénico, se hace necesario el uso de escenarios. Éstos se entienden como descripciones coherentes, internamente consistentes y convincentes de un posible estado futuro del mundo, y en este caso, del clima (IDEAM; PNUD; MADS; DNP; Cancillería, 2017). Los escenarios no deben asumirse como pronósticos o predicciones, cada escenario es una imagen alternativa de cómo el futuro puede mostrarse bajo determinadas condiciones en un tiempo dado. Por lo general se utiliza un conjunto de ellos con el fin de mostrar, de la mejor manera posible, el rango de incertidumbre en las proyecciones climáticas.

Actualmente, dentro del proyecto “Adaptación a los impactos del cambio climático en recursos hídricos en los Andes (AICCA)”, uno de los principales objetivos es la generación de escenarios de cambio climático para la cuenca del Lago de Tota, teniendo en cuenta el impacto que éstos podrían tener en el recurso hídrico de las cuencas de los ríos que la conforman. Dichos escenarios fueron seleccionados con base en tanto en su representación de los posibles cambios en los valores medios de las principales variables climáticas como en los cambios que podrían generar en la variabilidad climática natural de la zona.

A continuación se presentan los resultados de los escenarios de variabilidad climática y cambio climático para la cuenca del lago de Tota. Este análisis se realizó con base en la información disponible de la base de datos CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*) de precipitación a escala diaria y mensual para la zona de estudio; así como la información de temperaturas media, máxima y mínima obtenida a través de modelación numérica y validada con datos observados de estaciones hidrometeorológicas, y con información de los modelos climáticos globales que mejor representación tienen de la variabilidad climática histórica a nivel global y para la zona de estudio. Los escenarios generados corresponden a 2 aspectos primordiales

del comportamiento de las variables climáticas que mayor impacto pueden presentar en la cuenca del lago de Tota: aumento de las lluvias intensas (tanto en el volumen de la precipitación mensual y anual como el incremento de la cantidad de días consecutivos con lluvias y con eventos extremos), y reducción en la precipitación (aumento de la duración de las sequías o periodos con niveles de lluvia muy bajos). En el presente documento se presentan los resultados obtenidos para estos dos escenarios, junto con las series de datos e información generada durante el proceso (en los archivos Anexos al documento).

## METODOLOGÍA

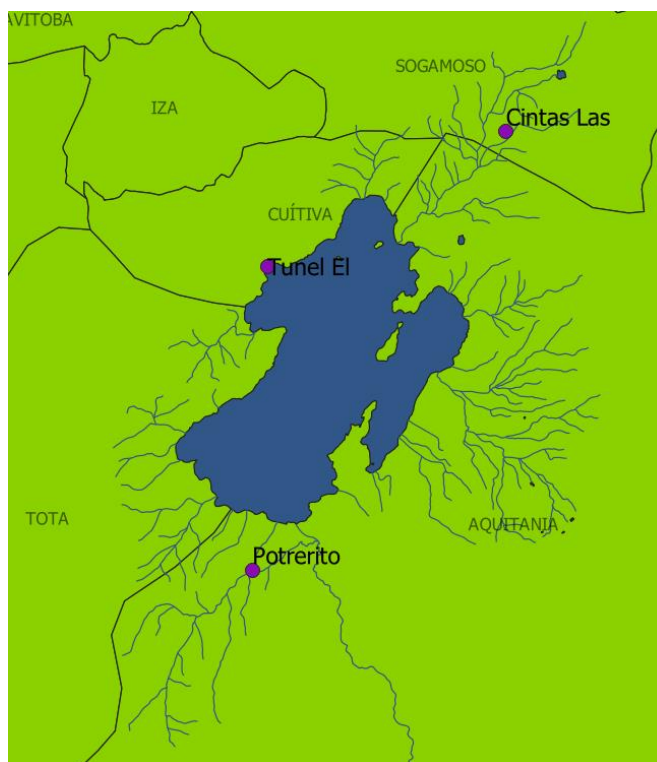
### Información climática utilizada

#### *Datos Observados*

Para el análisis climático, en primer lugar se revisó la información disponible de las estaciones hidrometeorológicas ubicadas en la zona de estudio que tuviesen datos de precipitación y temperaturas media, máxima y mínima diaria, para un periodo de al menos 25 años y que como máximo presentaran un faltante de información del 15%. Así mismo, a las series de datos se les realizó el control de calidad respectivo, con el fin de determinar la consistencia, congruencia y homogeneidad de los datos. De este proceso, se encontró que únicamente 3 estaciones cumplen con estas condiciones (ver Tabla 1 y Figura 1).

*Tabla 1. Detalles de las estaciones hidrometeorológicas seleccionadas que poseen información suficiente y confiable*

Estación	Nombre	Latitud	Longitud	Elevación	Año Inicial	Año Final	Cantidad de años que tiene	Porcentaje de información faltante
35090010	POTRERITO [35090010]	5,4776	-72,9486	3047	1971	2016	46	6,8%
35095030	EL TUNEL [35095030]	5,5749	-72,9477	3000	1971	2016	46	14,6%
35190010	LAS CINTAS [35190010]	5,6141	-72,8677	3400	1971	2016	46	14,2%



*Figura 1. Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas seleccionadas, que poseen información suficiente y confiable en la zona de estudio.*

Ante la poca cobertura de estaciones con información suficiente y confiable para la cuenca del lago de Tota, y teniendo en cuenta las observaciones y sugerencias de la subdirección de Meteorología del IDEAM, se decidió revisar otras fuentes de información (datos de reanálisis, satélite, entre otros), que tuviesen una mayor cantidad de puntos dentro de la zona de estudio. De esta revisión, se seleccionó la información de precipitación de la base de datos CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*), los cuales son datos de precipitación a escala diaria y mensual a una resolución espacial de 5x5 kilómetros. Estos datos son utilizados por el IDEAM en diversas tareas operativas (predicción climática con la herramienta CPT, por ejemplo), y en varios estudios han resultado ser válidos para algunas zonas de Colombia. Se determinaron los pixeles ubicados en la zona de estudio (Figura 2), y para ellos se extrajeron las series de datos correspondientes al periodo 1981-2018. El método de identificación de estos pixeles se basó en las coordenadas del centro de cada uno: Tomando como referencia que el pixel superior izquierdo es el primer pixel, se clasificaron estilo fila-columna (FxCx), donde F1C1 corresponde a la identificación de este primer pixel, F1C2 al siguiente pixel a la derecha, y así sucesivamente, y de la misma forma hacia abajo, siendo F2C1 el pixel que está inmediatamente por debajo del primer pixel, y así sucesivamente.

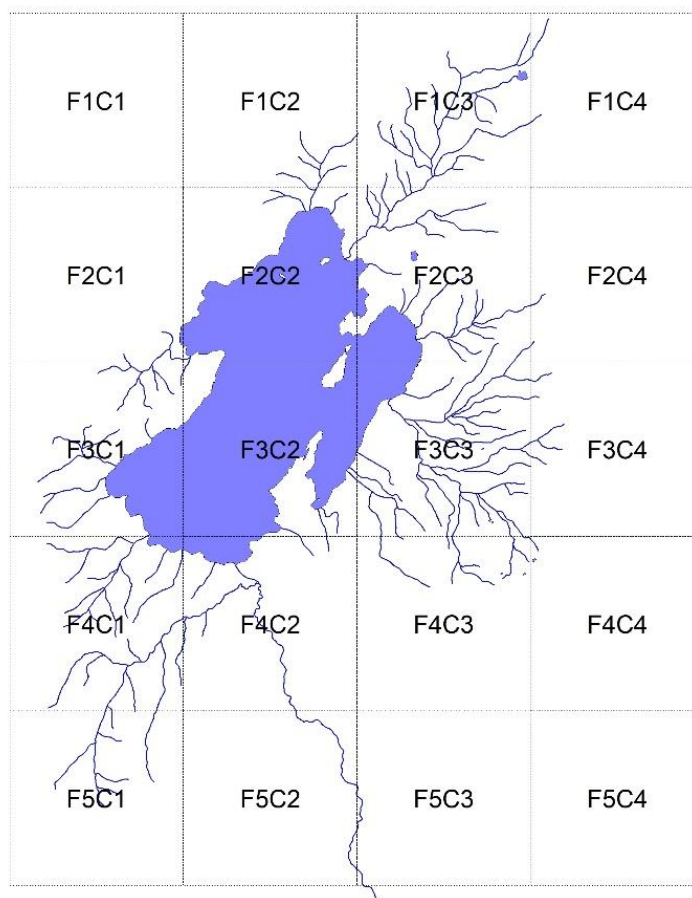


Figura 2. Pixeles de la base de datos CHIRPS para la cuenca del lago de Tota.

En el caso de las temperaturas media, máxima y mínima, se revisaron diferentes fuentes de datos para esta variable, encontrándose que la información existente a la fecha corresponde a datos de

reanálisis a una resolución de 0.5x0.5° (aproximadamente 55x55 kilómetros). Sin embargo, dentro del proyecto “Generación de información climática en alta resolución espacial para el norte de Suramérica y el Caribe utilizando el modelo WRF” del grupo “Tiempo, Clima y Sociedad” de la Universidad Nacional de Colombia se vienen realizando simulaciones a 10 Km de resolución espacial y a 6 horas de resolución temporal para toda Colombia, y el dominio de simulación seleccionado en este proyecto cubre por completo toda el área de la cuenca del lago de Tota (Figura 3). Se extrajeron los datos de los puntos que se encuentran en la cuenca del lago de Tota, y se realizó el control de calidad y la revisión de la consistencia y homogeneidad de las series en comparación con los datos observados de estaciones ubicadas en la cuenca y aledañas a la misma. Luego, se generaron los datos diarios y mensuales para el periodo 1981-2015 para los pixeles determinados que fueron seleccionados para la variable precipitación (Figura 2), realizando un proceso de ajuste y reducción de escala de los datos, utilizando el modelo digital de elevación (DEM) de 12.5 metros y las características de las estaciones ubicadas en el área. Este proceso se realizó con el fin de obtener un único conjunto de puntos y datos de todas las variables climáticas para las cuales se generaron los escenarios climáticos futuros.



Figura 3. Dominios de simulación del proyecto “Generación de información climática en alta resolución espacial para el norte de Suramérica y el Caribe utilizando el modelo WRF” de la Universidad Nacional de Colombia.

#### *Datos futuros de escenarios de cambio climático*

En lo relacionado con la información climática futura de distintos escenarios de cambio climático, se realizó la descarga de datos a escala diaria del proyecto *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP)* de la NASA (<https://cds.nccs.nasa.gov/nex-gddp/>). En este proyecto se tienen los datos de varios modelos del proyecto CMIP5 tanto para el periodo histórico 1976-2005 (y años anteriores) como para los periodos futuros 2011-2099 bajo dos escenarios RCP (4.5 y 8.5) a una resolución de 25x25 kilómetros. Se descargaron los datos para 13 de los 15 modelos utilizados en la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático para Colombia (IDEAM; PNUD; MADS; DNP; Cancillería, 2017) así como los datos de los modelos del *Max Planck Institute* de Alemania (MPI-ESM-LR y MPI-ESM-MR) (Tabla 2), los cuales han mostrado buenos resultados en varios proyectos y estudios de cambio climático. La descarga se realizó para el periodo de clima histórico 1981-2005 como para el periodo futuro 2011-2050, bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.



Tabla 2. Listado de modelos utilizados en la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático para Colombia.

<b>MODELO</b>	<b>INSTITUCIÓN</b>
<b>bcc-csm1-1-m</b>	<i>BCC – Beijing Climate Center, China Meteorological Administration</i>
<b>CCSM4</b>	<i>NCAR – National Center for Atmospheric Research</i>
<b>CSIRO-Mk3-6-0</b>	<i>CSIRO-QCCCE – Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence</i>
<b>GFDL-CM3</b>	<i>NOAA-GFDL – NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory</i>
<b>GISS-E2-H</b>	<i>NASA-GISS – NASA Goddard Institute for Space Studies</i>
<b>GISS-E2-R</b>	
<b>IPSL-CM5A-LR</b>	<i>IPSL - Institut Pierre-Simon Laplace</i>
<b>IPSL-CM5A-MR</b>	
<b>MIROC5</b>	<i>MIROC – Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Science</i>
<b>MIROC-ESM-CHEM</b>	
<b>MIROC-ESM</b>	
<b>MPI-ESM-LR</b>	<i>Max-Planck-Institut für Meteorologie (Max Planck Institute for Meteorology)</i>
<b>MPI-ESM-MR</b>	
<b>MRI-CGCM3</b>	<i>MRI – Meteorological Research Institute</i>
<b>NorESM1-ME</b>	<i>NCC – Norwegian Climate Centre</i>

Así mismo, se realizó la revisión de estudios y documentos científicos en los cuales se haya evaluado el desempeño de los modelos climáticos globales en la representación de los fenómenos de variabilidad climática, con el fin de seleccionar únicamente aquellos que presenten los mejores resultados (Cai, y otros, 2014) (Cai, y otros, 2015) (Wang, y otros, 2017). Se hizo énfasis en revisar aquellos modelos que hayan representado en forma aceptable las fases extremas que se presentan a escala interanual generadas por las anomalías de la temperatura superficial del océano Pacífico Tropical, las cuales se conocen como el fenómeno de El Niño/La Niña. Estas fluctuaciones temporales impactan de diversas formas el ambiente geofísico y socioeconómico en las regiones. Este fenómeno, a través de la respuesta atmosférica denominada la Oscilación del Sur, altera la circulación en la Zona Tropical, y con ello los patrones climáticos establecidos (incluida la frecuencia de los eventos meteorológicos extremos) en diferentes regiones del planeta (Serna, 2013). En Colombia, cuando se presentan condiciones El Niño (es decir una anomalía positiva de la temperatura superficial del océano Pacífico Tropical), el principal impacto se da en reducciones significativas de las precipitaciones, mientras que en condiciones La Niña (anomalía negativa de la temperatura superficial del océano Pacífico Tropical) el impacto ocasiona incrementos importantes en la precipitación. Estos cambios han tenido consecuencias importantes, especialmente en aquellos años donde el fenómeno se ha presentado de forma moderada a fuerte, por ejemplo los fenómenos de El Niño de 1990-1991 y 1997-1998 generaron eventos de sequía importantes en el país, los cuales a su vez ocasionaron afectación en la agricultura y en la disponibilidad del recurso hídrico. En cuanto a eventos La Niña importantes, se destaca el ocurrido en 2010-2011, donde en gran parte del territorio colombiano se presentaron afectaciones asociadas a los incrementos significativos de las lluvias (deslizamientos, daños en infraestructura, daños en el sector agropecuario, entre otros).

### Reducción de escala estadística

Debido a la resolución espacial de los datos de los modelos globales del CMIP5 (25x25 kilómetros), para las dimensiones de la cuenca del lago de Tota únicamente se tendrían datos de 2 a 4 píxeles. Ante esto, se hace necesario realizar una reducción de escala a los datos, con el fin de obtener series a una menor escala para los píxeles determinados con la información histórica a utilizar (Figura 1). Existen diferentes técnicas de reducción de escala, entre las cuales las más utilizadas son las siguientes:

- **Estadísticos:** Métodos en los que se trata de reproducir las estadísticas de largo plazo y las condiciones locales a través del análisis del comportamiento de los datos observados de una variable para un periodo largo de tiempo.
- **Dinámicos:** Utilizan modelos regionales de circulación (RCM por sus siglas en inglés). Estos modelos toman como entrada los datos de los GCM, y permiten ser configurados para correr en resoluciones más detalladas y para una región o zona en particular. Sin embargo, el tener un mayor detalle en la representación requiere capacidades de cómputos mayores, y el tiempo de ejecución de estos modelos es superior en comparación con los modelos globales.
- **Dinámico-Estadísticos:** Utiliza combinaciones de los dos métodos anteriores para la reducción de escala. Comúnmente se hace primero la reducción de escala dinámica a una resolución aceptable, que represente los aspectos importantes de la circulación general en el área de estudio (entre 25 y 50Km), y luego, con estos datos simulados, se realiza la reducción de escala estadística, con base en los datos observados de estaciones.

Con la información observada histórica y la de los escenarios futuros disponible para la zona de estudio, se analizó el uso de diferentes técnicas de reducción de escala estadística, con el fin de obtener series de datos diarias y mensuales coherentes tanto con el comportamiento histórico observado como con los cambios que podrían darse hacia el futuro en las variables climáticas. Además, estos cambios futuros que muestran las series de datos deben mostrar en una forma plausible las principales características de los escenarios seleccionados (los cuales se muestran en la siguiente sección). Se revisaron 3 técnicas de reducción de escala estadística: BCSD (*BIAS Correction and Spatial Dissagregation*, utilizada en la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático para Colombia (IDEAM; PNUD; MADS; DNP; Cancillería, 2017)), kNN (*Kth Nearest Neighbor* (Angarita & Yates, 2014)) y Delta Q-Q (Tabla 3).

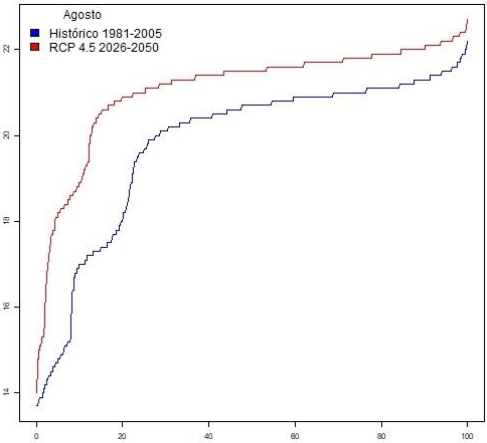
### Determinación de escenarios

Debido a la importancia que tiene para la cuenca del lago de Tota el impacto que pueden tener los eventos extremos de precipitación y temperatura, se realizó la revisión de diferentes índices estándar utilizados internacionalmente para análisis de tendencias climáticas y eventos climáticos extremos. Con base en estos índices, se establecen los escenarios futuros de variabilidad climática y cambio climático, los cuales son diferentes a los escenarios RCP del Quinto Reporte de Evaluación del IPCC. Estos escenarios consisten en aquellos que proyecten, para el periodo 2025-2050, las siguientes condiciones:

- Reducción de los niveles de precipitación anual y el aumento del máximo número de días secos consecutivos en el año (“Escenario seco”).
- Aumento en la precipitación anual e incremento del número de días consecutivos con precipitaciones en el año y en el número de días con lluvias superiores al percentil 95 (“Escenario húmedo”).

Tabla 3. Métodos de reducción de escala estadística revisados para la generación de las series de los escenarios climáticos

NOMBRE DEL MÉTODO	DESCRIPCIÓN	FORMA DE CÁLCULO	VENTAJAS Y LIMITACIONES
kNN ( <i>Kth Nearest Neighbor</i> )	Esta técnica realiza la generación de series sintéticas para los escenarios futuros tomando como base las distribuciones de probabilidades de transición entre estados de las variables climáticas a utilizar.	<p>El método KNN genera series aleatorias que preservan la probabilidad conjunta de los estados de humedad consecutivos – <math>J</math> del clima regional a paso de tiempo diario, definidos como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Seco (Dry), Precipitación media diaria regional menor a <math>\min(0.3, P_{0.05})</math>,</li> <li>• Humedo (Wet): Precipitación media regional entre 0.3 mm y <math>P_{95}</math></li> <li>• Extremadamente húmedo (Extremely wet): Precipitación media regional <math>&gt; P_{95}</math></li> </ul>	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capturan atributos climáticos de diferentes escalas temporales, tales como: la duración de las rachas de días secos y húmedos, que son de particular interés en la modelación de sistemas hidrológicos, la estacionalidad, y las oscilaciones de baja frecuencia.</li> <li>• Permiten conservar la correlación espacial de las observaciones.</li> <li>• Pueden construirse conjuntos arbitrariamente grandes de series de clima posible, e identificar en dichos conjuntos secuencias asociadas a narrativas específicas en un contexto de planificación, por ejemplo, aquellas que contengan eventos, o rachas de eventos “más secos” o “más húmedos”.</li> </ul> <p>Limitaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Las series sintéticas futuras generadas pueden tener vacíos.</li> <li>• La longitud de las series futuras debe ser la misma de la serie observada.</li> <li>• No está diseñado para visualizar los cambios en magnitud de los eventos extremos.</li> </ul>
BCSD ( <i>BIAS Correction and Spatial Dissagregation</i> )	Este método, en términos generales, busca reducir la diferencia entre los valores observados y los valores simulados, mediante la aplicación de un factor de ajuste a los datos simulados por los modelos globales.	$\alpha_j = \frac{\overline{X_j^{obs}}}{\overline{X_j^{mod}}}$ $X_{i,j}^* = \alpha_j X_{i,j}^{mod}$	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite generar series futuras basándose en la representación que cada modelo hizo de las series.</li> <li>• Conserva los cambios que cada modelo muestra para cada uno de los escenarios futuros.</li> <li>• Hace una muy buena aproximación de los valores medios mensuales.</li> <li>• No se generan series futuras con vacíos (a menos que las series originales del modelo global los contengan, lo cual es atípico).</li> <li>• El factor de ajuste se puede aplicar a toda la serie futura, independientemente de su longitud.</li> </ul> <p>Limitaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Para series diarias suaviza o amplifica significativamente los eventos extremos.</li> <li>• La longitud de la serie histórica observada y la simulada por el modelo debe ser la misma, y debe corresponder al mismo periodo de tiempo.</li> </ul>

NOMBRE DEL MÉTODO	DESCRIPCIÓN	FORMA DE CÁLCULO	VENTAJAS Y LIMITACIONES
Delta Q-Q (Delta Quantile Mapping)	<p>Con esta técnica básicamente lo que se busca es revisar los posibles cambios de magnitud que las variables climáticas muestran hacia el futuro, en comparación con la representación que el modelo tiene del clima de referencia a través de un mapeo de cuantiles.</p> <p>Finalmente, estos cambios de magnitud son aplicados a la serie observada, y esta serie ajustada pasa a ser la serie proyectada.</p>	$\alpha_{j,k}^{add} = \overline{X_{N,j,k}^{Futuro}} - \overline{X_{N,j,k}^{Base}}$ $X_{k,j,m}^{Fut} = X_{i,j}^{Obs} + \alpha_{j,m}^{add}$ 	<p>Ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conserva los cambios que cada modelo muestra para cada uno de los escenarios futuros.</li> <li>• Sirve para analizar los cambios en magnitud (y duración) de los eventos extremos.</li> <li>• Hace una muy buena aproximación de los valores diarios y mensuales.</li> </ul> <p>Limitaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se asume que el comportamiento observado del clima de referencia va a ser el mismo hacia el futuro, y que sólo cambia la magnitud de las variables.</li> <li>• Las series futuras generadas pueden tener vacíos (puesto que surgen de la serie observada).</li> <li>• La longitud de las series futuras e históricas de los modelos globales debe ser la misma de la serie observada.</li> </ul>

## RESULTADOS

A continuación se describen los resultados en el proceso de selección, generación y análisis de los escenarios de variabilidad climática y cambio climático para la cuenca del lago de Tota. La información generada se encuentra en los archivos anexos a este documento (series de datos originales y ajustados, índices y gráficos generados, entre otros).

### Selección de modelos

La Tabla 4 muestra el listado de modelos que, con base en la revisión de estudios y documentos científicos en los cuales se haya evaluado el desempeño de los modelos climáticos globales en la representación de los fenómenos de variabilidad climática, presentan los mejores resultados. De estos listados de modelos se seleccionaron aquellos que fueran comunes entre sí tanto a estos estudios como a los utilizados en la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático para Colombia (resaltados en verde).

Para los modelos seleccionados se generaron las series diarias y mensuales de precipitación y temperaturas media, máxima y mínima, tanto para el periodo histórico 1981-2005 como para el periodo futuro 2026-2050 bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5. Para este proceso, de las 3 técnicas de reducción de escala estadística vistas anteriormente, se seleccionó el método DeltaQQ, debido a que fue el que mejores resultados presentó en cuanto la representación de la variabilidad climática futura bajo distintos escenarios de cambio climático.

*Tabla 4. Listado de modelos que mejor representación tienen de los fenómenos El Niño/La Niña a nivel global, con base en diversos estudios.*

<b>Modelos con mejor representación de los fenómenos “El Niño” (Cai, y otros, 2014)</b>	<b>Modelos con mejor representación de los fenómenos “El Niño” bajo un escenario de aumento de la temperatura de 1.5°C (Wang, y otros, 2017)</b>	<b>Modelos con mejor representación de los fenómenos “La Niña” (Cai, y otros, 2015)</b>
CanESM2	bcc-csm1-1	bcc-csm1-1
<b>CCSM4</b>	bcc-csm1-1-m	bcc-csm1-1-m
CESM1-BGC	CanESM2	CanESM2
CMCC-CM	<b>CCSM4</b>	<b>CCSM4</b>
CNRM-CM5	CESM1-CAM5	CMCC-CESM
<b>GFDL-CM3</b>	CNRM-CM5	CMCC-CM
GFDL-ESM2M	<b>GFDL-CM3</b>	CMCC-CMS
HadGEM2-CC	GISS-E2-H	CESM1-BGC
IPSL-CM5B-LR	<b>MIROC5</b>	CESM1-CAM5
<b>MIROC5</b>	MPI-ESM-MR	CNRM-CM5
MPI-ESM-MR	MRI-CGCM3	FGOALS-s2
<b>MRI-CGCM3</b>	NorESM1-ME	<b>GFDL-CM3</b>
		GFDL-ESM2G
		GFDL-ESM2M
		GISS-E2-H
		IPSL-CM5B-LR
		<b>MIROC5</b>
		MPI-ESM-MR
		<b>MRI-CGCM3</b>
		NorESM1-M
		NorESM1-ME

Una vez generadas las series, se revisaron las principales condiciones para los escenarios futuros a generar, a través del uso de índices climáticos CLIMDEX, los cuales son utilizados principalmente para la evaluación de tendencias climáticas y eventos climáticos extremos (Tabla 5). Estos índices se calcularon para los datos históricos de referencia (CHIRPS) y para los datos de los 5 modelos bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5.

Tabla 5. Índices CLIMDEX utilizados para la evaluación y selección de los modelos a utilizar para la generación de los escenarios climáticos futuros para la cuenca del Lago de Tota.

ÍNDICE	DESCRIPCIÓN	ESCENARIO ASOCIADO
CDD (# días/año)	Mayor número de días secos consecutivos en un año.	Seco
CWD (# días/año)	Mayor número de días consecutivos con lluvia en un año.	Húmedo
R95P (# días/año)	Número de días en un año con lluvia mayor al percentil 95 <sup>1</sup> .	Húmedo
PRCPTOT (mm/año)	Precipitación total al año.	Húmedo / Seco

De los mismos, se compararon los cambios que presentarían los modelos en el futuro en estos índices, con relación a los valores de los mismos para el periodo histórico. De ellos, se priorizaron los modelos y escenarios RCP para los cuales se presentaran los mayores cambios en los índices (reducción de los niveles de precipitación anual y el aumento del máximo número de días secos consecutivos en el año para el “Escenario seco” y aumento en la precipitación anual e incremento del número de días consecutivos con precipitaciones en el año y en el número de días con lluvias superiores al percentil 95 para el “Escenario húmedo”), seleccionando los modelos que mayores valores presentaran de los índices (independientemente del escenario RCP al que pertenecieran las series futuras). De estos dos escenarios, el Escenario Húmedo es el de mayor probabilidad de ocurrencia, con base en las proyecciones generadas a nivel nacional en la Tercera Comunicación.

De esta revisión, se encontró que, para el “Escenario seco”, el modelo que mejor representación tiene de las condiciones requeridas para el mismo, es el modelo MRI-CGCM3 bajo el escenario RCP 4.5. Este modelo presentó reducciones de la precipitación anual del orden del 10-20% hacia el año 2050, y una extensión promedio de 5 a 9 días en la duración de los mayores periodos secos (ver “Índices” en los Anexos). Por otra parte, para el “Escenario húmedo”, el modelo seleccionado es el GFDL-CM3 bajo el RCP 8.5, el cual muestra incrementos de precipitación anual del orden del 15-40%, un aumento promedio de 4 a 7 días en la duración de los periodos extensos de lluvias, y un aumento entre 7 y 9 días más con lluvias extremas para la zona hacia el año 2050.

#### Escenarios de precipitación

En la Figura 4 se muestran, a manera de ejemplo, los comportamientos interanuales de la precipitación para dos puntos referenciales de la cuenca del Lago de Tota. En el comportamiento histórico del periodo 1981-2018 se aprecia que en los años donde se han presentado fenómenos de variabilidad climática que ocasionan aumento de las lluvias (evento La Niña 2010/2011 por ejemplo), la precipitación se ha incrementado entre un 60-80%, especialmente en los meses de mayores lluvias (de abril a noviembre), mientras que bajo eventos que originan reducciones de las mismas (El Niño 1991/1992 o 1997/1998 por ejemplo), las precipitaciones han disminuido hasta en un 70%.

Bajo los dos escenarios de cambio climático generados para el periodo 2026-2050, los cambios se darían principalmente en diciembre y entre marzo y junio. En el escenario Seco, las reducciones se darían entre un 10-20% en los meses mencionados, y leves aumentos (del 5-10%) entre julio y agosto. En cuanto al cambio de intensidad que ocasionarían los fenómenos de variabilidad climática (principalmente los asociados a eventos El Niño/La Niña), se mantendría en la misma proporción de los datos históricos (reducciones hasta un 70% e incrementos del orden del 60-80%). Por otra parte, bajo el escenario húmedo se presentarían incrementos de la precipitación del orden del 15-40%, y se presentarían en los meses de diciembre y entre febrero y agosto, dándose los más altos en abril, mayo y julio. Para los cambios de la intensidad de las lluvias ante fenómenos de variabilidad climática, se aprecia que, ante la ocurrencia de eventos que ocasionen aumentos de las mismas (eventos La Niña por ejemplo), estos incrementos serían mayores al 70%, llegando a presentarse meses con lluvias de más del 100% en comparación con las del periodo histórico. Mientras que, bajo eventos que ocasionen reducciones de las lluvias (eventos El Niño por ejemplo), éstas se reducirían

entre un 10-45%.

A nivel espacial anual (Figura 5 y Figura 6), el comportamiento de la precipitación histórica presenta valores entre los 900 y los 1600 milímetros al año, teniendo la zona noroccidental con valores inferiores a los 1000 milímetros y la zona oriental con valores anuales de precipitación de más de 1500 milímetros al año. Bajo el escenario Seco, las reducciones de la precipitación serían del orden de 2-6%, siendo el centro y norte de la cuenca donde se darían las mayores reducciones (superiores al 3%). Esto ocasionaría que, hacia el año 2050, las mayores precipitaciones anuales no superen los 1500 milímetros, y el área noroccidental donde se presentan valores menores a 1000 milímetros sería mayor, cubriendo la tercera parte del lago de Tota. Por otra parte, bajo el escenario Húmedo, los aumentos de las precipitaciones al año serían entre el 15-25%, lo que ocasionaría que las lluvias en toda la cuenca superen los 1100 milímetros al año, y en la parte oriental (municipio de Aquitania), se tendrían precipitaciones anuales de más de 1500 milímetros.

#### Escenarios de temperatura media

Los comportamientos interanuales de la temperatura media en la cuenca del Lago de Tota para el periodo 1981-2016 (Figura 7), muestran valores que oscilan entre los 7 y los 16°C, con los valores máximos en marzo y abril y los menores en julio y agosto. Se aprecia que en los años donde se han presentado fenómenos de variabilidad climática las temperaturas han llegado a cambiar en 1°C, aunque la tendencia es a que cada año éstas sean más altas.

Bajo los dos escenarios de cambio climático generados para el periodo 2026-2050, la temperatura media aumentaría en todo el año, dándose los mayores aumentos en noviembre y diciembre y entre marzo y mayo. En el escenario Seco, la temperatura aumentaría entre 0.7 y 0.9°C, mientras que bajo el escenario Húmedo, ésta se incrementaría entre 0.6 y 0.8°C. En ambos escenarios se aprecia cómo los valores de cada año del periodo futuro 2026-2050 son mayores al promedio del periodo histórico 1981-2016, y solamente se tendrían valores cercanos a éste en años donde se presenten fenómenos de variabilidad climática que ocasionen disminución en la temperatura.

A nivel espacial anual (Figura 8), el comportamiento de la temperatura media histórica presenta valores entre 7 y 10°C en la parte oriental de la cuenca, de 11 a 12°C en la parte occidental y de 13 a 16°C al norte (hacia Sogamoso). Bajo el escenario Seco, los aumentos de temperatura más altos se darían en la parte nororiental de la cuenca, con incrementos del orden de 0.8 a 0.9°C, mientras que en el resto de la zona los aumentos serían entre 0.7 y 0.8°C. Esto ocasionaría que, hacia el año 2050, en la parte norte y occidental de la cuenca se tengan temperaturas entre 12 y 17°C, mientras que en la parte oriental se tendrían temperaturas entre 8 y 11°C. Bajo el escenario Húmedo, los puntos cardinales de la cuenca del lago de Tota (norte, sur, oriente y occidente), serían los que mayores aumentos presentarían, del orden de 0.7 a 0.8°C, mientras que el centro de la zona tendría incrementos de la temperatura media del orden de 0.6 a 0.7°C. Al igual que con el escenario Seco, este aumento de la temperatura ocasionaría que hacia el año 2050 en la parte norte y occidental de la cuenca se tengan temperaturas entre 12 y 16°C, y en la parte oriental entre 8 y 11°C.

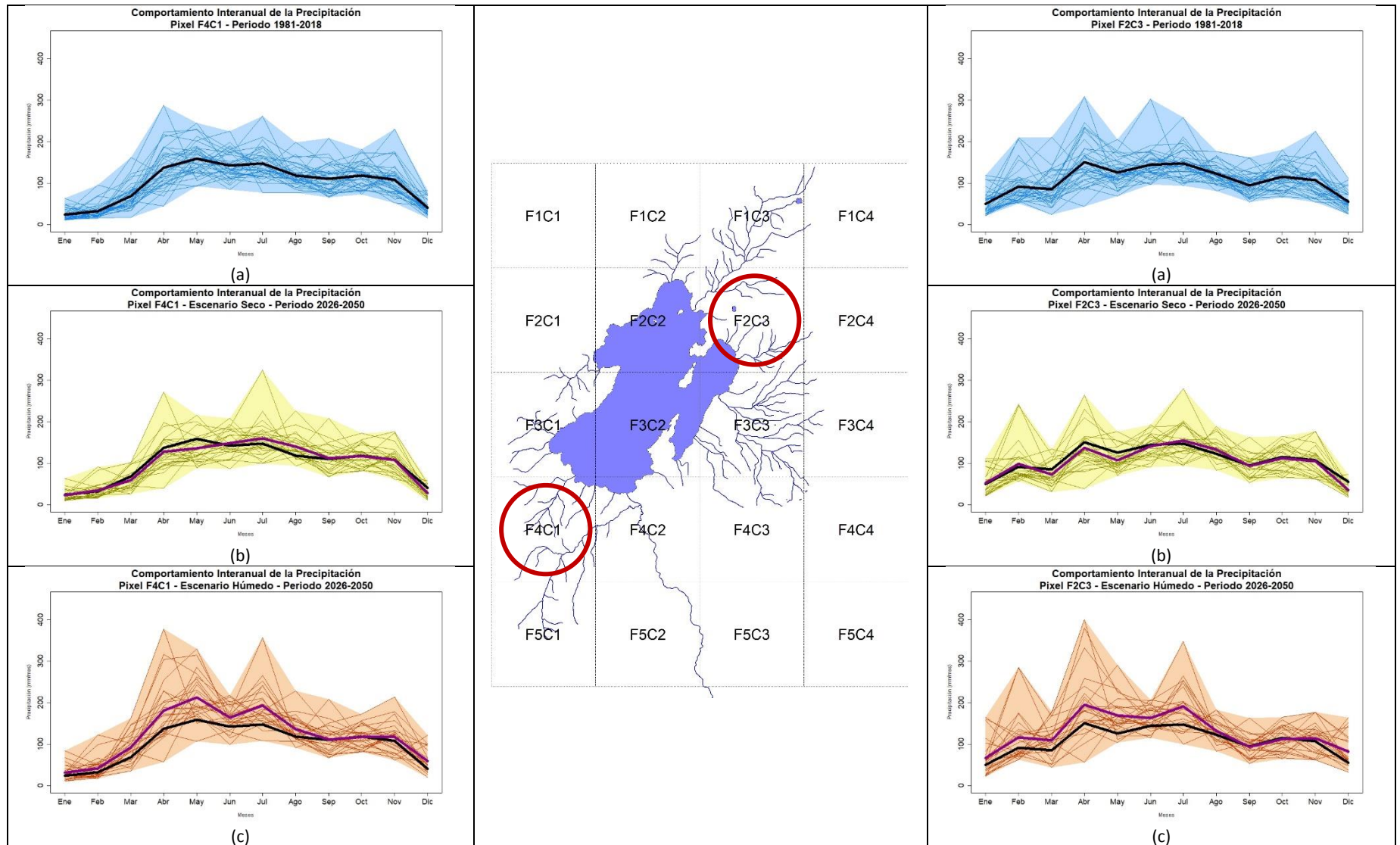


Figura 4. Comportamiento interanual de la precipitación histórica del periodo 1981-2018 (en azul), y proyectada bajo el “Escenario seco” (en amarillo) y bajo el “Escenario húmedo” (en rojo) para el periodo 2026-2050.



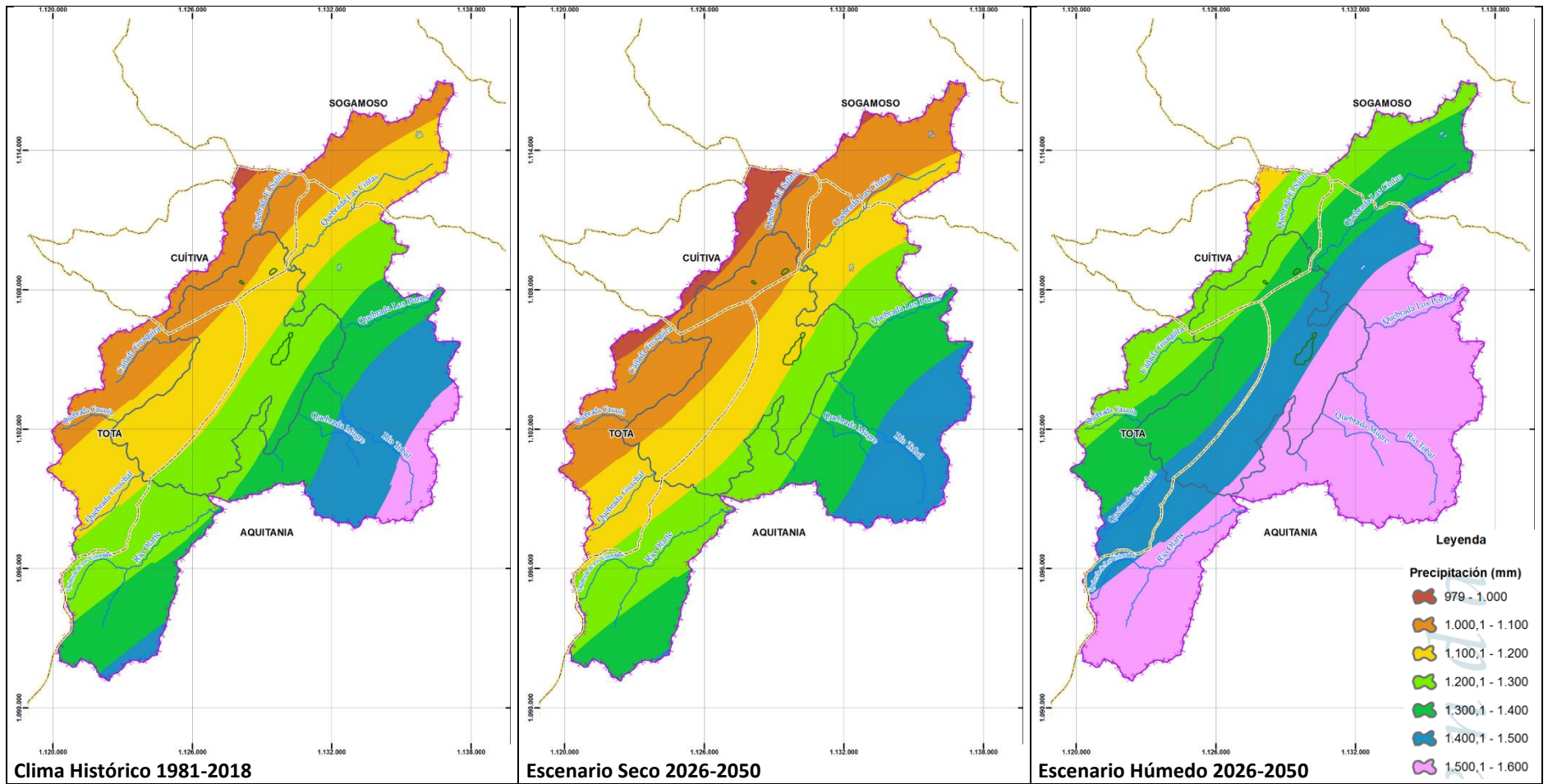


Figura 5. Climatología anual de la precipitación histórica (izquierda), y futura bajo el “Escenario seco” (centro) y bajo el “Escenario húmedo” (derecha).

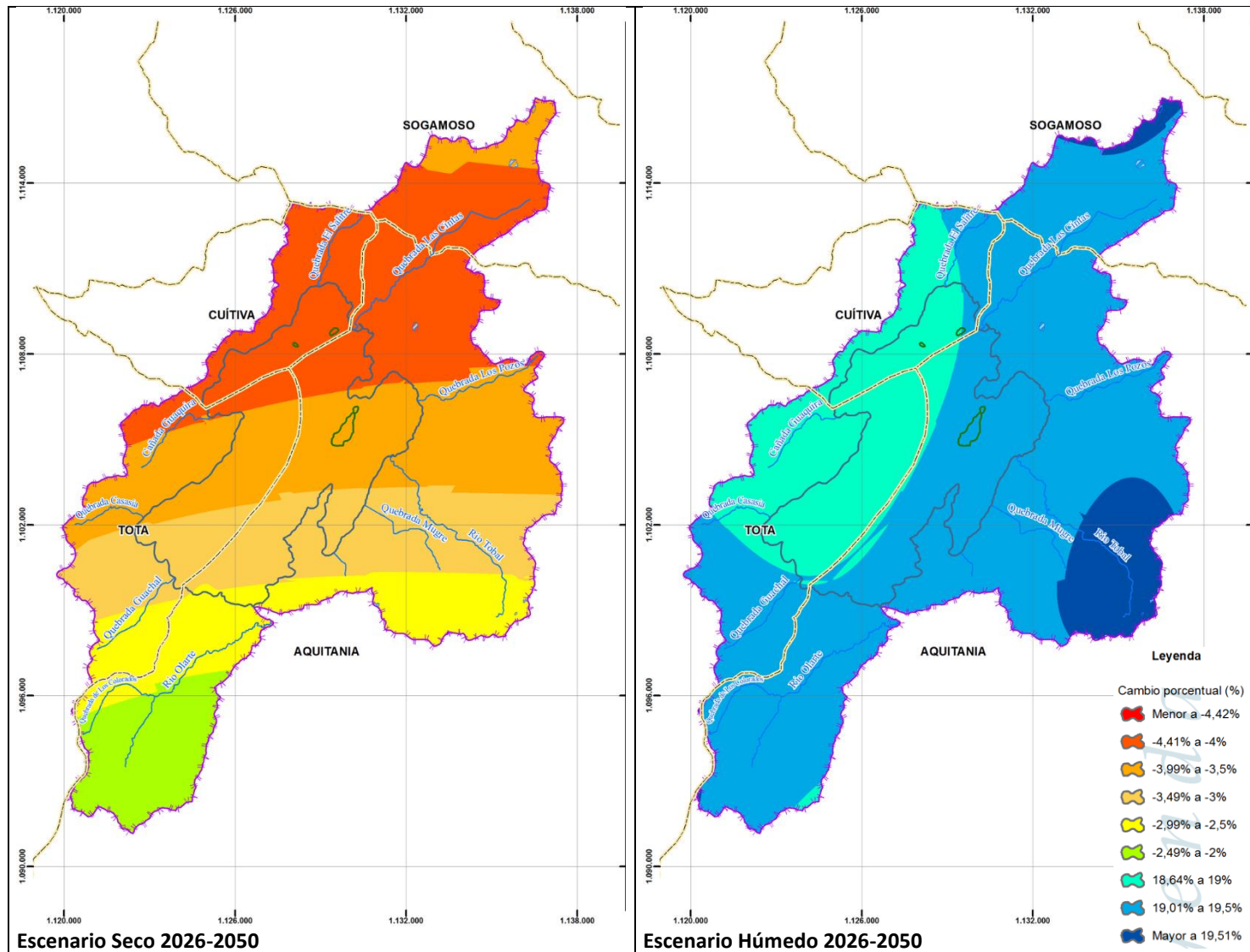


Figura 6. Cambio porcentual anual de la precipitación futura bajo el "Escenario seco" (izquierda) y bajo el "Escenario húmedo" (derecha).

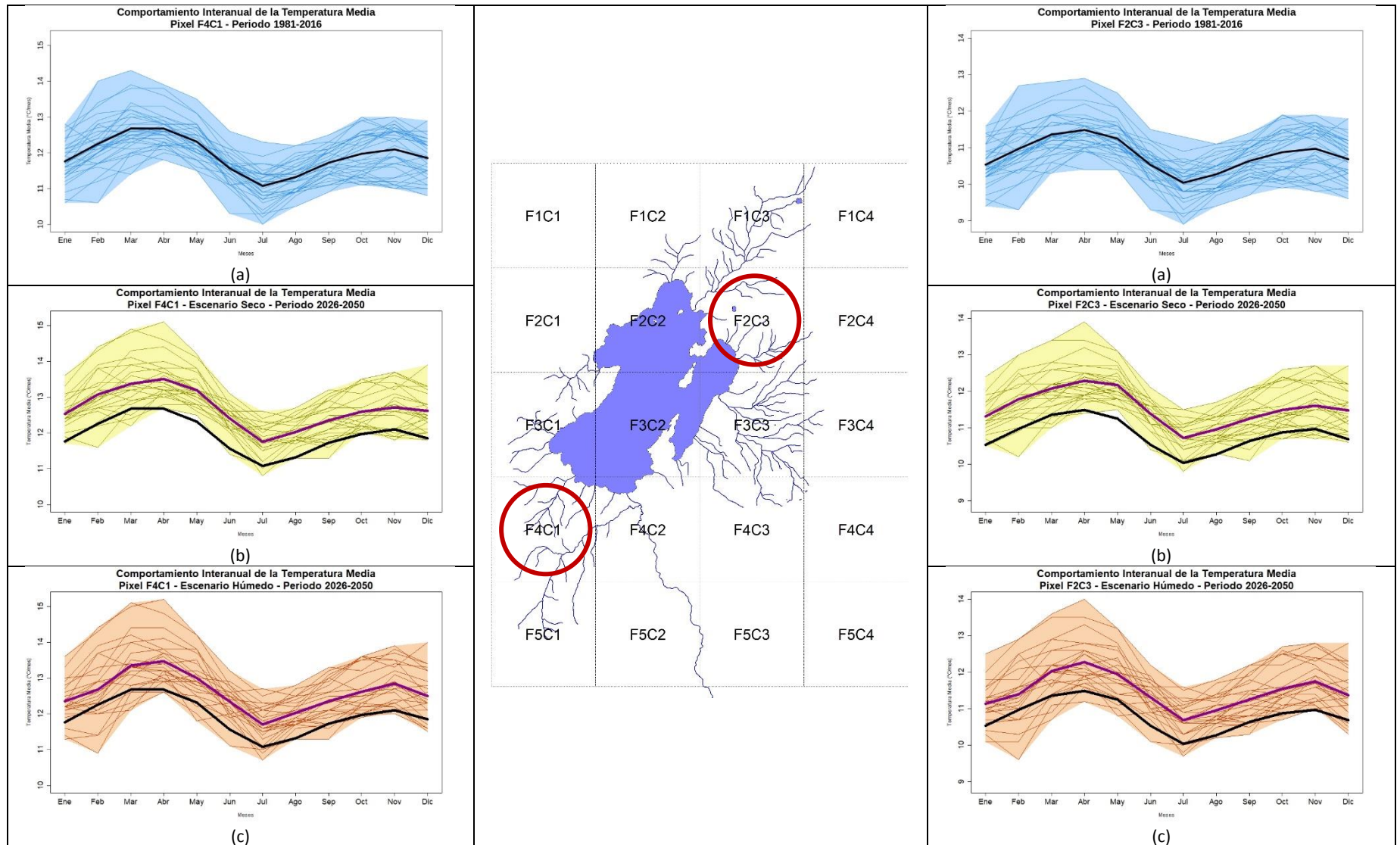


Figura 7. Comportamiento interanual de la temperatura media histórica del periodo 1981-2016 (en azul), y proyectada bajo el "Escenario seco" (en amarillo) y bajo el "Escenario húmedo" (en rojo) para el periodo 2026-2050.

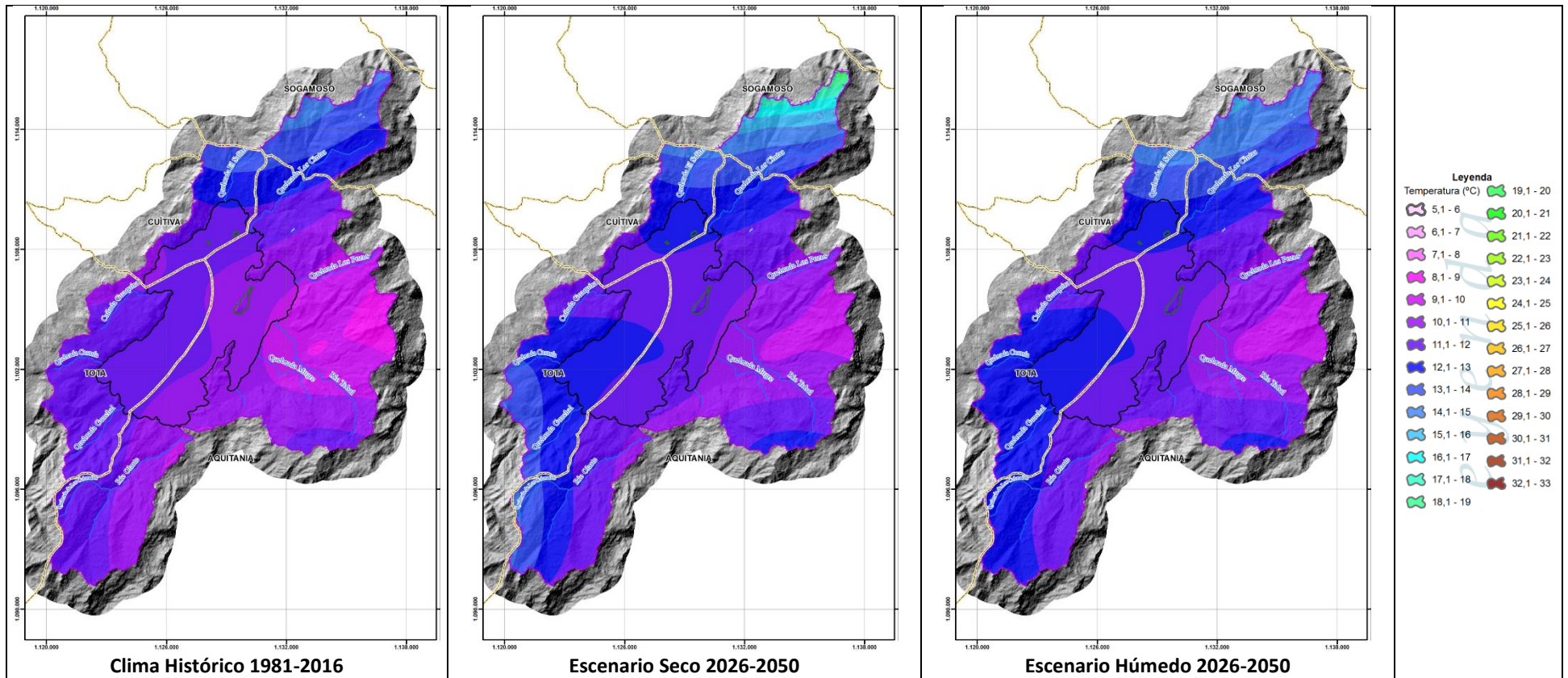


Figura 8. Climatología anual de la temperatura media histórica (izquierda) y futura bajo el “Escenario seco” (centro) y bajo el “Escenario húmedo” (derecha).

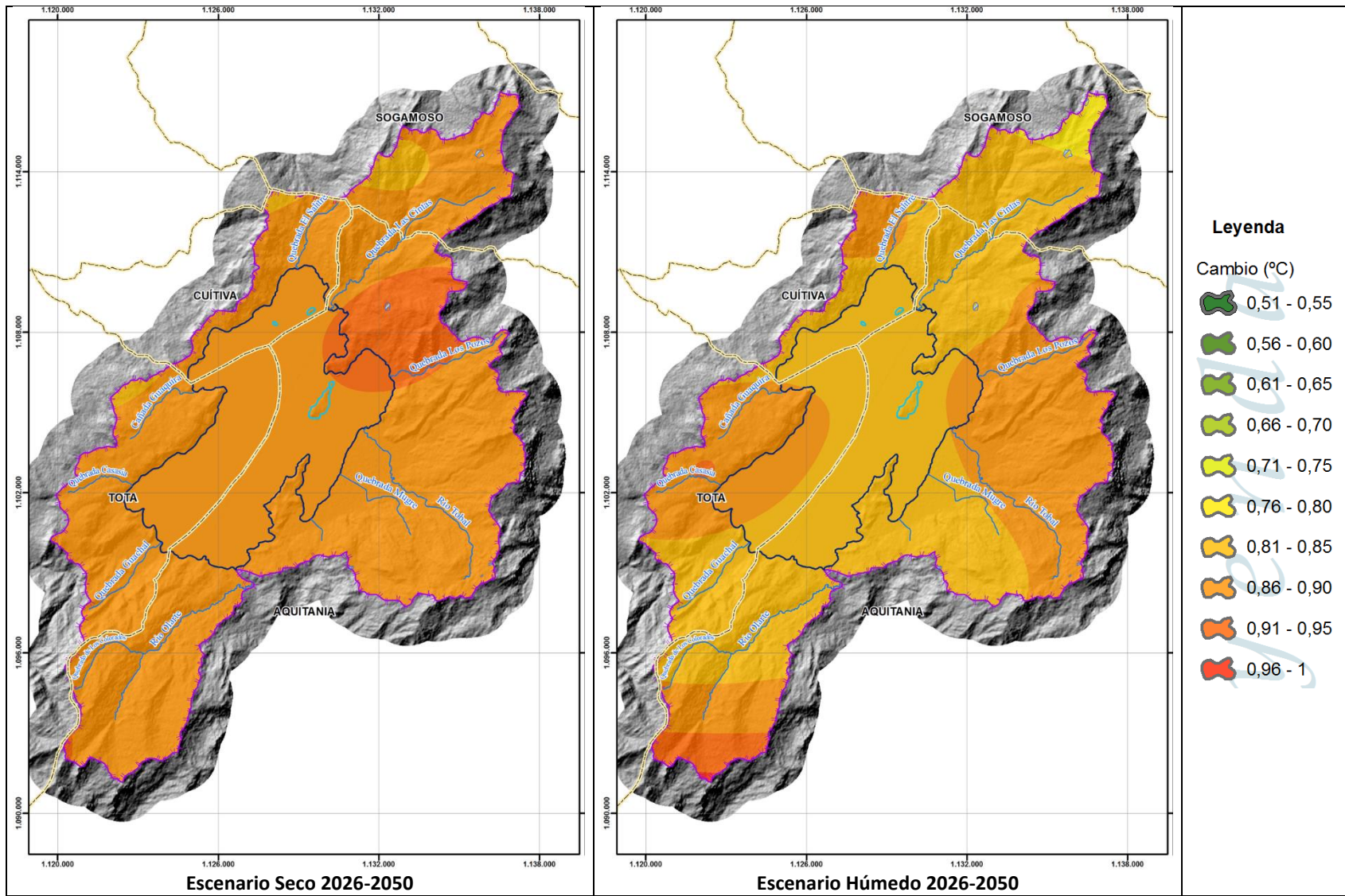


Figura 9. Cambio anual de la temperatura media (°C) futura bajo el "Escenario seco" (izquierda) y bajo el "Escenario húmedo" (derecha).

### Escenarios de temperatura máxima

La temperatura máxima en la cuenca del Lago de Tota en el periodo histórico 1981-2016 (Figura 10), muestra valores interanuales que oscilan entre los 10 y los 23°C, con los valores máximos de enero a abril y los menores de junio a agosto. Se aprecia que en los años donde se han presentado fenómenos de variabilidad climática las temperaturas han llegado a cambiar en aproximadamente 1°C, aunque la tendencia es a que cada año éstas sean más altas.

Bajo los dos escenarios de cambio climático generados para el periodo 2026-2050, la temperatura máxima aumentaría en todo el año, dándose los mayores aumentos en noviembre y diciembre y entre junio y agosto. En el escenario Seco, la temperatura aumentaría entre 0.6 y 0.8°C, mientras que bajo el escenario Húmedo, ésta se incrementaría entre 0.5 y 1°C, con el mayor aumento en noviembre y presentando un particular comportamiento de disminución o ausencia de cambio de la misma en el mes de febrero. En ambos escenarios se aprecia cómo los valores de cada año del periodo futuro 2026-2050 son mayores al promedio del periodo histórico 1981-2016, y solamente se tendrían valores cercanos a éste en años donde se presenten fenómenos de variabilidad climática que ocasionen disminución en la temperatura, siendo mucho más bajos a este promedio histórico en el mes de febrero.

A nivel espacial anual (Figura 11 y Figura 12), el comportamiento de la temperatura máxima histórica presenta valores entre 12 y 15°C en la parte oriental de la cuenca, de 16 a 19°C en la parte occidental y de 20 a 23°C al norte (hacia Sogamoso). En los dos escenarios (Seco y Húmedo), los aumentos de temperatura más altos se darían en la parte sur de la cuenca, con incrementos del orden de 0.8 a 0.9°C, mientras que en el resto de la zona los aumentos serían entre 0.6 y 0.8°C. Esto ocasionaría que, hacia el año 2050, en la parte central de la cuenca se tengan temperaturas máximas entre 15 y 17°C, mientras que en la parte oriental se tendrían temperaturas entre 12 y 14°C.

### Escenarios de temperatura mínima

Para la temperatura mínima en la cuenca del Lago de Tota del periodo histórico 1981-2016 (Figura 13), se tienen valores interanuales que oscilan entre 1 y 16°C, con los valores máximos en abril y mayo y los menores en enero. Se aprecia que en los años donde se han presentado fenómenos de variabilidad climática las temperaturas han llegado a cambiar en más de 1°C (teniendo años con cambios de 2°C), aunque la tendencia es a que cada año éstas sean más altas.

Bajo los dos escenarios de cambio climático generados para el periodo 2026-2050, la temperatura mínima aumentaría en todo el año, dándose los mayores aumentos entre abril y agosto. En el escenario Seco, la temperatura aumentaría entre 0.5 y 1°C, mientras que bajo el escenario Húmedo, ésta se incrementaría entre 0.3 y 1°C, con el mayor aumento en junio. En ambos escenarios se aprecia cómo los valores de cada año del periodo futuro 2026-2050 son mayores al promedio del periodo histórico 1981-2016, y solamente se tendrían valores cercanos a éste en años donde se presenten fenómenos de variabilidad climática que ocasionen disminución en la temperatura, siendo mucho más bajos a este promedio histórico en enero y febrero.

A nivel espacial anual (Figura 14 y Figura 15), el comportamiento de la temperatura mínima histórica presenta valores entre 5 y 7°C en la parte central de la cuenca, de 8 a 12°C en la parte suroccidental y de 13 a 16°C al norte (hacia Sogamoso). En los dos escenarios (Seco y Húmedo), los aumentos de temperatura más altos se darían en la parte sur y oriental de la cuenca, con incrementos del orden de 0.6 a 0.8°C, mientras que en el resto de la zona los aumentos serían entre 0.5 y 0.6°C. Esto ocasionaría que, hacia el año 2050, en la parte central de la cuenca se tengan temperaturas mínimas entre 7 y 10°C, mientras que en la parte sur y norte se tendrían temperaturas entre 11 y 17°C.

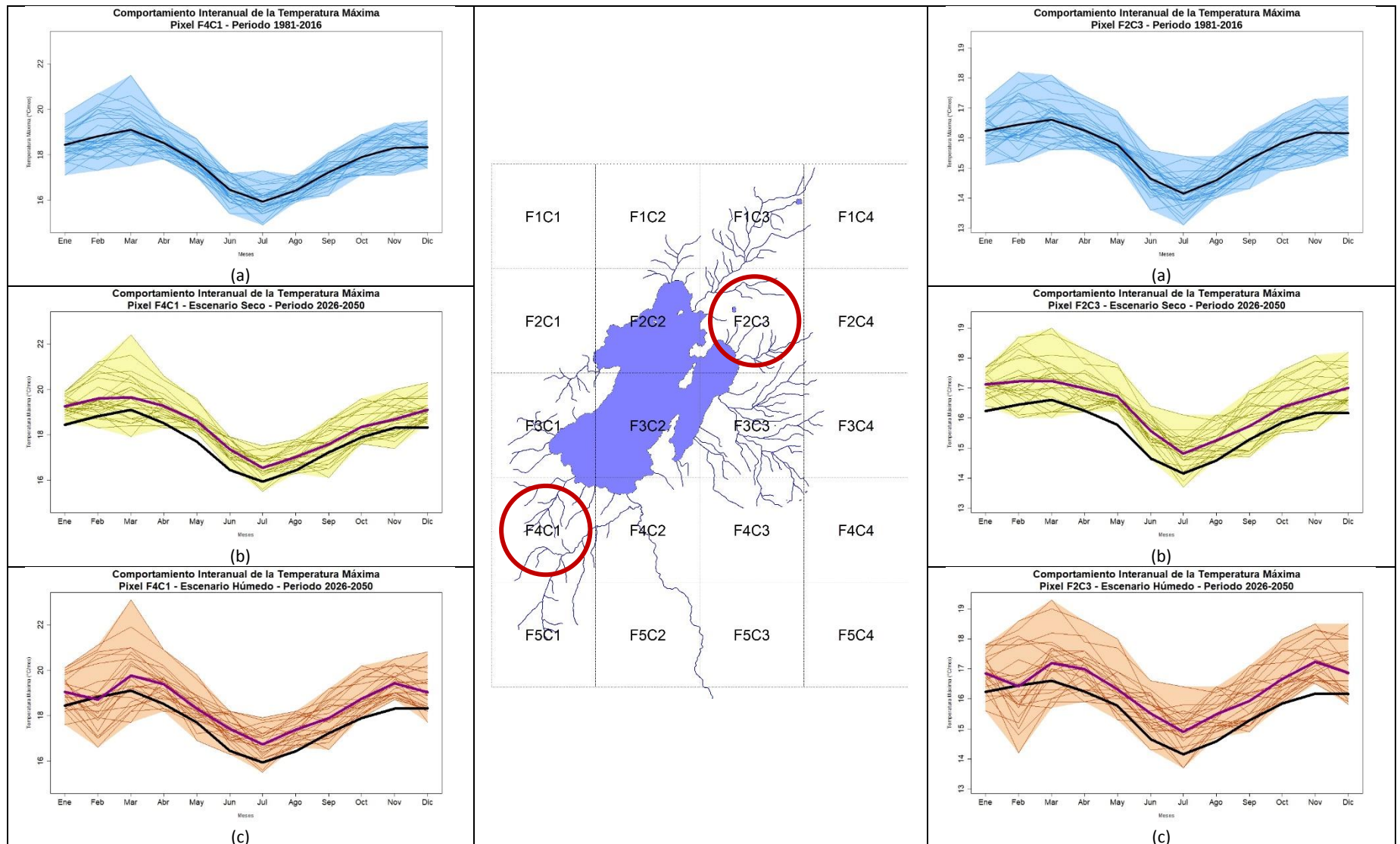


Figura 10. Comportamiento interanual de la temperatura máxima histórica del periodo 1981-2016 (en azul), y proyectada bajo el "Escenario seco" (en amarillo) y bajo el "Escenario húmedo" (en rojo) para el periodo 2026-2050.

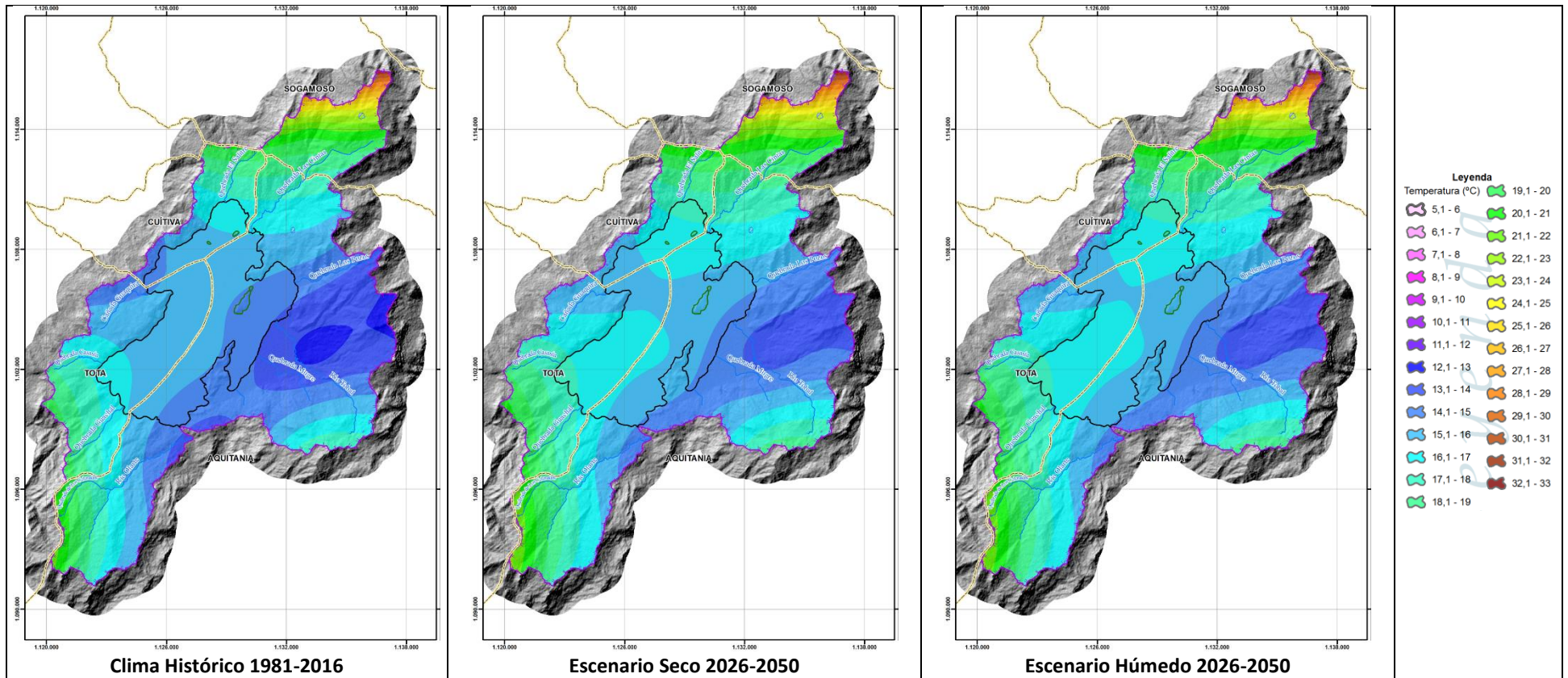


Figura 11. Climatología anual de la temperatura máxima histórica (izquierda) y futura bajo el “Escenario seco” (centro) y bajo el “Escenario húmedo” (derecha).



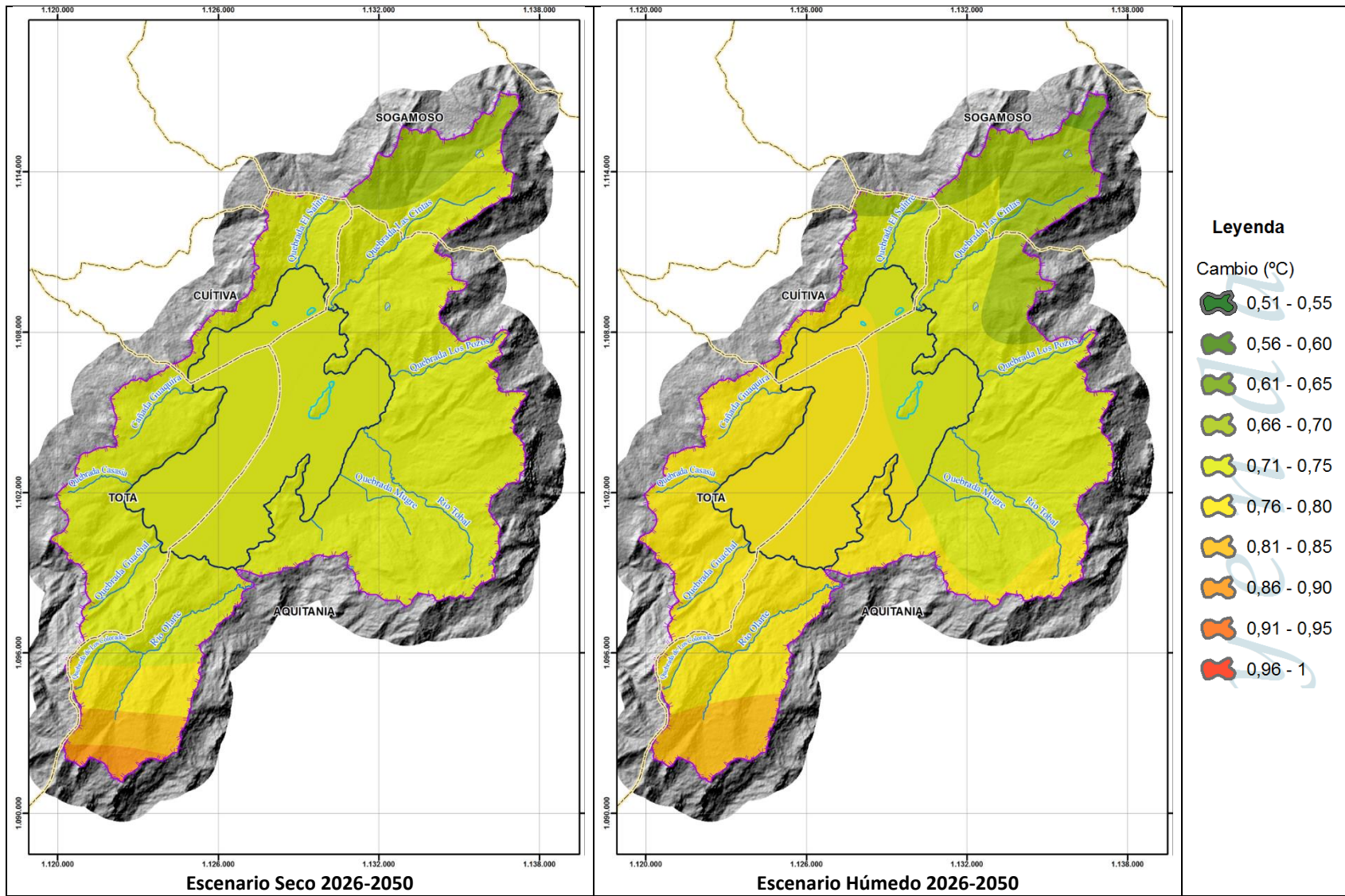


Figura 12. Cambio anual de la temperatura máxima (°C) futura bajo el "Escenario seco" (izquierda) y bajo el "Escenario húmedo" (derecha).

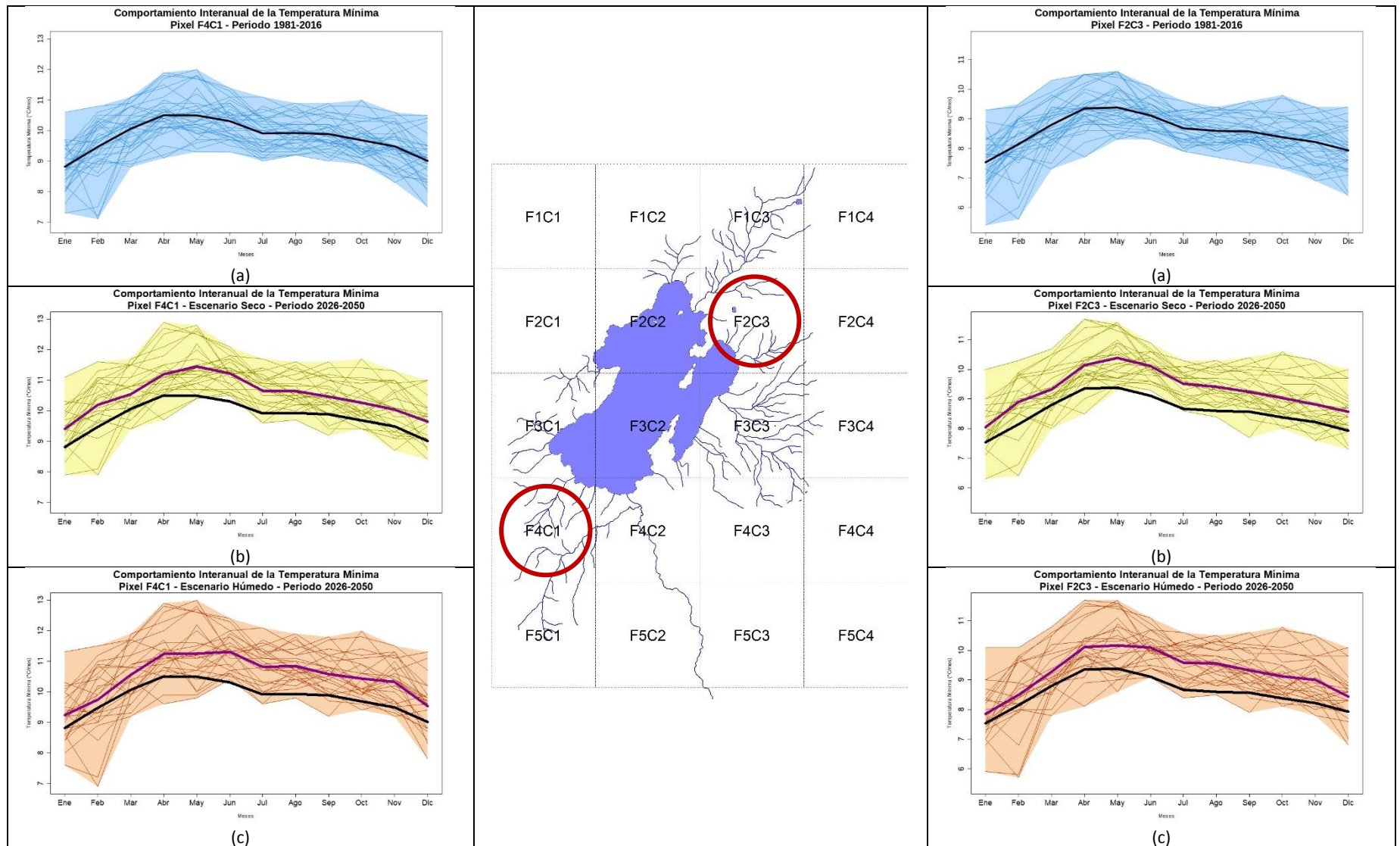


Figura 13. Comportamiento interanual de la temperatura mínima histórica del periodo 1981-2016 (en azul), y proyectada bajo el "Escenario seco" (en amarillo) y bajo el "Escenario húmedo" (en rojo) para el periodo 2026-2050.

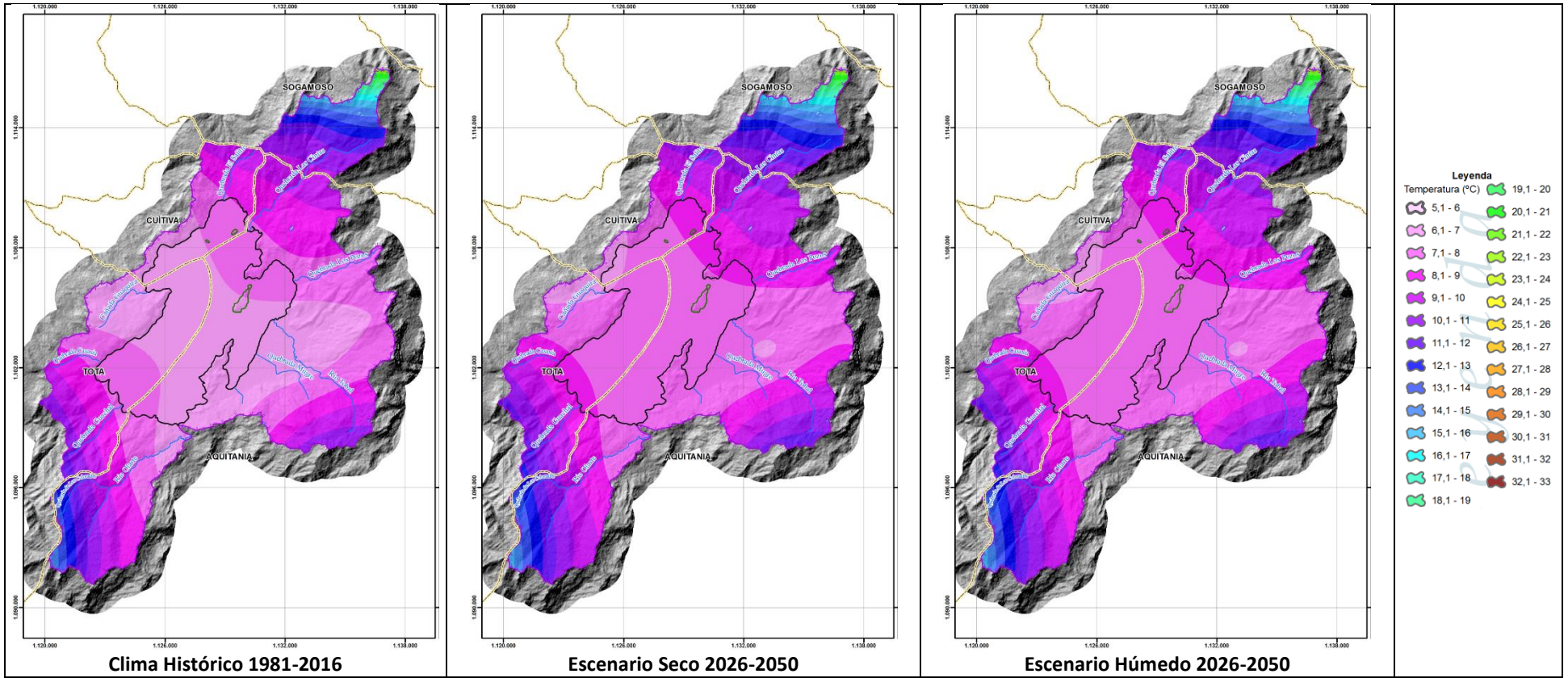


Figura 14. Climatología anual de la temperatura mínima histórica (izquierda) y futura bajo el "Escenario seco" (centro) y bajo el "Escenario húmedo" (derecha).

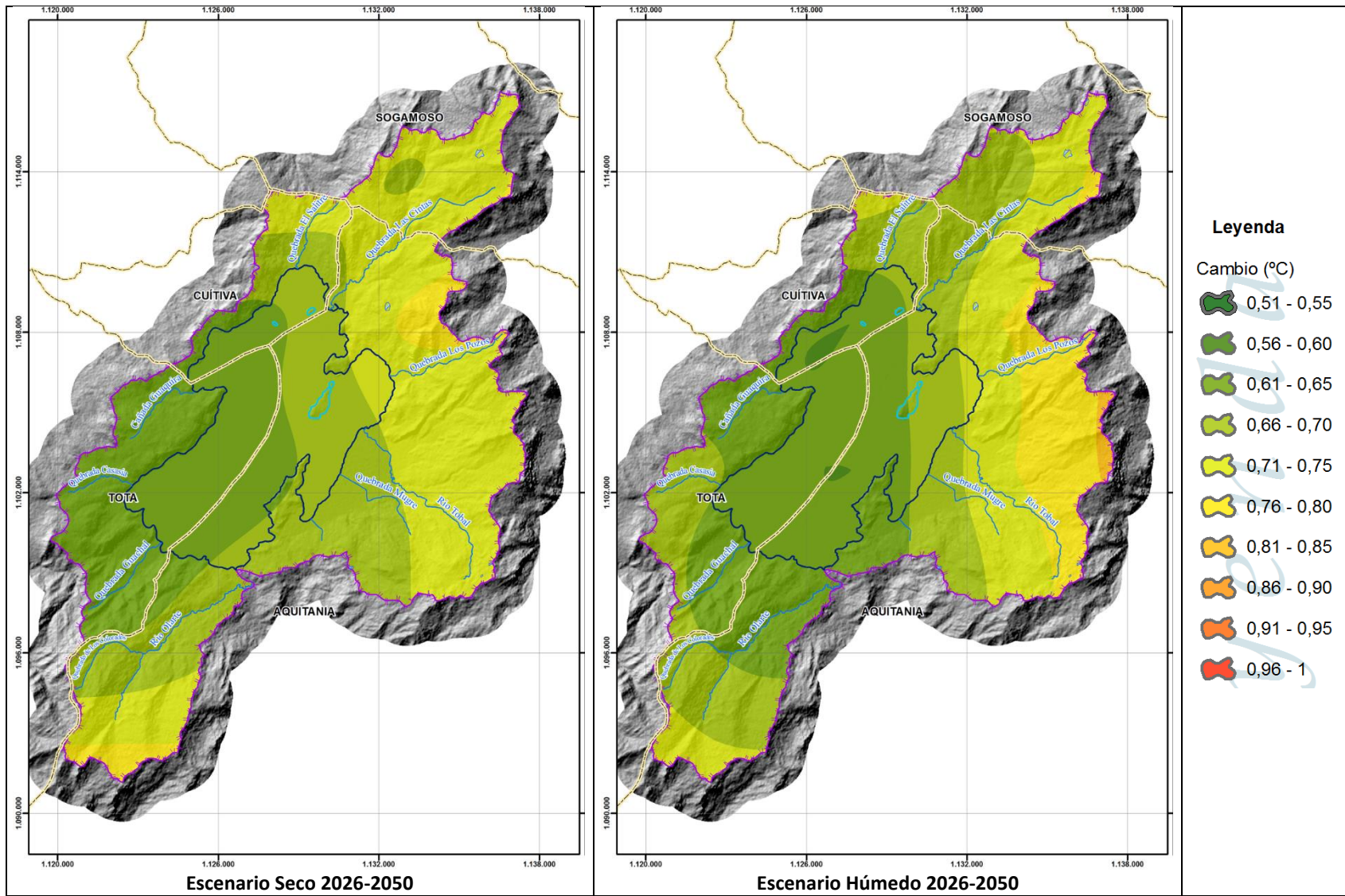


Figura 15. Cambio anual de la temperatura mínima (°C) futura bajo el "Escenario seco" (izquierda) y bajo el "Escenario húmedo" (derecha).

## CONCLUSIONES

- Los escenarios de cambio climático para la cuenca del lago de Tota para el periodo 2026-2050, muestran cambios significativos en las lluvias, especialmente en los primeros 6 meses del año, donde:
  - Bajo el Escenario Húmedo, las lluvias aumentarían entre un 15 y un 40%, principalmente entre los meses de Marzo y Agosto.
  - Bajo el Escenario Seco, las lluvias se reducirían entre un 10 y un 20%, principalmente entre los meses de Diciembre y Mayo.
- Adicionalmente, bajo el Escenario Húmedo, toda la cuenca presentaría aumentos importantes de las lluvias, especialmente la zona del municipio de Aquitania, con incrementos de más de 40 mm/año (más del 20%). Mientras que bajo el Escenario Seco, las mayores disminuciones de las lluvias se darían al norte y centro de la cuenca, con reducciones de más de 40 mm/año (más del 5%).
- Para las temperaturas media, máxima y mínima, éstas presentarían incrementos en todas ellas, del orden de 0.5 a 1°C, y dándose los más altos en la temperatura media, y los más bajos en la temperatura mínima. El centro de la cuenca del lago de Tota sería la zona donde se darían los mayores aumentos de las temperaturas, incrementándose entre 1 y 1.5°C los valores anuales, en comparación con las del periodo histórico 1981-2016.
- En cuanto a la variabilidad climática, se aprecia que los cambios serían cada vez mayores. En los años futuros en los que haya presencia de eventos de esta variabilidad, se presentarían aumentos de más del 100% en la precipitación o reducciones del 80% en las mismas, así como incrementos o reducciones de las temperaturas del orden de 1°C, y siendo mayores a este valor para las temperaturas máxima y mínima.
- Estos cambios proyectados por los escenarios ocasionarían diversos impactos. En el Escenario Húmedo habrían más días al año con lluvias y más días con lluvias extremas, lo que ocasionaría más deslizamientos, inundaciones y pérdidas de cultivos, entre otros impactos. Por otra parte, en el Escenario Seco los periodos sin lluvias serían más largos, y la cantidad de lluvia al año sería cada vez menor. Esto ocasionaría desabastecimiento de agua para riego y consumo, así como daños en cultivos y cambios sensibles en las actividades de la comunidad (por ejemplo un mayor desplazamiento para conseguir agua, cambios en las temporadas de siembra y cosecha, entre otros).
- Ante estos cambios, es importante determinar la forma en que la comunidad podría verse afectada. Para ello, en el proyecto AICCA Colombia ya se viene realizando el análisis de vulnerabilidad y riesgo ante el cambio climático, el cual es un insumo importante para poder definir las medidas de adaptación (y mitigación) de los impactos que este cambio del clima podría traer para la zona.

## REFERENCIAS

- Angarita, H., & Yates, D. (2014). *Metodología para incluir variabilidad climática y escenarios de cambio climático en el modelo WEAP de la macro cuenca del magdalena y resultados de las simulaciones*. Reporte presentado dentro del proyecto “ECOSYSTEM BASED ADAPTATION IN THE MAGDALENA BASIN – AID-514-A-13-00004”, Bogotá.
- Cai, W., Borlace, S., Vecchi, G., Lengaigne, M., Rensch, P. v., Collins, M., . . . Jin, F.-F. (Enero de 2014). Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *NATURE CLIMATE CHANGE*, 1-6. doi:10.1038/NCLIMATE2100
- Cai, W., Wang, G., Timmermann, A., Santoso, A., McPhaden, M. J., Wu, L., . . . Guilyardi, E. (Enero de 2015). Increased frequency of extreme La Niña events under greenhouse warming. *NATURE CLIMATE CHANGE*, 1-6. doi:10.1038/NCLIMATE2492
- IDEAM; PNUD; MADS; DNP; Cancillería. (2017). *Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de Colombia*. Bogotá, Colombia. Obtenido de [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023731/TCNCC\\_COLOMBIA\\_CMNUCC\\_2017\\_2.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023731/TCNCC_COLOMBIA_CMNUCC_2017_2.pdf)
- IPCC. (2012). Resumen para responsables de políticas en el Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático. En I. P. CHANGE, *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge, United Kingdom and New York, USA.: Cambridge University Press. Obtenido de [https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/IPCC\\_SREX\\_ES\\_web.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/IPCC_SREX_ES_web.pdf)
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014 mitigación del cambio climático*. Suiza: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Serna, J. (2013). *Efecto de los fenómenos El Niño y La Niña sobre la frecuencia de los eventos de precipitación extrema en la Sabana de Bogotá*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/11390/1/194150.2013.pdf>
- Wang, G., Cai, W., Gan, B., Wu, L., Santoso, A., Lin, X., . . . McPhaden, M. J. (Agosto de 2017). Continued increase of extreme El Niño frequency long after 1.5 °C warming stabilization. *NATURE CLIMATE CHANGE*, 568-573. doi:10.1038/NCLIMATE3351