



**Efectos del cambio climático sobre el régimen de caudales en la cuenca Magdalena-Cauca simulados con una versión mejorada del modelo SWAT**

Luis Miguel Lopera Muñoz

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Ingeniería Ambiental

Tutor

Juan Fernando Salazar Villegas, Doctor (PhD) en Ingeniería

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería Ambiental  
Medellín, Antioquia, Colombia  
2022

<b>Cita</b>	(Lopera & Salazar, 2022)
<b>Referencia</b>	Lopera, L., & Salazar, J. F. (2022). <i>Efectos del cambio climático sobre el régimen de caudales en la cuenca Magdalena-Cauca simulados con una versión mejorada del modelo SWAT</i> . [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	



Maestría en Ingeniería Ambiental.

Grupo de Investigación Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA).

Sede de Investigación Universitaria (SIU).



**Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)**

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla

**Jefe departamento:** Sara Cristina Vieira Agudelo

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Presentación:**

Este trabajo es una tesis de grado de maestría que tiene como objetivo estudiar los posibles cambios en el régimen de caudales de la cuenca del río Magdalena-Cauca bajo 4 escenarios de cambio climático, provenientes de datos del sexto proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP6) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). Empezando con las proyecciones del IPCC, obtuvimos los escenarios de cambio climático para mitad y final de siglo a través de un re-escalamiento estadístico. Luego, simulamos los caudales en estos escenarios usando SWAT-Tb, el cual es una versión reciente desarrollada del modelo SWAT que mejora la representación de la actividad de la vegetación a través la estacionalidad de los índices de área foliar. Como se discute a continuación, los resultados muestran impactos potenciales del cambio climático en el régimen de caudales que podrían afectar la seguridad hídrica en Colombia. Esta tesis está escrita en español usando un formato de artículo científico y será reescrita en inglés para su envío en una revista internacional revisada por pares.

## **Presentation:**

This work is a master's degree thesis that aims to study the possible changes in the streamflow regime of the Magdalena-Cauca river basin under four climate change scenarios from data of the 6th Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Starting with the IPCC's projections, we obtained climate change scenarios through statistical downscaling for the middle and end of the century. Then we simulated streamflow in these scenarios using SWAT-Tb, a recently developed version of the SWAT model that improves the representation of vegetation activity through the leaf area index seasonality. As discussed below, the results show potential impacts of climate change on the streamflow regime that would affect water security in Colombia. This thesis is written in Spanish using a scientific article format and will be rewritten in English for submission to a peer-reviewed international journal.

## **Resumen**

La modelación hidrológica es una herramienta útil para la evaluación de la disponibilidad de agua futura en las cuencas y sus implicaciones para la gestión y la toma de decisiones relacionadas. Un ejemplo de ello son los posibles cambios en el régimen de caudales de una cuenca debido al efecto del cambio climático. Un reto clave de esta modelación consiste en producir resultados realistas por las razones correctas. En este estudio nos concentramos en la cuenca del río Magdalena-Cauca, que es la cuenca no-transfronteriza más grande de Colombia (257.000 km<sup>2</sup>), además de ser el lugar donde se concentra la generación de energía hidroeléctrica y el abastecimiento de agua potable del país. Para estudiarla se implementó una versión reciente del modelo SWAT identificada como SWAT-Tb logrando una calibración y validación satisfactoria no sólo en los caudales de la cuenca para 3 puntos de interés, sino también en los índices de área foliar como parte de la representación de la vegetación. Además, se compararon los resultados simulados con observaciones basadas en GRACE de almacenamiento de agua para toda la cuenca. A partir de información de cambio climático del experimento CMIP6 del IPCC para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en los periodos de 2041-2060 y 2081-2100, se realizó una reducción de escala estadística, logrando identificar aumentos en la temperatura de entre 1°C y 4 °C para toda la cuenca y una posible intensificación de eventos extremos en la precipitación con énfasis en las temporadas más lluviosas.. Por último los resultados de forzar el modelo SWAT-Tb calibrado y validado con la información de cambio climático muestran un aumento de caudales para mitad de siglo (2041-

2060), mientras que para fin de siglo (2081-2100) hay aumentos o reducciones dependiendo de los dos escenarios aquí implementados.

**Palabras Clave:** Modelación hidrológica, SWAT-Tb, Andes tropicales, índice de área foliar, CMIP6.

## 1. Introducción

La hidrología ha evolucionado mucho en los últimos 50 años, pasando de una ciencia muy enfocada en el cálculo de caudales de diseño, hasta reconocer en la actualidad sus relaciones con el cambio ambiental global (Sivapalan, 2018). Las nuevas ideas resaltan el hecho de que la hidrología de una cuenca depende de fenómenos que se dan no sólo en la misma cuenca sino también en territorios aledaños o incluso en la escala global como el cambio climático (Marengo et al., 2018; Weng et al., 2019; Zhang et al., 2018). Parte del cambio en la manera como se estudia la hidrología se debe a una visión más amplia que se tiene en la actualidad, donde se habla por ejemplo de la función de los bosques en la regulación de las cuencas (Salazar et al., 2018), o los efectos del cambio climático que producen variaciones en los regímenes de precipitación (Bovolo et al., 2018; García et al., 2018, Sierra et al., 2015).

Muchos fenómenos sociales y naturales dependen de los regímenes de caudales (Noordwijk et al., 2018; Angarita et al., 2018) que pueden cambiar como consecuencia del cambio climático (Li et al., 2019). Algunos de los mayores impactos del cambio climático se pueden dar mediante alteraciones de los regímenes de caudales que afectan la seguridad hídrica en algún territorio, es decir, la “capacidad de una población de salvaguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para sostener los medios de vida, el bienestar humano y el desarrollo socioeconómico, para garantizar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con el agua, y para preservar los ecosistemas” (Montanari et al., 2013). Investigar este tipo de cambios en la hidrología debidos a los cambios en el ambiente (por ejemplo en el clima) es uno de los retos principales de las ciencias hidrológicas en la actualidad que se ha descrito como el problema “Panta Rhei” (Montanari et al., 2013; Blöschl et al., 2019).

El cambio climático puede afectar procesos (naturales o artificiales) de regulación de las cuencas vía interacciones entre la atmósfera y la superficie (Sorribas et al., 2016; Salazar et al., 2018), que generan, por ejemplo, alteraciones de eventos extremos (Yuan et al., 2017) y cambios rápidos en las cuencas hidrográficas (Wang et al., 2018). Los efectos que se pueden observar en una cuenca debido al cambio climático son múltiples (Sorribas et al., 2016; Kim et al., 2013); pareciera que en la literatura no hay un consenso científico sobre qué es lo que podría ocurrir exactamente, aunque sí hay consenso sobre que los cambios son esperables (O’Neill et al., 2015). La falta de consenso sobre lo primero se debe en parte a diferencias entre los contextos de cada cuenca, lo cual resalta la importancia de estudios para cuencas específicas como el presente.

Uno de los enfoques más usados en la literatura para estudiar impactos del cambio climático sobre el régimen de caudales de las cuencas es por medio de la información del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC; por sus siglas en inglés), con el cual se puede acceder a la última generación de modelos de circulación general que se presentan en el proyecto CMIP6 (Eyring et al., 2016). Esta información de salida de los modelos de circulación general (GCM por sus siglas en inglés, modelos climáticos) se puede usar como información de entrada en modelos hidrológicos que reciben, por ejemplo, campos de precipitación y

temperatura en escenarios de cambio climático (e.g., Su et al., 2016; Tan et al., 2017). Las proyecciones de cambio climático incluidas en el proyecto de CMIP6 varían dependiendo de diferentes escenarios SSP (camino socioeconómicos compartidos), como por ejemplo el SSP2-4.5 (aumento de  $4.5\text{w/m}^2$  en la radiación) y SSP5-8.5 (aumento de  $8.5\text{w/m}^2$  en la radiación), siendo el SSP2-4.5 un escenario realista pero optimista en el aumento no tan elevado de las concentraciones de  $\text{CO}_2$ , denominado “mitad del camino” (O’Neill et al., 2015), relacionado con el anterior escenario RCP4.5 (camino de concentración representativa) del CMIP5 (Thomson et al., 2011). El SSP5-8.5 es un escenario más extremo donde el aumento es el máximo planteado en el ejercicio de simulación del CMIP6, denominado “desarrollo con combustibles fósiles - tomar la autopista” (O’Neill et al., 2015), relacionado con el RCP8.5 (Riahi et al., 2011) del anterior experimento CMIP5. Considerando los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 de CMIP6, en este estudio analizamos los períodos de 2041-2060 (mitad de siglo) y 2081-2100 (fin de siglo), cada uno con cuatro GCM de los disponibles en CMIP6.

La resolución de estos modelos de circulación general (los de CMIP) es bastante gruesa (del orden de 100 a 300 km por grilla) con respecto al tamaño de la cuenca Magdalena-Cauca, por lo cual es fundamental procesar la información de tal manera que permita tener una representación adecuada de la zona de interés. La reducción de escala es una técnica ampliamente usada con este fin, que puede ser dinámica (por medio de un modelo climático de mayor resolución) o estadística en donde hay diversos métodos (Mizukami et al., 2016). Debido al costo computacional de la reducción dinámica de escala y múltiples estudios que han mostrado la viabilidad y relevancia del método de re-escalamiento estadístico (e.g. Eum et al., 2017; Tesemma et al., 2015; Tan et al., 2017; Aguayo et al., 2021), en este estudio usamos la reducción estadística de escala, más específicamente el método “Delta-Change factor”, el cual es uno de los más simples pero más usados en la literatura para estudios hidrológicos (más detalles en la sección de Metodología)..

Para evaluar la respuesta de los caudales en la cuenca Magdalena-Cauca bajo los escenarios futuros, se utilizó el modelo hidrológico SWAT. SWAT es un modelo semi-distribuido de código abierto desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), basado en las ecuaciones de balance de masa para representar el ciclo hidrológico a escala de cuenca. La implementación de SWAT ha tenido una amplia expansión en los últimos años para analizar la respuesta de distintas cuencas ante el cambio ambiental. Dado que la información de entrada al modelo está relacionada con los usos del suelo y las variables del clima, el modelo permite estudiar la respuesta de las cuencas bajo diferentes escenarios (Villamizar et al. 2019; Hoyos et al., 2019). Aun así, el modelo tiene limitaciones para su utilización en cuencas tropicales, debido a su pobre representación de la vegetación tanto en sus parámetros como en su estacionalidad, por lo cual el modelo SWAT que usamos en este estudio (en adelante SWAT-Tb; detalles en metodología) incluye una mejora en su código desarrollada por Valencia et al. (en revisión).

A pesar de múltiples avances en estudios previos (e.g. Nakaegawa y Vergara, 2010; Carmona y Poveda, 2014; Jeuken et al., 2016; Angarita et al., 2018), sigue siendo un reto avanzar en la comprensión y estimación de los impactos del cambio climático sobre la hidrología en la cuenca Magdalena-Cauca, incluyendo el régimen de caudales. De este régimen depende en gran medida la seguridad hídrica y energética de Colombia.

## **2. Metodología**

El diseño metodológico del estudio se basa en una revisión de literatura presentada en la Tabla 1. Esta tabla resume la búsqueda de estudios hidrológicos que tuvieran las siguientes características: cuencas con áreas entre 100.000 y 500.000 km<sup>2</sup>; modelos hidrológicos distribuidos o semi-distribuidos; información de cambio climático de algún CMIP; experimentos sin modificación en la cobertura inicial; índice ISI Q1; revistas con factor de impacto mayor a 2 y año de publicación entre 2010 y 2020. Esta búsqueda se realizó por medio de Scopus, Google Scholar y Science Direct, arrojando como resultado más de 2000 estudios, pero filtrados a 17 principalmente por el tamaño de la cuenca.

**Tabla 1.** Revisión de literatura de estudios similares al aquí presentado, como parte de la justificación y construcción del experimento de simulación presentado en la metodología.

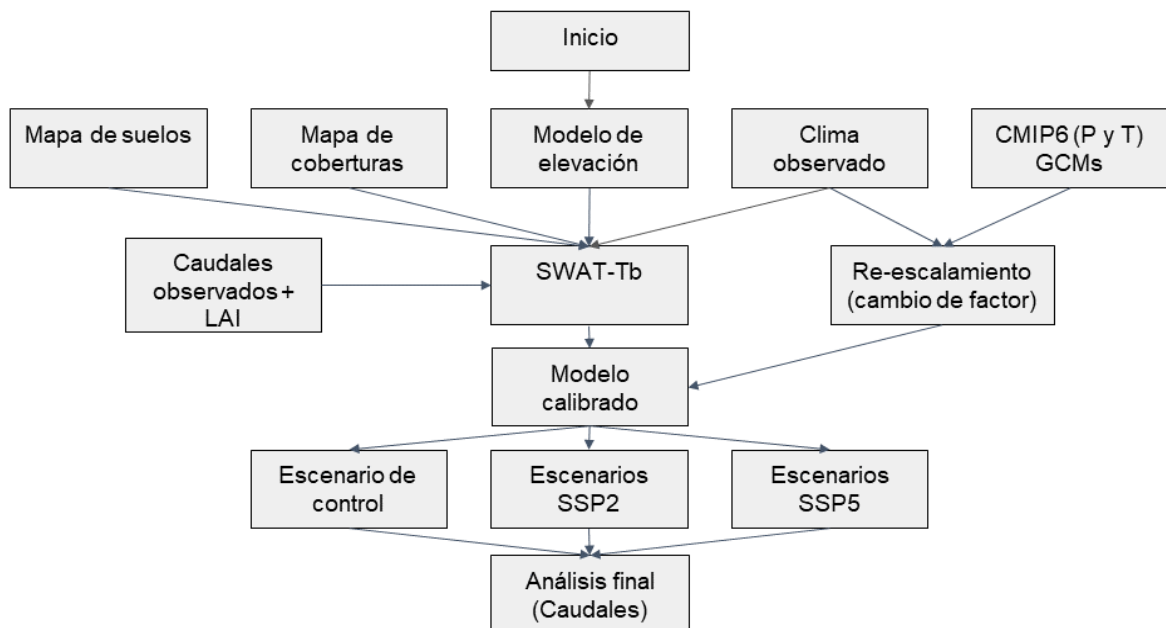
Referencia	Cuenca/ Área estudio	Área cuenca <sup>1</sup>	Modelo Hidrológico	CMIP	Escenario CMIP	Numero Modelos	Variables <sup>2</sup>	Implementan CMIP <sup>3</sup>	Períodos futuros
Cerkasova et al. (2016)	Lago Curonian / Europa	100.000	SWAT	3	A1B	10 GCMs	P - Tmax - Tmin - HR	Dinámico (a)	2016 - 2035
Kling et al. (2012)	Alto Danube / EU Central	101.000	Hydrologic model	3	A1B	21 RCMs	P - Tmp	Dinámico (a)	2021 - 2050 / 2071 - 2100
Kankamyeboah et al. (2013)	White volta / Ghana	105.000	SWAT	3	A1FI	2 GCMs	P - Tmax - Tmin	Estadístico	2006 - 2035 / 2036 - 2065
Zhong et al. (2018)	Tibetan Plateau / Asia Central	108.000	VIC	5	RCP 2.6, 4.5 y 8.5	6 GCMs	P - Tmp	Estadístico	2051 - 2100
Gebrechorkos et al. (2020)	Awash / Ethiopia	110.000	SWAT	5	RCP 2.6, 4.5 y 8.5	1 GCMs	P - Tmax - Tmin	Estadístico	2011 - 2040 / 2041 - 2070 / 2071 - 2100
Shrestha et al. (2020)	Chindwin / India	114.000	MIKE11	5	RCP 4.5 y 8.5	4 GCMs	P - Tmp	Dinámico (a)	2018 - 2040
Touseef et al. (2020)	Alto Xinjiang / China	118.000	SWAT	5	RCP 2.6, 4.5, 6, 8.5	5 GCMs	P - Tmax - Tmin - HR - RS - VV	Estadístico	2020 - 2050
Zuo et al. (2015)	Wei / China	135.000	SWAT	3	A2 y B1	3 GCMs	P - Tmax - Tmin	Estadístico	2046 - 2065 / 2081 - 2100
Ligaray et al. (2015)	Chao Phraya / Tailandia	160.000	SWAT	3	A1B, A2, B1	1 GCMs	P - Tmax - Tmin	Estadístico	2051 - 2059
Ficklin et al. (2013)	Alto Colorado / EEUU	190.000	SWAT	3	A2	16 GCMs	P - Tmax - Tmin - VV	Estadístico	2050 - 2060 / 2080 - 2090
Shrestha et al. (2017)	Fraser / EEUU	230.000	VIC	3-5	A1B, A2, B1 y RCP 2.6, 4.5 y 8.5	29 GCMs	P - Tmp	-	2011 - 2100 (cada 10 años)
Hassan et al. (2019)	Norte Indus / Pakistán	257.000	HEC-HMS	5	RCP 4.5 y 8.5	1 RCMs	P - Tmp	Dinámico (a)	2070 - 2099
Zhu et al. (2017)	Xinjiang / China	337.000	Liuxihe Model	5	RCP 4.5 y 8.5	1 GCMs / RCM	P - Tmax - Tmin	Dinámico	2010 - 2100
Lu-liu et al. (2012)	Zhujiang / China	453.000	HBV-D	3	A2, A1B, B1	3 GCMs	P	-	2011 - 2050 / 2051 - 2099
Yan et al. (2015)	Pearl / China	454.000	VIC	5	RCP 4.5 y 8.5	5 GCMs	P - Tmax - Tmin	-	2010 - 2099
Menzel et al. (2010)	Rhine - Elbe - Tisza - Amu / Euro-Africa	198.000-148.000-146.000-465.000	Watergap	3	A2 y B2	2 GCMs	-	-	2020 - 2030 / 2050 - 2060
Lobanova et al.	Northern Dvina-Rhine /	350.000	SWIM	5	RCP 4.5 y 8.5	1 RCMs	P - Tmax - Tmin	Dinámico (a)	2041 - 2070 / 2071 - 2100

(2018)	Europa	185.000							
--------	--------	---------	--	--	--	--	--	--	--

<sup>1</sup> área en km<sup>2</sup>; <sup>2</sup> P: precipitación, Tmp: Temperatura media, Tmax: Temperatura máxima, Tmin: Temperatura mínima, Hr: Humedad relativa, RS: Radiación solar, VV: Velocidad del viento; <sup>3</sup> Es la manera como se implementó la información de CMIP en los modelos hidrológicos, (a): información de un estudio anterior, - No reportan datos.

La tabla 1 muestra diferentes patrones que contribuyeron al diseño del experimento de modelación. Por ejemplo, la implementación de SWAT como uno de los principales modelos hidrológicos de superficie para estudios como este. La utilización de las variables climatológicas de temperaturas (mínimas y máximas) y precipitación como las variables principales para forzar este modelo y similares. El uso de múltiples escenarios CMIP para considerar diferentes perspectivas socioeconómicas y de forzamiento radiativo. El método más utilizado para representar escenarios de cambio climático a partir de CMIP es la reducción de escala estadística. Generalmente la reducción de escala dinámica depende de la disponibilidad de datos de estudios anteriores, probablemente por su alto costo computacional. Los periodos utilizados para evaluar los escenarios futuros normalmente incluyen años de mitad y final de siglo. Algo relevante es el tamaño de las cuencas, ya que no es común encontrar experimentos de simulación como el aquí planteado para cuencas de tamaño mediano/grandes, lo cual también muestra la importancia de estudios en cuencas como la del río Magdalena-Cauca. Por último, es importante aclarar que esta no fue la única revisión de literatura que se realizó, pues en el cuerpo del trabajo de investigación aparecen muchos más artículos. Los artículos incluidos en la Tabla 1 fueron claves para soportar el diseño del experimento de modelación.

La Figura 1 muestra de manera esquemática el experimento final planteado basado en la revisión de literatura mostrada en la Tabla 1. Se muestra la simulación de un escenario presente (control) y 4 escenarios de las condiciones climáticas del futuro para la cuenca Magdalena-Cauca. Estos escenarios están representados mediante cambios en la información de entrada relacionada con el clima.



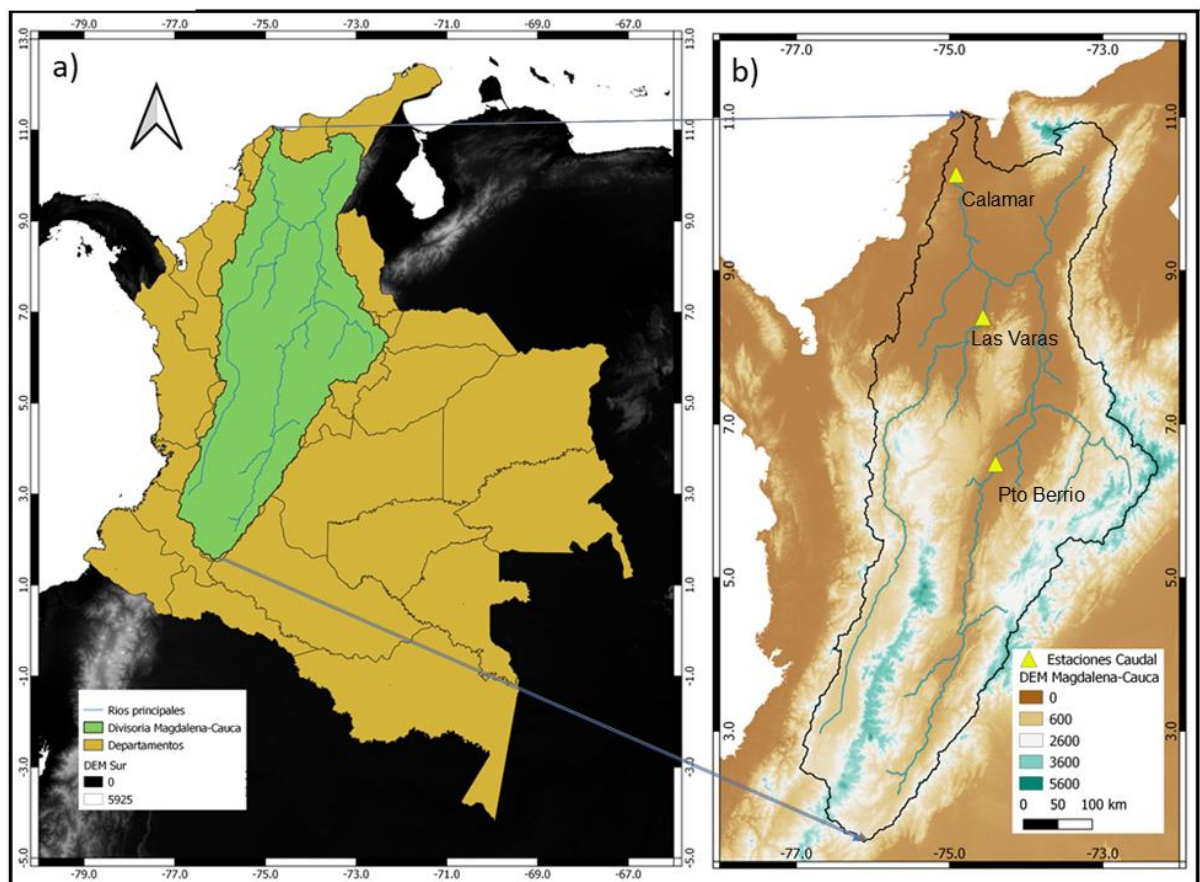
**Figura 1.** Esquema metodológico del experimento de modelación de este estudio. Adaptado de Tan et al., 2017.

Este esquema fue forzado con información representativa de la zona de estudio, y está descrita en la Tabla 2, información que se explica a detalle en las siguientes secciones.

## **2.1 Área de estudio**

Este estudio se enfoca en la cuenca Magdalena-Cauca (Figura 2) que es la más grande cuya área se encuentra en su totalidad dentro del territorio colombiano; con una extensión aproximada de 257.000 km<sup>2</sup>. En esta cuenca se concentra cerca del 70% de la población (Alfonso et al., 2013), la mayoría de la producción de energía hidroeléctrica del país, y numerosos sistemas de abastecimiento de agua potable (Angarita et al., 2018). La precipitación media en la cuenca es de 1.800 mm/año, con un comportamiento bimodal que incluye dos temporadas de lluvias (Marzo-Abril-Mayo y Septiembre-Octubre-Noviembre; MAM y SON) y dos secas (o “menos lluviosas”, Diciembre-Enero-Febrero y Junio-Julio-Agosto; DEF y JJA) al año (Espinoza et al. 2020; Arias et al. 2021a). El caudal medio en la salida es de 7.200 m<sup>3</sup>/s (estación Calamar; Figura 2b).

El río parte desde un punto inicial en la laguna del Magdalena en el páramo de las Papas (3.600 msnm) ubicado en el macizo colombiano (Kettner et al., 2010), una vez el río pasa sus primeros kilómetros inmediatamente entra en zonas de alto cambio en los usos del suelo debido a la agricultura, inclusive debido a la presencia de embalses importantes como el Quimbo y Betania (más de 5.000 hm<sup>3</sup> de capacidad máxima de almacenamiento) presentes en la parte alta de la cuenca, condicionando el desarrollo de su flujo en los kilómetros río abajo (CAM, 2012). La cuenca es producto de la unión del río Magdalena y Cauca aflorando los dos en el macizo colombiano, pero fluyendo por cauces diferentes debido a la división de los Andes en tres grandes cordilleras (brazos) separados por dos valles que llevan el nombre de los ríos Cauca y Magdalena, siendo el Cauca el flujo principal entre la cordillera occidental y central, y el Magdalena entre la central y la oriental. Esta unión se da en la zona baja de la cuenca cerca al sistema de humedales de Mompós. Más abajo el río Magdalena-Cauca ya integrado por los flujos del Magdalena y Cauca desemboca en el Mar Caribe del Océano Atlántico a la altura de la ciudad de Barranquilla.



**Figura 2.** Ubicación general de la cuenca Magdalena-Cauca. (a) Ubicación general; Colombia en el norte de Sudamérica, división por departamentos, y cuenca dentro del país. (b) Modelo de elevación digital (DEM, por sus iniciales en inglés) y tres puntos de interés (estaciones de caudal). La escala del DEM muestra la elevación mínima de cada rango.

La Magdalena-Cauca es una cuenca estratégica para la seguridad hídrica de Colombia. En esta cuenca, los impactos del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) sobre los caudales son evidencia de cómo los fenómenos climáticos pueden impactar la seguridad hídrica de Colombia, tanto desde el punto de vista de la escasez de agua (e.g. “el racionamiento” causado por El Niño en 1992; Gutiérrez y Dracup, 2001) como por la ocurrencia de inundaciones (e.g. las inundaciones causadas por La Niña en 2011; Hoyos et al., 2013).

## 2.2 Modelo y datos

El modelo SWAT-Tb es una variante del modelo SWAT desarrollada por Valencia et al. (2021, en revisión). Esta nueva variante se desarrolla para minimizar las limitaciones encontradas en el modelo original para simular el crecimiento de las plantas en el trópico (Strauch & Volk, 2013; Alemayehu et al., 2017; Hoyos et al., 2019). En la versión original el crecimiento se basa en la longitud de los días y estaciones características de las regiones templadas. Strauch & Volk (2013) abordaron este problema y después Alemayehu et al. (2017) desarrollaron el modelo SWAT-T que logra representar de una manera satisfactoria el ciclo de crecimiento de las plantas basado en el Índice de Área Foliar (LAI; por sus sigla en inglés), pero únicamente bajo un comportamiento unimodal. En los Andes tropicales, el comportamiento predominante es bimodal. Recientemente, Valencia et al. (2021, en revisión) desarrollaron la variante SWAT-Tb a partir de SWAT-T, incluyendo la bimodalidad de LAI que, según la información de sensores remotos disponible (e.g. MODIS), se observa en algunas zonas andinas tropicales. La

representación de la escorrentía depende de la influencia de LAI sobre la evapotranspiración. De ahí la selección de este modelo para el presente estudio en la cuenca Magdalena-Cauca.

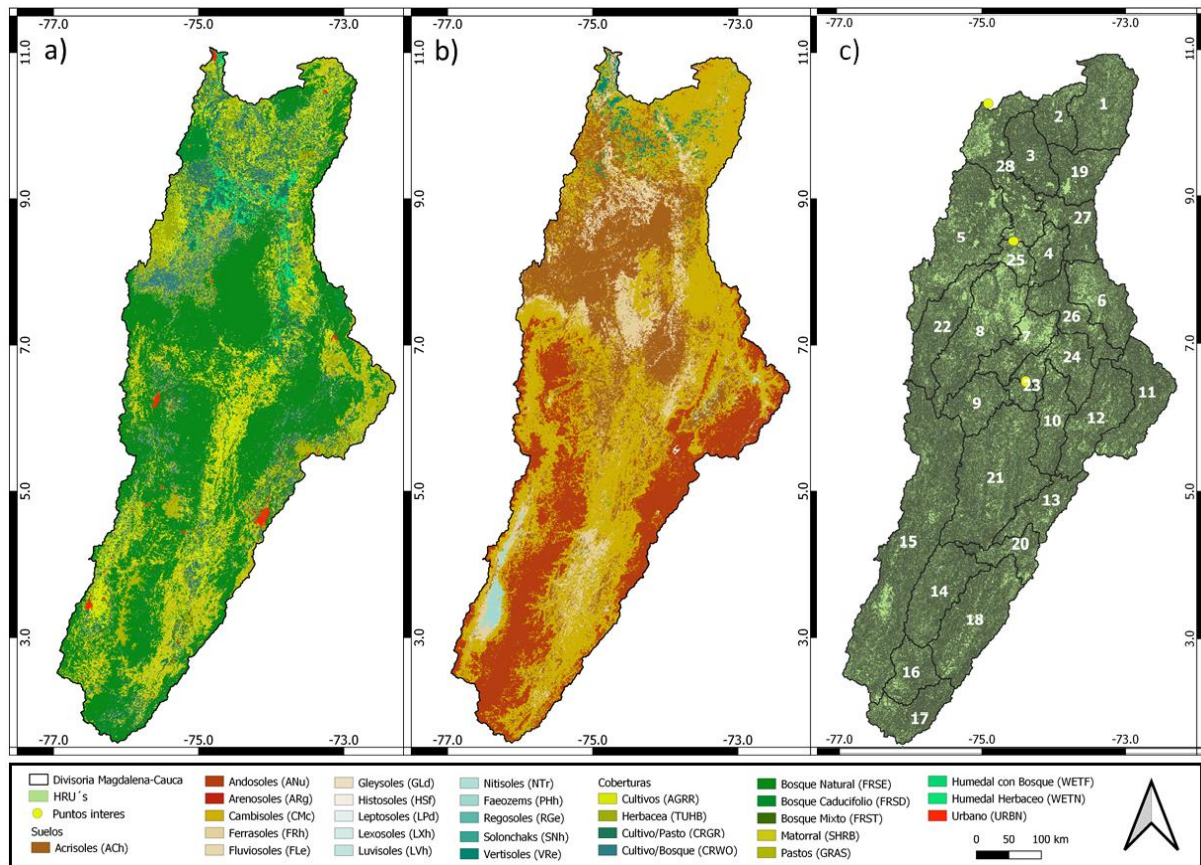
**Tabla 2.** Resumen de la información utilizada en este estudio.

Datos	Descripción	Fuente
Modelo de elevación digital	Modelo de elevación digital de STRM CGIAR-CSI <sup>1</sup> del año 2007 con resolución de 90 m.	Jarvis (2008)
Red de drenaje	Ríos de la cuenca de Hydrosheds del año 2006 con resolución de 1 km.	Lehner et al. (2008)
Mapa suelos	Suelos de ISRIC SoilGrids 2.0 <sup>2</sup> del año 2006 con resolución de 250 m.	Hengl (2017)
Mapa coberturas	Coberturas de la ESA 2.0.7 del año 2005 con resolución de 300m.	ESA <sup>3</sup>
Clima de control	170 y 80 estaciones de precipitación y temperatura máximas y mínimas a escala diaria para el periodo de 1988 - 2010.	IDEAM <sup>4</sup>
Precipitación de base global	Precipitación de CHRIPS v.2.0 con resolución de 0.05° Lat x 0.05° Lon para el periodo de 1988 - 2010.	Funk et al. (2015)
Caudales observados	3 estaciones de caudal observado a escala mensual para el periodo de 1991 – 2010 (Puerto Berrio, Las Varas y Calamar).	IDEAM <sup>4</sup>
LAI de referencia	Índices de área foliar (LAI) de MCD15A2Hv006 MODIS para el periodo 2003 - 2010 a escala semanal (8 días) con resolución de 500 m.	Myneni et al. (2015)
Clima del futuro	Precipitación y temperaturas máximas y mínimas de 4 GCM's de CMIP6 para el periodo 1988 - 2100. EC-Earth3 (0.7° Lat x 0.7° Lon), EC-Earth3-Veg (0.7° Lat x 0.7° Lon), FGOALS-g3 (2.025° Lat x 2° Lon), MPI-ESM1-2-HR (0.935° Lat x 0.937° Lon).	EC - Earth Consortium; Jungclaus et al.; Li (2019)

<sup>1</sup>Consortium for Spatial Information (<https://srtm.csi.cgiar.org/>); <sup>2</sup>World Soil Information (<https://www.isric.org/explore/soilgrids>); <sup>3</sup>European Space Agency (<http://www.esa-landcover-cci.org/>); <sup>4</sup>Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (<http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>).

Para su implementación, el modelo se corrió para el periodo 1991-2010, siendo el subperiodo de calibración los años entre 2003 y 2010, y el subperiodo de validación entre 1991 y 2002. La selección de estos periodos obedece a la disponibilidad y calidad de datos de LAI provenientes de MODIS y del resto de información necesaria para correr el modelo (precipitación y temperatura). La Tabla 2 presenta un resumen de la información utilizada, incluyendo mapas de formato raster como el modelo de elevación digital (DEM; Figura 2b), mapa de suelos, y mapa de coberturas (Figura 3a-b), los cuales se convirtieron a una resolución de 500 m (tamaño de la celda más fina en común). Estos mapas se procesaron para agrupar las categorías de suelo y coberturas menos representativas de la cuenca. Para esta agrupación se tuvieron en cuenta las categorías que cubren un mayor porcentaje de área de la cuenca (i.e., las más representativas), la relación de los tipos de suelo por su material parental, y los tipos de plantas (coberturas). Además, los mapas seleccionados corresponden a años dentro del periodo de calibración.

Con base en los mapas, el modelo divide la cuenca en unidades de respuesta hidrológica (HRUs; por su siglas en inglés) que resultan de una combinación entre tipo de suelo, cobertura y pendientes. En este estudio la cuenca quedó dividida en 2.000 HRUs en 28 subcuencas (Figura 3c). La evaluación del modelo se concentró en las subcuencas: 23 (Medio Magdalena; Estación Puerto Berrio), 25 (Cierre Cauca; Estación Las varas) y 28 (Cierre Magdalena-Cauca; Estación Calamar; Figura 3c).



**Figura 3.** Mapas (a) 12 coberturas del suelo, (b) 15 tipos de suelo en la cuenca Magdalena-Cauca y (c) son las subcuencas en el estudio (28), con énfasis en las subcuencas 23, 25 y 28 como puntos de interés. El código de la leyenda representa el utilizado en el modelo para categorizar las coberturas y suelos de la cuenca.

La información climática se procesó para obtener datos diarios entre 1988 y 2010, incluyendo 20 años del periodo del experimento y 3 años iniciales que se usaron como periodo de calentamiento (*spin-up*). Estos tres años se descartaron para reducir la incertidumbre asociada con las condiciones iniciales, especialmente la humedad del suelo. Para ello se usaron datos provenientes de 170 estaciones de precipitación y 80 de temperatura (valores máximos y mínimos) del IDEAM, seleccionados tras una revisión de datos faltantes: máximo 5% para precipitación y 25% para temperatura. Los datos faltantes se completaron empleando el generador climático del modelo SWAT (WGEN; Essensfelder, 2016) para la temperatura, y la información de CHIRPS v2.0 para la precipitación (e.g Urrea et al., 2019).

Por último, los valores de LAI de referencia se procesaron a partir de la información proveniente de los satélites AQUA y TERRA de la misión MODIS. Primero se extrajeron los datos de mejor calidad ( $Q_c=0$ ; Myneni et al., 2015), y después se cortaron por medio de máscaras de las áreas más grandes posibles para cada cobertura presente en la cuenca. Además, estas máscaras se compararon con el mapa de ecosistemas del IDEAM (2010; <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>) para garantizar no sólo la mayor área de extracción posible, sino también que esta área correspondiera a la cobertura para la cual se realizó la extracción. Una vez realizado el corte, por medio del método BFAST en R (Verbesselt et al., 2010), se extrajo la mediana de los LAI por cobertura, excluyendo su ruido y promediando su tendencia, obteniendo así las series finales de referencia de LAI para el periodo 2003-2010 utilizadas en la calibración. Los LAI calibrados son importantes para el cálculo de la evapotranspiración real que se basa en el método Priestley-Taylor utilizado para el cálculo de la

evapotranspiración potencial. Este método fue escogido debido a que su cálculo se basa en la precipitación y la temperatura, únicas variables climáticas utilizadas en este estudio, tanto para el escenario de control como para los escenarios futuros, debido a su disponibilidad.

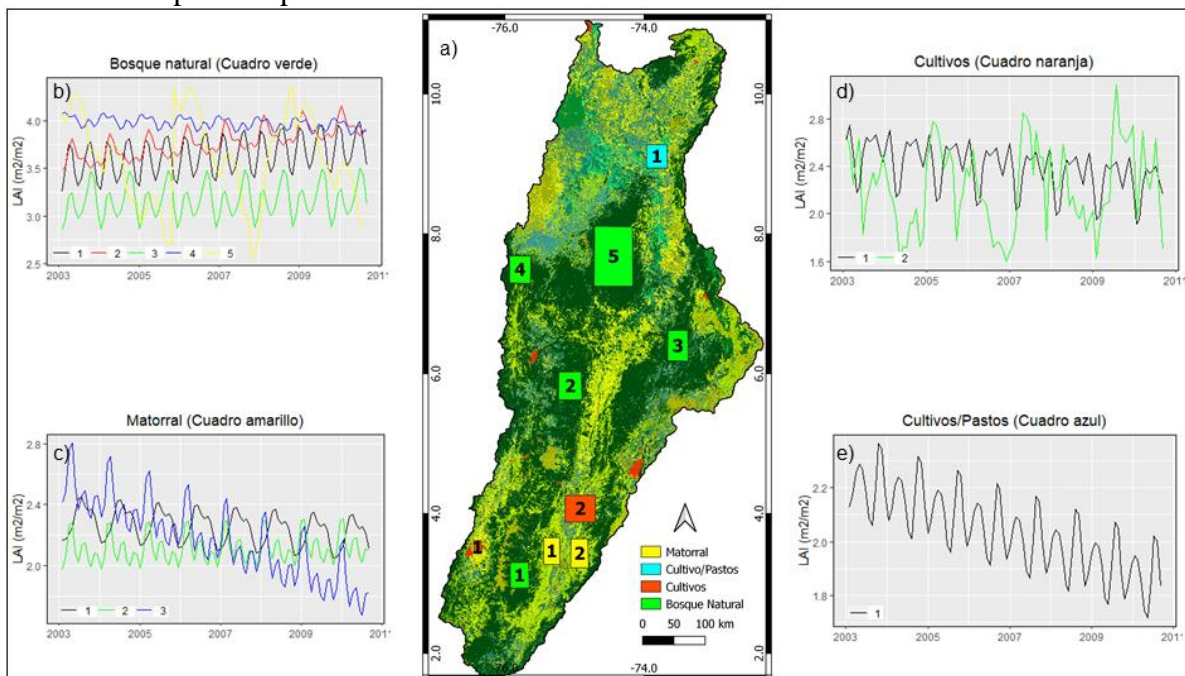
### 2.3 Configuración y calibración del modelo

Para configurar y calibrar SWAT-Tb se realizó primero la calibración de LAI. Para ello se inició con las tres coberturas de mayor porcentaje en la cuenca (Tabla 3), las cuales se ajustaron en magnitud y estacionalidad. En las ocho coberturas restantes, la calibración se enfocó sólo en la magnitud considerando los valores de LAI inicial, máximo y mínimo.

**Tabla 3.** Descripción de los tipos de coberturas para la cuenca Magdalena-Cauca.

Código SWAT	Tipo cobertura	Descripción	% Cobertura / Área cuenca	% Acumulado / Área cuenca
FRSE	Bosque natural	Bosque natural siempre verde	44.34	44.34
SHRB	Matorral	Vegetación secundaria	14.54	58.88
AGR	Cultivos	Mosaico de múltiples cultivos	12.11	70.99
CRGR	Cultivo/Pasto	Mosaico de cultivos y pastos	9.03	80.02
CRWO	Bosque Plantado	Bosque plantado tipo Pino	7.91	87.93
GRAS	Pastos	Mosaico de pastos limpios	3.73	91.66
TUHB	Maleza	Mosaico de pastos enmalezados	3.02	94.71
WETN	Humedal/Pasto	Pastos presentes en humedales	1.54	96.25
FRSD	Bosque Caducifolio	Bosques que mudan sus hojas	1.51	97.76
FRST	Bosque Mixto	Mosaico de múltiples bosques	1.49	99.25
URBN	Urbano	Ciudades principales del país	0.55	99.80
WETF	Humedal/Bosque	Bosques presentes en humedales	0.20	100

La extracción de los datos de LAI de referencia se obtuvieron por medio de varias máscaras por cobertura, esto debido principalmente a su alta distribución en la cuenca Magdalena-Cauca (Figura 4). Por lo cual se halló un promedio entre cada una de las máscaras, y su serie característica para las primeras 3 coberturas.



**Figura 4.** Mapa de extracción de los datos de MODIS (LAI) para las 4 coberturas con mayor presencia en la cuenca. (a) mapa de coberturas con los polígonos utilizados para la extracción de los datos de LAI. Los paneles (b-e) muestran las diferentes series de LAI extraídas.

El proceso de calibración de estos LAI se desarrolló mediante la versión 5.2.1 de SWAT-CUP (Arnold et al., 2012; herramienta de calibración automática del modelo SWAT), incluyendo los nuevos parámetros de SWAT-Tb, logrando su ajuste con base en revisión de literatura e iteraciones manuales (Tabla 4). Los valores calibrados de las series de LAI representan un promedio ponderado por el área de cada HRU, con paso de tiempo mensual, permitiendo una comparación directa con las series de referencia de MODIS (Hoyos et al., 2019; Valencia et al., 2021, en revisión). La evaluación se hizo mediante el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ), la eficiencia modificada de Kling-Gupta ( $KGE$ ) y el sesgo porcentual ( $PBIAS$ ).

**Tabla 4.** Parámetros ajustados de LAI para las cobertura presentes en la cuenca. Con sus valores iniciales y calibrados en el modelo SWAT-Tb.

Parámetro	Descripción	Valores Calibrados (Valores iniciales)										
		FRSE	SHRB	AGRR	CRGR	CRWO	GRAS	TUHB	WETN	FRSD	FRST	WETF
LAI_INIT <sup>1</sup>	Índice de área foliar inicial (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	3.65 (3.36)	2.12 (2.16)	2.45 (2.62)	2.25 (2.12)	2.55 (2.24)	2.62 (2.19)	2.05 (1.94)	2.08 (1.81)	2.75 (2.48)	2.65 (1.94)	4.4 (4.84)
BIO_INIT <sup>2</sup>	Biomasa inicial (kg/ha)	50000 (-)	20000 (-)	20000 (-)	20000 (-)	40000 (-)	20000 (-)	10000 (-)	10000 (-)	20000 (-)	25000 (-)	30000 (-)
PHU_PLT <sup>2</sup>	Número de unidades de calor para que la planta madure	3000 (-)	1800 (-)	1500 (-)	1500 (-)	2500 (-)	1500 (-)	2000 (-)	500 (-)	2500 (-)	2750 (-)	2500 (-)
BLAI <sup>1</sup>	Máximo Índice de área foliar (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	3.82 (6.5)	2.16 (3)	2.55 (3)	2.32 (3)	2.2 (4)	2.65 (4)	2.03 (3)	2.19 (3)	2.76 (5)	2.6 (4)	4.85 (5)
ALAI_MIN <sup>1</sup>	Mínimo Índice de área foliar (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	3.49 (0.75)	1.81 (0)	1.95 (0)	1.84 (0)	1.9 (0.75)	2.4 (0)	1.82 (0)	1.73 (0)	2.18 (0.75)	1.6 (0.75)	3.35 (0.75)
FRGRW <sup>1</sup> <sup>2</sup>	Fracción de PHU correspondiente al 1er punto de la curva de desarrollo del área foliar	0.2 (0.25)	0.6 (0.2)	0.16 (0.12)	- (0.15)	- (0.15)	- (0.2)	- (0.12)	- (0.12)	- (0.2)	- (0.22)	- (0.2)
FRGRW <sup>2</sup> <sup>2</sup>	Fracción de PHU correspondiente al 2nd punto de la curva de desarrollo del área foliar	0.24 (0.3)	0.8 (0.45)	0.2 (0.5)	- (0.45)	- (0.45)	- (0.45)	- (0.5)	- (0.5)	- (0.4)	- (0.4)	- (0.4)
LAIMX <sup>1</sup> <sup>2</sup>	Fracción de BLAI correspondiente al 1er punto de la curva de desarrollo óptimo del área foliar	0.3 (0.7)	0.65 (0.32)	0.8 (0.08)	- (0.6)	- (0.05)	- (0.32)	- (0.02)	- (0.32)	- (0.06)	- (0.06)	- (0.06)
LAIMX <sup>2</sup> <sup>2</sup>	Fracción de BLAI correspondiente al 2nd de la curva de desarrollo óptimo del área foliar	0.5 (0.99)	0.75 (0.9)	0.9 (0.9)	- (0.9)	- (0.92)	- (0.9)	- (0.9)	- (0.9)	- (0.95)	- (0.95)	- (0.95)
DLAI <sup>2</sup>	Fracción de PHU cuando LAI comienza a disminuir	0.5 (0.99)	0.85 (0.5)	0.99 (0.6)	- (0.9)	- (0.8)	- (0.5)	- (0.5)	- (0.5)	- (0.99)	- (0.99)	- (0.99)
T_BASE <sup>2</sup>	Temperatura mínima para el crecimiento de la planta (°C)	10 (10)	10 (0)	10 (8)	- (8)	- (8)	- (0)	- (0)	- (5)	- (10)	- (10)	- (10)

T_OPT <sup>2</sup>	Temperatura óptima para el crecimiento de la planta (°C)	28 (30)	28 (18)	28 (25)	- (24)	- (28)	- (18)	- (15)	- (23)	- (30)	- (30)	- (30)
BIO_E <sup>2</sup>	Ratio Biomasa/Energía ((kg/ha)/(MJ/m <sup>2</sup> ))	20 (15)	10 (30)	10 (40)	- (10)	- (25)	- (30)	- (30)	- (47)	- (15)	- (15)	- (18)
CHTMX <sup>2</sup>	Máxima altura de canopy (m)	10 (20)	4 (2)	2.5 (2.5)	- (2.5)	- (4)	- (0.5)	- (1)	- (2)	- (16)	- (18)	- (6)
BMDIEOFF <sub>2</sub>	Fracción de extinción de biomasa	0.1 (0.1)	0.6 (0.1)	0.2 (0.1)	- (0.5)	- (0.1)	- (0.1)	- (0.1)	- (0.1)	- (0.1)	- (0.1)	- (0.1)
SOS1 <sup>3</sup>	Mes de inicio de la transición a la primera temporada de lluvias	1 (3)										
SOS2 <sup>3</sup>	Mes final de la transición a la primera temporada de lluvias	2 (4)										
SOS3 <sup>3</sup>	Finalización de la primera estación húmeda y comienzo de la segunda estación seca	3 (6)										
SOS4 <sup>3</sup>	Mes de inicio de la transición a la segunda temporada de lluvias	5 (9)										
SOS5 <sup>3</sup>	Mes final de la transición a la segunda temporada de lluvias	6 (10)										

<sup>1</sup> Datos provenientes de las series de tiempo de MODIS, y ajustes manuales a los valores por defecto en SWAT. <sup>2</sup> Información de diferentes estudios donde se utiliza SWAT-T/Tb (Hoyos et al., 2019; Valencia et al., 2021, en revisión), más otros estudios de información teórica relacionada con los parámetros de las plantas (Strauch y Volk, 2012; Ensslin et al., 2015; Abbas et al., 2020); además de un ajuste manual durante el proceso de calibración final de las series. <sup>3</sup> Información de series de precipitación del IDEAM con ajuste manual. (-) Son parámetros sin valores iniciales por condiciones en plantas “Perennes” (Alemayehu et al., 2017). - Son parámetros no calibrados (simplificaciones de estudio).

Hecha la calibración para LAI, se procedió a calibrar los caudales para el mismo periodo, fijando los parámetros finales de LAI, y realizando un análisis de sensibilidad con 500 simulaciones y 18 parámetros influyentes en el cálculo de los caudales (Tabla 5; e.g., Hoyos et al., 2019). Este análisis de sensibilidad se realizó 3 veces, debido a tener 3 puntos de interés, por lo cual se obtuvieron diferentes valores y parámetros finales para la calibración de cada punto. Este análisis de sensibilidad se hizo en dirección aguas abajo, empezando por las subcuencas 23 y 25 (cuyas redes de drenaje son independientes), y por último la subcuenca 28 como punto de cierre de toda la cuenca, fijando los parámetros finales de 23 y 25. Después, usando los parámetros más sensibles se realizó la calibración final para los mismos 3 puntos de interés (Tabla 7). El procedimiento es similar al análisis de sensibilidad, realizando 1.000 simulaciones por iteración y evaluando las series simuladas de caudal por medio de la eficiencia de Nash (*NSE*), el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), y el sesgo porcentual (*PBIAS*), considerando los criterios propuestos por Moriasi et al. (2015). Esto representa un costo computacional grande que también hace parte de la justificación de la elección de todos los datos y procesos hasta ahora descritos.

**Tabla 5.** Parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad de los caudales para los 3 puntos de interés.

Parámetro	Descripción	Método <sup>1</sup>	Rango		Subcuenca 23		Subcuenca 25		Subcuenca 28	
			Min	Max	Estadístico t	Valor p	Estadístico t	Valor p	Estadístico t	Valor p
CN2.mgt	Número de curva SCS	r	-0.5	0.5	8.323	0 <sup>2</sup>	-2.948	0.003 <sup>2</sup>	-5.173	0 <sup>2</sup>
EPCO.hru	Factor de compensación de la absorción de agua de la planta	v	0.1	1	-2.115	0.034 <sup>2</sup>	11.058	0 <sup>2</sup>	7.647	0 <sup>2</sup>
ESCO.hru	Factor de compensación de la evaporación del suelo	v	0.1	1	0.362	0.717	-13.638	0 <sup>2</sup>	-6.79	0 <sup>2</sup>
ALPHA_BF.gw	Factor de flujo base	v	0.1	1	2.856	0.004 <sup>2</sup>	-0.334	0.738	-4.926	0 <sup>2</sup>
SOL_K.sol	Conductividad hidráulica saturada (mm / h)	r	-0.5	0.5	2.905	0.003 <sup>2</sup>	-3.092	0.002 <sup>2</sup>	-3.324	0 <sup>2</sup>
GWQMN.gw	Umbral de profundidad en el acuífero poco profundo para el flujo de retorno (mm)	v	0	5000	-3.216	0.001 <sup>2</sup>	0.958	0.338	2.862	0.004 <sup>2</sup>
CH_K2.rte	Conductividad hidráulica efectiva en el canal principal (mm / h)	v	0	500	-0.919	0.358	-2.56	0.01 <sup>2</sup>	-2.475	0.013 <sup>2</sup>
CH_K1.sub	Conductividad hidráulica efectiva en el canal tributario (mm / h)	v	0	300	0.103	0.917	-0.204	0.838	-0.388	0.697
SOL_BD.sol	Densidad húmeda aparente (g / cm <sup>3</sup> )	r	-0.5	0.5	11.483	0 <sup>2</sup>	-17.541	0 <sup>2</sup>	-5.924	0 <sup>2</sup>
SOL_AWC.sol	Factor de capacidad de agua disponible en el suelo	r	-0.25	5	1.796	0.073 <sup>2</sup>	3.47	0 <sup>2</sup>	16.53	0 <sup>2</sup>
RCHRG_DP.gw	Fracción de percolación del acuífero profundo	v	0	1	-3.695	0 <sup>2</sup>	5.964	0 <sup>2</sup>	-0.647	0.517
GW_DELAY.gw	Retraso del agua subterránea (días)	v	0.01	500	-7.4	0 <sup>2</sup>	14.844	0 <sup>2</sup>	3.708	0 <sup>2</sup>
SURLAG.bsn	Factor de retraso de la escorrentía superficial	v	0.05	24	-0.596	0.551	1.367	0.172 <sup>2</sup>	0.384	0.7
SOL_Z.sol	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo de la capa (mm)	r	-0.25	5	2.255	0.024 <sup>2</sup>	-13.923	0 <sup>2</sup>	22.967	0 <sup>2</sup>
SHALLST.gw	Profundidad inicial del agua en el acuífero poco profundo (mm)	v	0	50000	2.87	0.004 <sup>2</sup>	-3.922	0 <sup>2</sup>	-9.136	0 <sup>2</sup>
REVAPMN.gw	Umbral de profundidad en el acuífero poco profundo para el "Revap" (mm)	v	0	500	-1.13	0.258	0.444	0.657	0.343	0.731
GW_REVAP.gw	Coefficiente de "revap" del agua subterránea	v	0.02	0.2	-0.719	0.472	-0.468	0.639	2.552	0.011 <sup>2</sup>

OV_N.hru	Valor "n" de Manning para el flujo superficial	r	-0.5	0.5	-0.439	0.66	-1.399	0.162 <sup>2</sup>	-1.339	0.181
----------	--	---	------	-----	--------	------	--------	--------------------	--------	-------

<sup>1</sup> Método de reemplazo: v (absoluta) indica que el parámetro se sustituye por el valor de ajuste, r (relativa) indica que el parámetro se multiplica por  $[1 + (\text{valor de ajuste})]$ , lo que preserva la variabilidad espacial en la cuenca. <sup>2</sup> Los parámetros más sensibles (p-factor < 0.05 ó “One at a Time” análisis SWATCUP). Como los parámetros no están organizados en orden de sensibilidad, y hay diferencias entre los más sensibles para las subcuencas, se denotan con el superíndice.

Por último, como parte de una evaluación más completa del modelo, se calculó el balance hídrico de la cuenca (cambio en el almacenamiento;  $dS/dt = P - E - R$ ), por medio del promedio ponderado por área de HRU's de las variables  $P$ ,  $E$  y  $R$  (precipitación, evapotranspiración y escorrentía), y se validó con información de TWS (terrestrial water storage) de GRACE JPL Mascon (cambio en el almacenamiento) por medio de los estadísticos “ $NSE$ ” y “ $R^2$ ”. Estos datos de TWS están basados en un procesamiento y evaluación previos en la cuenca Magdalena-Cauca (Bolaños et al., 2021).

## 2.4 Escenarios climáticos futuros

Los cuatro escenarios de cambio climático simulado en el estudio (Tabla 6) están basados en los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 de CMIP6 para los períodos de 2041-2060 y 2081-2100, con información de los modelos EC-Earth3-Veg, EC-Earth3, FGOALS-g3, MPI-ESM1-2-HR. La selección de estos modelos obedece a su evaluación en estudios previos enfocada en la precipitación y temperatura sobre Centro y Suramérica (Arias et al., 2021b; Ortega et al., 2021). Se escoge SSP2-4.5 para representar las condiciones medias del experimento CMIP6, y SSP5-8.5 para representar las condiciones más extremas de cambio climático. Los periodos obedecen a un término cercano y uno largo para fin de siglo.

**Tabla 6.** Descripción de los escenarios de cambio climático. Los 4 escenarios futuros, cuentan con información de 4 modelos, obteniendo cuatro posibles casos para cada uno de los cuatro escenarios.

Casos	Escenario	Modelo	Casos	Escenario	Modelo
C1	SSP2-45 / 2041 - 2060	ECEV <sup>1</sup>	C9	SSP5-85 / 2041 - 2060	ECEV
C2		ECE3 <sup>2</sup>	C10		ECE3
C3		FGO3 <sup>3</sup>	C11		FGO3
C4		MPIH <sup>4</sup>	C12		MPIH
C5	SSP2-45 / 2081 - 2100	ECEV	C13	SSP5-85 / 2081 - 2100	ECEV
C6		ECE3	C14		ECE3
C7		FGO3	C15		FGO3
C8		MPIH	C16		MPIH

<sup>1</sup> EC-Earth3-Veg; <sup>2</sup> EC-Earth3; <sup>3</sup> FGOALS-g3; <sup>4</sup> MPI-ESM1-2-HR.

Esta información fue procesada con el método de reducción de escala estadística llamado “Delta-Change factor”. El método se basa en dos pasos: el primero es hallar unos deltas que describen los cambios que tendrán las variables utilizadas en el futuro (Ecuaciones 1 y 2;  $\Delta p(j)$  y  $\Delta T(j)$ ). Estos se calculan a escala mensual ( $j$ ) y con la información del escenario futuro (SSP5-8.5;  $P_{futura}(j)$  y  $T_{futura}(j)$ ), con respecto al experimento histórico de CMIP6 ( $P_{histórica}(j)$  y  $T_{histórica}(j)$ ) para el mismo periodo que la calibración y validación del modelo SWAT-Tb. Segundo los deltas obtenidos se aplican a los datos de las estaciones del IDEAM (Ecuación 3 y 4;  $P_{observada}(j, i)$  y  $T_{observada}(j, i)$ ), donde el delta del mes ( $\Delta p(j)$  y  $\Delta T(j)$ ) es aplicado a todos los datos diarios ( $i$ ) y el mes ( $j$ ) correspondiente. Los cambios en P (Ecuación 1) se calcularon considerando solo los valores entre el percentil 5 y 95 (e.g. Sellami et al., 2016; Bajracharya et al., 2018).

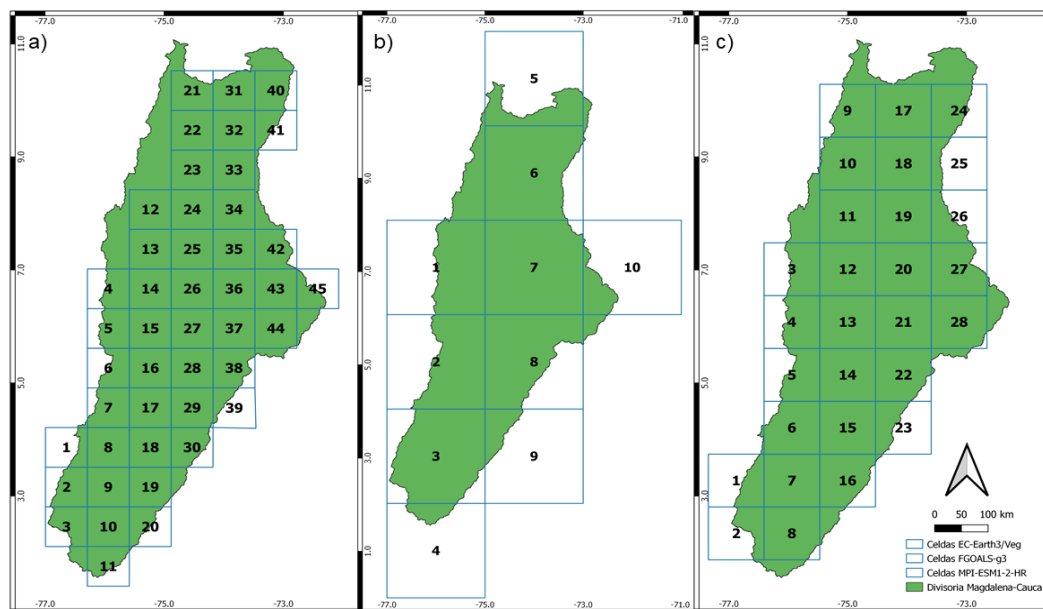
$$\Delta p(j) = P \text{ futura}(j) \div P \text{ histórica}(j) \quad [1]$$

$$\Delta T(j) = T \text{ futura}(j) - T \text{ histórica}(j) \quad [2]$$

$$P\Delta(j,i) = P \text{ observada}(j,i) \times \Delta p(j) \quad [3]$$

$$T\Delta(j,i) = T \text{ observada}(j,i) + \Delta T(j) \quad [4]$$

Este método no sólo tiene en cuenta la variabilidad temporal sino también la variabilidad espacial en función del tamaño de las celdas de los modelos sobre la región de la cuenca Magdalena-Cauca, las cuales son 45 para EC-Earth3-Veg y EC-Earth3, 28 para MPI-ESM1-2-HR y 10 para FGOALS-g3 (Figura 5). Esto significa que las ecuaciones 1 y 2 fueron aplicadas para cada una de las celdas de los cuatro modelos sobre la cuenca, y después, dependiendo de la ubicación espacial de las estaciones de precipitación y temperatura del IDEAM, se aplicaron las ecuaciones 3 y 4, representando así la distribución espacial y temporal del efecto del cambio climático.



**Figura 5.** Mapa de celdas de los modelos del CMIP6 sobre la cuenca Magdalena-Cauca. (a-c) muestran las celdas de los modelos EC-Earth3/Veg, FGOALS-g3, MPI-ESM1-2-HR respectivamente.

Por último, con las series de precipitación y temperatura representativas del escenario futuro, se corrió el modelo calibrado y validado para representar así la influencia del cambio climático sobre los caudales en la cuenca, obteniendo una posible banda de resultados debido a los casos (4 modelos GCM's) que permitan también contrarrestar la incertidumbre que pueden tener la información CMIP6, y el método de reducción de escala.

### 3. Resultados

#### 3.1 Calibración de los índices de Área Foliar

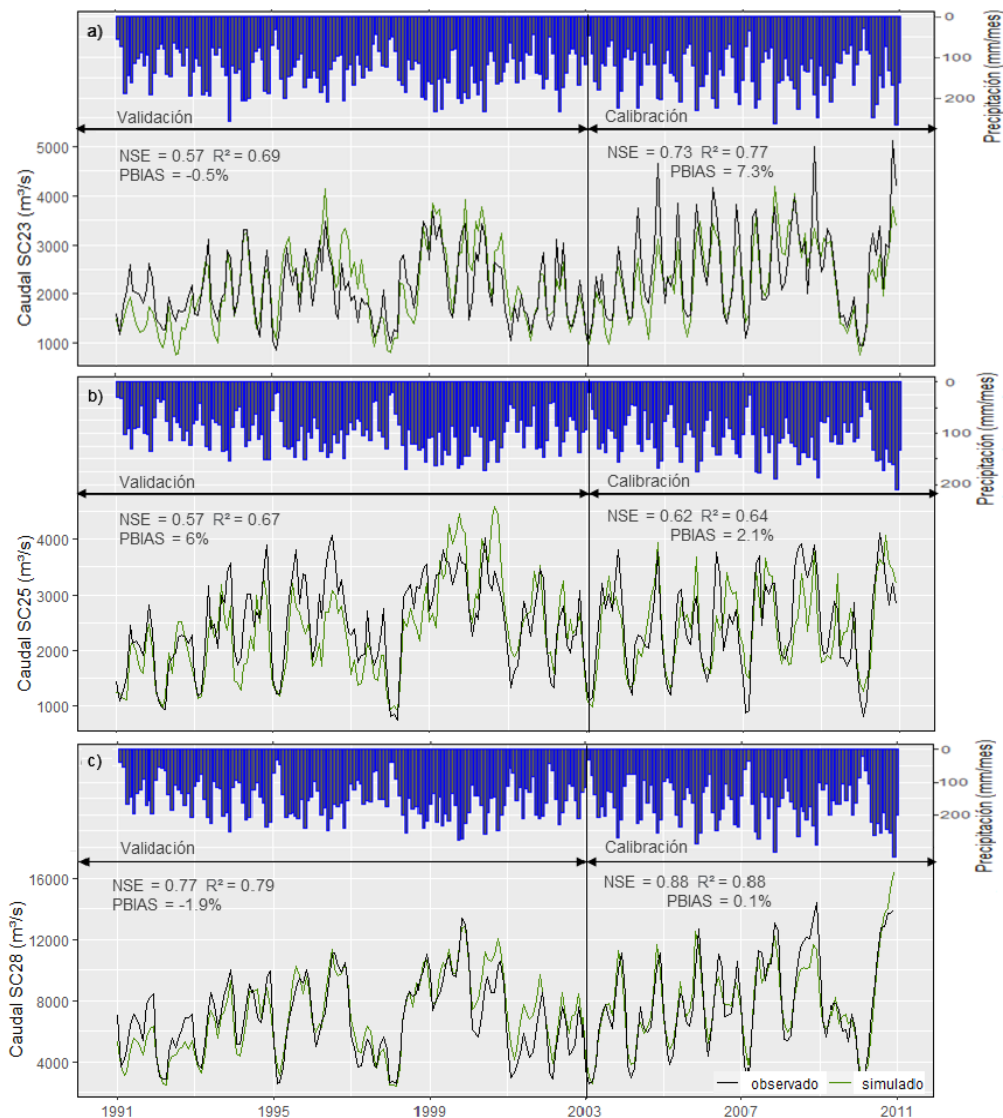
La Figura 6 muestra que el modelo SWAT-Tb produce una representación realista del ciclo estacional bimodal de LAI en las tres coberturas predominantes de la cuenca, en comparación con observaciones de MODIS.



CN2.mgt	r	-0.1	0.2	0.134	-0.1	0.15	-0.025	-0.25	0.25	-0.190
EPCO.hru	r	0.7	0.95	0.828	0.55	1	0.922	0.5	0.99	0.876
ESCO.hru	v	-	-	-	0.55	1	0.599	0.6	0.99	0.857
ALPHA_BF.gw	v	0.7	0.95	0.885	-	-	-	0	0.65	0.125
SOL_K.sol	r	-0.3	0.15	0.108	-0.25	0.1	-0.177	-0.45	0.15	0.141
GWQMN.gw	v	2200	2800	2742.699	-	-	-	0	2500	2496.25
CH_K2.rte	v	-	-	-	150	450	350.053	170	500	454.295
SOL_BD.sol	r	-0.6	0.2	-0.224	-0.5	0.01	-0.367	-0.8	0.05	-0.233
SOL_AWC.sol	r	3.5	7	5.444	4	7	5.815	2.5	7.5	5.743
RCHRG_DP.gw	v	0.55	0.8	0.799	0.2	0.8	0.208	-	-	-
GW_DELAY.gw	v	0.1	200	24.387	150	450	339.947	0	250	38.625
SURLAG.bsn	v	-	-	-	6	18	7.484	-	-	-
SOL_Z.sol	r	2	7	4.897	4.5	7	5.054	2.5	7	3.879
SHALLST.gw	v	38000	48000	42615	0	25000	960.526	8000	35000	17247.5
GW_REVAP.gw	v	-	-	-	-	-	-	0.06	0.15	0.116
OV_N.hru	r	-	-	-	-0.15	0.5	0.272	-	-	-

<sup>1</sup> Método de reemplazo: v (absoluta) indica que el parámetro se sustituye por el valor de ajuste, r (relativa) indica que el parámetro se multiplica por  $[1 + (\text{valor de ajuste})]$ , lo que preserva la variabilidad espacial en la cuenca. - Parámetros no sensibles en una subcuenca.

Con estos parámetros calibrados y las demás configuraciones del modelo se obtuvo la serie de los caudales para el escenario de control en los tres puntos de interés, cuya calibración está entre 2003-2010, y la validación entre 1991-2002 (Figura 7).



**Figura 7.** Caudales calibrados y validados en los 3 puntos de interés. (a) subcuena 23 (medio Magdalena, estación Puerto Berrio), (b) subcuena 25 (cierre Cauca, estación las Varas), y (c) subcuena 28 (cierre del río Magdalena-Cauca, estación Calamar). Los datos de precipitación provienen de las estaciones dentro de la divisoria de aguas de cada punto de interés.

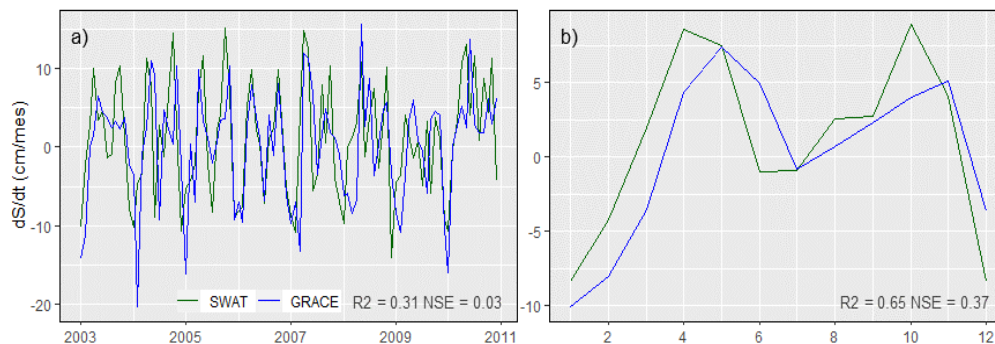
Los resultados obtenidos para los caudales se evaluaron con los estadísticos de las series observadas (negro) y simuladas (verde) en los puntos de interés, y se pueden observar resumidos para cada punto de interés en la Tabla 8. El ajuste obtenido es “bueno” para los 3 estadísticos en el periodo de calibración de la subcuena 23, mientras que para el periodo de validación es “satisfactorio” para NSE y  $R^2$ , mientras que para PBIAS es “muy bueno” (Moriasi et al., 2015). En el caso del punto de interés subcuena 25 tanto para el periodo de calibración como validación NSE y  $R^2$  son “satisfactorios”, y PBIAS “bueno” y “muy bueno” respectivamente, siendo el punto evaluado con menor rendimiento, pero aun así dentro de los estándares propuestos por Moriasi et al. (2015). Por último el punto de cierre de la cuenca obtuvo un ajuste “muy bueno” para el periodo de calibración en los tres estadísticos y “bueno” en el periodo de validación para NSE y  $R^2$ , además de “muy bueno” en PBIAS para ese mismo periodo de validación. Estos tres estadísticos muestran una estrecha similitud entre las series simuladas y observadas, similitud que se puede observar también entre la media y desviación estándar de los caudales (Tabla 8).

**Tabla 8.** Estadísticos finales de la calibración y validación de los caudales en los 3 puntos de interés.

Subcuenca	Periodo	NSE (Moriassi <sup>1</sup> )	R2 (Moriassi <sup>1</sup> )	PBIAS (Moriassi <sup>1</sup> )	p - factor <sup>2</sup>	Media Q Sim <sup>3</sup> (Obs <sup>4</sup> )	Sd Q Sim <sup>3</sup> (Obs <sup>4</sup> )
23	Calibración	0.73 (B)	0.77 (B)	7.3 (B)	0.93	2320.03(2503.04)	798.89(923.60)
	Validación	0.57 (S)	0.69 (S)	-0.5 (MB)	-	2100.34(2089.71)	767.77(653.27)
25	Calibración	0.62 (S)	0.64 (S)	2.1 (MB)	0.75	2417.15(2467.78)	745.94(818.90)
	Validación	0.57 (S)	0.67 (S)	6 (B)	-	2335.92(2484.66)	838.22(787.67)
28	Calibración	0.88 (MB)	0.88 (MB)	0.1 (MB)	0.86	7855.45(7865.65)	2758.63(3051.38)
	Validación	0.77 (B)	0.79 (B)	-1.9 (MB)	-	6966.38(6833.50)	2496.46(2443.79)

<sup>1</sup> Se referencia según Moriassi et al., 2015, si el ajuste dio Muy bueno (MB), Bueno (B) o Satisfactorio (S). <sup>2</sup> El P-factor hace referencia al porcentaje de observaciones que están dentro de la banda del percentil 95 de las 1000 simulaciones realizadas para la calibración. <sup>3</sup> Simulados. <sup>4</sup> Observados.

A partir de la buena representación de los caudales en la cuenca, se calculó el balance hídrico, obteniendo la serie de cambios en el almacenamiento de la cuenca simulada, que se comparó con datos de TWSC de GRACE JPL Mascon (Figura 8). La Figura 8 valida la representación del almacenamiento de agua en la cuenca mediante el modelo SWAT-Tb por medio del experimento de modelación aquí planteado para las condiciones del periodo de calibración de la cuenca Magdalena-Cauca.

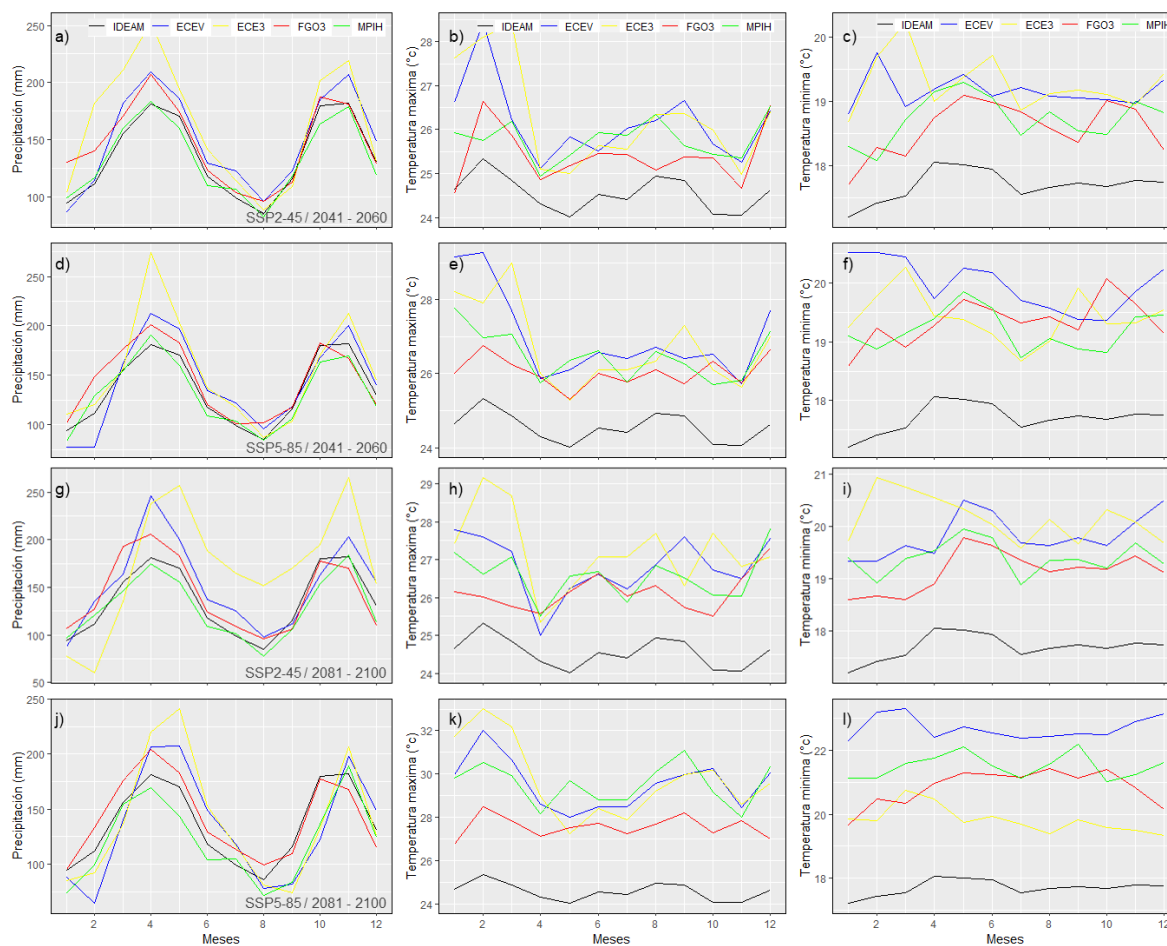


**Figura 8.** Cambio en el almacenamiento en la cuenca Magdalena-Cauca. (a) escala mensual y (b) ciclo medio anual del mismo periodo. La serie verde SWAT ( $dS/dt$ ) calculada de la simulación del modelo, y la serie azul de GRACE de los datos usados en el estudio de Bolaños et al. (2021).

Los resultados de la calibración y validación (Figuras 6, 7 y 8; Tabla 8) sugieren que el modelo SWAT-Tb reproduce adecuadamente los caudales de la cuenca a la vez que hace una representación realista de la dinámica de la vegetación mediante LAI, además de validar el cambio en el almacenamiento agregado para toda la cuenca, lo cual apunta en la dirección de producir buenos resultados por las razones correctas; un reto fundamental de la modelación hidrológica (Kirchner, 2006).

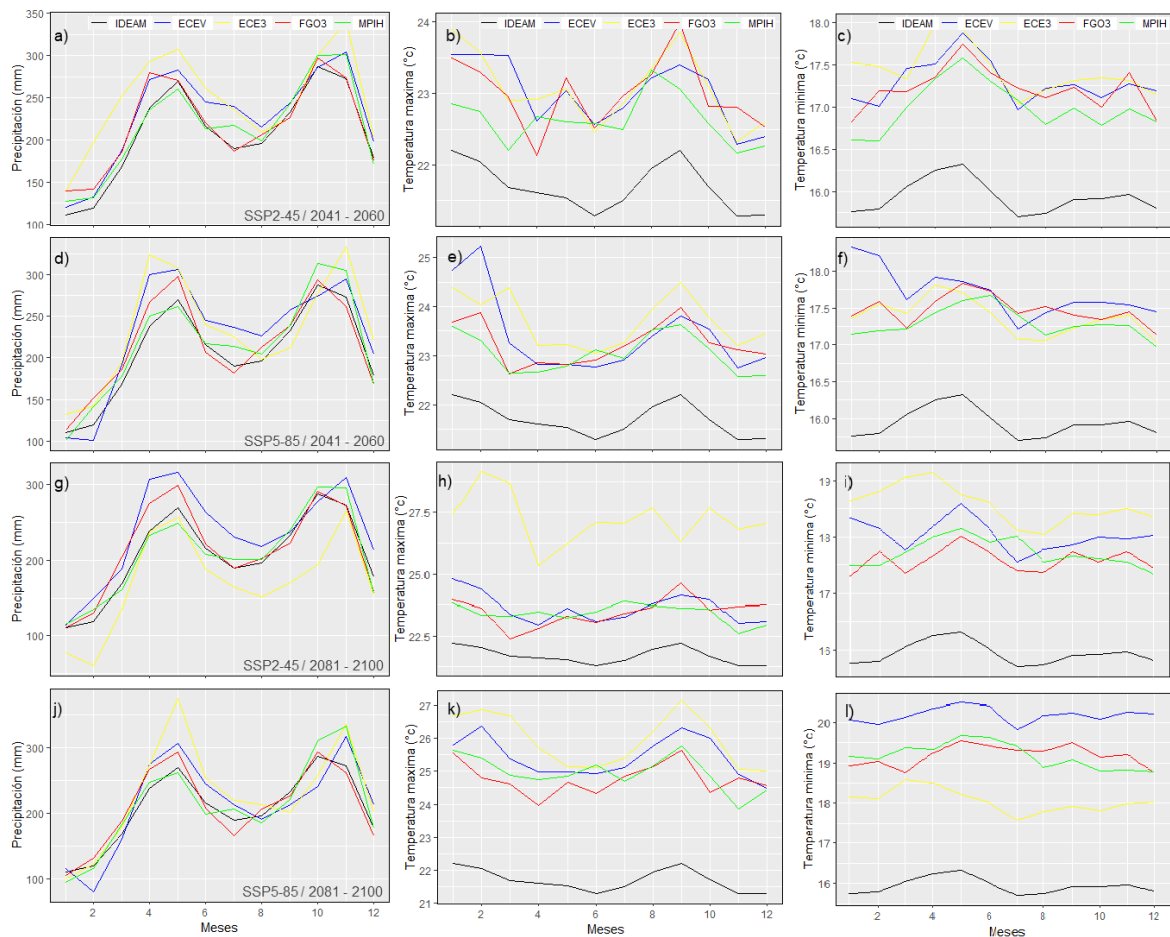
### 3.3 Cambios en las variables climáticas futuras

Como resultado de la aplicación del método de reducción de escala estadística (Ecuaciones 1-2-3-4), se presentan las Figura 9, 10 y 11, las cuales muestra un contraste entre la precipitación y temperaturas históricas y los escenarios futuros. Estas figuras de cambio en las variables climáticas están divididas en función de las estaciones dentro de la divisoria de aguas por punto de interés, de tal manera de poder discutir los efectos del cambio climático en cada uno de los 3 puntos aca evaluados.



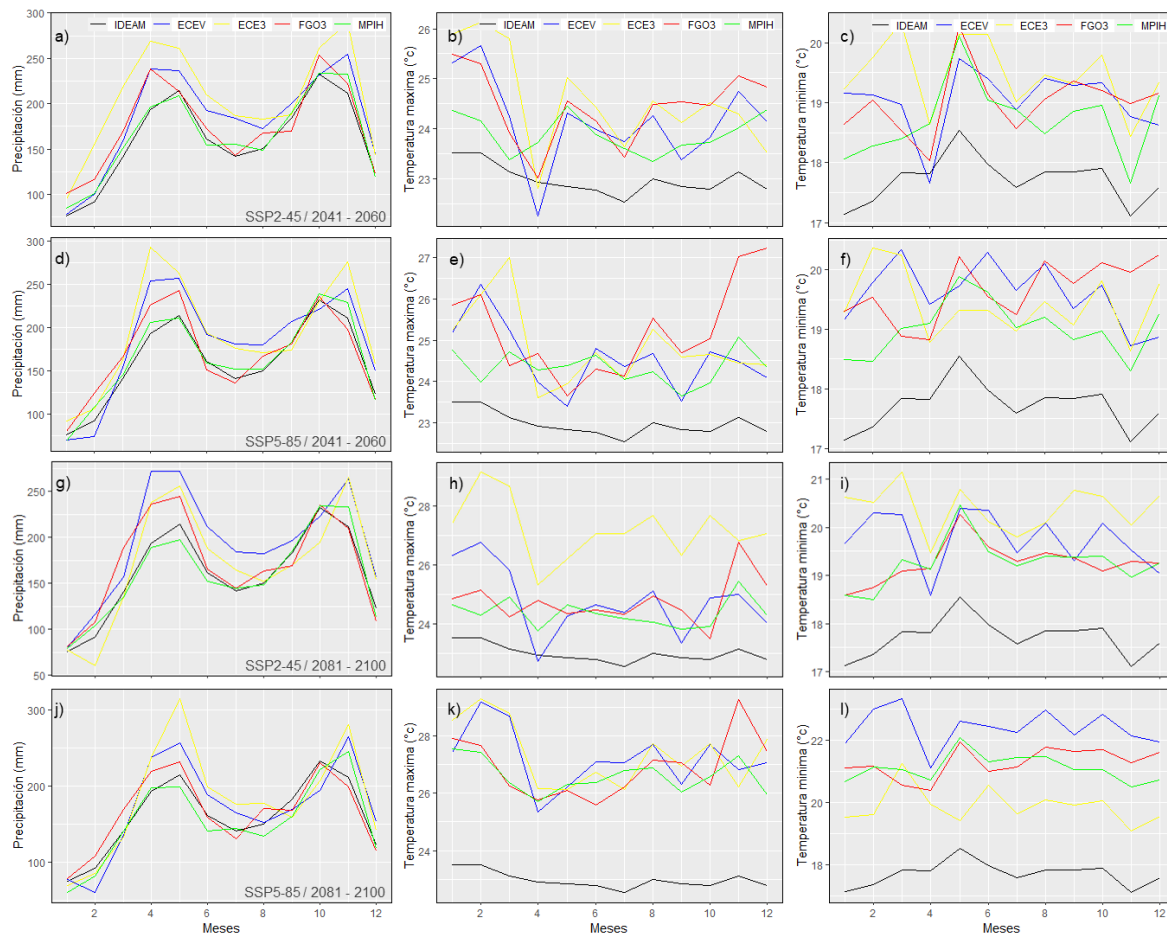
**Figura 9.** Cambios en el ciclo medio anual promedio para las estaciones de Precipitación y Temperatura presentes dentro de la divisoria de aguas del punto de interés subcuenca 23. (a-c) precipitación, temperatura máxima y mínima respectivamente, para el escenario SSP2-45 2041-2060. (d-f), (g-i) y (j-l) es la misma información para los escenarios SSP5-85 2041-2060, SSP2-45 2081-2100, y SSP5-85 2081-2100 respectivamente.

En comparación con el escenario de control, en los cuatro escenarios de cambio climático se prevén temperaturas más altas a lo largo de todo el año. Este es un patrón que se repite todos los meses independientemente de los escenarios y modelos, alcanzando incrementos de hasta 4 °C tanto en las temperaturas máximas como mínimas (Figura 9b-c-e-f-h-i-k-l). Este resultado de aumento en las temperaturas es consistente con información presentada desde un tiempo atrás en la literatura, como un aumento general de las temperaturas como efecto del cambio climático (Hitz y Smith, 2004). En el caso de la precipitación los cuatro escenarios incluyen aumentos y disminuciones en distintos meses, que a pesar de variar entre cada uno de ellos y sus modelos, presentan patrones similares. Por ejemplo, hay disminuciones mínimas de la precipitación (Figura 9a-d-g-j) que se concentran en las temporadas secas (DEF-JJA), y aumentos en las temporadas húmedas (MAM-SON), aun así en promedio para la Figura 9 son aumentos en la precipitación para los cuatro escenarios. En general estas series de tiempo no sufren cambios en su estacionalidad, a excepción del escenario SSP5-8.5 2081-2100 (Figura 9j), donde para algunos modelos específicos como ECE3 y ECEV se observa un desplazamiento en el ciclo medio anual un mes a la derecha, después del primer pico de lluvias en Abril, mostrando una modificación en el patrón respecto a los años de control.



**Figura 10.** Misma figura 9, pero con las estaciones dentro de la divisoria de aguas del punto de interés subcuenca 25.

Para el caso de la Figura 10 las temperaturas son similares a los presentados en la Figura 9 y descritos anteriormente con aumentos generalizados. Para la precipitación se observan los mismos patrones de aumento de magnitud en las temporadas de lluvia (MAM-SON) y disminuciones mínimas en las menos lluviosas o secas (DEF-JJA), y un promedio de aumento en la precipitación anual, sin grandes diferencias entre los puntos de interés. Aun así se pueden encontrar diferencias entre las Figuras 9 y 10. Un ejemplo es el modelo ECE3 para el escenario SSP2-4.5 2081-2100 donde para el punto de interés (subcuenca 23) el efecto del cambio climático sobre las precipitaciones es un aumento (Figura 9g), mientras que para el punto de interés subcuenca 25 es un disminución (Figura 10g), mostrando así diferencias que se pueden encontrar entre diferentes modelos, y la importancia de tener en cuenta la variabilidad espacial y no solo temporal de los efectos del cambio climático.

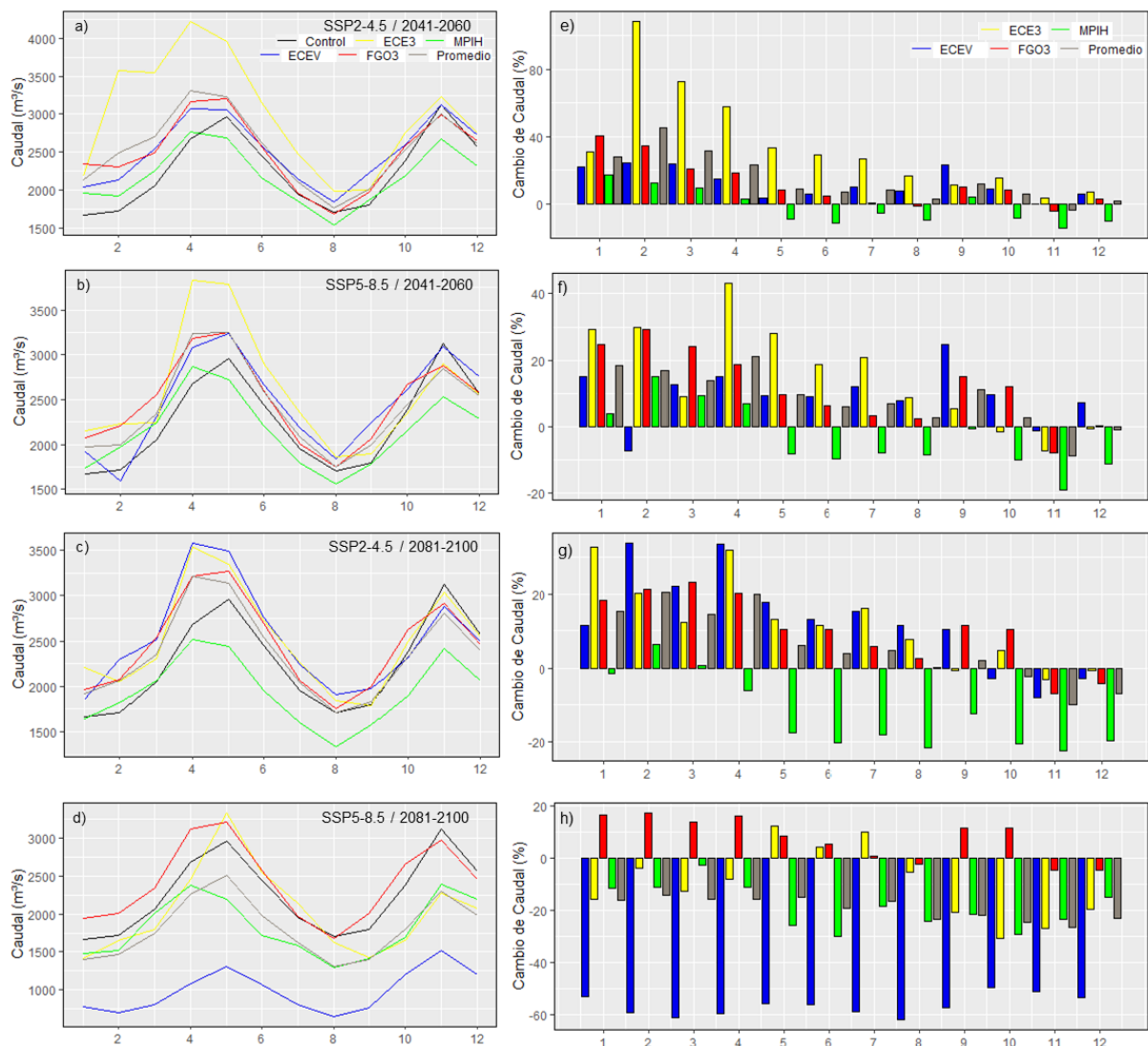


**Figura 11.** Misma figura 9, pero con la totalidad de estaciones dentro de la cuenca Magdalena-Cauca (Punto de interés subcuenca 28).

Por último la Figura 11 muestra los cambios en la totalidad de estaciones para la cuenca Magdalena-Cauca con patrones e implicaciones similares a las mostradas en las Figuras 9 y 10 descritas anteriormente. Los únicos cambios se dan en las temperaturas, donde para el mes de Abril se muestran aumentos no tan elevados en las temperaturas máximas y mínimas ( $1^{\circ}\text{C}$ ) en comparación de las anteriores figuras, inclusive habiendo escenarios y modelos (Figura 11b-c-h) para los cuales se espera que para el mismo mes de Abril las temperaturas no varían o sus cambios sean magnitudes inferiores respecto al escenario de control (IDEAM). Aun así estos cambios son mínimos y atípicos con respecto al aumento general de temperaturas en la cuenca, en comparación con el ciclo medio anual; por lo tanto, en general, se sigue esperando temperaturas más elevadas, y un aumento en la precipitación anual promedio de la cuenca.

### 3.4 Análisis de caudales en escenarios de control y futuros

Con la aplicación de la información climática de los escenarios futuros en el modelo calibrado, se obtuvieron para cada uno de los puntos de interés los caudales de los escenarios futuros mostrados en las Figuras 12, 13 y 14.

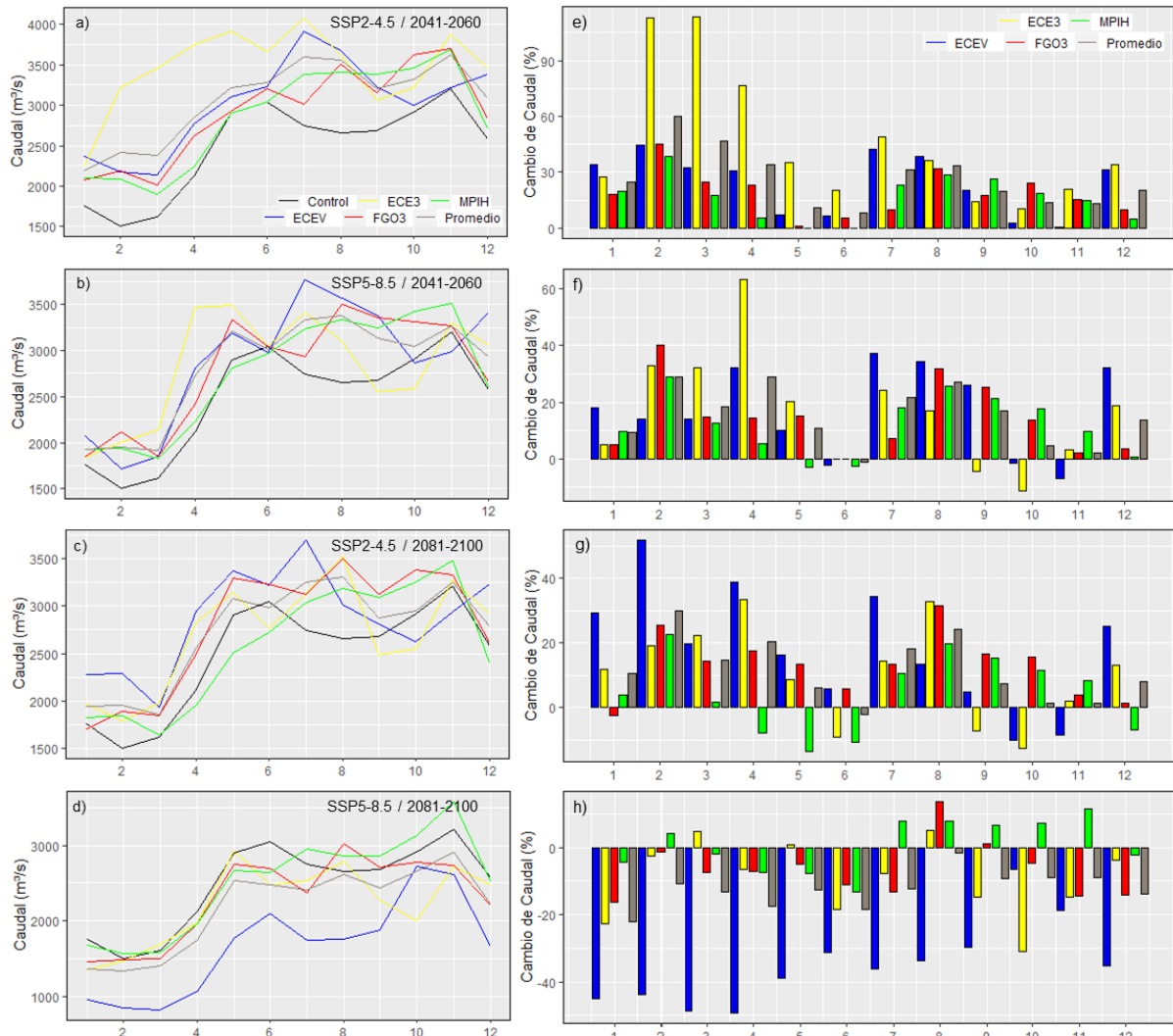


**Figura 12.** Caudales futuros para el punto de interés subcuenca 23 (Cierre del Medio Magdalena; Estación Puerto Berrio). (a-d) ciclo medio anual absoluto para los escenarios SSP2-45 2041-2060, SSP5-85 2041-2060, SSP2-45 2081-2100, y SSP5-85 2081-2100 respectivamente. (e-h) ciclo medio anual en porcentaje de cambio para los mismos escenarios.

En el punto de interés subcuenca 23 (Figura 12), los escenarios en el periodo de tiempo 2041-2060 (Figura 12a-b-e-f) muestran aumentos en los caudales en la mayoría de los meses a excepción de algunos para el segundo semestre del año y con modelos específicos como el MPIH (línea verde). Estos aumentos, en su mayoría, están entre el 10% y 40% respecto al escenario de control. Para los escenarios en el periodo de tiempo 2081-2100 (Figura 12c-d-g-h) se empiezan a observar disminuciones, en especial en el escenario SSP5-8.5 (Figura 12d-h). Estas disminuciones fluctúan entre el 10% y 30%, pero en el caso del modelo ECEV (línea azul) son de hasta el 60%, lo cual significaría una gran reducción de la disponibilidad de agua en la cuenca. Estas diferencias entre modelos y escenarios dan idea de incertidumbres en los impactos que podría tener el efecto del cambio climático para final de siglo, y resaltan la importancia de analizar diferentes escenarios y modelos para concluir sobre su efecto en los caudales.

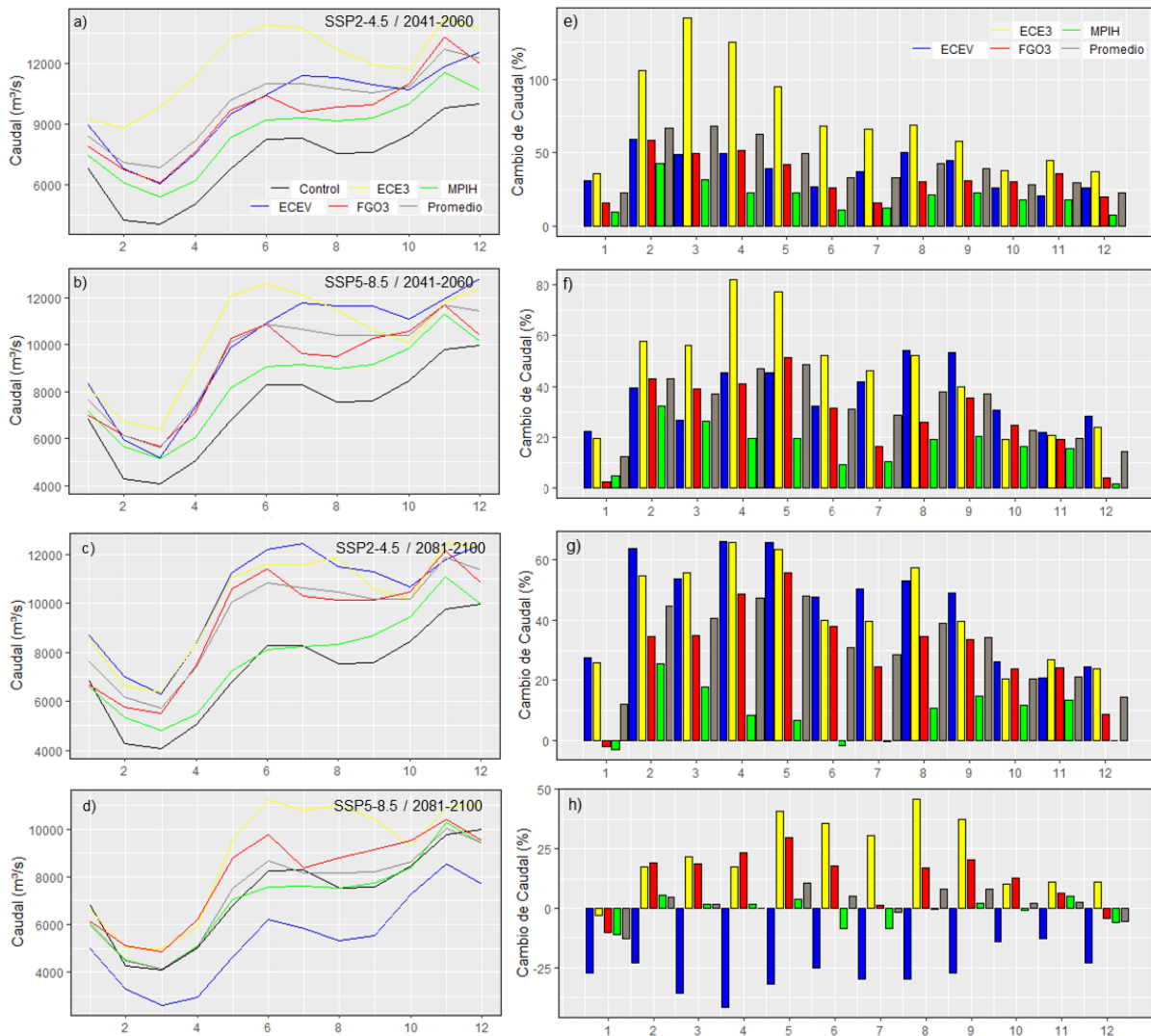
En promedio (línea gris), para los meses de temporada lluviosa (MAM-SON), el aumento de los caudales es mucho mayor que en los meses de temporada seca (DEF-JJA), siendo mucho

más fuerte el aumento para la primera temporada de lluvias (MAM), que para la segunda (SON), y a su vez siendo el aumento no tan elevado en los caudales para la primera temporada seca (JJA) como para la segunda (DEF). Este patrón estacional tiene excepciones como lo muestra las disminuciones del escenario SSP5-8.5 2081-2100.



**Figura 13.** Misma Figura 12, pero para el punto de interés subcuena 25 (Cierre del Cauca; Estación Las varas).

Para el punto de interés subcuena 25 (Figura 13), los patrones son muy parecidos a los explicados en la Figura 12, donde hay un posible aumento en los caudales para los escenarios en los años 2041-2060, y el escenario SSP2-4.5 en los años 2081-2100. Para el escenario más extremo (Figura 13d-h), el efecto es contrario a los primeros tres escenarios, y se espera una disminución en la mayoría de los caudales con un decrecimiento de mayor magnitud en las temporadas secas (DEF-JJA; de hasta el 25%) que en las temporadas de lluvia (MAM-SON; entre el 5 % y 10%).



**Figura 14.** Misma Figura 12, pero para el punto de interés subcuenca 28 (Cierre de la cuenca Magdalena-Cauca; Estación Calamar).

La Figura 14 muestra el efecto del cambio climático en la cuenca Magdalena-Cauca en su punto de cierre estación Calamar. Esta figura presenta los mismos patrones de las anteriores pero con cambios en su magnitud. Por ejemplo para los primeros tres escenarios, el aumento de caudales tiene una mayor magnitud en comparación con los anteriores puntos de interés. Estos aumentos no bajan del 20% y llegan en algunos casos hasta más del 60%. Por otro lado, el escenario más extremo (Figura 14d-h), no muestra ningún patrón claro entre los diferentes modelos. Algunos de ellos muestran un aumento como el ECE3 (línea amarilla) y el FGO3 (línea roja), otros muestran disminuciones como ECEV (línea azul), y otros muestran disminuciones y aumentos como el MPIH (línea verde). A su vez, el promedio (línea gris), muestra aumentos y disminuciones con un patrón estacional, con una disminución promedio de -4% en los caudales para los meses de DEF, un aumento del 2% en los caudales de JJA (meses de temporada seca o menos lluviosos); mientras que para la temporada de lluvia un aumento de aproximadamente 5% en los meses de MAM y SON. Estos cambios para el escenario SSP5-8.5 2081-2100 en su promedio (línea gris) son también en magnitud los más pequeños a diferencia del mismo escenario para los otros dos puntos de interés evaluados.

Por último, se puede concluir que de manera general se esperan aumentos de caudales para los escenarios de mitad de siglo (2041-2060) en la cuenca del río Magdalena-Cauca. Las proyecciones de estos aumentos varían dependiendo de los modelos y escenarios SSPs pero generalmente coinciden en el incremento de las magnitudes. Para fin de siglo hay diferencias en los resultados dependiendo de los escenarios; por ejemplo, para el escenario SSP2-4.5 se esperan aumentos aunque en menor magnitud que los observados en los escenarios en la mitad de siglo, mientras que para el escenario SSP5-8.5 se esperan disminuciones, aunque con diferencias en magnitud para los tres puntos de interés, siendo más fuertes estas disminuciones en el escenario SSP5-8.5 para el medio Magdalena y cierre del Cauca, y de menor magnitud para el cierre del Magdalena-Cauca.

## **4 Discusión**

### **4.1 Efectos contrastantes en las variables climáticas futuras**

Al observar los efectos del cambio climático en las variables de entrada se puede observar un aumento en las temperaturas que puede conducir a un aumento de la evapotranspiración, y por ende una disminución en los caudales. En el caso de la precipitación, a pesar de haber disminuciones en algunos meses y periodos (principalmente en los meses secos o menos lluviosos), en promedio hay un aumento de la precipitación en la cuenca que podría generar un incremento en los caudales. Estos dos efectos contrastantes se pueden observar en las figuras 12, 13, y 14 donde para los escenarios SSP2-4.5/2041-2060, SSP5-8.5/2041-2060 y SSP2-4.5/2081-2100 los caudales aumentan en magnitud, lo cual sugiere una predominancia del efecto del aumento de la precipitación sobre el aumento de la temperatura. Sin embargo, para el escenario SSP5-8.5/2081-2100 el efecto son disminuciones en la magnitud de los caudales, indicando que para este caso el efecto del aumento de la temperatura domina sobre el efecto del aumento de la precipitación. Es importante comprender que estos efectos en contraste se soportan en la ecuación del balance hídrico ( $dS/dt = P - E - R$ ), pero las variables como precipitación y temperatura/evapotranspiración no solo dependen del cambio climático, por lo cual estos efectos contrastantes se deben entender dentro del contexto de este estudio.

### **4.2 Aumento en los caudales y seguridad hídrica**

De los cuatro escenarios propuestos en este estudio, tres muestran, en general, aumentos en los caudales con respecto al escenario de control. Estos aumentos podrían pensarse como una mayor disponibilidad de agua, y por ende mejor reserva para la agricultura, y un mejor potencial hidráulico para la generación de energía eléctrica. Sin embargo, hay que considerar los porcentajes promedio del cambio en el caudal, los cuales varían entre el 10% y el 60% por encima de los caudales del escenario de control, dependiendo de los escenarios y puntos de interés. Además de ello hay modelos que de manera individual muestran aumentos de hasta el 100% respecto a los caudales del control, por lo cual la visión de una mayor disponibilidad de agua como ventajosa para el abastecimiento de diferentes actividades en la cuenca tiene que partir de la siguiente pregunta: ¿qué tan beneficioso sería un aumento de hasta un 60% en promedio en el régimen de caudales de la cuenca Magdalena-Cauca?. Esta pregunta cobra vital importancia teniendo en cuenta datos como los presentados en la introducción, donde se estima que el 70% de la población en Colombia vive dentro de la Cuenca Magdalena-Cauca (Alfonso et al., 2013), y un porcentaje importante de ella vive cerca de los cauces principales de la misma (e.g., en el Huila y el alto Magdalena; el bajo Cauca y el Magdalena Medio; entre otros). Una manera de entender este riesgo desde el punto de vista poblacional son las inundaciones que se vivieron en la cuenca en el año 2011 por el fenómeno de La Niña (Hoyos et al., 2013), donde

el aumento de las precipitaciones generó afectación directa en cerca del 9% de la población total del país (más de 4 millones de personas). Además de esto la cuenca es el lugar de mayor presencia de embalses en Colombia (Angarita et al., 2018), embalses que se construyeron bajo ciertas medidas estructurales con caudales promedio calculados a partir del histórico de las estaciones de medición (e.g 7.200 m<sup>3</sup>/s promedio mensual en la estación Calamar), pero es importante preguntarse si en las estimaciones se tuvieron en cuenta un aumento de estos caudales en el futuro (e.g hasta 11.520 m<sup>3</sup>/s promedio mensual en la estación Calamar). Un ejemplo de este posible riesgo estructural puede ser lo ocurrido en este mismo año (2021) con las inundaciones en Alemania y China, donde han ocurrido problemas en diferentes estructuras civiles, incluyendo la puesta en riesgo de un embalse al norte de la región de “Rhine-Westphalia” en Alemania, a tal punto de su posible ruptura (Sky News, 2021). Incluso en China las autoridades destruyeron un embalse cerca a la ciudad de “Luoyang” para así poder desviar el problema causado por las inundaciones (The Guardian, 2021). Por último, y a pesar de haber una alta incertidumbre, y que los escenarios y modelos presentados en este estudio son solo una muestra de todo el experimento de CMIP6, es importante preguntarnos si Colombia está preparada para los efectos que se podrían presentar en las variables hidroclimatológicas debido a la ocurrencia “inequívoca” (como la describe el IPCC) del cambio climático.

### **4.3 Dos caminos hacia fin de siglo**

En los dos escenarios de mitad de siglo (SSP2-4.5 y SSP5-8.5 / 2041-2060) hay una similitud en lo proyectado para la cuenca: aumentos en los caudales. En contraste, en los dos escenarios hacia fin de siglo (SSP2-4.5 y SSP5-8.5 / 2081-2100) hay dos posibles caminos: en el escenario SSP2-4.5 los modelos proyectan en su mayoría aumentos en los caudales, mientras que en el escenario SSP5-8.5 proyectan disminuciones. En realidad, la probabilidad de que ocurra uno u otro efecto (aumento o disminución) dependerá del camino que siga Colombia y la sociedad global en los próximos años (el escenario) con respecto a la mitigación del cambio climático. Nuevos experimentos y estudios pueden ayudar a reducir la incertidumbre de los posibles efectos esperados. Aun así, estos resultados del escenario SSP5-8.5 2081-2100 no son inútiles, ya que nos ayudan a ver la amplia variabilidad de posibilidades en el régimen de caudales de la cuenca Magdalena-Cauca, y así como se planteó en la anterior sección, sobre si los diferentes sectores de la sociedad estaban preparados para un aumento en el régimen de caudales, una posible disminución también presenta una pregunta importante sobre la disponibilidad futura de agua en la cuenca, y si Colombia está preparada para un escenario de escasez hídrica, así como el presentado en el fenómeno de El Niño de 1992, con el racionamiento que vivió el país (Gutiérrez y Dracup, 2001).

### **4.4 Futuros estudios**

Es importante indicar que el experimento de modelación aquí planteado no tiene en cuenta ni el cambio en el uso del suelo, ni los efectos de los embalses a pesar de ser dos variables importantes en la cuenca. Esto se ha justificado varias veces por medio de la pregunta de investigación unidireccional donde nos preguntamos ¿cuál es el efecto del cambio climático sobre el régimen de caudales en la cuenca del río Magdalena-Cauca? Aún así, es importante avanzar en estudios futuros que permitan una comprensión de los efectos que tendrían estos diferentes procesos en la cuenca de manera conjunta y no solo separados. Esto debido principalmente a las conexiones que pueden existir entre los diferentes procesos anteriormente mencionados. Un ejemplo son los aumentos de 4°C obtenidos en algunos de los escenarios de cambio climático aquí propuestos, los cuales podrían tener efectos, por ejemplo, en la cobertura vegetal, que a su vez podrían generar cambios en variables como LAI que es parte fundamental

de este estudio. O cambios en la tasa de evaporación de los embalses que puede afectar el almacenamiento de agua en los mismos, y así entre otros ejemplos.

## **5 Conclusiones**

En este estudio se logró calibrar y validar la variante del modelo SWAT denominada SWAT-Tb para la cuenca Magdalena-Cauca, representando adecuadamente no sólo los caudales en tres puntos de interés distribuidos en la cuenca, sino también el ciclo anual bimodal de la vegetación predominante mediante LAI (la representación de LAI es crítica para el balance hídrico de la cuenca por su papel en la estimación de la evapotranspiración, escorrentía e infiltración). También se logró una representación realista del cambio del almacenamiento de la cuenca, apuntando al propósito de “obtener buenos resultados por las razones correctas”.

La simulación realizada considerando las proyecciones de cuatro modelos CMIP6 bajo dos escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 y dos periodos de tiempo 2041-2060 y 2081-2100, sugiere un aumento de caudales en la cuenca para mitad de siglo y para el escenario SSP2-4.5 a final de siglo. Las proyecciones indican que aumentaría considerablemente la disponibilidad de agua en la cuenca, entre un 10% y 60% del caudal mensual promedio multianual. A su vez, en el escenario de cambio climático más extremo SSP5-8.5 para fin de siglo, las proyecciones muestran disminuciones de caudal que comprometerían considerablemente la disponibilidad de agua en la cuenca, equivalentes a entre un 10% y 30% del caudal mensual promedio multianual. Esto se traduce en diferencias notables entre los resultados de los diferentes escenarios y modelos aquí propuestos. Lo que sí es un patrón consistente es el efecto estacional que se puede observar en los aumentos y disminuciones de los caudales, lo cual se puede traducir en una intensificación de los extremos (temporadas secas más secas y lluviosas más lluviosas), independientemente de los escenarios, pero variando en su magnitud.

El proyecto CMIP6 contiene diferentes escenarios SSPs así como numerosos modelos de circulación general, por lo cual los resultados obtenidos en las variables de entrada y caudales deben entenderse como la respuesta de los cuatro modelos particulares para los cuatro escenarios considerados en el régimen de caudales de la cuenca Magdalena-Cauca. Por lo anterior, es importante seguir avanzando en el análisis de múltiples simulaciones considerando diferentes modelos globales y escenarios SSPs que permitan mejorar nuestra comprensión de las incertidumbres en la respuesta del régimen de caudales en la cuenca Magdalena-Cauca bajo forzamiento del cambio climático. Lo anterior es particularmente importante porque Colombia tiene una alta dependencia de la cuenca Magdalena-Cauca, incluyendo la seguridad hídrica, energética y alimentaria del país.

## **Agradecimientos**

Este trabajo fue financiado por MINCIENCIAS a través del Programa de Investigación “SOSTENIBILIDAD DE SISTEMAS ECOLÓGICOS Y SOCIALES EN LA CUENCA MAGDALENA-CAUCA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y PÉRDIDA DE BOSQUES” (Código: 1115-852-70719) con fondos del «PATRIMONIO AUTÓNOMO FONDO NACIONAL DE FINANCIAMIENTO PARA LA CIENCIA, LA TECNOLOGÍA Y LA INNOVACIÓN FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS».

## **Referencias**

- Abbas, S., Wong, M. S., Wu, J., Shahzad, N., & Muhammad Irteza, S. (2020). Approaches of Satellite Remote Sensing for the Assessment of Above-Ground Biomass across Tropical Forests: Pan-tropical to National Scales. *Remote Sensing*, 12(20), 3351.
- Aguayo, R., León-Muñoz, J., Garreaud, R., & Montecinos, A. (2021). Hydrological droughts in the southern Andes (40–45° S) from an ensemble experiment using CMIP5 and CMIP6 models. *Scientific reports*, 11(1), 1-16.
- Alemayehu, T., Van Griensven, A., Woldegiorgis, B. T., & Bauwens, W. (2017). An improved SWAT vegetation growth module and its evaluation for four tropical ecosystems. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(9), 4449.
- Alfonso, L., He, L., Lobbrecht, A., & Price, R. (2013). Information theory applied to evaluate the discharge monitoring network of the Magdalena River. *Journal of Hydroinformatics*, 15(1), 211-228.
- Angarita, H., Wickel, A. J., Sieber, J., Chavarro, J., Maldonado-Ocampo, J. A., Delgado, J., & Purkey, D. (2018). Basin-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, Colombia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(5), 2839-2865.
- Arias, P. A., Garreaud, R., Poveda, G., Espinoza, J. C., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., ... & van Oevelen, P. J. (2021a). Hydroclimate of the Andes Part II: Hydroclimate variability and sub-continental patterns. *Frontiers in Earth Science*, 8, 666.
- Arias, P.A., G. Ortega, L.D. Villegas, and J.A. Martínez, 2021b: Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: persistent biases and improvements. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 100, 1-22, DOI: 10.17533/udea.redin.20210525.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... & Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508.
- Bajracharya, A. R., Bajracharya, S. R., Shrestha, A. B., & Maharjan, S. B. (2018). Climate change impact assessment on the hydrological regime of the Kaligandaki Basin, Nepal. *Science of the Total Environment*, 625, 837-848.
- Blöschl, G., Bierkens, M. F., Chambel, A., Cudennec, C., Destouni, G., Fiori, A., ... & Stumpp, C. (2019). Twenty-three Unsolved Problems in Hydrology (UPH)—a community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, (just-accepted).
- Bolaños, S., Salazar, J. F., Betancur, T., & Werner, M. (2020). GRACE reveals depletion of water storage in northwestern South America between ENSO extremes. *Journal of Hydrology*, 125687.
- Bovolo, C. I., Wagner, T., Parkin, G., Hein-Griggs, D., Pereira, R., & Jones, R. (2018). The Guiana Shield rainforests—overlooked guardians of South American climate. *Environmental Research Letters*, 13(7), 074029.
- Čerkasova, N., Ertürk, A., Zemlys, P., Denisov, V., & Umgiesser, G. (2016). Curonian Lagoon drainage basin modelling and assessment of climate change impact. *Oceanologia*, 58(2), 90-102.
- Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (2012). Informe de gestión integral del recurso hídrico del Alto Magdalena.
- Carmona, A. M., & Poveda, G. (2014). Detection of long-term trends in monthly hydro-climatic series of Colombia through Empirical Mode Decomposition. *Climatic Change*, 123(2), 301-313.
- EC-Earth Consortium (EC-Earth) (2019). *EC-Earth-Consortium EC-Earth3 model output prepared for CMIP6 CMIP historical*. Version 2020/02/25. Earth System Grid Federation.
- Essenfelder, A. H. (2016). SWAT Weather Database: A Quick Guide. *Version: V. 0.16*, 6.

- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958.
- Espinoza, J. C., Garreaud, R., Poveda, G., Arias, P. A., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., ... & Scaff, L. (2020). Hydroclimate of the Andes Part I: main climatic features. *Frontiers in Earth Science*, 8, 64.
- Ensslin, A., Rutten, G., Pommer, U., Zimmermann, R., Hemp, A., & Fischer, M. (2015). Effects of elevation and land use on the biomass of trees, shrubs and herbs at Mount Kilimanjaro. *Ecosphere*, 6(3), 1-15.
- Eum, H. I., Cannon, A. J., & Murdock, T. Q. (2017). Intercomparison of multiple statistical downscaling methods: multi-criteria model selection for South Korea. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 31(3), 683-703.
- Ficklin, D. L., Stewart, I. T., & Maurer, E. P. (2013). Climate change impacts on streamflow and subbasin-scale hydrology in the Upper Colorado River Basin. *PloS one*, 8(8), e71297.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, 2(1), 1-21.
- Garcia, B., Libonati, R., & Nunes, A. (2018). Extreme drought events over the Amazon basin: The perspective from the reconstruction of South American hydroclimate. *Water*, 10(11), 1594.
- Gebrechorkos, S. H., Bernhofer, C., & Hülsmann, S. (2020). Climate change impact assessment on the hydrology of a large river basin in Ethiopia using a local-scale climate modelling approach. *Science of the Total Environment*, 742, 140504.
- Gutiérrez, F., & Dracup, J. A. (2001). An analysis of the feasibility of long-range streamflow forecasting for Colombia using El Niño–Southern Oscillation indicators. *Journal of Hydrology*, 246(1-4), 181-196.
- Hassan, M., Du, P., Mahmood, R., Jia, S., & Iqbal, W. (2019). Streamflow response to projected climate changes in the Northwestern Upper Indus Basin based on regional climate model (RegCM4. 3) simulation. *Journal of Hydro-environment Research*, 27, 32-49.
- Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., ... & Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS one*, 12(2), e0169748.
- Hitz, S., & Smith, J. (2004). Estimating global impacts from climate change. *Global Environmental Change*, 14(3), 201-218.
- Hoyos, N., Correa-Metrio, A., Jepsen, S. M., Wemple, B., Valencia, S., Marsik, M., ... & Velez, M. I. (2019). Modeling Streamflow Response to Persistent Drought in a Coastal Tropical Mountainous Watershed, Sierra Nevada De Santa Marta, Colombia. *Water*, 11(1), 94.
- Hoyos, N., Escobar, J., Restrepo, J. C., Arango, A. M., & Ortiz, J. C. (2013). Impact of the 2010–2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: the human toll of an extreme weather event. *Applied Geography*, 39, 16-25.
- Jarvis, A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara, 2008, Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database
- Jeuken, A., Bouaziz, L., Corzo, G., & Alfonso, L. (2016). Analyzing needs for climate change adaptation in the Magdalena River basin in Colombia. In *Climate Change Adaptation, Resilience and Hazards* (pp. 329-344). Springer, Cham.

- Jia, W., Dong, Z., Duan, C., Ni, X., & Zhu, Z. (2019). Ecological reservoir operation based on DFM and improved PA-DDS algorithm: A case study in Jinsha river, China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 1-19.
- Jungclaus, Johann; Bittner, Matthias; Wieners, Karl-Hermann; Wachsmann, Fabian; Schupfner, Martin; Legutke, Stephanie; Giorgetta, Marco; Reick, Christian; Gayler, Veronika; Haak, Helmuth; de Vrese, Philipp; Raddatz, Thomas; Esch, Monika; Mauritsen, Thorsten; von Storch, Jin-Song; Behrens, Jörg; Brovkin, Victor; Claussen, Martin; Crueger, Traute; Fast, Irina; Fiedler, Stephanie; Hagemann, Stefan; Hohenegger, Cathy; Jahns, Thomas; Kloster, Silvia; Kinne, Stefan; Lasslop, Gitta; Kornblueh, Luis; Marotzke, Jochem; Matei, Daniela; Meraner, Katharina; Mikolajewicz, Uwe; Modali, Kameswarrao; Müller, Wolfgang; Nabel, Julia; Notz, Dirk; Peters, Karsten; Pincus, Robert; Pohlmann, Holger; Pongratz, Julia; Rast, Sebastian; Schmidt, Hauke; Schnur, Reiner; Schulzweida, Uwe; Six, Katharina; Stevens, Bjorn; Voigt, Aiko; Roeckner, Erich (2019). *MPI-M MPI-ESM1.2-HR model output prepared for CMIP6 CMIP historical*. Version 2020/02/25. Earth System Grid Federation.
- Kankam-Yeboah, K., Obuobie, E., Amisigo, B., & Opoku-Ankomah, Y. (2013). Impact of climate change on streamflow in selected river basins in Ghana. *Hydrological sciences journal*, 58(4), 773-788.
- Kettner, A. J., Restrepo, J. D., & Syvitski, J. P. M. (2010). A spatial simulation experiment to replicate fluvial sediment fluxes within the Magdalena River Basin, Colombia. *The Journal of Geology*, 118(4), 363-379.
- Kling, H., Fuchs, M., & Paulin, M. (2012). Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 424, 264-277.
- Kim, J., Choi, J., Choi, C., & Park, S. (2013). Impacts of changes in climate and land use/land cover under IPCC RCP scenarios on streamflow in the Hoeya River Basin, Korea. *Science of the Total Environment*, 452, 181-195.
- Kirchner, J. W. (2006). Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Resources Research*, 42 (3).
- Lehner, B., Verdin, K., Jarvis, A. (2008): New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions, AGU*, 89(10): 93-94.
- Li, P., Muenich, R. L., Chaubey, I., & Wei, X. (2019). Evaluating Agricultural BMP Effectiveness in Improving Freshwater Provisioning Under Changing Climate. *Water resources management*, 33(2), 453-473.
- Li, Lijuan (2019). *CAS FGOALS-g3 model output prepared for CMIP6 CMIP historical*. Version 2020/02/25. Earth System Grid Federation.
- Ligaray, M., Kim, H., Sthiannopkao, S., Lee, S., Cho, K. H., & Kim, J. H. (2015). Assessment on hydrologic response by climate change in the Chao Phraya River Basin, Thailand. *Water*, 7(12), 6892-6909.
- Lobanova, A., Liersch, S., Nunes, J. P., Didovets, I., Stagl, J., Huang, S., ... & Krysanova, V. (2018). Hydrological impacts of moderate and high-end climate change across European river basins. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 18, 15-30.
- Lü-Liu, L., Tong, J., Jin-Ge, X., Jian-Qing, Z., & Yong, L. (2012). Responses of hydrological processes to climate change in the Zhujiang River basin in the 21st century. *Advances in Climate Change Research*, 3(2), 84-91.
- Marengo, J. A., Souza, C. A., Thonicke, K., Burton, C., Halladay, K., Betts, R. A., & Soares, W. R. (2018). Changes in climate and land use over the Amazon Region: current and future variability and trends. *Frontiers in Earth Science*, 6, 228.

- Menzel, L., & Matovelle, A. (2010). Current state and future development of blue water availability and blue water demand: a view at seven case studies. *Journal of hydrology*, 384(3-4), 245-263.
- Mizukami, N., Clark, M. P., Gutmann, E. D., Mendoza, P. A., Newman, A. J., Nijssen, B., ... & Brekke, L. D. (2016). Implications of the methodological choices for hydrologic portrayals of climate change over the contiguous United States: Statistically downscaled forcing data and hydrologic models. *Journal of Hydrometeorology*, 17(1), 73-98.
- Montanari, A., Young, G., Savenije, H. H. G., Hughes, D., Wagener, T., Ren, L. L., ... & Blöschl, G. (2013). "Panta Rhei—everything flows": change in hydrology and society—the IAHS scientific decade 2013–2022. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6), 1256-1275.
- Moriassi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763-1785.
- Myneni, R., Knyazikhin, Y., & Park, T. MCD15A2H MODIS/Terra+ Aqua Leaf Area Index/FPAR 8-day L4 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS L. Process. DAAC 2015.
- Nakaegawa, T., & Vergara, W. (2010). First projection of climatological mean river discharges in the Magdalena River Basin, Colombia, in a changing climate during the 21st century. *Hydrological Research Letters*, 4, 50-54.
- Noordwijk, M. V., Creed, I. F., Jones, J. A., Wei, X., Gush, M., Blanco Vaca, J. A., ... & Claasen, M. (2018). Climate-forest-water-people relations: seven system delineations. Irena F. Creed and Meine van Noordwijk (eds.), 2018. *Forest and Water on a Changing Planet: Vulnerability, Adaptation and Governance Opportunities. A Global Assessment Report. IUFRO World Series Volume 38. Vienna. Pp. 27-58.*
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., ... & Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169-180.
- Ortega, G., P.A. Arias, J.C. Villegas, P. A. Marquet, and P. Nobre, 2021: Present-day and future climate over Central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.7221.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., ... & Rafaj, P. (2011). RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic change*, 109(1-2), 33.
- Salazar, J. F., Villegas, J. C., Rendón, A. M., Rodríguez, E., Hoyos, I., Mercado-Bettín, D., & Poveda, G. (2018). Scaling properties reveal regulation of river flows in the Amazon through a forest reservoir. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(3), 1735-1748.
- Sellami, H., Benabdallah, S., La Jeunesse, I., & Vanclooster, M. (2016). Quantifying hydrological responses of small Mediterranean catchments under climate change projections. *Science of the Total Environment*, 543, 924-936.
- Shrestha, R. R., Cannon, A. J., Schnorbus, M. A., & Zwiers, F. W. (2017). Projecting future nonstationary extreme streamflow for the Fraser River, Canada. *Climatic Change*, 145(3), 289-303.
- Shrestha, S., Gunawardana, S. K., Piman, T., & Babel, M. S. (2020). Assessment of the impact of climate change and mining activities on streamflow and selected metal's loading in the Chindwin River, Myanmar. *Environmental research*, 181, 108942.

- Sierra, J. P., Arias, P. A., & Vieira, S. C. (2015). Precipitation over northern South America and its seasonal variability as simulated by the CMIP5 models. *Advances in Meteorology*, 2015.
- Sivapalan, M. (2018). From engineering hydrology to Earth system science: milestones in the transformation of hydrologic science. *Hydrology & Earth System Sciences*, 22(3).
- Sky news (2021). *Germany and Belgium floods: 'Enormous pressure' on dam near Cologne at risk of rupturing - as flood deaths reach 168*. Recuperado de: <https://news.sky.com/story/germany-and-belgium-floods-rescuers-search-for-hundreds-of-missing-as-more-than-120-die-in-historic-disaster-12357532> el 27 de Julio de 2021.
- Sorribas, M. V., Paiva, R. C., Melack, J. M., Bravo, J. M., Jones, C., Carvalho, L., ... & Costa, M. H. (2016). Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. *Climatic change*, 136(3-4), 555-570.
- Strauch, M., & Volk, M. (2013). SWAT plant growth modification for improved modeling of perennial vegetation in the tropics. *Ecological Modelling*, 269, 98-112.
- Su, B., Huang, J., Gemmer, M., Jian, D., Tao, H., Jiang, T., & Zhao, C. (2016). Statistical downscaling of CMIP5 multi-model ensemble for projected changes of climate in the Indus River Basin. *Atmospheric Research*, 178, 138-149.
- Tan, M. L., Yusop, Z., Chua, V. P., & Chan, N. W. (2017). Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of the Kelantan River Basin, Malaysia. *Atmospheric Research*, 189, 1-10.
- Tesemma, Z. K., Wei, Y., Peel, M. C., & Western, A. W. (2015). Including the dynamic relationship between climatic variables and leaf area index in a hydrological model to improve streamflow prediction under a changing climate.
- The Guardian (2021). *China floods: death toll climbs as questions raised over preparedness*. Recuperado de: <https://www.theguardian.com/world/2021/jul/22/china-floods-military-blasts-dam-release-water-as-floods-death-toll-climbs> el 27 de Julio de 2021.
- Thomson, A. M., Calvin, K. V., Smith, S. J., Kyle, G. P., Volke, A., Patel, P., ... & Edmonds, J. A. (2011). RCP4. 5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic change*, 109(1-2), 77.
- Touseef, M., Chen, L., Masud, T., Khan, A., Yang, K., Shahzad, A., ... & Wang, Y. (2020). Assessment of the future climate change projections on streamflow hydrology and water availability over Upper Xijiang River Basin, China. *Applied Sciences*, 10(11), 3671.
- Urrea, V., Mesa, O. J., & Ochoa, A. (2019, December). Trends of Hydroclimatic Intensity in Colombia. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2019, pp. A21U-2665).
- Valencia, S., Salazar, J. F., Villegas, J. C., Hoyos, N., & Duque-Villegas, M. (en revisión). SWAT-Tb with improved LAI representation in the tropics highlights the role of forests in watershed regulation. *Earth and Space Science Open Archive ESSOAr*.
- Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., & Culvenor, D. (2010). Detecting trend 747 and seasonal changes in satellite image time series. *Remote sensing of Environment*, 748 114 (1), 106–115.
- Villamizar, S. R., Pineda, S. M., & Carrillo, G. A. (2019). The Effects of Land Use and Climate Change on the Water Yield of a Watershed in Colombia. *Water*, 11(2), 285.
- Wang, Y., Zhang, N., Wang, D., Wu, J., & Zhang, X. (2018). Investigating the impacts of cascade hydropower development on the natural flow regime in the Yangtze River, China. *Science of the total environment*, 624, 1187-1194.
- Weng, W., Costa, L., Lüdeke, M. K., & Zemp, D. C. (2019). Aerial river management by smart cross-border reforestation. *Land Use Policy*, 84, 105-113.

- Yan, D., Werners, S. E., Ludwig, F., & Huang, H. Q. (2015). Hydrological response to climate change: The Pearl River, China under different RCP scenarios. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 228-245.
- Yuan, X. C., Wei, Y. M., Wang, B., & Mi, Z. (2017). Risk management of extreme events under climate change. *Journal of cleaner production*, 166, 1169-1174.
- Zhang, X., Li, H. Y., Deng, Z. D., Ringler, C., Gao, Y., Hejazi, M. I., & Leung, L. R. (2018). Impacts of climate change, policy and Water-Energy-Food nexus on hydropower development. *Renewable energy*, 116, 827-834.
- Zhong, R., He, Y., & Chen, X. (2018). Responses of the hydrological regime to variations in meteorological factors under climate change of the Tibetan plateau. *Atmospheric Research*, 214, 296-310.
- Zhu, D., Das, S., & Ren, Q. (2017). Hydrological appraisal of climate change impacts on the water resources of the Xijiang basin, South China. *Water*, 9(10), 793.
- Zuo, D., Xu, Z., Zhao, J., Abbaspour, K. C., & Yang, H. (2015). Response of runoff to climate change in the Wei River basin, China. *Hydrological Sciences Journal*, 60(3), 508-522.