Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), marzo-abril 2025,
Volumen 9, Número 2.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2

LA OFERTA HÍDRICA DEL RÍO ZULIA EN COLOMBIA ANTE DOS ESCENARIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

THE WATER SUPPLY OF THE ZULIA RIVER IN COLOMBIA UNDER TWO CLIMATE CHANGE SCENARIOS

Rubén Darío Fernández Cárdenas
Universidad Francisco de Paula Santander Colombia

Gustavo Adolfo Carrillo Soto
Universidad Francisco de Paula Santander Colombia

Jorge Enrique Barrera Cortes
Universidad Francisco de Paula Santander Colombia

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2.17308

La oferta hídrica del río Zulia en Colombia ante dos escenarios del cambio climático

Rubén Darío Fernández Cárdenas[1]
rubendariofc@ufps.edu.co
https://orcid.org/0009-0005-5858-033x
Universidad Francisco de Paula Santander
Colombia

Gustavo Adolfo Carrillo Soto
gustavocarrillo@ufps.edu.co
https://orcid.org/0000-0001-6772-4431
Universidad Francisco de Paula Santander
Colombia

Jorge Enrique Barrera Cortes
jorgebarrera7@yahoo.com.mx
https://orcid.org/0009-0003-5188-5486
Universidad Francisco de Paula Santander
Colombia

RESUMEN

No tener información sobre el impacto del cambio climático genera incertidumbre en la planificación del recurso hídrico. El objetivo de esta investigación fue estimar el cambio climático y su incidencia en la oferta hídrica del río Zulia. Con los escenarios SSP5-8.5 y SSP2-4.5 se proyectaron mensualmente al año 2100 las series de precipitación y de temperatura para las estaciones que miden estas variables y que tienen influencia en la cuenca, utilizando el Proyecto CMIP6. Se generaron al año 2100 las series de precipitación y temperatura media mensual; se obtuvo que al año 2100 la temperatura media anual la cual con el escenario SSP5-8.5 se incrementó 5.09 °C, con el SSP2-4.5 tuvo incremento de 2.63 °C; para el caso de la precipitación anual, con el SSP5-8.5 se proyecta un incremento del 2.19%, y una disminución de la misma del -6.80%; con el modelo hidrológico abcd Thomas, previamente calibrado se simularon los caudales medios mensuales para el mismo periodo de tiempo. Para el año 2100 los resultados indican, que con el SSP5-8.5, se proyecta disminución del caudal medio del 22.04% y con el SSP2-4.5 del 20.76%.

Palabras clave: cambio climático, modelo hidrológico abcd thomas, proyecto cmip6

[1] Autor principal.
Correspondencia: rubendariofc@ufps.edu.co

The water supply of the Zulia river in Colombia under two climate change scenarios

ABSTRACT

Lack of information on the impact of climate change creates uncertainty in water resource planning. The objective of this research was to estimate climate change and its impact on the Zulia River's water supply. Using the SSP5-8.5 and SSP2-4.5 scenarios, monthly precipitation and temperature series were projected to the year 2100 for the stations that measure these variables and that influence the basin, using the CMIP6 Project. Monthly precipitation and average temperature series were generated for the year 2100. It was found that the average annual temperature increased by 5.09 °C in the SSP5-8.5 scenario and increased by 2.63 °C in the SSP2-4.5 scenario. For annual precipitation, an increase of 2.19% is projected for the SSP5-8.5 scenario and a decrease of -6.80%. Using the previously calibrated Thomas hydrological model abcd, the average monthly flows were simulated for the same period. For the year 2100, the results indicate that with SSP5-8.5, the average flow is projected to decrease by 22.04%, and with SSP2-4.5, by 20.76%.

***Keywords*:** climate change, thomas abcd hydrological model, cmip6 project

Artículo recibido: 14 febrero 2025
Aceptado para publicación: 17 marzo 2025

INTRODUCCIÓN

El agua es el insumo vital para la vida, esta se presenta en la naturaleza principalmente en tres estados, líquida, sólida y gaseosa, la investigación y el conocimiento de los diferentes procesos hídricos que se llevan a cabo en el medio ambiente son de gran importancia para hacer su uso sostenible y racional.

De acuerdo al Banco Mundial, la mayoría de las naciones enfrenta una presión sin precedentes sobre sus recursos hídricos. La población mundial crece aceleradamente y, según estimaciones, en 2030 el planeta sufrirá una escasez del 40% entre la demanda proyectada y el agua disponible. (Banco Mundial, 2020).

El Banco Mundial señala que, pese a la abundancia de agua en Colombia, no todos los ciudadanos se benefician de ella. Un tercio de la población urbana de uno de los nueve territorios más ricos en agua del mundo sufre estrés hídrico. En 20 años, la escasez de agua ha crecido por el cambio climático y el aumento poblacional. Colombia enfrenta inseguridad hídrica por excesos, escasez y contaminación del agua, con sequías e inundaciones (Banco Mundial, 2020).

En el Norte de Santander existe una riqueza hídrica importante, en este departamento se ubica el Páramo de Santurbán, el Páramo de Almorzadero y Páramo de Tama. Las más importantes corrientes hídricas del departamento, son principalmente, los ríos, Zulia, Pamplonita, Algodonal y Catatumbo. Según proyecciones del IDEAM al año 2025, Norte de Santander presenta valor alto en dos municipios y valor medio alto en siete municipios en el índice de escasez de agua en cabeceras municipales (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, 2000).

La cuenca del río Zulia en Norte de Santander abarca 15 municipios con una población de 929,641 habitantes (de un total de 1,479,710). De este río se abastece el acueducto de San José de Cúcuta, el distrito de adecuación de tierras de gran escala del río Zulia para irrigar 9,368.87 hectáreas de arroz y se suple el requerimiento de agua de dos plantas generadoras de energía térmica en el municipio de San Cayetano. En 2022, el índice de retención hídrica era del 64% (bajo) y el de vulnerabilidad al desabastecimiento era alto en año medio y muy alto en año seco (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, 2023).

Según los estudios del "Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático – IPCC", los cambios recientes en el clima son sin precedentes en siglos. Esto se debe al incremento en las GEI,

principalmente por acciones del hombre como incinerar combustibles fósiles y la tala indiscriminada para expandir tierras agrícolas. La atmósfera, el océano y la tierra están calentándose, es un hecho. El IPCC sostiene que en los últimos años han ocurrido cambios climáticos sin precedentes, y lo más alarmante es que muchos de estos cambios son irreversibles y solo se podrán remediar en cientos o miles de años. Las acciones humanas son indudablemente culpables de los incrementos en la GEI uniformemente distribuidos desde aproximadamente 1750. Desde 2011, las concentraciones en la atmósfera han crecido incesantemente, logrando promedios anuales de 410 ppm de CO2, 1.886 ppb de metano y 332 ppb de óxido nitroso en 2019 (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático IPCC, 2021).

En 2021, se documentaron cifras récord para cuatro indicadores cruciales del cambio climático, incluyendo gases de efecto invernadero y aumento del nivel del mar. La OMM asegura que esto es una nueva prueba clara de que las actividades humanas están provocando alteraciones en la tierra, el océano y la atmósfera a escala global, y que estas alteraciones tienen efectos nocivos y duraderos para el desarrollo sostenible y los ecosistemas (Organización Meteorológica Mundial OMM , 2022).

El Cambio Climático (Banco Mundial, 2021), se viene manifestando en el mundo con incrementos en la temperatura, en algunas épocas sequías severas y en otras intensas precipitaciones, con fenómenos del Niño y de la Niña cada vez más frecuentes, incremento en el nivel del mar, derretimiento de la nieve polar y de los nevados, tormentas, todo lo que indudablemente afecta negativamente la calidad de vida humana y el hábitat de muchas especies animales, vegetales, insectos y microorganismos en general.

El Cambio Climático (Instituto de Hidrológia, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, 2010) se refiere a la variación en temperatura, precipitación y otras variables climáticas, provocada por las emisiones de gases de efecto invernadero, siendo el dióxido de carbono y el metano (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC, 2021) los que más aceleran esta variabilidad. La variabilidad climática afecta el balance hídrico, lo que impacta en los seres vivos y en la calidad de vida humana.

El artículo de investigación tuvo como objetivo estimar la incidencia del impacto del Cambio Climático con los escenarios SSP5-8.5 y SSP2-4.5 en el caudal medio mensual hasta el año 2100 en la cuenca hidrográfica del río Zulia, delimitada hasta la estación de aforos de IDEAM código 16027060 que se

ubica en Puerto León cuyas coordenadas son latitud 8.3502778 y longitud -72.4347222, con 47 m.s.n.m. de altitud, ubicada en la zona rural del municipio de San José de Cúcuta en el Norte de Santander.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El área de estudio se definió y se delimito en la cuenca del río Zulia hasta el sitio donde se ubica la estación limnigráfica "Puerto León", operada por el IDEAM, en zona rural de San José de Cúcuta, Norte de Santander. El área de estudio es de 312.991,31 hectáreas y corresponde a las partes alta, media y una fracción de la parte baja de la cuenca del río Zulia.

La cuenca analizada está ubicada en la vertiente del Caribe, donde se halla la amplia cuenca del Catatumbo que desemboca en el Lago de Maracaibo en Zulia, Venezuela. La subcuenca del 'Gran Zulia', que abarca las cuencas del río Zulia y su principal afluente, el río Pamplonita, también contribuye sus aguas al Catatumbo, formando parte del sistema hídrico de los Andes Nororientales del país (Corporación Autónoma de la Frontera Nororiental CORPONOR, 2010).

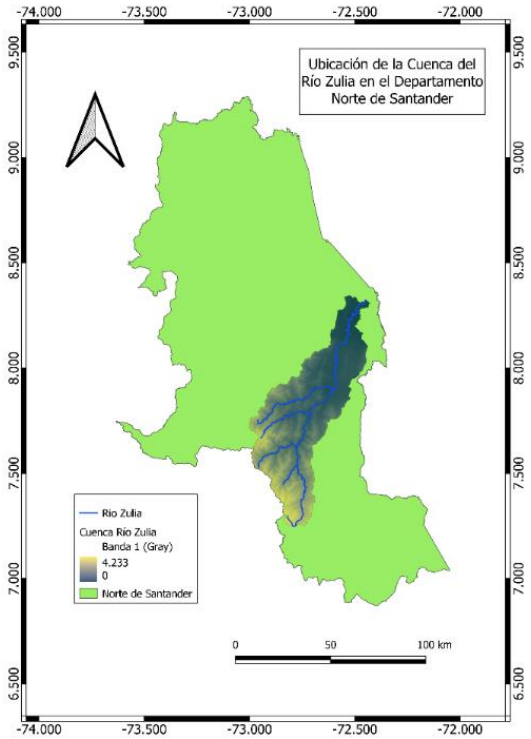
El río Zulia comienza en el Páramo de Santurbán, en el río La Plata, en Silos, Norte de Santander, a 4.123 msnm y fluye hasta Puerto Santander, ingresando luego a Venezuela. El curso principal inicia en Arboledas a 800 msnm y tiene una longitud de 300.08 km (Corporación Autónoma de la Frontera Nororiental CORPONOR, 2010).

Los ríos Cucutilla, Arboledas, Salazar, Peralonso y Pamplonita, así como la quebrada Ocarena, son los principales afluentes del río Zulia (Corporación Autónoma de la Frontera Nororiental CORPONOR, 2010).

Las zonas de origen de fuentes hídricas se extienden desde Mutiscua, Pamplona, Cucutilla, Arboledas, Salazar, Gramalote y El Zulia debido al desvío de aguas sur-occidental y levemente sur-oriental, ubicándose entre 800 y 3.600 m.s.n.m. y abarcan un área de 37.393,88 hectáreas (Corporación Autónoma de la Frontera Nororiental CORPONOR, 2010).

Dentro de la cuenca en estudio se ubican territorios de los municipios de Silos, Arboledas, Cucutilla, El Zulia, Salazar, Gramalote, Mutiscua, Durania, Pamplona, Bochalema, Santiago, San Cayetano, Cúcuta, Puerto Santander y Tibú.

Figura 1: Delimitación de la cuenca del río Zulia hasta la estación del IDEAM "Puerto León.



Fuente: elaboración propia.

Dentro del área de influencia del estudio se ubicaron 19 estaciones para la data de precipitación mensual y 8 estaciones para la data de temperatura media mensual y 1 estación de medición de caudales, operadas por el IDEAM. En la Tabla 1 y en la Tabla 2 se relacionan las estaciones meteorológicas utilizadas para la investigación.

Tabla 1
Estaciones de temperatura IDEAM.

Estación	**Código**	**Latitud**	**Longitud**	**Altitud msnm**
Camilo Daza	16015010	7.93	-72.51	250
Cinera	16020140	8.17	-72.48	96
Sardinata	16035030	8.08	-72.80	320
Iser	16015020	7.37	-72.65	2,340
Salazar	16025030	7.75	-72.83	860
Carmen Tonchalá	16025010	7.85	-72.57	285

Silos	37015010	7.21	-72.75	2,765
Esc. Agr. Cáchira	23195180	7.74	-73.05	1,882

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2
Estaciones de precipitación IDEAM.

Estación	**Código**	**Latitud**	**Longitud**	**Altitud (msnm)**
Carmen de Tonchalá	16025010	7.85	-72.57	285
Santiago Caimito	16020030	7.86	-72.72	411
Gramalote	16020010	7.89	-72.80	1200
Urimaco	16020280	7.90	-72.60	221
Cornejo	16020190	7.90	-72.63	250
Cerro Pelao	16020180	8.01	-72.50	300
Bocatoma río Zulia	16020140	8.08	-72.58	150
Cínera - Villa Olga	16025040	8.17	-72.47	96
Las Vacas	16020250	8.22	-72.53	70
Barrancas	16020130	8.25	-72.53	74
Cucutilla	16020080	7.53	-72.77	1280
La Caldera	16020110	7.32	-72.72	2875
Risaralda	16025020	8.23	-72.53	90
Arboledas	16020050	7.64	-72.80	925
Salazar	16025030	7.78	-72.83	860
Silos	37015010	7.21	-72.75	2765
Lourdes	16030080	7.95	-72.83	1200
Villacaro	16030090	7.92	-72.98	1490
Bagachué	16020060	7.58	-72.93	1750

Fuente: elaboración propia.

Selección del modelo del proyecto CMIP6 que presentó mejor habilidad para representar la precipitación mensual y la temperatura media mensual en la cuenca

Con el proyecto CMIP6 (Programa Mundial de Investigaciones Climaticas- Proyecto de intercompracaión de modelos acoplados del PMIC, 2021) (Programa Mundial de Investigación Climática PMIP, 2021) (Ocean Health Index, 2022) y para los escenarios de cambio climático correspondientes a las trayectorias socio económicas SSP 5-8.5 (altas emisiones GEI) y SSP2-4.5, con las coordenadas de la estación IDEAM Salazar se proyectaron las series históricas de precipitación mensual y temperatura media mensual con los modelos relacionados en la Tabla 3, generando la data mediante la plataforma KNMI Climate Explorer que es una aplicación web para generar y analizar estadísticamente datos climáticos, para cambio climático y decenas de herramientas de análisis; esta plataforma hace parte del Centro Regional sobre el Clima de la Organización Meteorológica Mundial OMM en KNMI (KNMI - OMM, 2022).

Las series históricas simuladas en cada modelo se evaluaron respecto a las series históricas observadas por el IDEAM (Banco Mundial, 2021), para esto, se utilizaron las métricas estadísticas que normalmente se usan para construir los diagramas de Taylor (Rivera, Herrera, & Ochoa, 2022), el RMSE, la DV y correlación (CORR). Para obtener una medida cuantitativa de lo que expresa el diagrama de Taylor se utilizó la distancia mínima (D) de cada simulación al respecto de los datos observados en un sistema de coordenadas tridimensionales (Díaz et.al., 2019) y se elaboró un ranking, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$D = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \qquad (1)$$

$$x = (0 - RMSE) \qquad (2)$$

$$y = (DVobs - DVsim) \qquad (3)$$

$$z = [1 - (CORR)] \qquad (4)$$

Donde el modelo seleccionado es el que menor distancia (D) obtenga al respecto de los datos históricos observados.

Tabla 3
Evaluación Modelos CMIP6 – Precipitación mensual.

Modelo	D
CNRM CM6 1 HR F2	136.47
ACCESSO CM2	137.32
BCC CSM2 MR	137.63
AWI CM 1 1 MR	137.90
FGOALS g3	137.91
INM CM4 8	140.01
FGOALS F3 L	140.67
GFDL ESM4	141.37
KACE 1 O G	141.89
MIROC ES2L	142.88
CMCC CM2	143.19
CESM2 WACCM	144.06
GISS E2 1 G p3	144.66

Fuente: elaboración propia.

Se observa que de los trece (13) modelos de circulación global (MCG) evaluados del proyecto de intercomparación de modelos climáticos CMIP6, los que mejor representan la precipitación mensual en la cuenca hidrográfica del río Zulia en estudio son: CNRM CM6 1 HR F2, ACCESSO CM2, BCC CSM2 MR y AWI CM 1 1 MR.

Para la evaluación de estos trece (13) modelos en cuanto a su habilidad para representar la temperatura media de la cuenca en estudio se utilizó la misma metodología antes descrita. Los resultados de la evaluación se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4
Evaluación Modelos CMIP6 – Temperatura mensual.

Modelo	D
CNRM CM6 1 HR F2	2.74
INM CM4 8	3.19
FGOALS F3 L	3.34
GFDL ESM4	3.56
MIROC ES2L	3.89
FGOALS g3	4.27
CESM2 WACCM	4.36
ACCESSO CM2	4.36
AWI CM 1 1 MR	4.43
KACE 1 O G	4.52
CMCC CM2	4.55
GISS E2 1 G p3	4.63
BCC_CSM2_MR	5.16

Fuente: elaboración propia.

De los modelos evaluados, los que mejor habilidad presentan para representar la temperatura media de la cuenca son: CNRM CM6 1 HR F2, INM CM4 8, FGOALS F3 L y GFDL ESM4.

Dado que el modelo CNRM CM6 1 HR F2 mostró la mejor representación de la temperatura media mensual y la precipitación mensual en las evaluaciones, se eligió para aplicarlo en esta investigación por ser el que mejor habilidad tiene para proyectar las variables mencionadas en la cuenca del río Zulia en Colombia.

Este modelo, con resolución nominal de 50 km, fue desarrollado en mayo de 2019 por el instituto francés CNRM y el CERFACS (KNMI - OMM, 2022).

Proyección y regionalización de las series de cambio climático de temperatura media mensual y de precipitación mensual para las estaciones IDEAM seleccionadas.

Con el modelo CNRM CM6 1 HR F2, y para las coordenadas de cada una de las estaciones IDEAM relacionadas en las Tablas 1 y 2, utilizando los escenarios SSP 5-8.5 y SSP2-4.5 (Instituto de Hidrológia,

Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, 2010) del CMIP6 se simularon las series de temperatura media mensual y de precipitación mensual desde el año 1850 hasta el año 2100. De la información histórica simulada se trabajó con el mismo periodo de tiempo con el cual se obtuvo la data observada por el IDEAM, con esta información se calculó la media mensual de la data observada (periodo 1980-2009) y la media mensual de la data histórica simulada.

Los modelos de circulación global ayudan a prever cambios climáticos futuros, ofreciendo información en escalas más amplias que los modelos hidrológicos. Para evaluar el impacto regional del cambio climático, es necesario regionalizar los MCG (Díaz & Suaréz, 2019) (Maraun, 2010).

El método lineal de reducción del sesgo estadístico (LS) regionaliza datos simulados por estación. Según Lenderink et al. (2007), su objetivo es igualar la media de los valores corregidos y observados. El método ajusta las diferencias entre datos observados y simulados con valores de corrección mensuales para precipitación y temperatura (Fange *et al.,* 2015) (Gomez, 2021):

$$Pcor, md = Praw, m, d * \left[\frac{\mu(Pobs, m)}{\mu(Praw, m)}\right] \qquad (5)$$

$$Tcor, m, d = \\ = Traw, m, d + \mu(Tobs, m) \\ -(\mu(Traw, m) \qquad (6)$$

Para el dowscaling o regionalización de las series de cambio climático se trabajó con referencia al periodo de tiempo desde enero de 1980 hasta diciembre de 2009. En las ecuaciones (5) y (6), *Pcor,m,d y Tcor,m,d* son la precipitación y la temperatura corregida (regionalizada) en el n-ésimo mes del n-ésimo año (mm y °C); *Praw,m,d y Traw,m,d* son la precipitación y la temperatura simulada no regionalizada en el n-ésimo mes del n-ésimo año (mm y °C); *μ(Pobs,m)* es la media de la precipitación mensual observada (mm); *μ(Praw,m),* es la media de la precipitación media mensual simulada histórica (mm); *μ(Tobs,m)* es la media de la temperatura mensual observada (°C); *μ(Traw,m)* es la media de la temperatura mensual simulada histórica.

Con las ecuaciones (5) y (6) se regionalizaron las series simuladas para cambio climático con proyección mensual hasta el año 2100, para cada una de las estaciones relacionadas en las tablas 1 y 2.

Calibración del modelo hidrológico abcd Thomas para la simulación de caudales medios mensuales

Utilizando el software QGIS 3.28, utilizando el método de polígonos de Thiessen, con la información histórica de temperatura media mensual, precipitación mensual observada por el IDEAM desde enero de 1980 hasta diciembre de 1999 en las estaciones relacionadas en las tablas 1 y 2, se obtuvo la temperatura media mensual observada, y la precipitación mensual observada de la cuenca previamente delimitada hasta la estación IDEAM Puerto León código 16027060, cuyas coordenadas son latitud 8.3503 y longitud -72.4347, con altitud de 47 m.s.n.m., con esta información, aplicando el modelo hidrológico abcd Thomas (Loaiza, 2016) con un código en Python se simularon los caudales medios mensuales para el periodo de tiempo correspondiente a las variables mencionadas observadas (1980 a 1999); con la referencia de la data de caudales medios observados en este mismo periodo de tiempo por el IDEAM en la estación "Puerto León" se calibró el modelo para la cuenca en estudio.

En la calibración del modelo, los valores obtenidos para las funciones objetivo seleccionadas, indican que el modelo hidrológico abcd Thomas obtenido, representa "muy bien" (Molnar, 2011) la cuenca hidrográfica del río Zulia, estos son R^2=0.798, el índice Nash-Suctliffe NSE=0.798, el índice de eficiencia de Kling – Gupta KGE=0.824.

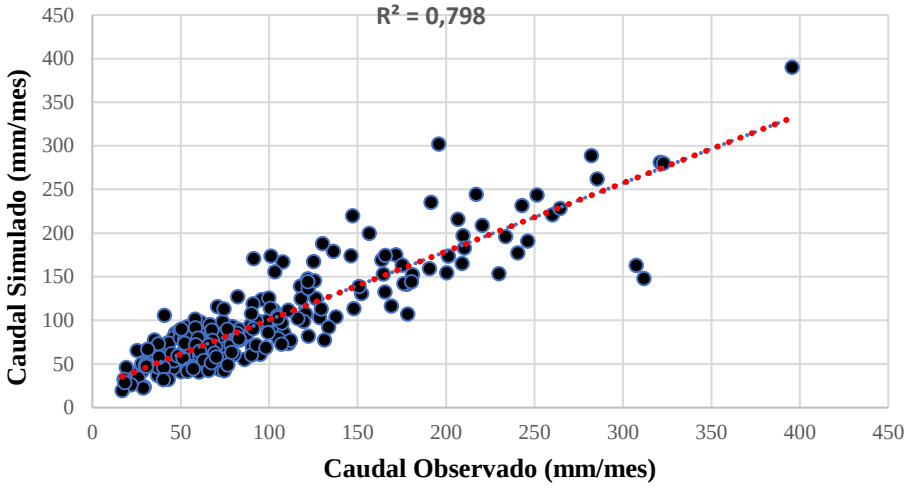
Las condiciones iniciales que se tuvieron Sw_0= 400 (almacenamiento inicial del suelo) y Sg_0= 100 (almacenamiento inicial de la zona saturada). Los parámetros del modelo hidrológico abdc Thomas que tuvieron los anteriores valores de los índices de evaluación del modelo fueron:

a = 0.92 c = 0.01

b = 630 d = 0.01

Gráfico 1

Gráfico de dispersión Calibración del modelo abcd Thomas para la cuenca del río Zulia.



Fuente: elaboración propia.

Simulación de caudales medios mensuales proyectados para la cuenca en estudio hasta el año 2100.

Con las series regionalizadas de temperatura media mensual y precipitación mensual para cada una de las estaciones relacionadas en las tablas 1 y 2, y con el modelo hidrológico abcd Thomas calibrado para el caso en estudio, se simularon los caudales medios mensuales hasta el año 2100 para cada uno de los escenarios SSP 5.8.5 y SSP2-4.5 del modelo CNRM CM6 1 HR F2, del proyecto CMIP6.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

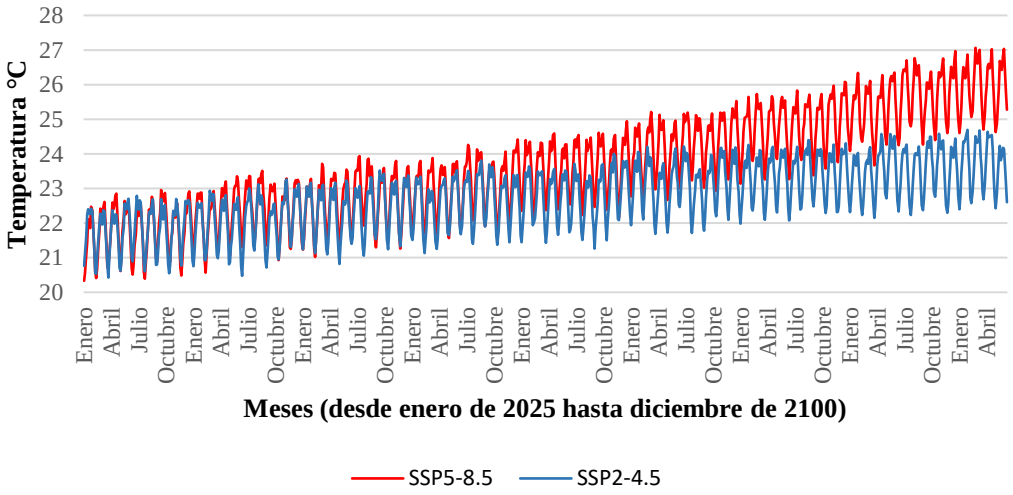
Dentro de las variables hidrometeorológicas que se relacionan con el balance hídrico están, la temperatura media mensual y la precipitación mensual, estas se constituyen en una parte de los datos de entrada del modelo hidrológico abcd Thomas, que tiene como salida los caudales medios mensuales. Para la cuenca hidrográfica del río Zulia en el escenario futuro de cambio climático más crítico de los dos planteados, el SSP5-8.5, se estima que la temperatura media anual al año 2050 tenga incremento de 1.94 °C y para el año 2100 tenga incremento de 5.09 °C. Con este escenario, para el caso de la precipitación anual se prevé que para el año 2050 la precipitación tenga incremento de 1.14% y para el año 2100 tenga incremento del 2.19%. Para el escenario SSP2-4.5 el incremento de las temperaturas proyectado es menor que las temperaturas simuladas con el escenario SSP5-8.5; para la precipitación, este proyecta disminuciones para los años 2050 y 2100, del 3.49% y del 6.80% respectivamente.

Tabla 5
Variación de Temperatura Simulada Cuenca río Zulia al año 2100 (°C).

Año	Variación SSP2-4.5	Variación SSP5-8.5
2030	0.87	0.87
2040	0.95	1.52
2050	1.60	1.94
2070	2.29	3.07
2090	2.65	4.25
2100	2.63	5.09

Fuente elaboración propia.

Gráfico 2
Temperaturas medias simuladas para la cuenca del río Zulia con los dos escenarios de cambio climático.



Fuente: elaboración propia.

La precipitación media anual multianual para el periodo histórico observado (1980 – 1999) es de 1,815.69 mm. Para el escenario SSP5-8.5, en el periodo desde el año 2081 hasta el año 2100 se proyecta una precipitación media mensual multianual al respecto de la precipitación media mensual multianual histórica con variación negativa en los meses de enero, febrero, marzo, abril y diciembre; abril que es el mes históricamente es más lluvioso, para el periodo en mención disminuye su precipitación hasta un -12.99%. La precipitación media anual multianual simulada para el periodo de tiempo desde enero de 2061 hasta diciembre de 2080, prevé variación negativa en los meses de febrero, marzo y abril, siendo el mes de abril el de mayor disminución con un -15.53%; en los otros meses del año esta variable simula incremento, siendo el mes de junio con un +13.74% el de mayor aumento. La precipitación media anual

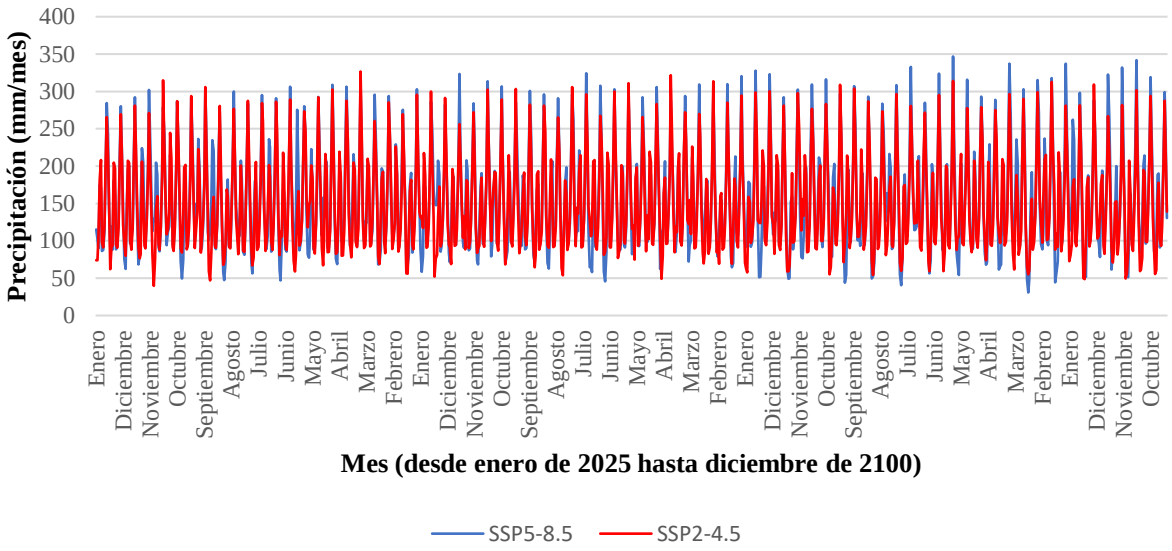
multianual simulada en este escenario para el periodo de tiempo desde enero de 2041 hasta diciembre de 2060 prevé variación negativa en los meses de febrero, abril, septiembre y diciembre, históricamente el mes más lluvioso es abril, este es el que mayor disminución proyecta de esta variable pudiendo llegar hasta un -8.53%; para el segundo semestre históricamente octubre es el mes más lluvioso, este mes con este escenario para el periodo en mención proyecta un incremento de precipitación de hasta +6.44%.

Tabla 6
Precipitación multianual (mm/año) Simulada en Cuenca río Zulia al año 2100 (°C).

Periodo	Precipitación SSP2-4.5	Precipitación SSP5-8.5
2041 - 2060	1,822.75	1,858.23
2061 - 2080	1,838.73	1,838.29
2081 - 2100	1,793.90	1,822.22

Fuente: elaboración propia.

Gráfico 1
Precipitación Simulada río Zulia con los dos escenarios de Cambio Climático.



Fuente: elaboración propia.

Para el periodo desde los años 2081 al 2100, con el escenario SSP5-8.5 se estima que se presente disminución en 11 de los 12 meses de caudales medios multianuales, en este periodo el caudal medio anual multianual prevé disminución del 17.07% respecto a los históricos observados, esta disminución se proyecta con mayor proporción en los meses de abril y mayo, se estima que el mes con caudal medio más bajo podrá ser julio con 46.14 mm y el que el mes con mayor caudal sea octubre con 160.6 mm. Para el escenario SSP2-4.5 se simula que el caudal medio anual multianual tenga disminución del

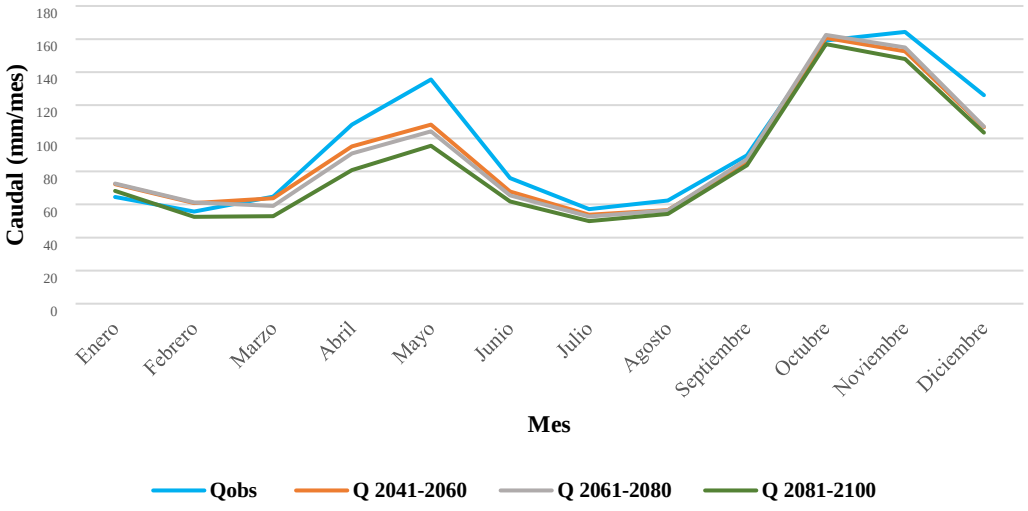
13.38%, el mes donde se prevé el menor caudal con este escenario es julio con 49.41 mm y el mes que proyecta el mayor caudal será octubre con 156.91 mm.

Tabla 7
Caudales río Zulia – Caudales estimados para el periodo 2081 al 2100 - Comparativo de cada escenario con los observados en la estación IDEAM Puerto León.

Mes	**Q Obs Hist (mm)**	**Q SSP2-4.5 (mm)**	**Q SSP5-8.5 (mm)**
Enero	64.57	68.14	62.00
Febrero	55.71	52.50	48.94
Marzo	64.71	52.82	46.16
Abril	108.25	80.75	71.55
Mayo	135.46	95.43	90.65
Junio	75.85	61.75	58.05
Julio	57.24	49.91	46.14
Agosto	62.30	54.19	51.20
Septiembre	89.59	83.76	79.38
Octubre	159.09	156.91	160.60
Noviembre	164.30	147.90	151.00
Diciembre	126.07	103.45	98.91
Promedio año	**96.93**	**83.96**	**80.38**

Fuente: elaboración propia.

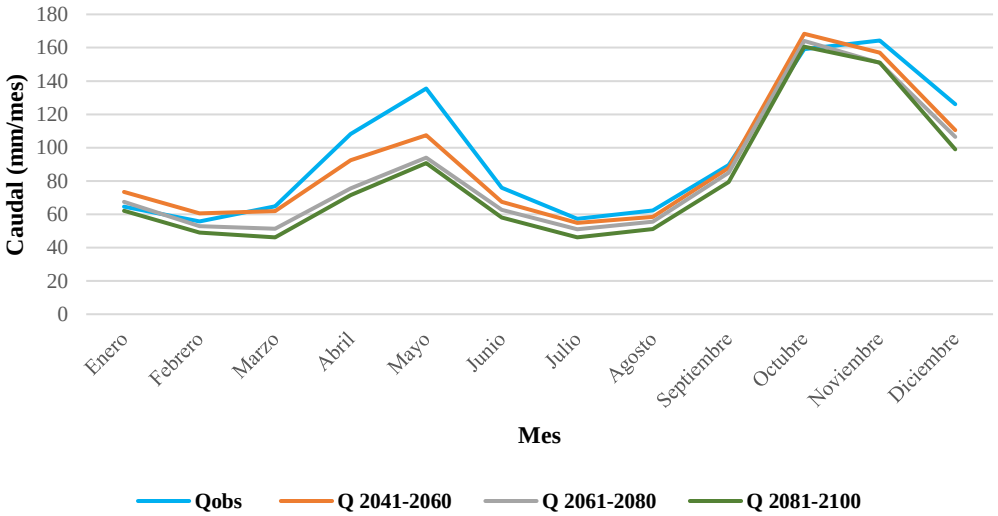
Gráfico 2
Caudal Simulado río Zulia con el escenario SSP2-4.5.



Fuente elaboración propia.

En el análisis de caudales medios mensuales multianuales simulados en los escenarios SSP5-8.5 y SSP2-4.5, se observa que para los primeros semestres de cada año se prevé disminución del caudal medio mensual al respecto del caudal histórico observado, este sería más crítico en los meses de abril y mayo, para los segundos semestres de cada año se simula que esta disminución del caudal medio mensual sea menos intensa que la de los primeros semestres; octubre se espera que sea el mes con mayor oferta hídrica en la cuenca hidrográfica en estudio, es este mes el que presenta la tendencia a presentar caudales mayores a los observados históricamente.

Gráfico 5
Caudal Simulado río Zulia con el escenario SSP5-8.5.



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

El proyecto de intercomparación de modelos climáticos CMIP6 que tiene más de 32 modelos para la generación de series de cambio climático de temperatura media mensual y de precipitación mensuales se constituye en una herramienta básica para investigaciones regionales sobre el cambio climático; para la regionalización de estas es de gran importancia contar con información histórica observada en la región objeto de la investigación.

De los trece (13) modelos CMIP6 evaluados para cambio climático el que mejor representa la temperatura media mensual y la precipitación mensual de la cuenca del río Zulia, Norte de Santander, Colombia, es el modelo francés CNRM CM6 1 HR F2.

Para la cuenca hidrográfica del río Zulia debido al efecto del cambio climático en consideración al escenario más crítico de los dos estudiados, el SSP 5-8.5 del CMIP6 para las simulaciones mensuales del periodo entre el año 2041 al 2060 se estima una reducción del caudal medio multianual del 4.29%, los meses donde se presentará mayor disminución del caudal medio mensual serían abril con -14.66% y mayo con -20.72%. Para el periodo entre los años 2081 al 2100 se estima disminución del caudal medio anual multianual en un 17.71%, los meses de proyección de mayor disminución del caudal son abril con -33.91% y mayo con -33.08%.

La tendencia de los caudales simulados en este escenario en relación con los caudales de referencia observados es a la disminución en un 75.66% de los meses simulados desde enero de 2025 hasta diciembre de 2100. De los 912 meses simulados el 9.65% presentan tendencia a tener caudales con incremento mayor al 10% al respecto de los de referencia y el 47.80% de los meses simulados presenta tendencia a tener caudales con disminución mayor al 10% al respecto de los de referencia. Se prevé que con el aumento de los años simulados y entre más se aproximen al año 2100 será más crítico el déficit hídrico en los primeros semestres de cada año, para los segundos semestres se da la tendencia a tener déficit hídrico con menor proporción de crecimiento que al de los primeros semestres de cada año.

Teniendo en cuenta que la proyección de la población futura es creciente y la oferta hídrica de esta cuenca es decreciente, es importante que el Gobierno Nacional, Regional, la autoridad ambiental regional CORPONOR, el sector productivo y los quince (15) municipios que hacen parte de la cuenca

del río Zulia, planifiquen el uso del recurso hídrico de manera sostenible ambientalmente, de lo contrario los efectos serán muy perjudiciales para su población causando la disminución de su calidad de vida.

Con cualquiera de los escenarios SSP5-8.5 o SSP2-4.5 se cambiará la distribución geográfica de las zonas climáticas de la cuenca hídrica del río Zulia en Colombia, alterando la distribución y abundancia de especies vegetales y animales, afectando también, el comportamiento, los ciclos de vida, los rendimientos y la capacidad de ecosistemas de garantizar la oferta de bienes y servicios ambientales que prestan en el presente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Banco Mundial. (2020, septiembre 2). *Colombia: rica en agua, pero con sed de inversiones* [En línea]. https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2020/09/02/colombia-water-security

Banco Mundial. (2021). *¿Qué es el cambio climático?* [En línea]. https://climateknowledgeportal.worldbank.org/overview [Accedido: 08-may-2023].

Banco Mundial. (2023, mayo 19). *Involucrarse más: ¿Cómo resguardar los recursos hídricos de América Latina?* [En línea]. https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2023/05/19/involucrarse-mas-como-resguardar-los-recursos-hidricos-de-america-latina

CORPONOR Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental. (2010). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Zulia* [En línea]. https://corponor.gov.co/publica_recursos/pomca/zulia/POMCH_COMPLETO-RIO_ZULIA.pdf. [Accedido: 08-may-2023].

Díaz González, P. V., & Suarez Rodríguez, A. M. (2019). *Modelación hidrológica para el pronóstico de sequías en la cuenca del río Pamplonita bajo escenarios de cambio climático* [Tesis de grado, Universidad Santo Tomás, Colombia]. https://hdl.handle.net/11634/15306. [Accedido: 18-ago-2023].

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2000). *Estudio Nacional del agua* (p. 251). [En línea]. http://www.ideam.gov.co/documents/14691/125687935/Estudio+Nacional+del+Agua.pdf/87672672-962e-4fc2-89a2-98728bb90f92?version=1.0. [Accedido: 04-may-2023].

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2010). *Guía procedimiento para la generación de escenarios de cambio climático regional y local a partir de los modelos globales* [En línea]. http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gu%C3%ADa+Escenarios+Cambio+Climatico.pdf/72eae24f-04ea-4ce2-9a4b-e551559c48fc. [Accedido: 09-may-2023].

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2023). *Estudio Nacional del agua 2022* (p. 464). [En línea]. http://www.ideam.gov.co/web/agua/estudio-nacional-del-agua/-/document_library_display/hWSQik0LFPrw/view/125666586. [Accedido: 04-may-2023].

IPCC Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2008). *El cambio climático y el agua – Documento Técnico VI del IPCC* [En línea]. https://archive.ipcc.ch/pdf/technical-papers/ccw/climate-change-water-sp.pdf. [Accedido: 17-may-2023].

IPCC Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. (2021). *Resumen para responsables de políticas. En: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.)]. Cambridge University Press. [En línea]. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf. [Accedido: 19-may-2023].

KNMI Climate Explorer, Organización Meteorológica Mundial OMM. (2022). *Ejecuciones mensuales del escenario CMIP6* [En línea]. https://climexp.knmi.nl. [Accedido: 15-jul-2023].

Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A., Chandler, R., Kendon, E., Widmann, M., Rust, H., Sauter, T., Themeßl, M., Venema, V., Chun, K., Goodess, C., Jones, R., Onof, C., & Vrac, M. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics, 48*, 24 de septiembre. https://doi.org/10.1029/2009RG000314. [Accedido: 19-ago-2023].

OMM – Organización Meteorológica Mundial. (2022). *Cuatro indicadores claves del cambio climático batieron récords en 2021* [En línea]. https://wmo.int/es/media/cuatro-indicadores-clave-del-cambio-climatico-batieron-records-en-2021

Ocean Health Index. (2022). *CMIP6 búsqueda de datos* [En línea]. https://oceanhealthindex.org/news/cmip_2_what_is_this [Accedido: 07-may-2023].

PMIC Programa Mundial de Investigación Climática. (2021). *PMIP – Proyecto de intercomparación de modelos paleoclimáticos* [En línea]. https://www.wcrp-climate.org/modelling-wgcm-mip-catalogue/cmip6-endorsed-mips-article/1064-modelling-cmip6-pmip. [Accedido: 05-may-2023].

Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC). (2021). *Proyecto de intercomparación de modelos acoplados (CMIP) del PMIC* [En línea]. https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip. [Accedido: 11-may-2023].

Rivera, P., Herrera, E., & Ochoa, W. (2022). Comparación de series mensuales de precipitación y temperaturas de los modelos CMIP6 para Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud, 9*(2). https://doi.org/10.36829/63CTS.v9i2.1285. [Accedido: 11-jun-2023].