

**Evaluación de la oferta hídrica disponible para el sistema de abastecimiento del municipio de Ibagué ante escenarios de cambio climático**

**Eduwar Ballesteros Cantor**

**Universidad Santo Tomás, Bogotá D.C**

**Facultad de Ciencias Ambientales**

**Maestría en Gestión de Cuencas Hidrográficas**

**2026**

**Evaluación de la oferta hídrica disponible para el sistema de abastecimiento del municipio de Ibagué ante escenarios de cambio climático**

**Eduwar Ballesteros Cantor**

**Trabajo de grado para optar el título Magister en Gestión de Cuencas Hidrográficas**

**Director**

**Hidrosistemas, M. Sc Miguel Ángel Cañón Ramos**

**Universidad Santo Tomas, Bogotá D.C**

**Facultad de Ciencias Ambientales**

**Maestría en Gestión de Cuencas Hidrográficas**

**2026**

## Tabla de contenido

Resumen .....	6
Abstract.....	8
Introducción y planteamiento del problema .....	10
1. Objetivos .....	12
2. Alcance del proyecto .....	12
3. Pregunta de investigación .....	12
4. Marco teórico.....	13
4.1 Análisis exploratorios de datos .....	13
4.2 Modelación, calibración y validación.....	24
4.3 Escenarios de cambio climático .....	32
5. Metodología .....	46
5.1 Etapa 1: Recolección de información.....	47
5.2 Etapa 2: Generación de un modelo hidrológico.....	52
5.3 Etapa 3: Simulación de oferta ante escenarios de cambio climático .....	54
6. Resultados .....	60
6.1 Etapa 1: Análisis y recolección de información .....	60
6.2 Etapa 2: Modelación hidrológica.....	77
6.3 Etapa 3: Simulación de oferta ante escenarios de cambio climático.....	83
7. Recomendaciones de adaptación.....	96
8. Conclusiones.....	99
9. Anexos .....	102
10. Bibliografía .....	102

## Índice de figuras

<b>Figura 1:</b> Fundamento del modelo GR4J.....	27
<b>Figura 2:</b> <i>Desarrollo general de la metodología</i> .....	47
<b>Figura 3:</b> Delimitación de la cuenca Río Combeima, municipio de Ibagué y bocatomá .....	60
<b>Figura 4:</b> Curva hipsométrica de la cuenca río Combeima .....	65
<b>Figura 5:</b> Estaciones alrededor de 30 km del río Combeima. ....	66
<b>Figura 6:</b> Análisis de completitud estaciones de precipitación .....	67
<b>Figura 7:</b> <i>Estaciones de caudales</i> .....	67
<b>Figura 8:</b> <i>Estaciones climáticas seleccionadas</i> .....	68
<b>Figura 9:</b> Valores atípicos de la estación precipitación El Secreto 21210080 de precipitación. 70	
<b>Figura 10:</b> Resumen de la aleatoriedad variable precipitación .....	72
<b>Figura 11:</b> Análisis de la serie de tiempo diario, mensual y anual.....	74
<b>Figura 12:</b> Análisis de serie de tiempo multianual Enso de la estación El secreto 21210080. .76	
<b>Figura 13:</b> Caudal observado versus caudal simulado .....	78
<b>Figura 14:</b> Calibración de caudal observado vs caudal simulado vs precipitación y curva de duración.....	80
<b>Figura 15:</b> Validación de caudal observado vs caudal simulado vs precipitación y curva de duración.....	82
<b>Figura 16:</b> Comportamiento intra-anual de la variable precipitación estación El secreto 21210080.....	85
<b>Figura 17:</b> Evolución anual de la precipitación proyectada en diferentes SSP estación El secreto 21210080. ....	87
<b>Figura 18:</b> Proyección de habitantes para el año 2100.....	88
<b>Figura 19:</b> Demanda hídrica de la población de Ibagué. ....	89
<b>Figura 20:</b> Disponibilidad de agua en el escenario SSP1-2.6.....	90
<b>Figura 21:</b> Disponibilidad de agua en el escenario SSP2-4.5.....	92
<b>Figura 22:</b> Disponibilidad de agua en el escenario SSP3-7.0 .....	93
<b>Figura 23:</b> Disponibilidad de agua en el escenario SSP5-8.5.....	94

## Índice de tablas

<b>Tabla 1:</b> Morfometría de la cuenca río Combeima. ....	61
<b>Tabla 2:</b> Resultados de la calibración del modelo GR4J. ....	79
<b>Tabla 3:</b> Resultados de la validación del modelo GR4J. ....	81

## Resumen

El presente documento denominado la evaluación de la oferta hídrica disponible para el sistema de abastecimiento del municipio de Ibagué frente a escenarios de cambio climático, se toma el área de estudio de la cuenca del río Combeima, principal fuente de abastecimiento de agua potable para la población. El desarrollo de este proyecto surge ante la necesidad de analizar el impacto de la variabilidad climática, disminución observada en caudales.

La metodología del estudio se desarrolló en tres etapas, en la primera se realizó la recopilación, depuración y análisis de información hidrometeorológica, incluye precipitación, temperatura, evatranspiración y caudales, evaluando los criterios de calidad, completitud y consistencia estadística. De forma paralela, se ejecutó la morfometría de la cuenca mediante herramientas SIG y modelos digitales de elevación, permitiendo comprender el comportamiento hidrológico.

La segunda etapa se implementa el modelo hidrológico GR4J, el cual fue calibrado y validado utilizando series históricas diarias de caudales, precipitación y evatranspiración potencial. La modelación permite simular el comportamiento hidrológico de la cuenca y estimar la oferta hídrica bajo las condiciones actuales.

Seguido a ello, para la tercera etapa, se evaluó la oferta hídrica futura mediante la incorporación de proyecciones climáticas a partir del sexto informe de evaluación del IPCC, utilizando modelos de circulación global y escenarios socioeconómicos SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5.

Las proyecciones fueron ajustadas por medio de procesos de downscaling, corrección de sesgos y ensamblé REA, generando series futuras diarias de precipitación, temperatura y evatranspiración potencial que alimentan el modelo hidrológico para la simulación de caudales futuros.

Los resultados evidencian una disminución progresiva de la oferta hídrica disponible bajo los diferentes escenarios climáticos, acompañado de un incremento de la demanda asociado al crecimiento poblacional. La comparación entre oferta y demanda demuestra condiciones de déficit hídrico, especialmente en escenarios de mayores emisiones, comprometiendo la sostenibilidad del abastecimiento a largo plazo.

Finalmente, se propone unas recomendaciones de adaptación orientadas a la gestión eficiente de la demanda, la protección de ecosistemas reguladores, fortalecimiento del almacenamiento hídrico y la planificación del recurso bajo los criterios de cambio climático. Estos resultados permiten construir un insumo técnico para toma de decisiones en la gestión integral del agua y la planificación territorial del municipio de Ibagué.

## **Abstract**

This document, entitled "Evaluation of the Available Water Supply for the Ibagué Municipality's Water System Under Climate Change Scenarios," focuses on the Combeima River basin, the main source of drinking water for the population. This project arose from the need to analyze the impact of climate variability and the observed decrease in river flows.

The study methodology was developed in three stages. The first stage involved the collection, refinement, and analysis of hydrometeorological data, including precipitation, temperature, evapotranspiration, and flows, evaluating the criteria of quality, completeness, and statistical consistency. Simultaneously, the basin's morphometry was carried out using GIS tools and digital elevation models, allowing for an understanding of its hydrological behavior.

The second stage involved implementing the GR4J hydrological model, which was calibrated and validated using daily historical series of flows, precipitation, and potential evapotranspiration. This model allows for the simulation of the basin's hydrological behavior and the estimation of water supply under current conditions. Following this, for the third stage, future water supply was evaluated by incorporating climate projections from the IPCC Sixth Assessment Report, using global circulation models and socioeconomic scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5.

The projections were adjusted through downscaling, bias correction, and REA assembly processes, generating future daily series of precipitation, temperature, and potential evapotranspiration that feed the hydrological model for simulating future flows.

The results show a progressive decrease in available water supply under the different climate scenarios, accompanied by an increase in demand associated with population growth. The comparison between supply and demand demonstrates water deficit conditions, especially in scenarios with higher emissions, compromising the long-term sustainability of the water

supply. Finally, adaptation recommendations are proposed, focusing on efficient demand management, the protection of regulatory ecosystems, strengthening water storage, and resource planning under climate change criteria. These results provide a technical input for decision-making in integrated water management and territorial planning for the municipality of Ibagué.

## **Introducción y planteamiento del problema**

El acelerado desarrollo industrial y el crecimiento poblacional, tanto actual como proyectado, han generado modificaciones significativas en las condiciones meteorológicas promedio del planeta (Adedeji et al., 2014). En este contexto, se ha evidenciado un incremento en la frecuencia e intensidad de fenómenos extremos, tales como precipitaciones intensas, olas de calor y eventos de sequía. Estos fenómenos pueden tener un origen natural o estar asociados a la intervención antrópica, particularmente a la emisión de gases de efecto invernadero y a los cambios en el uso del suelo (Adedeji et al., 2014; Anderson et al., 1995)

En relación con el recurso hídrico, las alteraciones en las condiciones hidrometeorológicas, tanto a escala espacial como temporal, pueden generar impactos negativos sobre las poblaciones, afectando la disponibilidad, calidad y sostenibilidad del agua (Adedeji et al., 2014; Poveda German et al., 2001).

El municipio de Ibagué, capital del departamento del Tolima (Colombia), cuenta con una extensión aproximada de 1.439 km<sup>2</sup>, una altitud media de 1.285 m s. n. m. y una temperatura promedio de 24 °C. De acuerdo con el censo de 2018, presenta una población cercana a los 529.634 habitantes. El suministro de agua potable es gestionado principalmente por la Empresa Ibagueresa de Acueducto y Alcantarillado (IBAL), cuya principal fuente de captación es el río Combeima, el cual aporta aproximadamente el 80 % del abastecimiento para la ciudad (Universidad de Ibagué, 2024).

La cuenca del río Combeima se extiende desde el Nevado del Tolima, a una altitud aproximada de 5.200 m s. n. m., hasta su desembocadura en el río Coello, a 700 m s. n. m., atravesando los municipios de Cajamarca, Anzoátegui, Alvarado, Piedras, Coello, San Luis y Rovira. Esta cuenca presenta un área aproximada de 279,48 km<sup>2</sup>, lo que la convierte en un sistema estratégico para el abastecimiento hídrico regional (Universidad de Ibagué, 2024).

En los últimos años, y particularmente durante 2024, se han registrado eventos de sequía significativos en el país. En este contexto, el río Combeima, como fuente principal de abastecimiento para Ibagué, ha presentado una disminución aproximada del 23,5 % en su caudal (Redacción Ibagué & El Olfato, 2024). Actualmente, el caudal disponible en condiciones normales es cercano a 9,021 m<sup>3</sup>/s, mientras que la demanda total de agua en la cuenca alcanza aproximadamente 15,77 m<sup>3</sup>/s, lo que evidencia una condición de alto estrés hídrico (Cortolima, 2020).

Ante esta problemática, resulta fundamental evaluar la disponibilidad actual y futura del recurso hídrico en la cuenca del río Combeima, considerando la influencia de la variabilidad climática y los escenarios de cambio climático, con el fin de generar insumos técnicos que contribuyan a la gestión sostenible del recurso y a la toma de decisiones.

En este contexto, la pregunta de investigación se orienta a analizar la variación de la oferta hídrica en la cuenca del río Combeima bajo diferentes escenarios de cambio climático, lo cual define el enfoque del estudio hacia la evaluación de la disponibilidad del recurso en condiciones actuales y futuras. En coherencia con esta pregunta, los objetivos específicos se estructuran en torno a la recopilación y análisis de información hidrometeorológica, la implementación de un modelo hidrológico calibrado y validado, y la simulación de escenarios climáticos que permitan estimar la oferta hídrica.

A su vez, la metodología se organiza en tres etapas que responden directamente a estos objetivos: (uno) análisis de la información base, (dos) modelación hidrológica y (tres) simulación de escenarios de cambio climático. De esta manera, se garantiza la articulación entre la pregunta de investigación, los objetivos planteados y el enfoque metodológico. Finalmente, los resultados obtenidos permiten dar respuesta a la pregunta formulada, evidenciando la variación de la oferta hídrica y su relación con la demanda, lo cual sustenta la

formulación de recomendaciones orientadas a la gestión del recurso hídrico en el municipio de Ibagué.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Evaluar la oferta hídrica del municipio de Ibagué ante escenarios de cambio climático para proponer recomendaciones de adaptación.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Recopilar y analizar la información hidro climatológica disponible del municipio de Ibagué.
- Determinar la oferta hídrica disponible en la condición actual y futura con un modelo calibrado y validado.
- Analizar los resultados de oferta y demanda hídrica en la captación del área de estudio.

## **2. Alcance del proyecto**

Para el alcance del proyecto se cuenta de tipo correlación como lo menciona Sampieri (Sampieri Roberto, 2014), debido a que el propósito es identificar si existe una relación significativa entre las proyecciones de los diferentes escenarios de cambio climático y disponibilidad de agua en las fuentes hídricas en el municipio de Ibagué. El estudio adicional cuenta con un alcance descriptivo ya que se realizará una caracterización del sistema de abastecimiento actual de las fuentes hídricas y los patrones de oferta y demanda del agua.

## **3. Pregunta de investigación**

Cómo varía la oferta hídrica en la cuenca del río Combeima bajo los diferentes escenarios de cambio climático del sexto informe del IPCC.

## **4. Marco teórico**

En el presente capítulo se describen los conceptos y metodologías empleados para la caracterización física y espacial de la cuenca, así como el tratamiento estadístico de las series hidrológicas, integrando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el análisis morfométrico. Asimismo, se aborda el uso de modelos hidrológicos, en particular el modelo GR4J, utilizado en el desarrollo de este estudio para la simulación de caudales y la aplicación de técnicas de calibración y validación.

Adicionalmente, se incorporan los conceptos asociados al cambio climático, incluyendo el uso de modelos de circulación general, los escenarios SSP y las técnicas de downscaling y corrección de sesgos, con el propósito de evaluar la respuesta hidrológica futura de la cuenca, la oferta hídrica y la disponibilidad de agua por habitante bajo distintos escenarios climáticos.

### **4.1 Análisis exploratorios de datos**

El esquema metodológico del análisis exploratorio de datos aplicado al estudio hidrológico de una cuenca. El proceso inicia con la carga de la información base como modelos de Elevación Digital para la delimitación de la cuenca y el cálculo de su morfometría.

De manera simultánea, se desarrolla el análisis hidrometeorológico, que incluye la evaluación de la calidad y completitud de los datos, la identificación de valores atípicos mediante pruebas estadísticas por método del Test de Grubbs y método de MADS. Posteriormente, se evalúa la aleatoriedad y tendencia de las series mediante pruebas como Mann-Kendall, regresión lineal y prueba de rachas, integrando finalmente la influencia del ENSO en el comportamiento hidrológico de la cuenca.

#### **4.1.1 Hidrometeorológica**

La información hidrometeorológica corresponde al conjunto de variables que describen el comportamiento del ciclo hidrológico una región determinada (Chow Ven Te et al., 1988;

Maidment et al., n.d.). Estos datos constituyen la base para la comprensión y modelación de procesos como la precipitación, la evapotranspiración, la escorrentía y la infiltración, y son esenciales para la evaluación de la oferta hídrica y la planificación del recurso.

Entre las principales variables empleadas en los estudios hidrológicos se incluyen la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración, el brillo solar y el caudal, las cuales permiten caracterizar de manera integral el funcionamiento hidrológico de una cuenca y su respuesta a la variabilidad climática (Blöschl et al., 2017; Trenberth et al., 2009; World Meteorological Organization, 2008).

Esta información se obtiene a partir de redes de estaciones hidrometeorológicas operadas por entidades oficiales. En Colombia, el monitoreo es realizado principalmente por el IDEAM, cuyos registros constituyen la principal fuente de datos para estudios hidrológicos, climáticos y de gestión del recurso hídrico.

#### **4.1.2 Series hidrológicas, calidad, completitud, confiabilidad Tratamiento de datos.**

Las series hidrológicas son registros temporales de variables como la precipitación, el caudal, la temperatura, brillo solar, humedad relativa y la evapotranspiración. Su correcta interpretación depende de la calidad, completitud y confiabilidad de los datos, los cuales condicionan la validez de los análisis hidrológicos (Wilks Daniel, 2006).

La calidad de los datos se refiere a la exactitud, consistencia y coherencia física, de modo que representen de forma realista el comportamiento de la variable sin errores sistemáticos ni inconsistencias temporales. La completitud corresponde al grado de disponibilidad de los datos dentro de una serie, expresado como el porcentaje de registros existentes respecto al total esperado, lo que permite identificar vacíos y evaluar su representatividad estadística (Teegavarapu & Chandramouli, 2005; Wilks Daniel, 2006).

La Organización Meteorológica Mundial recomienda que las series hidroclimáticas tengan una longitud mínima de 30 años y un porcentaje de datos faltantes inferior al 30 % para garantizar análisis confiables (Kundzewicz & Robson, 2004; World Meteorological Organization, 2008).

El tratamiento estadístico de las series hidroclimáticas comprende el conjunto de técnicas destinadas a depurar, analizar e interpretar los datos con el fin de extraer información representativa y reducir la incertidumbre asociada a los registros (Katz & Brown, n.d.; Wilks Daniel, 2006). Dentro de este proceso, los valores atípicos corresponden a observaciones que se apartan del comportamiento general de la serie y pueden deberse tanto a errores de medición como a eventos hidrológicos extremos reales. Para su identificación se emplean pruebas como el test de Grubbs y la desviación absoluta mediana (MADS), que difieren en sus supuestos estadísticos y sensibilidad a valores extremos (Grubbs, 1969; Wilks Daniel, 2006).

#### **4.1.2.1 Método de MADS**

El método MADS (Median Absolute Deviation from the Median) es una técnica estadística robusta empleada para la detección de valores atípicos en series de datos, especialmente adecuada cuando no se cumple el supuesto de normalidad (Helsel et al., n.d.; Wilks Daniel, 2006). A diferencia de los métodos basados en la media y la desviación estándar, el MADS reduce la influencia de valores extremos, permitiendo una identificación más confiable de anomalías en series hidrológicas.

El método se fundamenta en el cálculo de la desviación absoluta de cada observación respecto a la mediana de la serie, lo cual permite cuantificar la dispersión de los datos de manera robusta. La desviación absoluta mediana (MAD) se define como:

$$MAD = \text{Mediana} (|X_i - \text{Mediana}(x)|)$$

**Fuente:** Ecuación tomada de (Helsel et al., n.d.).

Posteriormente, este valor puede ser escalado (MADs) para hacerlo comparable con la desviación estándar bajo condiciones de normalidad:

$$MADs = 1.4826 * MAD$$

**Fuente:** Ecuación tomada de (Helsel et al., n.d.).

Un valor es considerado atípico cuando su desviación respecto a la mediana supera un umbral definido en función de la desviación absoluta mediana escalada:

$$[Xi - media(x)] > K * MADs$$

**Fuente:** Ecuación tomada de (Helsel et al., n.d.).

Donde K corresponde a un factor de tolerancia, comúnmente entre 3 y 3,5, que determina el nivel de sensibilidad en la detección de valores extremos (Wilks Daniel, 2006).

En el contexto hidrológico, el método MADS resulta especialmente útil para identificar eventos extremos reales en variables como la precipitación, sin sesgar el análisis debido a la presencia de distribuciones asimétricas. En este estudio, dicho método se empleó para la detección de valores atípicos en las series de precipitación, permitiendo diferenciar entre eventos hidrometeorológicos extremos y posibles inconsistencias en los datos.

De manera complementaria, el análisis de tendencias y aleatoriedad permite evaluar la existencia de cambios sistemáticos en el tiempo en las series hidroclimáticas, los cuales pueden estar asociados a la variabilidad climática y a posibles modificaciones en el régimen hidrológico (Kundzewicz & Robson, 2004; Milly et al., 2008). Asimismo, este análisis facilita la identificación de la estructura temporal de la serie, permitiendo determinar si presenta

dependencia temporal o un comportamiento estacionario, aspectos fundamentales para la correcta interpretación de los registros hidrológicos (Helsel et al., n.d.; Milly et al., 2008).

La dependencia temporal se manifiesta cuando los valores de la serie presentan correlación a lo largo del tiempo, mientras que un comportamiento estacionario se caracteriza porque sus propiedades estadísticas, como la media y la varianza, permanecen constantes en el tiempo (Milly et al., 2008).

Para la evaluación de estas características, se implementaron de manera complementaria métodos estadísticos como la regresión lineal, utilizada para identificar tendencias determinísticas, y el test no paramétrico de Mann-Kendall, ampliamente aplicado en estudios hidrológicos debido a que no requiere supuestos de normalidad y presenta robustez frente a valores atípicos (Helsel et al., n.d.).

#### **4.1.2.2 Mann Kendall**

El método de tendencia Mann-Kendall es modelo no paramétrico, el cual evalúa si existe una tendencia monótona dentro de una serie de datos en el tiempo (Yue & Wang, 2002).

El cual se emplea 4 pasos para ejecutarlo:

Método estadístico S, el cual compara todos los datos pares de datos de la serie y determina si predominan incrementos o decrecimientos.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i)$$

**Fuente:** Ecuación tomada de (Yue & Wang, 2002).

Donde

- $X_i$  y  $X_j$ ; son valores de la serie

- n: número de observaciones.

Seguido a ello se realiza la Varianza de S, donde mide la variabilidad esperada de S y ajusta el cálculo si hay valores iguales.

La siguiente fórmula matemática se presenta si no hay empates:

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

**Fuente:** Ecuación tomada (Yue & Wang, 2002).

Sin embargo, si se presenta valores iguales se presenta la siguiente fórmula matemática:

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_p T_p(T_p-1)(2T_p+5)}{18}$$

**Fuente:** Ecuación tomada (Helsel et al., n.d.).

Donde:

- Var (S): Varianza del estadístico S.
- n: número total de observaciones.
- $T_p$ : el número de datos iguales en un determinado grupo.
- suma P: suma sobre todos los grupos de empates presentes en la serie.

Posteriormente el estadístico normalizado Z, normaliza S usando su varianza permitiendo comparar el resultado con una distribución normal:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{Si } S > 0 \\ 0 & \text{Si } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{Si } S < 0 \end{cases}$$

**Fuente:** Ecuación tomada (Helsel et al., n.d.).

Finalmente el último paso del método se compara Z con un valor de criterio, donde determinara si  $Z > 0$  se decide que la tendencia es creciente, sin embargo,  $Z < 0$  se determina que la tendencia es decreciente, pero si no es significativo el valor Z será sin tendencia (Helsel et al., n.d.)(Yue & Wang, 2002).

#### 4.1.3 Morfometría de la cuenca

La morfometría de una cuenca hidrográfica corresponde al análisis cuantitativo de sus características geométricas, topográficas y del sistema de drenaje, las cuales influyen directamente en el comportamiento hidrológico del territorio (Farhan et al., 2015). Estos parámetros permiten describir la forma, el relieve y la organización del sistema fluvial, proporcionando información clave para comprender la generación de escorrentía, la respuesta ante eventos de precipitación y la disponibilidad del recurso hídrico.

Los parámetros de forma, como el área, el perímetro y la longitud del cauce principal, permiten caracterizar la geometría de la cuenca y constituyen la base para el análisis de su respuesta hidrológica (Farhan et al., 2015).

Los parámetros de relieve permiten identificar como influye directamente en la generación de escorrentía y la dinámica del flujo. Es la manera en que el sistema transforma la precipitación en escorrentía, por parámetros de forma, pendiente y densidad del drenaje que influyen directamente en el tiempo de concentración (Chow Ven Te et al., 1988; Farhan et al., 2015; Schumm, 1966).

Los índices de forma permiten evaluar la geometría de la cuenca y su influencia sobre la concentración de esorrentía; cuencas alargadas tienden a presentar respuestas hidrológicas más atenuadas en comparación con cuencas compactas (ministerio de hacienda & ministerio de ambiente, n.d.). Para este estudio se emplearon índices de compacidad como Gravelius ( $K_c$ ), Coeficiente de sinuosidad ( $K_s$ ) y factor de forma ( $K_f$ ).

Índice de compacidad de Gravelius, compara la forma de la cuenca con un círculo de igual área y lo expresa en la siguiente expresión matemática:

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi * A}}$$

**Fuente:** Ecuación tomada de (ministerio de hacienda & ministerio de ambiente, n.d.).

Donde  $P$  es el perímetro de la cuenca y  $A$  es el área de la cuenca, el valor de  $K_c = 1$  corresponde a una cuenca perfectamente circular, mientras valores mayores a uno corresponde a cuencas menos compactas y más alargadas. Si  $K_c$  de una cuenca tiende a ser menor significa que tiende a concentrar la esorrentía en mejor tiempo, generando picos de caudal altos, mientras que valores de  $K_c$  elevados reflejan una respuesta más atenuada (ministerio de hacienda & ministerio de ambiente, n.d.).

Coeficiente de sinuosidad mide el grado de curvatura del cauce principal y se define como la relación entre longitud real del cauce y la longitud en línea recta desde el nacimiento hasta su punto de cierre (ministerio de hacienda & ministerio de ambiente, n.d.), se expresa en la siguiente expresión matemática:

$$K_s = \frac{L_c}{L_r}$$

**Fuente:** Ecuación tomada de (ministerio de hacienda & ministerio de ambiente, n.d.).

Donde  $L_c$  es la longitud real del cauce y  $L_r$  es la longitud recta del cauce. Los valores de  $K_8$  cercanos a 1 indican cauces rectilíneos, mientras que valores mayores reflejan cauces más sinuosos (ministerio de hacienda & ministerio de ambiente, n.d.). Una mayor sinuosidad incrementa el tiempo de recorrido de una gota de agua, reduce la velocidad y favorece a la dispersión de energía ayudando a atenuar crecidas, procesos de erosión y transporte de sedimentos.

Factor forma relaciona el área de la cuenca con la longitud de la misma y se expresa de la siguiente manera:

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

**Fuente:** Ecuación tomada de (ministerio de hacienda & ministerio de ambiente, n.d.).

Donde  $A$  es el área de la cuenca y  $L$  es la longitud máxima de la cuenca, este índice permite evaluar el alargamiento de la cuenca, valores altos de  $K_f$  corresponden a cuencas más compactas mientras que valores bajos indican cuencas alargadas e indican que presenta una mayor dispersión temporal de los aportantes de escorrentía (ministerio de hacienda & ministerio de ambiente, n.d.).

Parámetros de drenaje permite analizar si la densidad de drenaje refleja el grado de desarrollo del sistema fluvial y su eficiencia para transportar la escorrentía superficial. Los tiempos de concentración es el tiempo que tarda una gota de agua en desplazarse desde el punto más alejado de la cuenca hasta la salida o punto de control (ministerio de hacienda & ministerio de ambiente, n.d.).

Se cuentan con diferentes métodos para analizar el tiempo de concentración los cuales se encuentra:

Kirpich, aplica principalmente en cuencas pequeñas con pendientes pronunciadas, caracterizado por tiempos de concentración bajos (ministerio de hacienda & ministerio de ambiente, n.d.), su expresión matemática se presenta a continuación:

$$TC = 0.0195 * L^{0.77} * S^{-0.385}$$

**Fuente:** Ecuación tomada de (ministerio de hacienda & ministerio de ambiente, n.d.).

Donde Tc: tiempo de concentración, L longitud del cauce principal y S pendiente media del cauce.

Giandotti, implementa en cuencas medianas y grandes, ya que incorpora el área, longitud y pendiente, proporcionado valores intermedios y representativos (ministerio de hacienda & ministerio de ambiente, n.d.). La expresión matemática se presenta como Tc: tiempo de concentración, A: área de la cuenca, L: longitud del cauce principal y H la diferencia altitudinal.

$$Tc = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H}}$$

**Fuente:** Ecuación tomada de (ministerio de hacienda & ministerio de ambiente, n.d.).

#### 4.1.4 Método Oudin

EL uso del modelo de (Oudin et al., 2005), se realiza para la estimación de la evapotranspiración potencial (ETP). Este modelo empírico simplificado se basa principalmente

en la temperatura media del aire y la radiación extraterrestre, constituyéndose en una herramienta eficiente y robusta para estudios hidrológicos en cuencas con disponibilidad limitada de información meteorológica.

La formulación del modelo de Oudin se expresa como:

$$ETP = \begin{cases} Re & T > 5^{\circ}C \\ \frac{Re}{\delta\rho} * \frac{T + 5}{100} & T \leq -5^{\circ}C \end{cases}$$

**Fuente:** Ecuación tomada de (Oudin et al., 2005).

La ETP es evapotranspiración potencial diaria (mm/día), Re corresponde a la radiación extraterrestre diaria ( $MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$ ), T es la temperatura media diaria del aire ( $^{\circ}C$ ),  $\delta$  representa el calor latente de vaporización del agua (aproximadamente  $2.45 MJ \cdot kg^{-1}$ ) y  $\rho$  es la densidad del agua ( $1000 kg \cdot m^{-3}$ ). El modelo asume que la evapotranspiración potencial está controlada principalmente por la energía disponible y la temperatura del aire, permitiendo estimaciones confiables sin requerir variables adicionales como humedad relativa, velocidad del viento o radiación solar medida (Oudin et al., 2005).

#### 4.1.5 Enso

El fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) constituye el principal modo de variabilidad climática interanual del sistema océano–atmósfera en el océano Pacífico tropical, ejerciendo una influencia significativa sobre los patrones climáticos a escala global y regional (Philander, 2001). Este fenómeno resulta del acoplamiento entre las anomalías de la temperatura superficial del mar y las variaciones en la circulación atmosférica, lo que genera cambios en los regímenes de precipitación y temperatura en distintas regiones del mundo.

ENSO presenta tres fases: El Niño, La Niña y una fase neutral. Durante eventos El Niño, se registra un calentamiento anómalo de la temperatura superficial del mar en el Pacífico

ecuatorial, acompañado por un debilitamiento de los vientos alisios, lo que genera condiciones más secas en gran parte de Colombia. Por el contrario, La Niña se caracteriza por un enfriamiento anómalo de estas aguas y el fortalecimiento de los vientos alisios, favoreciendo el incremento de la precipitación y, en consecuencia, de los caudales (IDEAM, 2022; Poveda German et al., 2001).

Desde el punto de vista hidrológico, el ENSO desempeña un papel determinante en la variabilidad interanual de la precipitación y los caudales, especialmente en regiones tropicales como los Andes colombianos. En este contexto, los eventos El Niño suelen asociarse con reducciones en la disponibilidad hídrica, mientras que La Niña incrementa la probabilidad de lluvias intensas, crecientes y procesos de transporte de sedimentos (IDEAM, 2018; Poveda German et al., 2001).

Para la caracterización del ENSO se emplean diferentes índices climáticos, como el Índice Oceánico de El Niño (ONI), el Índice Niño 3.4 y el Índice de Oscilación del Sur (SOI), los cuales permiten identificar la intensidad y duración de los eventos y analizar su relación con las variables hidrometeorológicas (NOAA, 2025; Poveda German et al., 2001).

En el presente estudio, el ENSO se incorpora como un factor clave para el análisis de la variabilidad de la precipitación y su influencia sobre la dinámica hidrológica de la cuenca del río Combeima. Su inclusión permite interpretar la ocurrencia de eventos extremos, la presencia de valores atípicos en las series de precipitación y las variaciones en la oferta hídrica, estableciendo un vínculo directo entre los forzantes climáticos de gran escala y la respuesta hidrológica de la cuenca.

#### **4.2 Modelación, calibración y validación**

El esquema implementado para el desarrollo de la modelación, calibración y validación para la modelación hidrológica. El proceso inicia con la definición de los modelos hidrológicos,

seguida de la selección del modelo GR4J, elegido por su estructura conceptual, requerimiento de información y adecuada aplicación en cuencas con disponibilidad limitada de datos.

Posteriormente, se describen los fundamentos teóricos del modelo GR4J y la definición de sus parámetros, que incluyen la capacidad del reservorio de producción (X1), el coeficiente de intercambio subterráneo (X2), la capacidad del reservorio de enrutamiento (X3) y el tiempo de retardo de la cuenca (X4).

Finalmente, el esquema culmina con la etapa de calibración y validación, en la cual se ajustan los parámetros del modelo mediante criterios de desempeño estadístico, con el fin de evaluar su capacidad para reproducir el comportamiento hidrológico observado y garantizar la confiabilidad de las simulaciones de caudal.

#### **4.2.1 Modelos hidrológicos**

La modelación hidrológica consiste en la representación de los componentes del ciclo hidrológico mediante relaciones matemáticas, con el propósito de describir y analizar la dinámica del agua superficial (Chow Ven Te et al., 1988; Singh, n.d.). Esta representación se fundamenta en principios físicos básicos, como las ecuaciones de conservación de la masa y la energía, que permiten simular el comportamiento del agua en el sistema. Los procesos incorporados en un modelo dependen de su naturaleza y del fenómeno que se desea estudiar, por lo que la selección del modelo debe responder a los objetivos específicos de cada aplicación, ya sea la evaluación de riesgos, el diseño de infraestructura o la gestión del recurso hídrico, dado que cada propósito implica distintos requerimientos de información, parámetros y resultados (Beven, 2012).

Existen diversos tipos de modelos hidrológicos desarrollados en distintos contextos, cuya elección depende principalmente de la disponibilidad y calidad de los datos, así como del nivel de instrumentación de la cuenca (Refsgaard, 1997). En términos generales, los modelos

pueden clasificarse en deterministas, que producen una única solución para un conjunto dado de condiciones iniciales y parámetros, y estocásticos o probabilísticos, que incorporan la variabilidad y la incertidumbre mediante enfoques estadísticos (Singh, n.d.; Todini, 2007).

La gama de modelos hidrológicos abarca desde formulaciones simples hasta modelos conceptuales, físicamente basados y modelos integrados que representan múltiples componentes del ciclo hidrológico, e incluso su interacción con la atmósfera (Beven, 2012; Singh, n.d.). Entre los más utilizados se encuentran los modelos lluvia–escorrentía, los cuales simulan la transformación de la precipitación en caudal y pueden aplicarse a diferentes escalas espaciales y temporales, tanto en eventos individuales como en simulaciones continuas, siendo ampliamente empleados en ingeniería, gestión del recurso hídrico y estudios de cambio climático (Beven, 2012; Perrin et al., 2003).

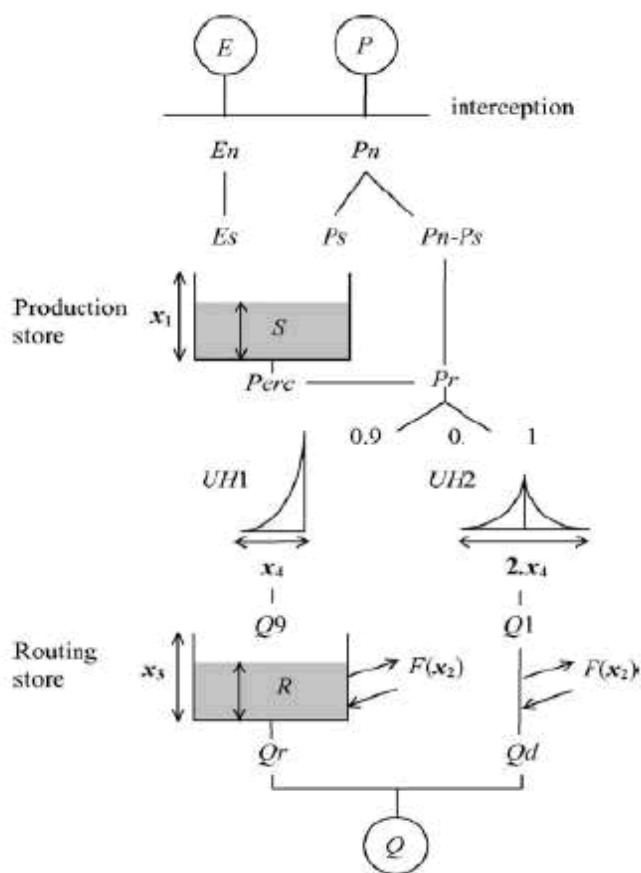
Por su parte, los modelos estadísticos constituyen herramientas de rápida implementación y amplia aplicación en el diseño de infraestructura, la planeación hídrica y el análisis de eventos extremos (Helsel et al., n.d.; Wilks Daniel, 2006). Tanto los modelos deterministas como los estadísticos presentan ventajas y limitaciones asociadas al paso de tiempo, el número de parámetros y los requerimientos de información, por lo que su selección debe ajustarse a los objetivos y alcances específicos de cada estudio (Beven, 2012; Refsgaard, 1997).

#### **4.2.2 Modelo GR4J**

El modelo GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier) es un modelo hidrológico desarrollado por Cemagref. Es una herramienta robusta para simular la transformación precipitación – escorrentía a escala de la cuenca (Âassian et al., 2001; Perrin et al., 2003). Adicional el modelo representa el comportamiento hidrológico promedio de toda la cuenca, asumiendo homogeneidad espacial y dispone de series de hidrometeorológicas confiables

(Perrin et al., 2003, 2007). Para explicar un poco el fundamento del modelo se aprecia la figura 1, donde simula proceso de lluvia escorrentía a partir de la precipitación y la evapotranspiración potencial diaria (Perrin et al., 2003).

**Figura 1:**  
Fundamento del modelo GR4J.



**Fuente:** Elaborado por (Perrin et al., 2003) .

La precipitación efectiva, obtenida tras considerar las pérdidas por evapotranspiración, ingresa al depósito de producción, donde tienen lugar los procesos de almacenamiento y liberación del agua en el suelo (Perrin et al., 2003). Una parte de esta agua retorna a la atmósfera mediante la evapotranspiración real, mientras que la fracción restante percola hacia el sistema de transferencia.

El flujo percolado se divide posteriormente en dos componentes que son enrutados mediante hidrogramas unitarios (UH1 y UH2), los cuales representan la respuesta retardada de la cuenca y permiten simular la propagación temporal del caudal a lo largo del sistema hidrológico (Assian et al., 2001; Perrin et al., 2003, 2007). A continuación, el flujo es regulado en el depósito de laminación, encargado de controlar los procesos de retardo y atenuación antes de alcanzar la salida de la cuenca (Perrin et al., 2001). Finalmente, el caudal total simulado ( $Q_{tot}$ ) resulta de la combinación de los flujos rápidos y lentos, representando de manera integrada el comportamiento hidrológico de la cuenca (Perrin et al., 2007). Parámetros del modelo GR4J.

El modelo cuenta con los siguientes cuatro parámetros su calibración:

- X1: capacidad máxima del reservorio de producción (mm), asociada al almacenamiento del suelo.
- X2: coeficiente de intercambio subterráneo (mm), que controla las ganancias o pérdidas de agua del sistema.
- X3: capacidad del reservorio de enrutamiento (mm), relacionada con la atenuación del flujo.
- X4: tiempo de retardo (días), que controla la respuesta temporal del caudal.

La calibración de los parámetros permite ajustar el modelo para que el caudal simulado represente adecuadamente el caudal observado.

El modelo GR4J ha sido ampliamente utilizado en la simulación de la oferta hídrica a partir de la relación lluvia–escorrentía, debido a su capacidad para reproducir caudales en diferentes condiciones hidrológicas (Perrin et al., 2003). En el estudio seminal de (Perrin et al., 2003), el modelo fue evaluado en un conjunto amplio de cuencas, evidenciando un desempeño

superior frente a otros modelos conceptuales, con valores altos del coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE) y una adecuada representación de caudales medios y bajos, lo que consolidó su uso en estudios hidrológicos regionales. De manera complementaria, (Assian et al., 2001), demostraron que el modelo presenta una adecuada capacidad de transferencia entre cuencas, manteniendo desempeños satisfactorios en validación, lo que resalta su robustez bajo diferentes condiciones hidrológicas. Asimismo, estudios como el de (Gupta et al., 2009a) evidencian que los modelos conceptuales pueden alcanzar eficiencias superiores a 0.7, confirmando su utilidad en la simulación hidrológica.

En el contexto de cambio climático, el modelo ha sido utilizado para evaluar la respuesta hidrológica bajo diferentes escenarios, evidenciando su capacidad para reproducir la variabilidad estacional de los caudales. Sin embargo, (Mecchia et al., 2014), muestran que la incertidumbre aumenta al proyectar condiciones futuras, especialmente en escenarios de altas emisiones, lo que afecta la confiabilidad de las estimaciones de oferta hídrica. De manera similar, (Le Lay et al., 2007) evidencian que el desempeño de modelos conceptuales disminuye cuando las condiciones climáticas difieren del periodo de calibración, lo que pone en evidencia limitaciones en su capacidad predictiva bajo condiciones no estacionarias.

El desempeño del modelo también puede verse afectado por la calidad de los datos de entrada, especialmente en regiones con limitada información hidrometeorológica. (Perrin et al., 2003) evidencian que la incertidumbre en la precipitación influye directamente en la calibración y desempeño del modelo. En cuencas de alta montaña o con procesos hidrológicos complejos, (Steffens et al., 2013) muestran que los modelos conceptuales presentan limitaciones para representar procesos como la acumulación y fusión de nieve, lo que afecta la simulación de caudales. Asimismo, (Gupta et al., 2009b) señalan que estos modelos tienden a subestimar eventos extremos debido a la simplificación de los procesos hidrológicos.

En el contexto colombiano y andino, los modelos conceptuales han demostrado ser herramientas útiles para reproducir la dinámica hidrológica general; sin embargo, presentan limitaciones en la representación de eventos extremos y en la variabilidad espacial de la cuenca (Beven, 2012; Gupta et al., 2009b). En síntesis, la literatura evidencia que el modelo GR4J constituye una herramienta eficiente y ampliamente validada para la simulación de la oferta hídrica. No obstante, su carácter conceptual y agregado limita la representación de la heterogeneidad espacial y de eventos extremos, especialmente en cuencas de alta montaña. Estas limitaciones son particularmente relevantes en la cuenca del río Combeima, donde la complejidad topográfica y la variabilidad climática pueden influir en la precisión de las simulaciones.

En síntesis, la literatura evidencia que, aunque el modelo GR4J presenta un desempeño robusto en la simulación de caudales medios, tiende a subestimar eventos extremos debido a su estructura conceptual simplificada y su carácter agregado, lo que limita la representación de la variabilidad espacial, especialmente en cuencas de alta montaña. En el contexto colombiano, los estudios coinciden en que el modelo presenta resultados satisfactorios en términos generales, aunque con incertidumbres asociadas a la calidad de los datos y la representación de crecidas. No obstante, es importante precisar que el alcance del presente estudio no se orienta al análisis detallado de eventos extremos, sino a evaluar la variación de la oferta hídrica bajo escenarios de cambio climático en la cuenca del río Combeima. En este sentido, el uso del modelo GR4J resulta pertinente para representar la dinámica hidrológica general y dar respuesta a la pregunta de investigación planteada.

#### **4.2.3 Calibración y validación del modelo.**

La calibración del modelo consiste en evaluar su desempeño para representar adecuadamente el fenómeno de interés, utilizando datos históricos previamente procesados. Esta evaluación se realiza mediante criterios de desempeño que comparan los valores

observados y simulados, permitiendo verificar la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento del sistema hidrológico (Moriassi et al., 1983; Refsgaard, 1997).

Entre los indicadores más utilizados se encuentra el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el cual mide la magnitud de los errores relativos entre las simulaciones y las observaciones en relación con la variabilidad de los datos observados. Este coeficiente puede tomar valores entre menos infinito y 1, donde valores cercanos a 1 indican un ajuste óptimo del modelo, mientras que valores menores a 0 reflejan un desempeño inadecuado (Nash & Sutcliffe, 1970).

De acuerdo con los criterios propuestos por (Moriassi et al., 1983) los valores de NSE superiores a 0.75 indican un desempeño muy bueno del modelo, lo que implica una alta capacidad para reproducir la dinámica hidrológica del sistema. Valores entre 0.65 y 0.75 se consideran buenos, mientras que valores entre 0.50 y 0.65 son aceptables, especialmente en estudios donde existen limitaciones en la calidad o disponibilidad de datos. Por el contrario, valores inferiores a 0.50 reflejan un desempeño insatisfactorio del modelo, lo que sugiere la necesidad de recalibración o ajuste de parámetros (Moriassi et al., 1983).

Adicionalmente, el coeficiente de correlación ( $R$ ) es ampliamente empleado para medir el grado de asociación lineal entre las series observadas y simuladas, permitiendo evaluar la capacidad del modelo para reproducir la variabilidad temporal de la variable hidrológica. Asimismo, el error medio absoluto relativo (MARE) constituye un indicador adimensional que cuantifica la magnitud promedio del error relativo entre los valores simulados y observados. En aplicaciones de modelación lluvia–escorrentía a escala diaria, valores de MARE inferiores al 40 % son considerados aceptables, especialmente en cuencas con alta variabilidad climática o limitaciones en la disponibilidad de información hidrometeorológica (Gupta et al., 2009b; Legates & McCabe, 1999).

La validación del modelo hidrológico no implica establecer una verdad absoluta, sino confirmar su legitimidad mediante argumentos, métodos y convenciones aceptadas en la comunidad científica. Este proceso consiste en evaluar el desempeño del modelo en condiciones distintas ya sean temporales o espaciales a las utilizadas durante la calibración, aplicándolo sin modificar sus parámetros. De esta manera, se busca verificar la capacidad predictiva del modelo y evitar problemas de sobreajuste, garantizando que los resultados obtenidos sean representativos y confiables (Beven, 2012; Refsgaard, 1997). En este contexto, el coeficiente de Nash-Sutcliffe continúa siendo una herramienta clave para evaluar la calidad de las simulaciones durante la validación, permitiendo comparar el desempeño del modelo en diferentes escenarios.

En síntesis, la calibración y validación de modelos hidrológicos mediante indicadores como el NSE, el coeficiente de correlación y el MARE constituyen etapas esenciales para garantizar la calidad y confiabilidad de las simulaciones hidrológicas. La adecuada aplicación de estos criterios permite no solo evaluar la precisión del modelo, sino también su capacidad predictiva, contribuyendo significativamente a la gestión sostenible de los recursos hídricos y al análisis de escenarios de variabilidad y cambio climático.

#### **4.3 Escenarios de cambio climático**

Para el esquema para desglosar la componente escenarios de cambio climático, el cual se mencionará la evaluación de escenarios de cambio climático aplicados al análisis hidrológico. El proceso parte del Sexto Informe de Evaluación del IPCC, a partir del cual se seleccionan modelos de circulación global (CMIP6) y escenarios SSP (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5).

Posteriormente, se mencionará las proyecciones climáticas son sometidas a downscaling y corrección de sesgos, seguidas de un ensamble de modelos (REA) para reducir

la incertidumbre. Finalmente, la información climática ajustada se emplea para evaluar la oferta y demanda hídrica futura bajo distintos escenarios de cambio climático.

#### **4.3.1 Sexto informe de cambio climático**

El Sexto Informe de Evaluación del Cambio Climático (AR6), elaborado por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), constituye la evaluación científica más reciente y completa sobre el estado del sistema climático global, publicada de manera progresiva entre los años 2021 y 2023. Este informe integra los avances más recientes en la comprensión de los procesos físicos del clima, los impactos del cambio climático, los riesgos asociados y las opciones de adaptación y mitigación, proporcionando una base científica sólida para la formulación de políticas públicas y la planificación territorial a escala global y regional (IPCC, 2021, 2022, 2023).

El AR6 concluye con alto grado de confianza que el calentamiento global observado es consecuencia directa de la actividad humana, principalmente por el incremento en las concentraciones de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Asimismo, el informe documenta aumentos significativos en la temperatura media global, modificaciones en los patrones de precipitación, una mayor frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos y alteraciones en el ciclo hidrológico, con implicaciones directas sobre la disponibilidad y variabilidad del recurso hídrico (IPCC, 2021).

#### **4.3.2 Modelos de circulación global**

Los modelos de circulación global (GCM, por sus siglas en inglés) son herramientas numéricas diseñadas para simular el comportamiento del sistema climático terrestre a escala global, representando de manera integrada los principales componentes del clima. Estos modelos incluyen la atmósfera, donde se simulan variables como temperatura, precipitación,

presión, viento y radiación; los océanos, mediante la representación de corrientes marinas, temperatura y salinidad; la criosfera, que incorpora procesos asociados a la nieve, glaciares y hielo marino; y la superficie continental, donde se modelan procesos como evaporación, infiltración, escorrentía y cambios en la cobertura del suelo (IPCC, 2021; Randall et al., 2007). Los GCM constituyen la base científica para la evaluación del cambio climático y la generación de proyecciones climáticas a largo plazo.

No obstante, la resolución espacial típica de los modelos de circulación global, que se encuentra en el orden de 100 a 250 km, limita su capacidad para representar adecuadamente fenómenos climáticos locales o regionales, especialmente aquellos condicionados por la topografía, el uso del suelo y la variabilidad climática local. Debido a esta limitación, las salidas de los GCM no pueden aplicarse directamente en estudios hidrológicos a escala de cuenca, por lo que es necesario recurrir a técnicas de reducción de escala (downscaling), ya sea dinámico, mediante modelos climáticos regionales, o estadístico, a través de relaciones empíricas entre variables climáticas globales y locales (Giorgi & Gutowski, 2015; IPCC, 2021).

#### **4.3.3 Modelos climáticos globales seleccionados**

En el marco del Sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6), las proyecciones climáticas se fundamentan en simulaciones realizadas por Modelos de Circulación Global (GCM), desarrollados por distintos centros de investigación a nivel mundial. Estos modelos participan en el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados fase 6 (CMIP6), y su objetivo es generar conjuntos de simulaciones climáticas consistentes que permitan evaluar la evolución del clima bajo diferentes niveles de forzamiento climático y escenarios de cambio climático futuro (Eyring et al., 2016; IPCC, 2021). Los GCM presentan diferencias en su estructura física, esquemas de parametrización y sensibilidad climática, lo que conduce a variaciones en las proyecciones obtenidas. Por esta razón, el uso de múltiples modelos climáticos es una práctica ampliamente aceptada, ya que permite capturar y cuantificar la

incertidumbre asociada a las proyecciones climáticas, aumentando la robustez de los análisis y la confiabilidad de los resultados (IPCC, 2021; Knutti et al., 2010).

#### **4.3.3.1 ACCESS-CM2**

El ACCESS-CM2 es un modelo climático global acoplado desarrollado por la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) y la Bureau of Meteorology de Australia, en el marco de su contribución al CMIP6 (Wang et al., 2020). El modelo integra la atmósfera, el océano, la superficie terrestre y el hielo marino, y opera con una resolución espacial aproximada de  $1.25^\circ \times 1.875^\circ$  en el componente atmosférico y cercana a  $1^\circ$  en el componente oceánico, lo que corresponde a escalas del orden de 100–200 km (Bi et al., 2020). Una de sus principales fortalezas es la adecuada representación de los procesos atmosféricos, en particular de la precipitación y la temperatura, razón por la cual ha sido ampliamente empleado en evaluaciones climáticas asociadas al Sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6) (IPCC, 2021).

#### **4.3.3.2 CanESM5**

El CanESM5 (Canadian Earth System Model, versión 5) es un modelo climático global acoplado desarrollado por Environment and Climate Change Canada y el Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, como contribución oficial de Canadá al CMIP6 (Swart et al., 2019). El modelo integra la atmósfera, el océano, la superficie terrestre, la biosfera y el hielo marino, y opera con una resolución horizontal aproximada de  $2.8^\circ \times 2.8^\circ$  en la atmósfera y cercana a  $1^\circ$  en el componente oceánico, lo que corresponde a escalas espaciales del orden de 100 a 300 km (Swart et al., 2019). Una característica distintiva del CanESM5 es su alta sensibilidad climática, lo que se traduce en una tendencia a simular mayores incrementos de temperatura (IPCC, 2021).

#### **4.3.3.3 EC-EARTH3**

El EC-EARTH3 es un modelo climático global acoplado desarrollado por el EC-Earth Consortium, que agrupa múltiples instituciones europeas, como parte de su contribución al CMIP6 (Haarsma et al., 2020). El modelo integra atmósfera, océano, superficie terrestre y hielo marino, y opera con una resolución atmosférica aproximada de  $1^\circ \times 1^\circ$ , mientras que el componente oceánico presenta una resolución cercana a  $1^\circ$ , correspondiente a escalas espaciales del orden de 100 km. EC-EARTH3 se caracteriza por su buen desempeño en la simulación de patrones de precipitación y circulación atmosférica (Haarsma et al., 2020; IPCC, 2021).

#### **4.3.3.4 MIROC6**

El MIROC6 (Model for Interdisciplinary Research on Climate, versión 6) es un modelo climático global acoplado desarrollado por un consorcio japonés liderado por la University of Tokyo, JAMSTEC y el National Institute for Environmental Studies (Tatebe et al., 2019). El modelo presenta una resolución atmosférica cercana a  $1.4^\circ \times 1.4^\circ$  y una resolución oceánica de aproximadamente  $1^\circ$ , lo que equivale a escalas espaciales del orden de 100–150 km. MIROC6 se distingue por su adecuado balance entre simulación de temperatura y precipitación, así como por su capacidad para representar la variabilidad climática interanual (IPCC, 2021; Tatebe et al., 2019).

#### **4.3.3.5 NorESM2-MM**

El NorESM2-MM (Norwegian Earth System Model, versión 2 – Medium Resolution) es un modelo climático global acoplado desarrollado por el Norwegian Climate Centre, como contribución de Noruega al CMIP6 (Seland et al., 2020). El modelo integra atmósfera, océano, superficie terrestre, hielo marino y procesos biogeoquímicos, y opera con una resolución atmosférica aproximada de  $1.25^\circ \times 0.94^\circ$  y una resolución oceánica cercana a  $1^\circ$ ,

correspondiente a escalas espaciales del orden de 100 km. NorESM2-MM se caracteriza por su fuerte acoplamiento océano-atmósfera (IPCC, 2021; Seland et al., 2020).

#### **4.3.3.6 CMCC-ESM2**

El CMCC-ESM2 es un modelo climático global acoplado desarrollado por el Centro Euro-Mediterráneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), como parte de la contribución italiana al CMIP6 (Lovato T et al., 2022). El modelo integra atmósfera, océano, superficie terrestre, hielo marino y ciclos biogeoquímicos del carbono, y presenta una resolución atmosférica cercana a 1° y una resolución oceánica de aproximadamente 1°, equivalente a escalas espaciales del orden de 100 km. CMCC-ESM2 se destaca por su representación explícita del ciclo del carbono (IPCC, 2021; Lovato T et al., 2022).

#### **4.3.4 Escenarios SSP**

Una de las contribuciones fundamentales del Sexto Informe de Evaluación del Cambio Climático (AR6) es la introducción y consolidación de los escenarios Socioeconómicos Compartidos (Shared Socioeconomic Pathways, SSP), los cuales describen trayectorias plausibles del desarrollo socioeconómico global y su interacción con las emisiones futuras de gases de efecto invernadero. Estos escenarios permiten evaluar posibles futuros climáticos bajo diferentes supuestos relacionados con el crecimiento poblacional, el desarrollo económico, los patrones de uso de la energía y la implementación de políticas climáticas, constituyéndose en un marco integral para el análisis de impactos, adaptación y mitigación del cambio climático (IPCC, 2021; O'Neill et al., 2016).

Los escenarios SSP representan combinaciones coherentes entre trayectorias socioeconómicas utilizados en estudios climáticos e hidrológicos. En particular, el escenario SSP1-2.6 representa un desarrollo sostenible con bajas emisiones y una transición hacia energías limpias; SSP2-4.5 corresponde a una trayectoria intermedia de desarrollo; SSP3-7.0

se caracteriza por una alta fragmentación socioeconómica y elevadas emisiones; mientras que SSP5-8.5 describe un desarrollo intensivo basado en el uso de combustibles fósiles, asociado a altos niveles de emisiones y forzamiento radiactivo (IPCC, 2021, 2023).

#### **4.3.5 Downscaling**

Los modelos de circulación global (GCM) proporcionan proyecciones climáticas a escala planetaria, pero su resolución espacial relativamente gruesa, del orden de 100 a 250 km, limita su aplicación directa en estudios de impacto climático e hidrológico a escala local o de cuenca (Giorgi & Gutowski, 2015; IPCC, 2021). Por esta razón, se emplean técnicas de downscaling, cuyo objetivo es transferir la información climática global hacia escalas espaciales y temporales más finas, incorporando de manera explícita las características locales de la región de estudio, tales como la topografía, el uso del suelo y la variabilidad climática regional, lo que permite mejorar la representatividad de variables climáticas como la temperatura y la precipitación (Wilby et al., 2004).

Existen dos enfoques principales de downscaling: el downscaling dinámico, que se basa en el uso de modelos climáticos regionales (RCM) que resuelven explícitamente las ecuaciones físicas del sistema climático sobre un dominio regional, utilizando como condiciones de frontera las salidas de los GCM (Giorgi & Gutowski, 2015) y el downscaling estadístico, que establece relaciones empíricas entre las variables simuladas por los GCM y las observaciones locales, siendo uno de los métodos más utilizados el Bias Correction and Spatial Disaggregation (BCSD), el cual permite corregir sesgos sistemáticos y ajustar la variabilidad espacial de las proyecciones climáticas a escalas locales (Maraun et al., 2010; Wood et al., 2004) BCSD – Bias-Correct and Spatial Disaggregation.

#### 4.3.6 Bias-Correction and Spatial Disaggregation

El método Bias Correction and Spatial Disaggregation (BCSD) es una técnica de downscaling estadístico ampliamente utilizada, la cual combina dos etapas fundamentales: la corrección de sesgos de los modelos de circulación global (GCM) y la desagregación espacial de la información climática hacia resoluciones más finas. Los GCM suelen presentar sesgos sistemáticos respecto a las observaciones locales, derivados de simplificaciones en la representación de procesos físicos, parametrizaciones y limitaciones en su resolución espacial.

La etapa de corrección de sesgos tiene como objetivo ajustar estadísticamente las salidas del modelo climático, de modo que sus distribuciones de probabilidad incluyendo la media, la varianza y la forma— sean consistentes con las observaciones durante un período de referencia. Uno de los enfoques más utilizados para este propósito es el mapeo cuantílico (quantile mapping), el cual permite transformar la distribución de los datos simulados para que coincida con la distribución observada (Maraun et al., 2010; Wood et al., 2004). De forma general, este proceso puede expresarse como:

$$X_{corr} = F_{obs}^{-1}(F_{gcm}(X_{gcm}))$$

**Fuente:** Ecuación tomada (Wood et al., 2004).

Donde  $X_{gcm}$  es la variable simulada por el GCM,  $F_{GCM}$  es su función de distribución acumulada, y  $F_{obs}^{-1}$  corresponde a la función de distribución inversa de los datos observados (Wood et al., 2004).

Posteriormente, la etapa de desagregación espacial permite redistribuir la información climática corregida desde la escala del GCM hacia una grilla de mayor resolución, utilizando patrones espaciales observados o información auxiliar, como la topografía. Este proceso permite preservar la variabilidad espacial local de variables climáticas, particularmente la

precipitación y la temperatura, generando insumos más representativos para estudios hidrológicos (IPCC, 2021; Wood et al., 2004).

A partir de las características del modelo BCSD el cual ha sido ampliamente implementado en estudios de cambio climático e hidrología, se ha evidenciado una alta capacidad para reproducir tanto la media como la variabilidad de las variables climáticas observadas (Atiah et al., 2023; Duan et al., 2021; Lorenz et al., 2021). En este sentido, el método es considerado robusto y consolidado en la literatura científica, siendo aplicado de forma recurrente en la generación de escenarios climáticos y en la evaluación de impactos hidrológicos.

En múltiples estudios de downscaling estadístico, el énfasis se centra en la aplicación de métodos consolidados más que en su validación local, dado que su desempeño ha sido previamente evaluado en diversos contextos climáticos e hidrológicos. En particular, el método Bias-Correction and Spatial Disaggregation (BCSD) ha sido ampliamente implementado en estudios de cambio climático, demostrando su capacidad para corregir sesgos sistemáticos y reproducir adecuadamente las características estadísticas de variables como la precipitación y la temperatura (Cannon et al., 2015; Maurer & Hidalgo, 2008a; Pierce et al., n.d.)

A partir de lo anterior, en el presente estudio no se realiza una validación explícita entre datos observados y corregidos, dado que se adopta un método cuya robustez ha sido previamente documentada en la literatura científica. Esta decisión es consistente con el alcance de la investigación, el cual se orienta a la estimación de la oferta hídrica bajo escenarios de cambio climático, y no al desarrollo o validación de técnicas de downscaling. Por tanto, se prioriza la aplicación de metodologías consolidadas, práctica ampliamente aceptada en estudios de modelación climática.

No obstante, se reconoce que el proceso de downscaling introduce incertidumbres asociadas tanto a la calidad de los datos de entrada como a las condiciones locales, las cuales pueden influir en los resultados obtenidos. En consecuencia, dichas incertidumbres son consideradas en la interpretación de los resultados, particularmente en el análisis de la variabilidad y disponibilidad hídrica proyectada.

#### **4.3.7 Ensamble climático RAE**

Dentro de los estudios de cambio climático, las proyecciones futuras presentan incertidumbres significativas asociadas a las diferencias en la estructura física, esquemas de parametrización y sensibilidad climática de los modelos de circulación global (GCM). Para abordar estas incertidumbres, se emplean ensambles climáticos, los cuales combinan múltiples modelos con el fin de obtener proyecciones más robustas y representativas. El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) recomienda el uso de múltiples modelos, dado que ningún GCM individual es capaz de representar completamente la complejidad del sistema climático, y que la combinación de modelos permite capturar mejor la incertidumbre asociada a las proyecciones futuras (IPCC, 2021; Knutti et al., 2010).

Uno de los métodos más utilizados para la construcción de ensambles ponderados es el REA (Reliability Ensemble Averaging), el cual asigna pesos diferenciados a los modelos climáticos, en lugar de asumir que todos poseen la misma confiabilidad (Giorgi & Gutowski, 2015). Este método se basa en dos criterios fundamentales: el desempeño histórico, que evalúa la capacidad de cada modelo para reproducir el clima observado durante un período de referencia, y la convergencia futura, que mide el grado de consistencia de las proyecciones de cada modelo respecto al conjunto del ensamble.

La fórmula matemática que emplea la metodología REA es la siguiente:

$$x_{rea} = \frac{\sum_{i=1}^N W_i * X_i}{\sum_{i=1}^N W_i}$$

**Fuente:** Ecuación tomada de (Giorgi & Gutowski, 2015).

Donde:

- $X_i$  son las proyecciones de la variable climática del modelo  $i$ .
- $W_i$ : peso asignado al modelo  $i$  según su confiabilidad.
- $N$ : número total de modelos

Los pesos  $W_i$  se calculan en función del error del modelo respecto a las observaciones y su desviación frente al promedio del ensamble (Giorgi & Gutowski, 2015; Knutti et al., 2010).

#### **4.3.8 Oferta hídrica.**

La oferta hídrica superficial corresponde al volumen de agua que escurre naturalmente a través de las cuencas hidrográficas como resultado de los procesos del ciclo hidrológico, principalmente la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración y el almacenamiento temporal. En Colombia, la estimación de esta variable se fundamenta en el balance hídrico y en los principios de conservación de la masa y la energía, los cuales permiten cuantificar la disponibilidad natural del recurso hídrico en diferentes escalas espaciales y temporales (IDEAM, 2022). El Estudio Nacional del Agua 2022 distingue entre la oferta hídrica total superficial, entendida como el volumen de agua generado naturalmente en la cuenca a partir de la precipitación una vez descontadas las pérdidas por evapotranspiración, infiltración y almacenamiento, y la oferta hídrica disponible o neta, definida como el volumen de agua que puede ser aprovechado sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas acuáticos ni los usos aguas abajo (IDEAM, 2022).

De acuerdo con el IDEAM, la oferta hídrica superficial en Colombia presenta una alta variabilidad espacial y temporal, asociada a factores topográficos, gradientes altitudinales y a la

influencia de fenómenos climáticos de gran escala como el El Niño–Oscilación del Sur (ENSO), los cuales modulan significativamente los patrones de precipitación y escorrentía (IDEAM, 2022; IPCC, 2021). La oferta hídrica neta se obtiene al descontar de la oferta hídrica total los caudales ambientales, entendidos como el volumen mínimo requerido para garantizar el funcionamiento ecológico de los ecosistemas acuáticos y la provisión de sus servicios ambientales. De manera general, esta relación puede expresarse como:

$$\text{Caudal neta} = \text{Caudal total} - \text{Caudal Ambiental}$$

**Fuente:** Ecuación tomada por (IDEAM, 2022).

Donde el caudal neta corresponde a la oferta hídrica disponible, caudal total a la oferta hídrica superficial total y caudal ambiental al caudal ambiental definido para la cuenca. Este enfoque es ampliamente utilizado en la planificación y gestión del recurso hídrico en Colombia, al permitir una evaluación integrada de la disponibilidad del agua bajo criterios de sostenibilidad ambiental (IDEAM, 2022).

#### **4.3.9 Caudal ambiental**

La oferta hídrica total disponible corresponde al volumen de agua resultante de descontar, la oferta hídrica total superficial, el caudal necesario para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos, denominado caudal ambiental. Este último, según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, es el volumen de agua requerido para garantizar el equilibrio ecológico y las actividades de los usuarios aguas abajo (V. y D. T. Ministerio de Ambiente, 2010).

Para su estimación, el IDEAM propone un enfoque basado en las curvas de duración de caudales y la regionalización por subzonas hidrográficas. A partir de estas curvas se seleccionan percentiles representativos del régimen hidrológico, como Q75 y Q85, en función del Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH). Cuando el IRH es menor a 0,70 (baja a

moderada regulación), se adopta el Q75 como caudal ambiental; mientras que para valores iguales o superiores a 0,70 (moderada a alta regulación), se utiliza el Q85. Este criterio permite ajustar la estimación del caudal ambiental a la capacidad de regulación natural de la cuenca (IDEAM, 2018).

#### **4.3.10 Dotación de agua por habitante**

La proyección poblacional y la estimación del consumo de agua por habitante constituyen insumos fundamentales para la planificación y diseño de sistemas de abastecimiento de agua potable, ya que permiten estimar la demanda actual y futura del recurso hídrico. En Colombia, estos análisis se rigen por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2017, el cual establece los lineamientos técnicos para la determinación de la población actual y proyectada, así como para la definición de las dotaciones per cápita, considerando las características demográficas, socioeconómicas y territoriales del área de estudio (Ras 2017, 2017). De acuerdo con este reglamento, para poblaciones urbanas la dotación típica de agua potable se encuentra en un rango aproximado de 120 a 180 L/(hab·día), mientras que para poblaciones rurales los valores recomendados son menores, permitiendo ajustes con base en información local, hábitos de consumo y estudios específicos (Ras 2017, 2017).

La proyección de la población debe realizarse a partir de información censal oficial, suministrada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), empleando métodos demográficos reconocidos, tales como el método aritmético, geométrico o exponencial, seleccionando aquel que mejor represente la dinámica de crecimiento del municipio (Ministerio de Ambiente, 2003; Ras 2017, 2017). En particular, el método aritmético de proyección poblacional asume que la población crece a una tasa absoluta constante en el tiempo, lo que implica un incremento anual uniforme de habitantes. Este método es apropiado para poblaciones con un crecimiento relativamente estable, donde los procesos de natalidad,

mortalidad y migración presentan variaciones moderadas, dando lugar a un comportamiento lineal del crecimiento poblacional (Ministerio de Ambiente, 2003; Ras 2017, 2017).

A continuación, la fórmula matemática para la proyección de población:

$$Pf = Puc + \left( \frac{Puc - Pci}{Tuc - Tci} \right) * (Tf - Tuc)$$

**Fuente:** Ecuación tomada de (Ras 2017, 2017).

Donde:

- Pf: Población proyectada futura para cada año.
- Puc: Población del último censo disponible.
- Pci: Población del censo inicial.
- Tuc: Año último censo.
- Tci: Año del censo inicial.
- Tf: Año para el que se desea proyectar.

El consumo de agua por habitante, también denominado dotación, corresponde al volumen promedio diario de agua requerido por una persona para satisfacer sus necesidades domésticas, y constituye un parámetro esencial para la estimación de la demanda hídrica y la planificación sostenible del recurso agua (Mays, 2005).

$$Demanda = Poblacion\ proyectada * Dotacion\ per\ cápita$$

**Fuente:** Ecuación tomada de (IDEAM, 2022).

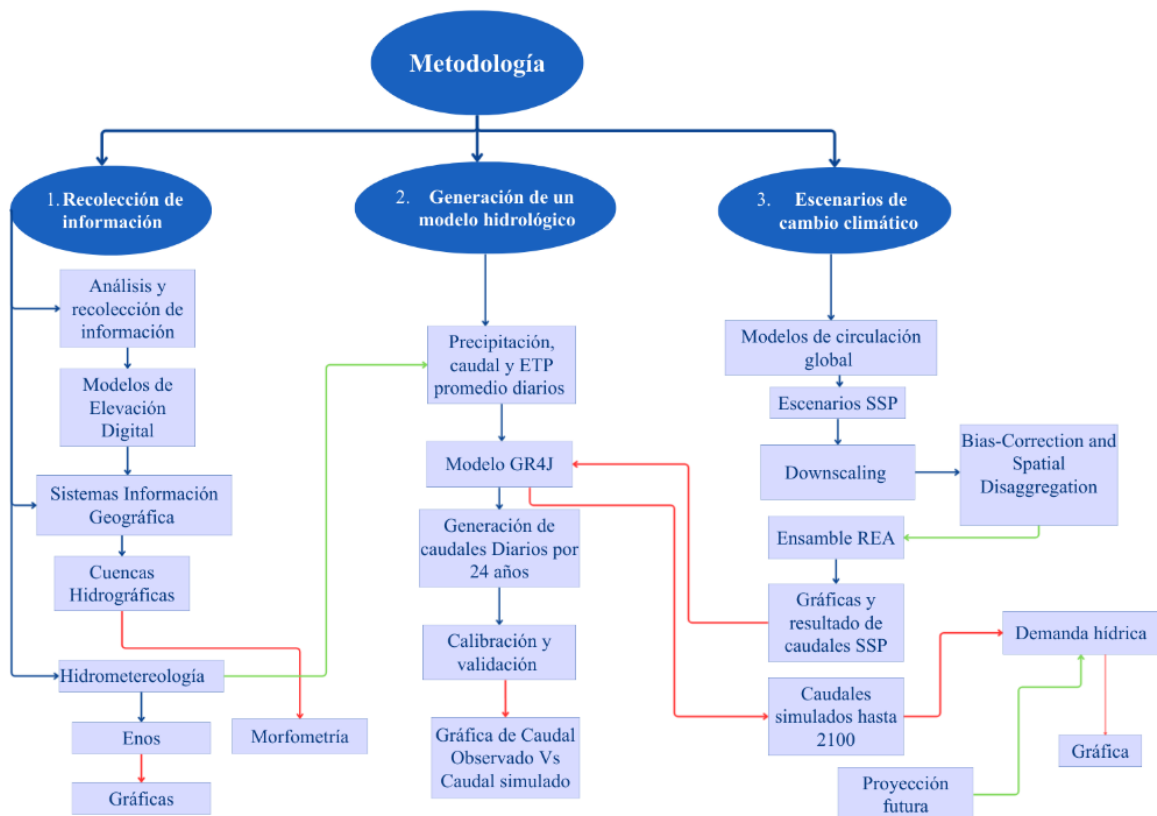
## 5. Metodología

El desarrollo del presente estudio se estructuró en tres etapas principales, orientadas a la recopilación y análisis de la información hidrometeorológica, la generación de un modelo hidrológico y la evaluación de la oferta hídrica bajo escenarios de cambio climático. Esta organización metodológica permite abordar de manera integral la dinámica del sistema hidrológico de la cuenca del río Combeima, garantizando la coherencia entre los datos de entrada, los procesos de modelación y los resultados obtenidos.

La figura 2, muestra la metodología general del estudio, organizada en tres componentes principales: la recolección y análisis de la información, la generación del modelo hidrológico GR4J y la evaluación de escenarios de cambio climático. Adicional la figura describe el flujo de datos desde la caracterización hidrometeorológica y morfométrica de la cuenca, pasando por la calibración y validación del modelo hidrológico, hasta la simulación de caudales bajo diferentes escenarios climáticos y la estimación de la demanda hídrica futura. Finalmente, las líneas verdes representan los insumos que alimentan cada etapa del proceso, mientras que las líneas rojas indican los resultados generados, como los caudales simulados y las proyecciones futuras.

Dentro de cada etapa que se explicara en la metodología se puede ver más a fondo cada proceso realizado.

**Figura 2:**  
*Desarrollo general de la metodología.*



**Fuente:** Elaboración propia.

### 5.1 Etapa 1: Recolección de información

La primera etapa del estudio tuvo como objetivo la recopilación, depuración y análisis de la información espacial e hidrometeorológica necesaria para la caracterización de la cuenca. Esta fase constituye la base del estudio, ya que garantiza la calidad y representatividad de los datos utilizados en la modelación hidrológica.

En esta etapa se integró información cartográfica y climática proveniente de diferentes fuentes, incluyendo modelos digitales de elevación, estaciones hidrometeorológicas y plataformas de análisis geoespacial. Asimismo, se realizó el análisis estadístico de las series hidrometeorológicas, evaluando criterios de calidad, completitud y consistencia, así como la identificación de valores atípicos, tendencias y patrones de variabilidad.

### **5.1.1 Análisis y Recolección de información**

En esta fase se recopiló la información necesaria para la caracterización del área de estudio, incluyendo datos espaciales y variables hidrometeorológicas. Para ello, se emplearon modelos digitales de elevación (DEM) obtenidos a través de la plataforma EarthData, los cuales permitieron analizar la topografía y las características geomorfológicas de la cuenca.

Adicionalmente, se localizó la bocatoma del sistema de abastecimiento del municipio de Ibagué mediante la plataforma Google Earth, y se delimitó el área de estudio utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), apoyándose en información cartográfica oficial del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

En cuanto a la información hidrometeorológica, se recopilaron registros de precipitación, temperatura y caudal provenientes de estaciones operadas por el IDEAM, los cuales fueron sometidos a procesos de control de calidad, análisis de completitud y consistencia estadística, con el fin de garantizar su confiabilidad para el desarrollo del estudio.

### **5.1.2 Delimitación de la cuenca y morfometría**

La delimitación de la cuenca hidrográfica se realizó mediante herramientas SIG, a partir de un modelo digital de elevación (DEM). Inicialmente, el DEM fue preprocesado mediante el relleno de depresiones para asegurar la continuidad del flujo superficial. Posteriormente, se calcularon las direcciones y acumulaciones de flujo, lo que permitió definir la red de drenaje.

A partir de esta información, se estableció el punto de salida de la cuenca correspondiente a la bocatoma del río Combeima, y se aplicó la herramienta watershed para delimitar el área de aporte. El resultado fue convertido a formato vectorial, obteniendo el polígono de la cuenca para su análisis posterior.

Posterior para calcular la pendiente media de la cuenca y del cauce, para generación de estos procesos se utiliza los DEM y se aplica la herramienta slope del Arcgis configurando la salida en grados. Seguido a ello se implementa el shape de las delimitaciones de las cuencas y drenajes y se usa la herramienta Zonal statistics as table usando el polígono de la cuenca como zona y el DEM de pendientes variables. El valor Mean de la tabla corresponde a la pendiente media de la cuenca.

A partir de lo anterior con el software Arcgis, se obtiene los siguientes datos área, perímetro elevación máxima, mínima y media de la cuenca, longitud del cauce principal y longitud en línea recta, longitud de drenajes, longitud de la cuenca, ancho de la cuenca, pendiente media de la cuenca y pendiente del cauce principal. A partir de los resultados obtenidos se calcularon morfometría y curvas hipsométrías. Los índices de compacidad de Gravelius, coeficiente de sinuosidad, factor forma, densidad de drenajes, coeficiente orográfico y los diferentes tiempos de concentración mencionados en el marco teórico.

### **5.1.3 Curvas hipsométricas**

Para las curvas hipsométrías, se desarrollaron a partir de los modelos de elevación digital (DEM) se realizó una clasificación por rangos altitudinales se emplea la herramienta reclassify agregando 10 cotas, con la herramienta zonal statistics as table se obtiene una tabla con el área que corresponde a cada elevación. Se exporta los datos en formato Excel para ordenar de menor a mayor y calcular el área acumulada y el porcentaje acumulado de la cuenca para poder generar una salida grafica del resultado.

### **5.1.4 Hidrometeorológica**

El análisis hidrometeorológico tuvo como objetivo evaluar la calidad, consistencia y comportamiento estadístico de las series de precipitación, temperatura y caudal utilizadas en el estudio, garantizando su confiabilidad para la modelación hidrológica.

Inicialmente, se realizó un análisis de calidad y completitud de los datos, identificando la presencia de vacíos de información y verificando la coherencia de los registros. Este procesamiento se aplicó a las variables de temperatura máxima, mínima y promedio, brillo solar, evapotranspiración, caudal y precipitación, asegurando que las series seleccionadas cumplieran criterios de calidad y confiabilidad. En particular, se consideraron series con una longitud mínima de 30 años y un porcentaje de datos faltantes inferior al 30 %, conforme a las recomendaciones de la World Meteorological Organization, lo cual garantiza la representatividad estadística y la robustez de los análisis realizados (World Meteorological Organization, 2008).

El procesamiento y análisis de la información hidrometeorológica se llevó a cabo mediante herramientas computacionales en el entorno de programación PyCharm, utilizando scripts desarrollados en Python para la depuración, organización y análisis estadístico de las series de datos. Este enfoque permitió automatizar procesos, mejorar la trazabilidad de los análisis y garantizar la reproducibilidad de los resultados.

Como parte del procesamiento de la información, se realizó la estimación de la precipitación media diaria sobre la cuenca mediante el método de los polígonos de Thiessen, el cual permite asignar un peso espacial a cada estación pluviométrica en función del área de influencia que representa dentro de la cuenca. Este método resulta especialmente útil cuando las estaciones presentan una distribución espacial irregular, ya que mejora la representatividad espacial de la precipitación frente al uso de promedios simples (Chow Ven Te et al., 1988; World Meteorological Organization, 2008).

La precipitación media de la cuenca se calculó mediante la siguiente expresión:

$$Pm = \sum_{i=1}^n P_i * \frac{A_i}{A}$$

**Fuente:** Ecuación tomada por (Chow Ven Te et al., 1988).

Donde  $P_m$ , es la precipitación media de la cuenca,  $P_i$  corresponde a la precipitación registrada en la estación  $i$ ,  $A$  es el área total de la cuenca y  $n$  el número de estaciones consideradas. De esta forma, cada estación contribuye a la estimación de la precipitación media en proporción directa al área que representa, permitiendo una aproximación más realista de la distribución espacial de la lluvia, la cual constituye un insumo fundamental para el modelo hidrológico GR4J.

Posteriormente, se llevó a cabo la identificación de valores atípicos mediante la aplicación de métodos estadísticos robustos, específicamente el método de la desviación absoluta mediana (MADS) y el test de Grubbs (Grubbs, 1969; Wilks Daniel, 2006). Estos métodos permitieron detectar valores extremos en las series de precipitación, diferenciando entre posibles errores de medición y eventos hidrometeorológicos reales. En este sentido, los valores atípicos asociados a eventos extremos fueron conservados en la serie, dado que representan la variabilidad natural del sistema y son fundamentales para la modelación hidrológica.

De manera complementaria, se realizó el análisis de tendencias y aleatoriedad mediante la aplicación del test no paramétrico de Mann-Kendall (Yue & Wang, 2002), con el fin de identificar la existencia de cambios sistemáticos en el tiempo. Este análisis permitió evaluar si las series presentan comportamiento estacionario o si evidencian tendencias asociadas a la variabilidad climática.

Adicionalmente, se analizó la influencia del fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENSO) sobre la precipitación, mediante la comparación entre las series hidrometeorológicas y los índices climáticos correspondientes (NOAA, 2025; Poveda German et al., 2001). Este análisis permitió identificar la relación entre los eventos ENSO y la ocurrencia de periodos secos o húmedos, así como su incidencia en la presencia de eventos extremos.

Finalmente, se estimó la evapotranspiración potencial mediante el método de Oudin (Oudin et al., 2005), utilizando como variable principal la temperatura media diaria. Esta variable constituye un insumo fundamental para la modelación hidrológica, ya que permite representar las pérdidas de agua del sistema y su influencia en la generación de escorrentía.

En conjunto, este análisis permitió obtener series hidrometeorológicas depuradas, consistentes y representativas, las cuales fueron utilizadas como entrada en el modelo hidrológico, garantizando la confiabilidad de los resultados obtenidos.

## **5.2 Etapa 2: Generación de un modelo hidrológico**

La segunda etapa del estudio consistió en la implementación del modelo hidrológico lluvia–escorrentía GR4J, con el propósito de simular la dinámica hidrológica de la cuenca del río Combeima y estimar los caudales a partir de las variables hidrometeorológicas previamente procesadas. Para ello, se integraron como variables de entrada las series de precipitación media areal, calculada mediante el método de los polígonos de Thiessen, la evapotranspiración potencial estimada mediante el método de Oudin y los registros de caudal observado. Estas variables fueron previamente depuradas y validadas en la etapa de análisis hidrometeorológico, garantizando su consistencia y representatividad para su uso en la modelación. Cabe resaltar que las series empleadas corresponden a un periodo comprendido entre los años 2000 y 2024, con información diaria, lo cual permitió capturar adecuadamente la variabilidad hidrológica de la cuenca.

La implementación del modelo se realizó mediante hojas de cálculo en Microsoft Excel, en las cuales se estructuraron las ecuaciones del modelo GR4J y se organizó el flujo de cálculo a escala diaria. Este entorno permitió desarrollar las simulaciones de forma sistemática, facilitando el seguimiento de los cálculos, la modificación de parámetros y la comparación directa entre los caudales simulados y observados. El modelo transforma la precipitación en

escorrentía a través de una estructura conceptual basada en reservorios que representan los procesos de almacenamiento, infiltración y transferencia del agua dentro de la cuenca.

En este modelo, la respuesta hidrológica está controlada por cuatro parámetros principales que representan distintos procesos del sistema. El parámetro X1 corresponde a la capacidad máxima del reservorio de producción y está asociado al almacenamiento de agua en el suelo, controlando la cantidad de agua disponible para infiltración y evapotranspiración. El parámetro X2 representa el coeficiente de intercambio subterráneo, el cual regula las pérdidas o aportes de agua hacia o desde sistemas subterráneos. El parámetro X3 corresponde a la capacidad del reservorio de enrutamiento, relacionado con el almacenamiento y la transferencia del flujo dentro del sistema fluvial. Finalmente, el parámetro X4 representa el tiempo de retardo o tiempo de respuesta de la cuenca, controlando la velocidad con la que el agua se desplaza hacia la salida.

El proceso de calibración del modelo se llevó a cabo mediante el ajuste iterativo de dichos parámetros, con el objetivo de minimizar las diferencias entre los caudales simulados y los observados. Este procedimiento se desarrolló sobre un periodo de calibración definido dentro del intervalo de datos disponible (2000–2024), ejecutando múltiples simulaciones en Excel y evaluando el efecto de la variación de los parámetros dentro de rangos físicamente plausibles. Para la evaluación del desempeño del modelo se emplearon indicadores estadísticos ampliamente utilizados en hidrología, tales como el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el coeficiente de correlación (R) y el error medio absoluto relativo (MARE), los cuales permitieron cuantificar tanto la capacidad del modelo para reproducir la variabilidad de los caudales como la magnitud de los errores asociados.

Posteriormente, la validación del modelo se realizó utilizando un periodo independiente al de calibración dentro del mismo intervalo temporal, con el fin de evaluar su capacidad predictiva bajo condiciones distintas a las utilizadas en el ajuste de parámetros. Durante esta

etapa, los parámetros calibrados se mantuvieron constantes y el modelo fue ejecutado nuevamente en el entorno de Excel, comparando los caudales simulados con los observados mediante los mismos indicadores estadísticos. Los resultados obtenidos evidenciaron que el modelo presenta un desempeño adecuado en la representación de la dinámica hidrológica general de la cuenca, particularmente en condiciones de caudales medios y bajos.

En conjunto, la implementación, calibración y validación del modelo GR4J en entorno de hojas de cálculo permitió obtener una representación consistente del comportamiento hidrológico de la cuenca del río Combeima, constituyendo una base sólida para la simulación de escenarios y la evaluación de la disponibilidad del recurso hídrico bajo condiciones actuales y futuras.

### **5.3 Etapa 3: Simulación de oferta ante escenarios de cambio climático**

La figura 2, se aprecia el flujo metodológico para la evaluación del impacto del cambio climático sobre la oferta y demanda hídrica. El proceso inicia con la selección de modelos de circulación global (CMIP6) y la recopilación de escenarios SSP, cuyas proyecciones son sometidas a downscaling, corrección de sesgos y desagregación espacial, integrándose posteriormente mediante un ensamble de modelos (REA).

A partir de esta información se generan las series futuras de precipitación, evapotranspiración y caudal, implementando los polígonos de Thiessen para generar los valores medios diarios de la cuenca. Estas series alimentan el modelo hidrológico GR4J, permitiendo simular caudales futuros. Finalmente, los resultados se integran con la proyección de población para estimar la demanda hídrica, la oferta neta anual y la disponibilidad de agua per cápita, cuyos resultados se presentan mediante gráficos comparativos por escenario SSP.

### **5.3.1 Selección de modelos climáticos globales y escenarios SSP**

Con un modelo calibrado precedimos a generar las entradas para los escenarios futuros, para este estudio se seleccionaron los siguientes modelos climáticos globales: ACCESS-CM2, CanESM5, EC-EARTH3, MIROC6, NorESM2-MM y CMCC-ESM2, los cuales fueron escogidos considerando su uso frecuente en la literatura científica, su disponibilidad de variables climáticas relevantes (precipitación y temperatura) y su adecuada representación del clima en regiones tropicales y de montaña.

Se recopilaron y organizaron las proyecciones climáticas provenientes de la circulación global, bajo los diferentes escenarios SSP126, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 donde se incluyen las variables de precipitación y temperatura.

### **5.3.2 Downscaling Bais-Correction Spacial Desaggregation**

Dado que los modelos climáticos globales presentan una resolución espacial relativamente gruesa, generalmente del orden de decenas o cientos de kilómetros, fue necesario aplicar técnicas de reducción de escala (downscaling) para adaptar la información climática a la escala de la cuenca.

Para este propósito, se utilizó el método BCSD (Bias Correction and Spatial Disaggregation), el cual combina la corrección estadística de sesgos con la desagregación espacial de las variables climáticas. Este método permite ajustar las distribuciones de precipitación y temperatura simuladas por los modelos climáticos, alineándolas con los registros observados históricos, reduciendo así las desviaciones sistemáticas.

El proceso de corrección de sesgos se realizó mediante la comparación entre las series históricas observadas y las simuladas por los modelos climáticos, ajustando parámetros estadísticos como la media y la variabilidad. Posteriormente, la desagregación espacial permitió

trasladar estas correcciones a la escala de la cuenca, obteniendo series climáticas consistentes y representativas para su uso en el modelo hidrológico.

### **5.3.3 Ensamble RAE**

Con el fin de reducir la incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas, se implementó un ensamble de modelos utilizando la metodología RAE (Reliability Ensemble Averaging). Este enfoque permite combinar múltiples modelos climáticos asignando pesos en función de su desempeño histórico y su grado de convergencia con el conjunto de simulaciones.

El método RAE considera que no todos los modelos tienen la misma capacidad para representar las condiciones climáticas de una región específica, por lo que asigna mayor peso a aquellos modelos que muestran mejor ajuste a las condiciones observadas. De esta manera, se obtiene una proyección climática más robusta y confiable, reduciendo la incertidumbre asociada a la variabilidad entre modelos.

Este procedimiento permitió generar series climáticas ponderadas, representativas de cada escenario SSP, las cuales fueron utilizadas como entrada en el modelo hidrológico. Donde se tiene como resultados series diarias de precipitación y temperatura para cada escenario SSP corregidas escaladas y validadas.

### **5.3.4 Caudales simulados**

Una vez obtenidas las series climáticas futuras de precipitación y temperatura a partir del proceso de proyección climática, se procedió a estimar la evapotranspiración potencial (ETP) mediante la aplicación del método de Oudin, el cual ha demostrado un adecuado desempeño en modelos lluvia–escorrentía con requerimientos mínimos de información climática (Oudin et al., 2005). Posteriormente, se implementó el modelo hidrológico GR4J, el cual fue previamente calibrado con datos históricos y validado en un periodo independiente,

siguiendo los lineamientos comúnmente aceptados en la modelación hidrológica (Perrin et al., 2003), y presentó un desempeño satisfactorio de acuerdo con los criterios estadísticos adoptados, en particular el error medio absoluto relativo (MARE), ampliamente utilizado en la evaluación de modelos hidrológicos (Moriasi et al., 2007).

El modelo GR4J calibrado se ejecutó en modo predictivo, utilizando como variables de entrada la precipitación futura y la evapotranspiración potencial correspondiente a cada escenario SSP, con el fin de simular los caudales diarios futuros para los distintos escenarios de cambio climático. Las series de caudal resultantes fueron posteriormente organizadas a escalas diaria, mensual y anual, permitiendo realizar comparaciones entre el periodo histórico y los escenarios futuros. Para el análisis de la disponibilidad hídrica, se priorizó el uso de los caudales medios anuales, por su relevancia en la evaluación de la oferta hídrica superficial.

A partir de las series consolidadas, se calcularon indicadores hidrológicos anuales, expresados en unidades de  $m^3/s$ , los cuales permiten evaluar la disponibilidad del recurso hídrico en el tiempo, analizar la variabilidad interanual del régimen hidrológico y cuantificar el impacto del cambio climático sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca, conforme a prácticas ampliamente reportadas en la literatura hidrológica (Moriasi et al., 2007).

### **5.3.5 Caudal ambiental**

A partir de las series de caudales diarios generadas para los diferentes escenarios de análisis, se realizó el procesamiento hidrológico con el fin de estimar el caudal ambiental. Inicialmente, los datos fueron organizados y ordenados para construir la curva de duración de caudales, a partir de la cual se determinó la frecuencia de excedencia asociada a cada valor de caudal, considerando el número total de registros disponibles. Todo este procesamiento fue desarrollado mediante herramientas de lenguaje Python.

Posteriormente, se calcularon el volumen total ( $V_t$ ) y el volumen parcial ( $V_p$ ) mediante integración numérica de la curva de duración, lo que permitió estimar el Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) como la relación entre dichos volúmenes. Con base en el valor obtenido de IRH, se definió el nivel de regulación de la cuenca y, en consecuencia, se seleccionó el percentil correspondiente de la curva de duración de caudales para la determinación del caudal ambiental, siguiendo los lineamientos del (IDEAM, 2018).

De esta manera, para valores de IRH inferiores a 0,70 se adoptó el percentil Q75, mientras que para valores iguales o superiores a este umbral se empleó el percentil Q85 (IDEAM, 2018). Finalmente, este procedimiento se aplicó de forma anual para cada uno de los escenarios proyectados, permitiendo estimar el caudal ambiental año a año hasta el horizonte de análisis establecido (2100), incorporando así la variabilidad hidrológica y los posibles efectos del cambio climático sobre la disponibilidad del recurso hídrico.

### **5.3.6 Oferta y demanda hídrica**

Para la proyección de la demanda futura de agua, se recopiló información oficial de los censos de población del municipio de Ibagué, suministrados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). De acuerdo con los lineamientos establecidos por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, a través del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2017, 2017), se adoptó una dotación per cápita de 130 L/hab·día, valor representativo para poblaciones urbanas con características socioeconómicas similares al área de estudio (RAS 2017, 2017).

Para la estimación de la población futura, se implementó el método aritmético de proyección poblacional, el cual asume un crecimiento absoluto constante y resulta adecuado para poblaciones con una dinámica de crecimiento relativamente estable (Ministerio de

Ambiente, 2003; Ras 2017, 2017). La proyección se realizó para el periodo comprendido entre 2024 y 2100, permitiendo estimar la demanda hídrica anual de forma continua.

A partir de la población proyectada y la dotación per cápita, se calculó la demanda anual de agua, convirtiendo las unidades de consumo de L/hab·día a m<sup>3</sup>/año, con el fin de mantener coherencia dimensional con la oferta hídrica. De manera paralela, se consideraron como insumos el caudal ambiental anual y la oferta hídrica total, esta última obtenida a partir de los caudales medios anuales simulados bajo escenarios de cambio climático.

La oferta hídrica neta se determinó como la diferencia entre la oferta total y el caudal ambiental, siguiendo criterios de sostenibilidad ecológica establecidos por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (IDEAM, 2022).

Finalmente, se realizó el balance hídrico anual mediante la comparación entre la oferta hídrica neta y la demanda proyectada para cada año del periodo de análisis, con el fin de evaluar la suficiencia del recurso hídrico bajo condiciones futuras.

## 6. Resultados

A continuación, se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de las etapas metodológicas planteadas. En particular, se desarrollan los resultados correspondientes a la Etapa 1: Análisis y recolección de información, los cuales se organizan y describen de manera detallada a través de sus respectivos subtemas.

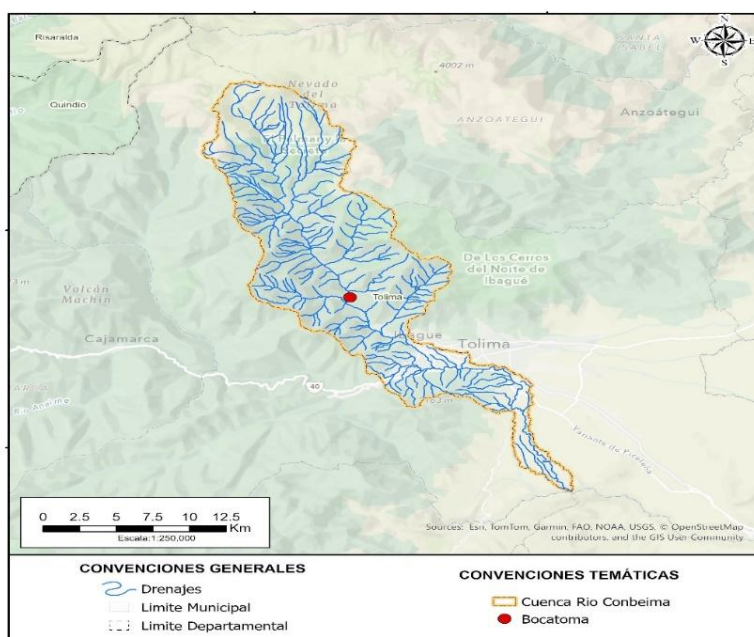
### 6.1 Etapa 1: Análisis y recolección de información

#### 6.1.1 Delimitación de la cuenca

La Figura 3, muestra la localización geográfica de la cuenca del río Combeima, incluyendo la ubicación de la bocatoma del sistema de abastecimiento, así como la delimitación de la cuenca y los límites municipales involucrados como son Cajamarca, Rovira, San Luis, Coello, Piedras, Alvarado y Anzoátegui. se puede identificar la red de drenajes de la cuenca del río Combeima.

#### Figura 3:

*Delimitación de la cuenca Río Combeima, municipio de Ibagué y bocatoma*



**Fuente:** Elaboración Propia.

La ubicación de la bocatoma dentro del sistema de drenaje evidencia que la oferta hídrica disponible depende directamente de las condiciones hidrológicas aguas arriba, lo cual implica que cualquier alteración en la cuenca tiene efectos directos sobre el sistema de abastecimiento.

### 6.1.2 Morfometría

A continuación, se presenta la caracterización de la morfometría de la cuenca del río Combeima, el cual permite comprender el comportamiento hidrológico del sistema como se aprecia en la tabla 1.

**Tabla 1:**  
*Morfometría de la cuenca río Combeima.*

Parámetro	Símbolo	Unidad	Cuenca Río Combeima	Descripción
Área	A	(km <sup>2</sup> )	279.48	Intermedia – Pequeña
Perímetro	P	(km)	166.00	-
Elevación Mínima de la Cuenca	Elev_Min	(m)	681.00	-
Elevación Máxima de la Cuenca	Elev_Max	(m)	5243.00	-
Elevación Media de la Cuenca	Elev_Mean	(m)	2390.30	-
Longitud del Cauce Principal	Lp	(Km)	58.21	
Longitud Cauce Principal En línea Recta	Lt	(Km)	46.08	
Longitud de Drenajes	Ld	(Km)	474.06	
Longitud de la Cuenca	L	(Km)	43.94	
Ancho de la Cuenca	B	(Km)	5.11	
Pendiente Media de la Cuenca	Sc	(m/m)	54.27	Moderadamente escarpado
Pendiente del cauce Principal	Sp	(m/m)	31.06	
Índice de Compacidad de Gravelius	Kc	(Ad)	2.80	Rectangular oblonga
Coefficiente de Sinuosidad	Ks	(Ad)	1.26	Transicional
Factor de Forma	Kf	(Ad)	0.14	Muy alargada
Densidad de Drenajes	D	(Km/Km <sup>2</sup> )	1.70	Moderada/Tendencia media de escorrentía
Coefficiente Orográfico	Co	(Ad)	0.02	-
Tc Williams	Tc1	(Hr)	0.44	-
Tc Giandotti	Tc2	(Hr)	0.07	-
Tc Kirpich	Tc3	(Hr)	0.34	-
Tc Pérez	Tc4	(Hr)	0.09	-
Tc Temez	Tc5	(Hr)	3.32	-
Tc Promedio	Tc	(Hr)	0.85	-

**Fuente:** Elaboración Propia.

La cuenca del río Combeima presenta un área de 279,48 km<sup>2</sup>, lo que la clasifica como una cuenca de tamaño intermedio con tendencia a pequeña. Su morfología alargada, evidenciada por un factor de forma bajo ( $K_f = 0,14$ ) y un índice de compacidad ( $K_c = 2,80$ ), indica una distribución espacial elongada que tiende a dispersar los aportes de escorrentía en el tiempo, reduciendo parcialmente la simultaneidad de los caudales pico.

Desde el punto de vista altitudinal, la cuenca presenta un rango elevado (681 m – 5243 m s. n. m.), con una elevación media de 2390,30 m, lo que evidencia una fuerte variabilidad topográfica característica de sistemas andinos de alta montaña. Esta condición favorece procesos hidrológicos complejos, incluyendo gradientes marcados de precipitación, temperatura y generación de escorrentía.

La pendiente media de la cuenca (54,27 m/km) y del cauce principal (31,06 m/km) reflejan un relieve moderadamente escarpado, lo cual, junto con una densidad de drenaje de 1,70 km/km<sup>2</sup>, sugiere una alta capacidad de generación de escorrentía superficial. Estas características indican una respuesta hidrológica relativamente rápida, con potencial para la generación de crecientes súbitas, especialmente bajo eventos de precipitación intensa.

En términos de la red de drenaje, la longitud total de drenajes (474,06 km) y la longitud del cauce principal (46,08 km) evidencian una red bien desarrollada, con una eficiencia moderada en la evacuación del flujo. El coeficiente de sinuosidad ( $K_s = 1,26$ ) indica un cauce de comportamiento transicional, lo que influye en la velocidad del flujo y en los procesos de transporte de sedimentos.

Los tiempos de concentración estimados mediante diferentes metodologías (0,07 h – 3,32 h) reflejan una variabilidad asociada a la sensibilidad de cada método a las características morfométricas de la cuenca. No obstante, el valor representativo ( $T_c \approx 0,85$  h) sugiere una

respuesta hidrológica rápida, típica de cuencas de montaña, donde los aportes de escorrentía se concentran en cortos periodos de tiempo.

Los resultados de la morfometría (Tabla 1 y Figura 4) indican que la cuenca presenta una forma alargada, con un factor de forma bajo ( $K_f$ ) y un coeficiente de compacidad ( $K_c$ ) mayor a la unidad, lo cual sugiere una respuesta hidrológica relativamente distribuida en el tiempo.

Adicionalmente, la curva hipsométrica evidencia una distribución altitudinal que indica una cuenca en estado geomorfológico activo, con presencia de zonas de alta pendiente que favorecen la generación de escorrentía rápida.

Desde el punto de vista hidrológico, estos resultados implican:

- Mayor tiempo de concentración.
- Menor sincronización de aportes de escorrentía.
- Atenuación relativa de picos de caudal

Aunque la morfometría sugiere una cierta capacidad de regulación natural, los resultados de caudal evidencian una disminución significativa de la oferta hídrica. Esto indica que la forma de la cuenca, por sí sola, no es un factor suficiente para garantizar la estabilidad hidrológica. En este contexto, la morfometría condiciona una respuesta hidrológica rápida, aunque parcialmente regulada, lo que implica que, si bien la cuenca atenúa los picos de caudal, no logra compensar la reducción de la oferta hídrica bajo condiciones de variabilidad climática. En consecuencia, se evidencia que los factores climáticos ejercen un mayor control sobre la disponibilidad del recurso.

Este resultado resulta relevante, ya que cuestiona la interpretación simplificada de que una cuenca alargada presenta inherentemente menor vulnerabilidad hidrológica, demostrando

que la disponibilidad hídrica está determinada en mayor medida por la interacción entre la variabilidad climática y las presiones antrópicas.

### **6.1.3 Curvas hipsométricas**

La curva hipsométrica de la cuenca del río Combeima evidencia un comportamiento mixto con tendencia convexa–cóncava, lo que confirma un estado evolutivo intermedio. Esta condición refleja un equilibrio dinámico entre procesos de erosión y conservación del relieve, donde las zonas altas aún presentan menor grado de desgaste, mientras que en sectores medios y bajos predominan procesos de incisión y modelado del terreno. La concentración del área en cotas medias y bajas sugiere una mayor participación de estas zonas en la generación de escorrentía como se analiza en la figura 4.

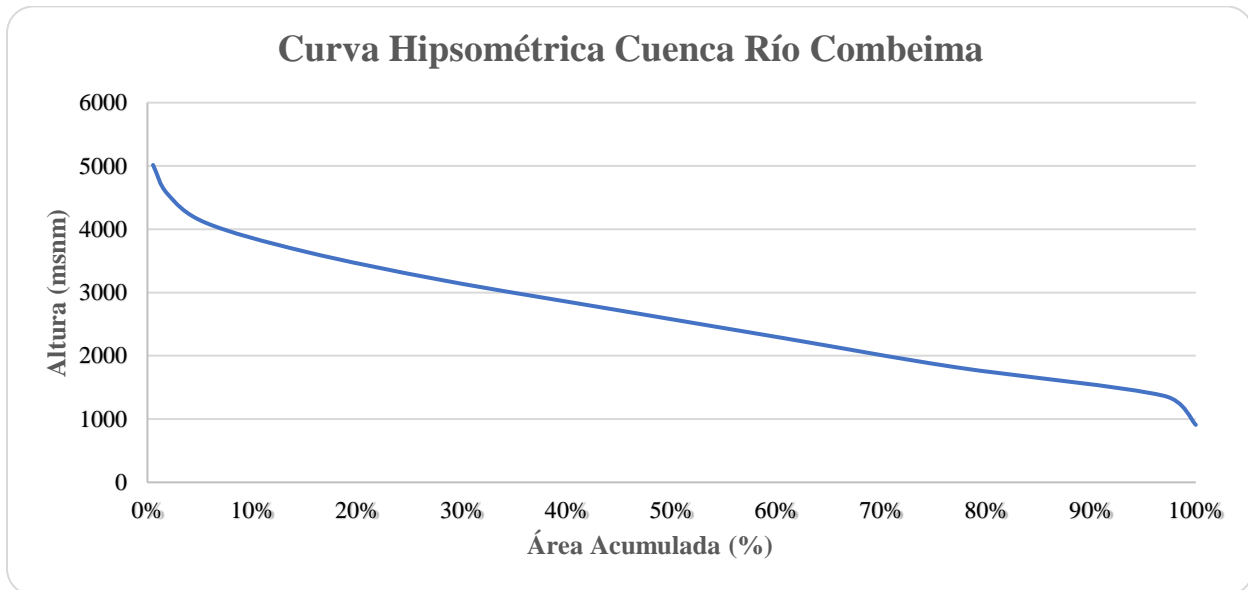
Complementando con la morfometría, la cuenca presenta una configuración alargada a partir del facto forma, favoreciendo la distribución temporal de los aportes hídricos y atenúa parcialmente la ocurrencia simultánea de caudales pico. Sin embargo, esta condición se ve contrarrestada por factores como la pendiente media elevada, la densidad de drenaje moderada y el corto tiempo de concentración, los cuales indican una respuesta hidrológica rápida característica de cuencas de montaña.

El amplio rango altitudinal y la topografía generan condiciones propicias para procesos hidrológicos complejos, gradientes marcados de precipitación y temperatura, así como una alta capacidad de generación de escorrentía superficial. Esto, sumado a la morfología del cauce, influye directamente en la dinámica del flujo y en el transporte de sedimentos, favoreciendo su movilización desde las partes altas hacia los sectores bajos.

La cuenca del río Combeima presenta una dinámica hidrológica activa, con susceptibilidad a crecientes rápidas ante eventos de precipitación intensa. No obstante, la presencia de ecosistemas estratégicos en zonas altas desempeña un papel fundamental en la

regulación hídrica, contribuyendo al sostenimiento del caudal base y mitigando parcialmente la variabilidad extrema del sistema.

**Figura 4:**  
*Curva hipsométrica de la cuenca río Combeima*

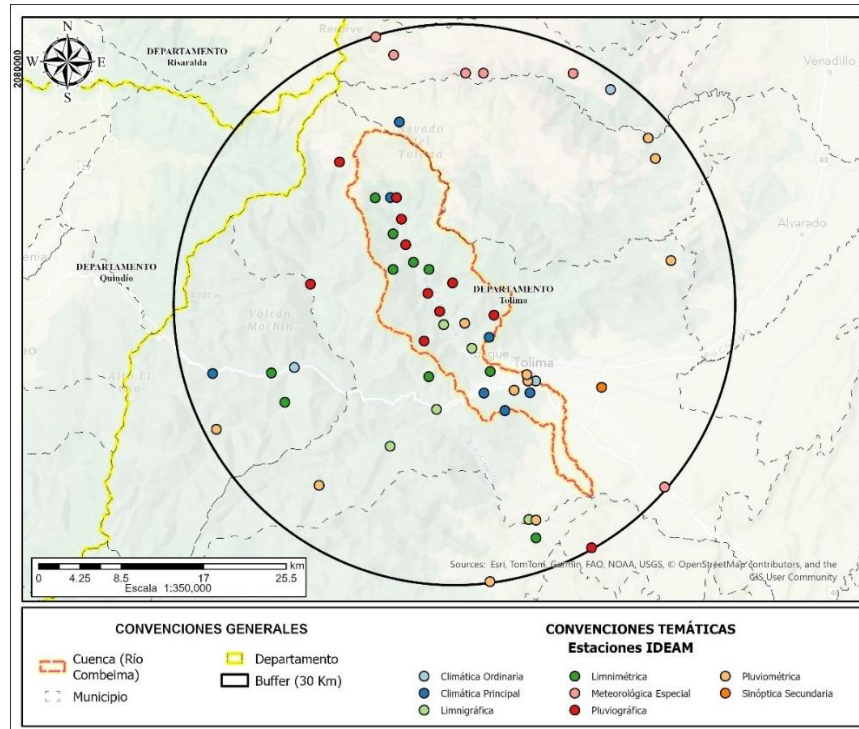


**Fuente:** Elaboración Propia.

#### 6.1.4 Hidrometeorológica

Se identifica todas las estaciones disponibles en un radio de 30 km alrededor del punto de captación de la bocatoma del río Combeima, en la figura 5, se pueden observar las 3 estaciones climatológicas ordinarias, 7 estaciones climáticas principal, 5 estaciones limnigráfica, 10 estaciones limnimétrica, 7 estaciones meteorológicas espacial, 22 estaciones pluviométricas y 1 estación secundaria para un total de 55 estaciones.

**Figura 5:**  
*Estaciones alrededor de 30 km del río Combeima.*



**Fuente:** Elaboración Propia.

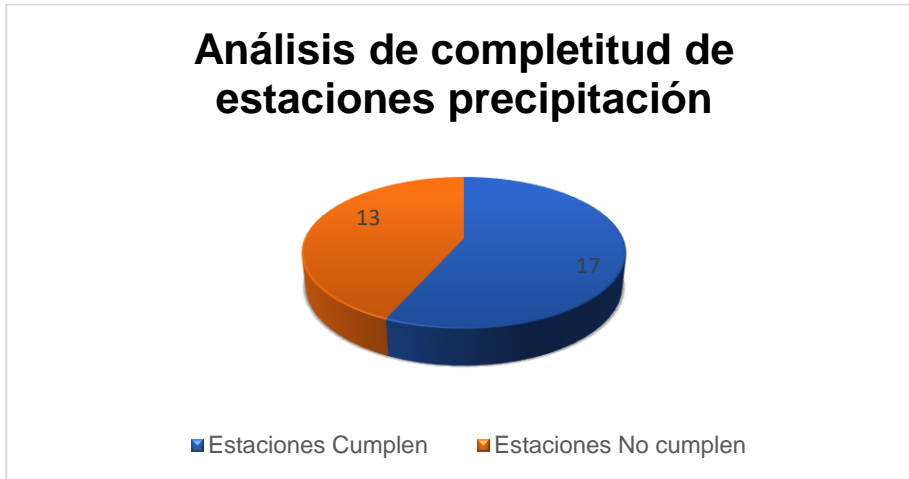
#### 6.1.4.1 Completitud y calidad en las series climáticas

Con la identificación de 55 estaciones, se procede a realizar el análisis de completitud de las series climáticas evidenció una marcada variabilidad en la calidad y continuidad temporal de los registros entre las estaciones evaluadas. Los periodos de información disponible oscilan entre series menores a 1 año y superiores a 50 años, con porcentajes de completitud que varían desde valores inferiores al 1 % hasta superiores al 85 % como se puede apreciar con mayor detalle en los anexos.

En la figura 6, se presenta el análisis de completitud de la información para la variable de precipitación en la cuenca. De acuerdo con el criterio de selección establecido el cual exige series con más de 30 años de registro y un porcentaje de datos faltantes inferior al 30%, se identificó que, de las 30 estaciones evaluadas, únicamente 17 cumplen con los requisitos

definidos para su utilización en el estudio mientras que las otras 13 estaciones fueron rechazadas.

**Figura 6:**  
*Análisis de completitud estaciones de precipitación*



**Fuente:** Elaboración Propia.

Para el análisis de completitud de estaciones de caudales, teniendo en cuenta las condiciones de criterio mencionado en la figura anterior, se observan que de las 13 estaciones cumplieron con totalidad los criterios establecidos para el estudio como se aprecia en la figura 7.

**Figura 7:**  
*Estaciones de caudales*



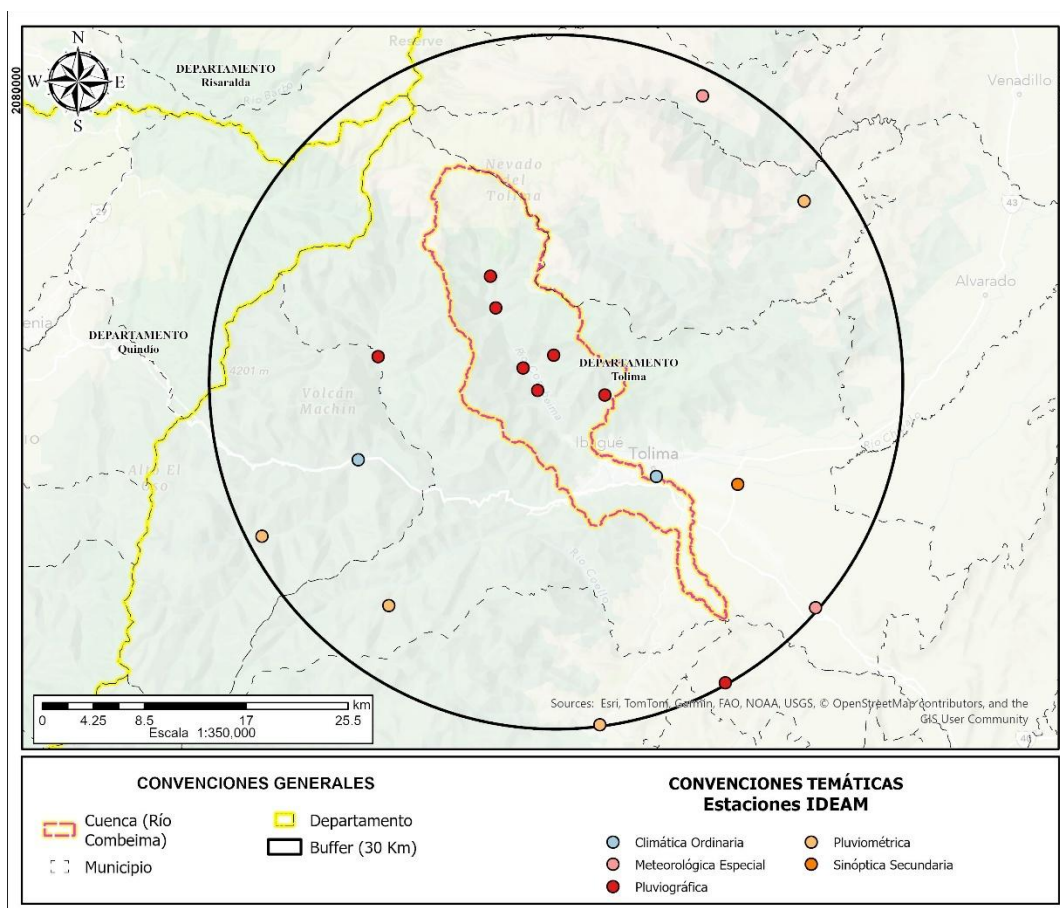
**Fuente:** Elaboración Propia.

### 6.1.4.2 Estaciones seleccionadas

Las estaciones seleccionadas que cumplieron los criterios de calidad y confiabilidad, con una longitud mínima de 30 años de información, conforme a las recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (IDEAM, 2022; World Meteorological Organization, 2008), con un porcentaje de datos faltantes inferior al 30 %. De las 55 estaciones iniciales cumplieron en total 29 estaciones con la recomendación mencionada, de las cuales están divididas en 3 estaciones climáticas ordinarias, 5 estaciones limnigráfica, 8 estaciones limnimétrica, 1 meteorológica espacial, 11 pluviométricas y 1 sinóptica secundaria como se ve en la figura 8.

**Figura 8:**

*Estaciones climáticas seleccionadas.*



Fuente: Elaboración Propia.

### 6.1.4.3 Identificación de valores atípicos

El análisis de valores atípicos para la serie de precipitación diaria de la estación El Secreto (21210080), presentado en la Figura 9, evidencia un patrón recurrente de eventos extremos a lo largo de todo el periodo de estudio. La aplicación de los métodos estadísticos MADS y Grubbs permitió identificar valores significativamente elevados, los cuales se agrupan en periodos específicos, reflejando una distribución temporal no uniforme asociada a condiciones climáticas particulares.

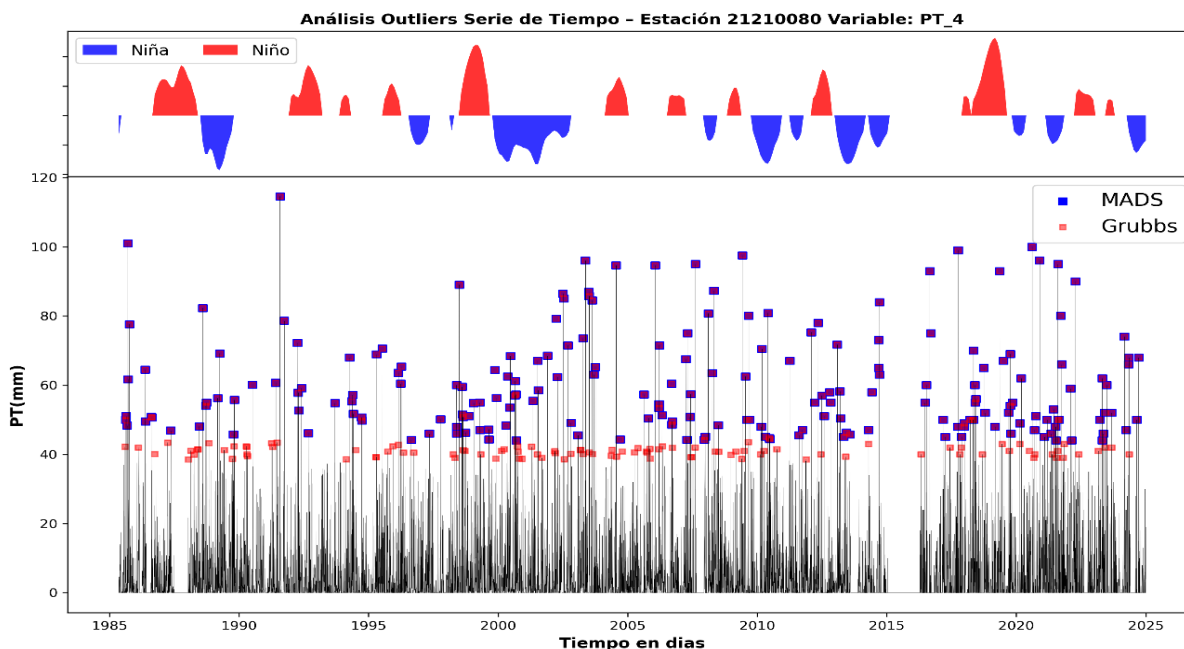
Se observa que una proporción importante de estos eventos extremos coincide con fases del fenómeno La Niña, caracterizadas por condiciones más húmedas y un incremento en la intensidad y frecuencia de las precipitaciones. Esta relación se evidencia en la figura, donde los periodos asociados a La Niña (representados en color azul en la parte superior) coinciden con una mayor concentración de valores atípicos y con los picos más altos de precipitación, particularmente en intervalos como 1999–2001, 2010–2012 y 2020–2022. En contraste, durante las fases El Niño (zonas en color rojo), los eventos extremos se presentan de forma más dispersa y con menor magnitud, lo que confirma la influencia del ENSO sobre la variabilidad de la precipitación en la estación analizada.

La comparación entre los métodos utilizados muestra una consistencia general en la detección de valores atípicos; sin embargo, MADS presenta una mayor sensibilidad en la identificación de eventos extremos en comparación con Grubbs, permitiendo capturar un espectro más amplio de la variabilidad presente en la serie. Esta complementariedad metodológica fortalece la confiabilidad del análisis.

Los resultados indican que los valores atípicos identificados no corresponden a errores de medición, sino a eventos hidrometeorológicos reales que forman parte de la dinámica natural del sistema. Por tanto, su conservación dentro de la serie es fundamental para representar adecuadamente la variabilidad del régimen de precipitaciones, así como para el

análisis de eventos extremos, la modelación hidrológica y la estimación de crecidas en la cuenca.

**Figura 9:**  
Valores atípicos de la estación precipitación El Secreto 21210080 de precipitación.



**Fuente:** Elaboración Propia.

#### 6.1.4.4 Análisis de Aleatoriedad

Para la variable precipitación, en la Figura 10 se presenta el resumen del análisis de aleatoriedad, donde el eje vertical corresponde a las estaciones seleccionadas y el eje horizontal al número de días clasificados como aceptables y rechazados dentro de las series evaluadas. En términos generales, se observa que la mayoría de las estaciones presentan una proporción significativamente mayor de datos aceptables respecto a los rechazados, lo que indica una adecuada calidad estadística de la información. Este comportamiento sugiere que las series conservan una estructura sin sesgos sistemáticos dominantes, lo cual es fundamental para su utilización en procesos de modelación hidrológica.

Sin embargo, este resultado no implica una aleatoriedad en el sentido estadístico, sino que refleja una variabilidad natural propia de los procesos hidrológicos. En coherencia con el análisis de series temporales y la influencia del fenómeno ENSO desarrollado previamente, la precipitación en la cuenca del río Combeima está condicionada por forzantes climáticos de gran escala, lo que introduce patrones de variabilidad interanual. En este contexto, las desviaciones observadas no deben interpretarse como anomalías, sino como parte del comportamiento climático regional, lo cual explica por qué las series no son completamente aleatorias.

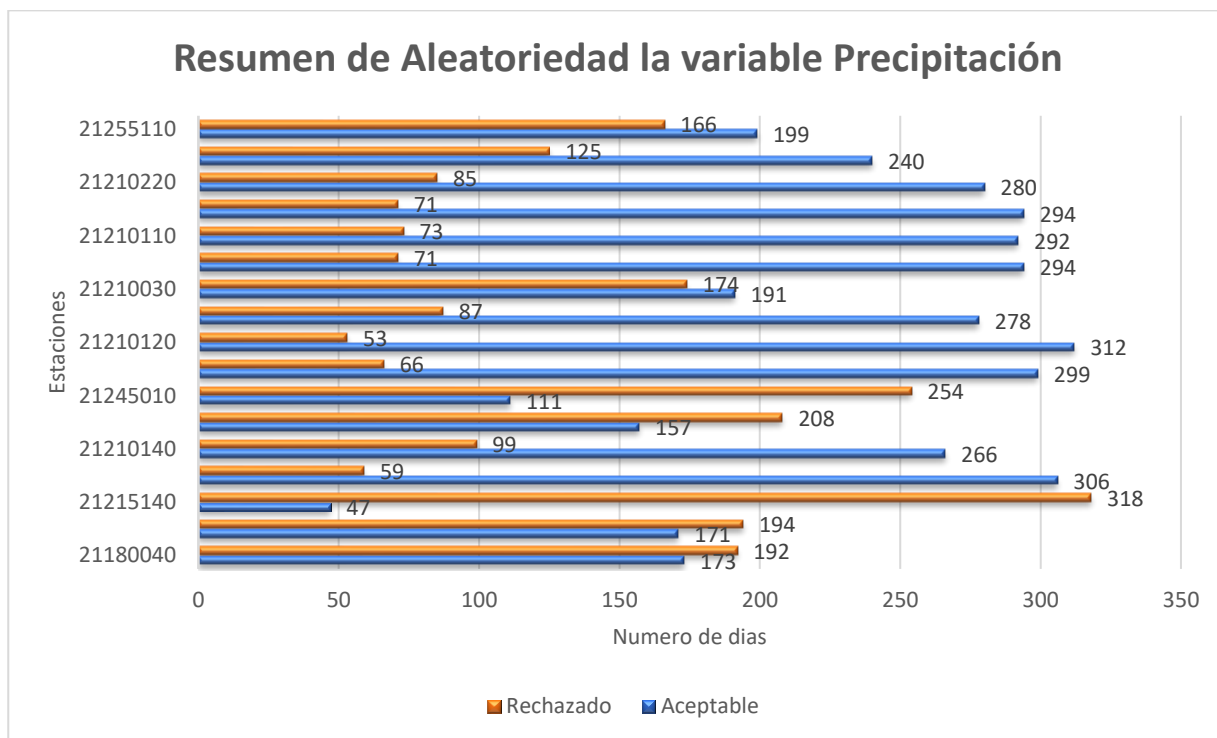
Por otro lado, se identifican estaciones como la 21245010 y 21215140, en las cuales el número de datos rechazados es considerablemente alto. Esta situación puede estar asociada a inconsistencias en la medición, vacíos de información, errores instrumentales o cambios en las condiciones de registro, lo que reduce la representatividad estadística de estas estaciones.

En contraste, estaciones como la 21210220, 21210110, 21210120 y 21210030 presentan una clara predominancia de datos aceptables, evidenciando series más consistentes, robustas y confiables. Estas estaciones resultan clave para la representación del comportamiento hidrológico de la cuenca, ya que permiten capturar de manera más adecuada la variabilidad espacial y temporal de la precipitación, mejorando así la calidad de la calibración y validación del modelo.

Estos resultados evidencian que la calidad de la información hidrometeorológica no es homogénea en toda la cuenca, lo cual introduce una fuente importante de incertidumbre. Al considerar además las características morfométricas de la cuenca particularmente su gradiente altitudinal y la presencia de zonas de alta montaña es probable que la variabilidad espacial de la precipitación sea mayor a la capturada por la red de estaciones. En consecuencia, los resultados de modelación deben interpretarse como una representación agregada del sistema, lo cual es consistente con lo reportado en la literatura, donde se reconoce que las limitaciones

en los datos y la variabilidad climática influyen directamente en la confiabilidad de los modelos hidrológicos (Helsel et al., n.d.; Wilks Daniel, 2006).

**Figura 10:**  
Resumen de la aleatoriedad variable precipitación



**Fuente:** Elaboración Propia.

#### 6.1.4.5 Análisis temporal de las series diario, mensual y anual

El análisis de la precipitación en la cuenca del río Combeima, a partir de las diferentes herramientas estadísticas aplicadas, evidencia un comportamiento altamente variable tanto en el tiempo como en su magnitud. En primer lugar, el análisis de aleatoriedad (Figura 10) muestra que la mayoría de las estaciones presentan una proporción mayor de datos aceptables respecto a los rechazados, lo cual indica una adecuada calidad de la información y permite su utilización en procesos de modelación hidrológica. No obstante, esta aparente aleatoriedad no corresponde a un comportamiento completamente aleatorio en términos estadísticos, sino que

refleja la variabilidad natural del sistema climático, influenciado por forzantes de gran escala como el fenómeno ENSO, lo cual introduce patrones interanuales en la precipitación.

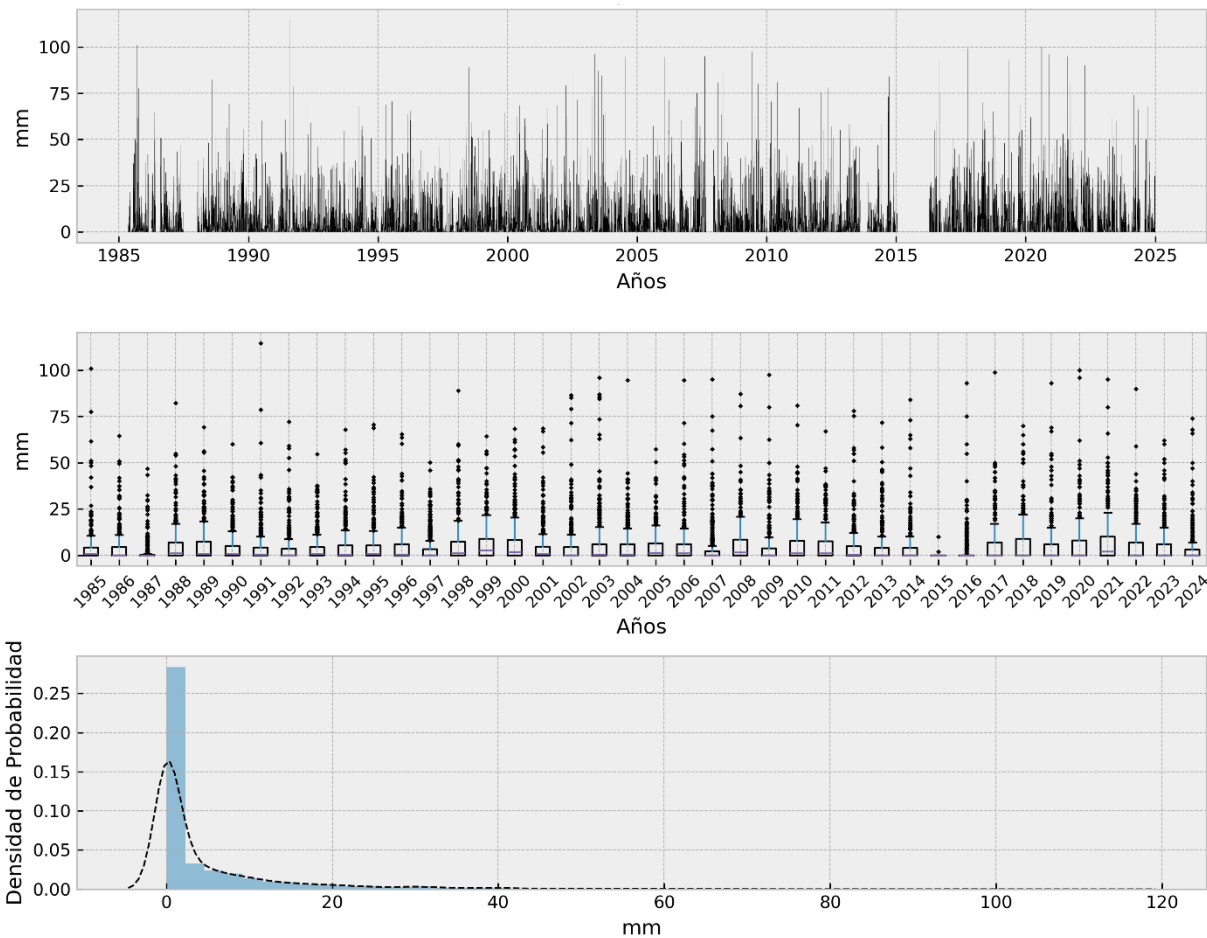
En este sentido, el análisis de valores atípicos de la estación El Secreto (21210080) figura 11, refuerza esta interpretación, evidenciando que los eventos extremos no son aleatorios, sino que se encuentran asociados a condiciones climáticas específicas. La coincidencia en la detección de outliers mediante los métodos MADs y Grubbs indica consistencia en la identificación de eventos extremos, los cuales corresponden principalmente a lluvias intensas que tienen un papel determinante en la dinámica hidrológica de la cuenca. Estos resultados permiten establecer que la variabilidad observada no debe interpretarse como ruido estadístico, sino como una característica intrínseca del régimen pluviométrico.

De manera complementaria, el análisis de la serie de tiempo, los diagramas de caja y la distribución de probabilidad figura 11, evidencian que la precipitación presenta una distribución altamente asimétrica, dominada por valores bajos y eventos extremos de baja frecuencia, pero alta magnitud. Aunque no se identifica una tendencia clara en el tiempo, la presencia recurrente de eventos intensos indica que el sistema presenta un comportamiento no estacionario, lo cual es consistente con la influencia de la variabilidad climática. Este tipo de comportamiento es característico de cuencas andinas, donde la precipitación está controlada por la interacción entre factores climáticos y topográficos.

Al relacionar estos resultados con las características morfométricas de la cuenca, se evidencia que la forma alargada, junto con el gradiente altitudinal y las pendientes pronunciadas, condiciona la respuesta hidrológica del sistema. En particular, los eventos de precipitación intensa generan respuestas rápidas en las zonas altas, mientras que en las zonas medias y bajas se presenta una atenuación del flujo. Esta interacción entre la variabilidad climática y la morfometría explica el comportamiento observado en la modelación hidrológica.

Finalmente, la integración de estos resultados evidencia que la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Combeima no está determinada únicamente por la cantidad de precipitación, sino por la interacción entre la variabilidad climática, las características físicas de la cuenca y la calidad de la información utilizada. En este contexto, la predominancia de eventos extremos, combinada con las limitaciones en la representación de la variabilidad espacial de la precipitación, introduce incertidumbre en la estimación de la oferta hídrica. Por tanto, los resultados deben interpretarse como una aproximación del sistema hidrológico, en la cual los eventos extremos juegan un papel fundamental en la dinámica del caudal y en la sostenibilidad del recurso hídrico, especialmente bajo escenarios de cambio climático.

**Figura 11:**  
*Análisis de la serie de tiempo diario, mensual y anual.*



**Fuente:** Elaboración Propia.

#### **6.1.4.6 Enso**

El análisis conjunto entre la serie de precipitación y el índice El Niño–Oscilación del Sur (ENSO) para la estación 21210080, presentado en la Figura 12, evidencia una influencia significativa de este fenómeno climático sobre la variabilidad de la precipitación. La superposición de ambas series permite identificar una relación clara entre las fases del ENSO y el comportamiento de la lluvia a lo largo del periodo de estudio.

Durante las fases La Niña, caracterizadas por anomalías negativas del índice ENSO (zonas en color azul), se observa un incremento en la frecuencia e intensidad de los eventos de precipitación. Este comportamiento se refleja en la presencia de picos elevados en la serie, particularmente en periodos como finales de los años 80, 1999–2001, 2010–2012 y 2020–2022, donde los valores de precipitación aumentan de manera significativa. Este patrón es consistente con lo reportado para regiones andinas, donde La Niña favorece condiciones más húmedas y una mayor disponibilidad de humedad atmosférica (Poveda German et al., 2001; Ropelewski C.F & Halpert M.S, 1987).

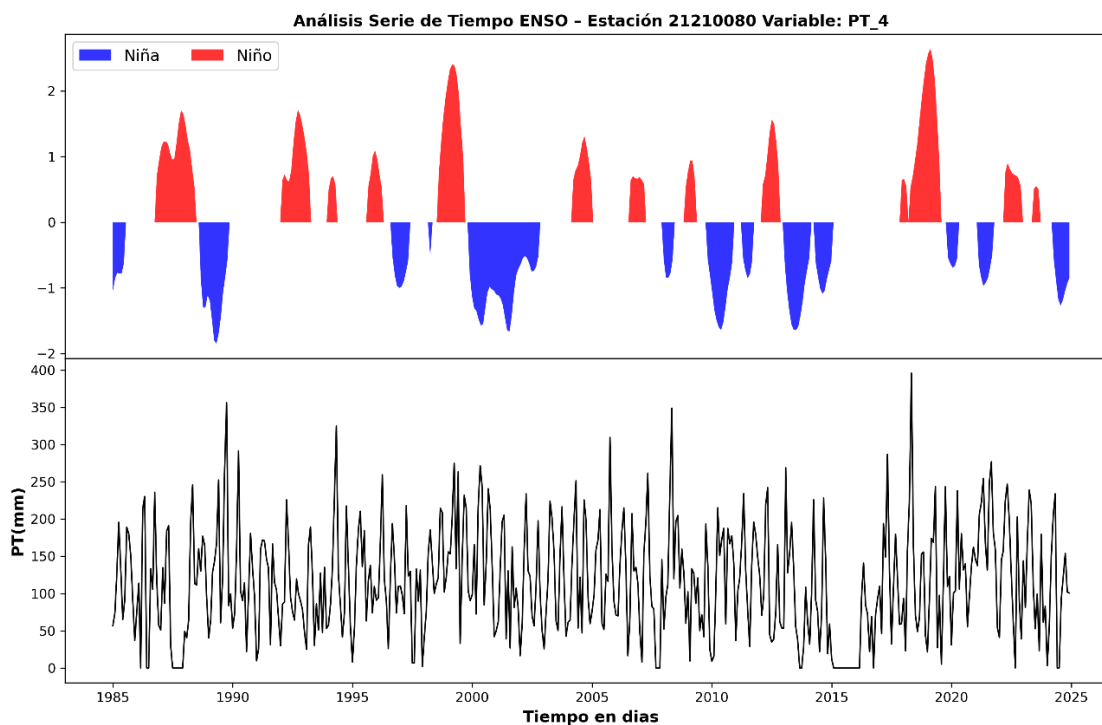
En contraste, durante las fases El Niño, asociadas a anomalías positivas del índice ENSO (zonas en color rojo), se evidencia una reducción en la frecuencia e intensidad de la precipitación, reflejada en una mayor presencia de valores bajos y una menor ocurrencia de eventos extremos. No obstante, se identifican eventos aislados de alta precipitación en periodos como 1986–1987, 1991–1992, 1997–1998, 2002–2003, 2009–2010, 2015–2016 y 2019, los cuales se presentan de forma puntual y sin una concentración temporal definida, evidenciando la complejidad del ENSO y su interacción con factores locales y regionales (Trenberth et al., 2009).

Adicionalmente, la comparación entre ambas series sugiere que la respuesta de la precipitación frente al ENSO no es inmediata, presentando en algunos casos desfases temporales. Este comportamiento es característico de sistemas hidrológicos influenciados por

múltiples forzantes climáticos, donde la señal del ENSO se modula por condiciones regionales y locales.

En conjunto, los resultados indican que, aunque no se evidencia una tendencia sostenida de aumento o disminución de la precipitación a largo plazo, el ENSO desempeña un papel determinante en la ocurrencia de eventos extremos (Ropelewski C.F & Halpert M.S, 1987; Wilks Daniel, 2006). En este contexto, la variabilidad asociada a este fenómeno condiciona la disponibilidad hídrica en la cuenca, generando fluctuaciones interanuales que determinan periodos de abundancia y escasez, e introducen un nivel significativo de incertidumbre en la estimación de la oferta hídrica.

**Figura 12:**  
*Análisis de serie de tiempo multianual Enso de la estación El secreto 21210080.*



**Fuente:** Elaboración Propia.

## 6.2 Etapa 2: Modelación hidrológica

La simulación lluvia–escorrentía realizada mediante el modelo GR4J permitió generar una serie temporal de caudales simulados, los cuales fueron comparados con los caudales observados para el periodo de análisis figura 13. Esta comparación constituye la base para evaluar la capacidad del modelo en la representación del comportamiento hidrológico de la cuenca.

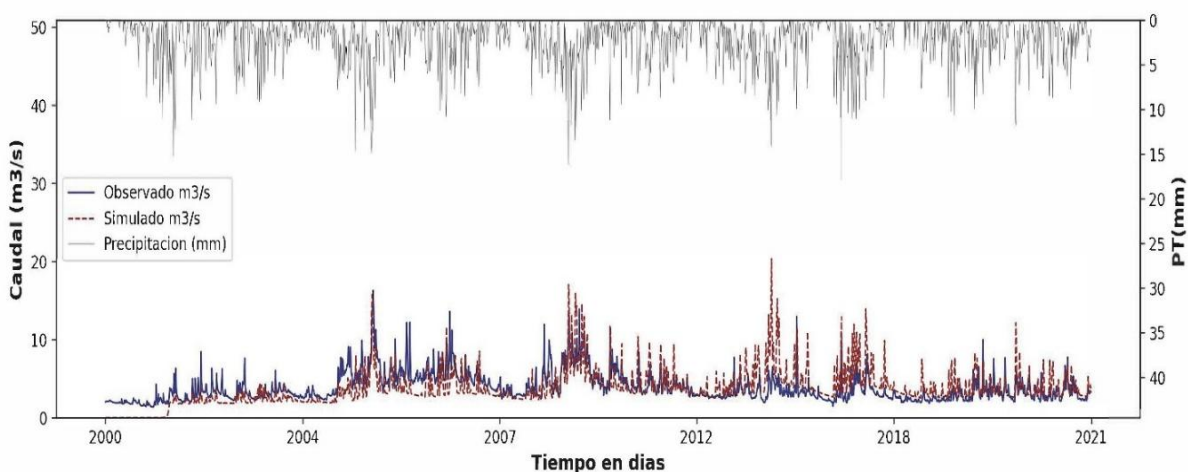
A partir de la incorporación de las variables de entrada (precipitación, temperatura y caudal), los resultados evidencian que el modelo logra reproducir de manera adecuada la dinámica general del sistema hidrológico, especialmente en condiciones de caudales bajos y medios. En estos periodos, se observa una buena correspondencia entre las series simulada y observada, lo que indica una correcta representación de los procesos de almacenamiento y liberación de agua en la cuenca.

Sin embargo, durante eventos de mayor magnitud, se identifican discrepancias entre los caudales simulados y observados. En particular, el modelo tiende a sobreestimar los picos de caudal, como se aprecia en varios eventos donde la serie simulada supera significativamente los valores observados. Esta situación sugiere una posible limitación del modelo para representar con precisión los procesos asociados a eventos extremos, tales como la infiltración, la saturación del suelo o la regulación natural en la cuenca.

Adicionalmente, se observa que el modelo captura de manera adecuada la temporalidad de los eventos, es decir, los picos simulados ocurren en momentos cercanos a los observados, lo que indica una buena representación del tiempo de respuesta hidrológica. No obstante, las diferencias en magnitud evidencian la necesidad de un ajuste más fino de los parámetros del modelo o la incorporación de información adicional que permita mejorar la simulación de eventos extremos.

Los resultados indican que el modelo GR4J constituye una herramienta adecuada para representar el comportamiento hidrológico general de la cuenca. Aunque presenta limitaciones en la simulación de caudales máximos, su buen desempeño en la representación de caudales medios y bajos permite su aplicación confiable en la estimación de la oferta hídrica. No obstante, diversos estudios han demostrado que este tipo de modelos conceptuales tiende a representar con mayor precisión las condiciones hidrológicas medias, mientras que la simulación de eventos extremos puede requerir procesos de calibración más rigurosos o el uso de enfoques complementarios (Tidjani et al., 2026).

**Figura 13:**  
*Caudal observado versus caudal simulado*



**Fuente:** Elaboración Propia.

### 6.2.1 Calibración del modelo

La calibración del modelo hidrológico GR4J constituye una etapa fundamental dentro del proceso de modelación, ya que permite ajustar sus parámetros para representar adecuadamente la dinámica hidrológica de la cuenca del río Combeima, a partir de las series históricas previamente depuradas. El periodo de calibración fue definido entre los años 2000 y 2021, considerando la disponibilidad, continuidad y calidad de la información

hidrometeorológica, así como la representatividad de la variabilidad climática de la cuenca, incluyendo la influencia de fenómenos como el ENSO.

El proceso se desarrolló mediante Python, lo que permitió optimizar los parámetros del modelo a partir de criterios estadísticos y garantizar la reproducibilidad del análisis. Como resultado, se obtuvieron los parámetros  $X1 = 1544.28$ ,  $X2 = 0.565$ ,  $X3 = 1.00$  y  $X4 = 1.412$ , los cuales reflejan una configuración adecuada del sistema hidrológico, en concordancia con la estructura conceptual del modelo (Perrin et al., 2003).

En términos de desempeño, el modelo presentó una concordancia moderada entre caudales observados y simulados ( $R = 0.583$ ), un buen ajuste global ( $NSE = 0.71$ ) y un error dentro de rangos aceptables ( $MARE = 0.376$ ), evidenciando su capacidad para reproducir el comportamiento general del sistema, especialmente en condiciones medias, lo cual es consistente con aplicaciones hidrológicas continuas (Moriassi et al., 2007, 2015; Reusser et al., 2009).

**Tabla 2:**  
*Resultados de la calibración del modelo GR4J.*

	<b>X1</b>	<b>X2</b>	<b>X3</b>	<b>X4</b>	<b>R</b>	<b>MARE</b>	<b>NASH</b>
<b>0</b>	1544.28	0.565	1	1.412	0.583	0.376	0.71

**Fuente:** Elaboración Propia.

La comparación entre los caudales observados y simulados (Figura 14), correspondiente al periodo de calibración (2000–2021), evidencia que el modelo reproduce adecuadamente la dinámica temporal del caudal, capturando los patrones asociados a los eventos de precipitación. No obstante, se presentan diferencias en la magnitud de algunos picos, especialmente durante eventos de alta intensidad.

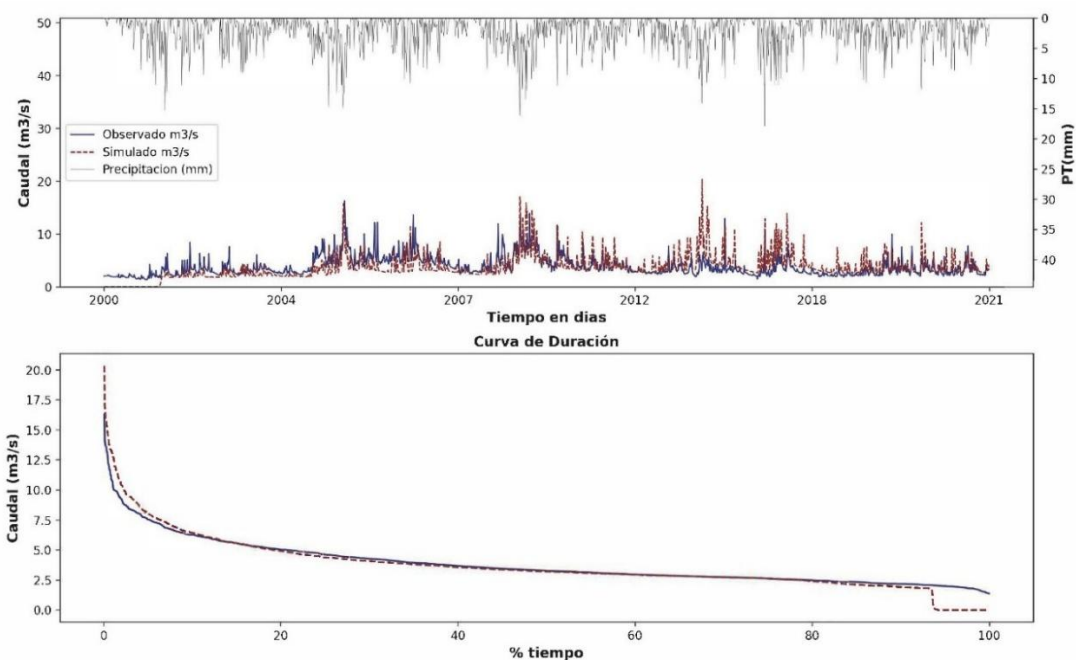
La curva de duración muestra una buena concordancia en los caudales medios, mientras que se identifican discrepancias en los extremos (altos y bajos), lo que refleja

limitaciones del modelo en la representación de condiciones extremas. Estas diferencias están asociadas tanto a la estructura conceptual del modelo como a la variabilidad climática de la cuenca, influenciada por fenómenos como el ENSO.

En general, los resultados indican que el modelo GR4J es adecuado para estimar la oferta hídrica bajo condiciones promedio. Sin embargo, sus limitaciones en la simulación de eventos extremos y su sensibilidad a la variabilidad climática deben considerarse en la interpretación de los resultados, entendiéndose como una herramienta de aproximación del comportamiento hidrológico del sistema.

**Figura 14:**

*Calibración de caudal observado vs caudal simulado vs precipitación y curva de duración.*



Fuente: Elaboración Propia.

### 6.2.2 Validación del modelo

La validación del modelo hidrológico GR4J se realizó manteniendo fijos los parámetros obtenidos durante la calibración ( $X1 = 1544.28$ ,  $X2 = 0.565$ ,  $X3 = 1.00$  y  $X4 = 1.41$  días), con el objetivo de evaluar su capacidad predictiva en un periodo independiente. El periodo de validación comprendido entre 2020 y 2024 fue seleccionado para evitar el solapamiento de

información y garantizar la robustez del proceso, en concordancia con metodologías ampliamente utilizadas en modelación hidrológica (Klemeš, 1986; Perrin et al., 2003).

Este procedimiento permite verificar la estabilidad y representatividad de los parámetros calibrados frente a condiciones hidrológicas distintas, constituyéndose en un paso clave para garantizar la confiabilidad del modelo en aplicaciones posteriores. Los valores de los parámetros son coherentes con una dinámica hidrológica caracterizada por una capacidad de almacenamiento moderada a alta, un intercambio subterráneo significativo y una respuesta relativamente rápida del sistema, en concordancia con la interpretación conceptual del modelo (Perrin et al., 2003)

Los resultados evidencian que el modelo mantiene un desempeño aceptable, con una concordancia moderada ( $R = 0.51$ ), un error dentro de rangos aceptables ( $MARE = 0.37$ ) y un NSE de 0.61, lo que indica una adecuada capacidad para reproducir la dinámica general del caudal, en línea con lo reportado en estudios de validación hidrológica (Moriasi et al., 2015; Reusser et al., 2009).

La ligera disminución respecto a la calibración refleja la incertidumbre inherente al proceso de modelación y la variabilidad de las condiciones hidrológicas, lo cual es esperado en procesos de validación y confirma que el modelo no presenta sobreajuste, sino que mantiene una capacidad predictiva consistente.

**Tabla 3:**  
*Resultados de la validación del modelo GR4J.*

	<b>X1</b>	<b>X2</b>	<b>X3</b>	<b>X4</b>	<b>R</b>	<b>MARE</b>	<b>NASH</b>
<b>0</b>	1544.28	0.565	1	1.412	0.507	0.371	0.61

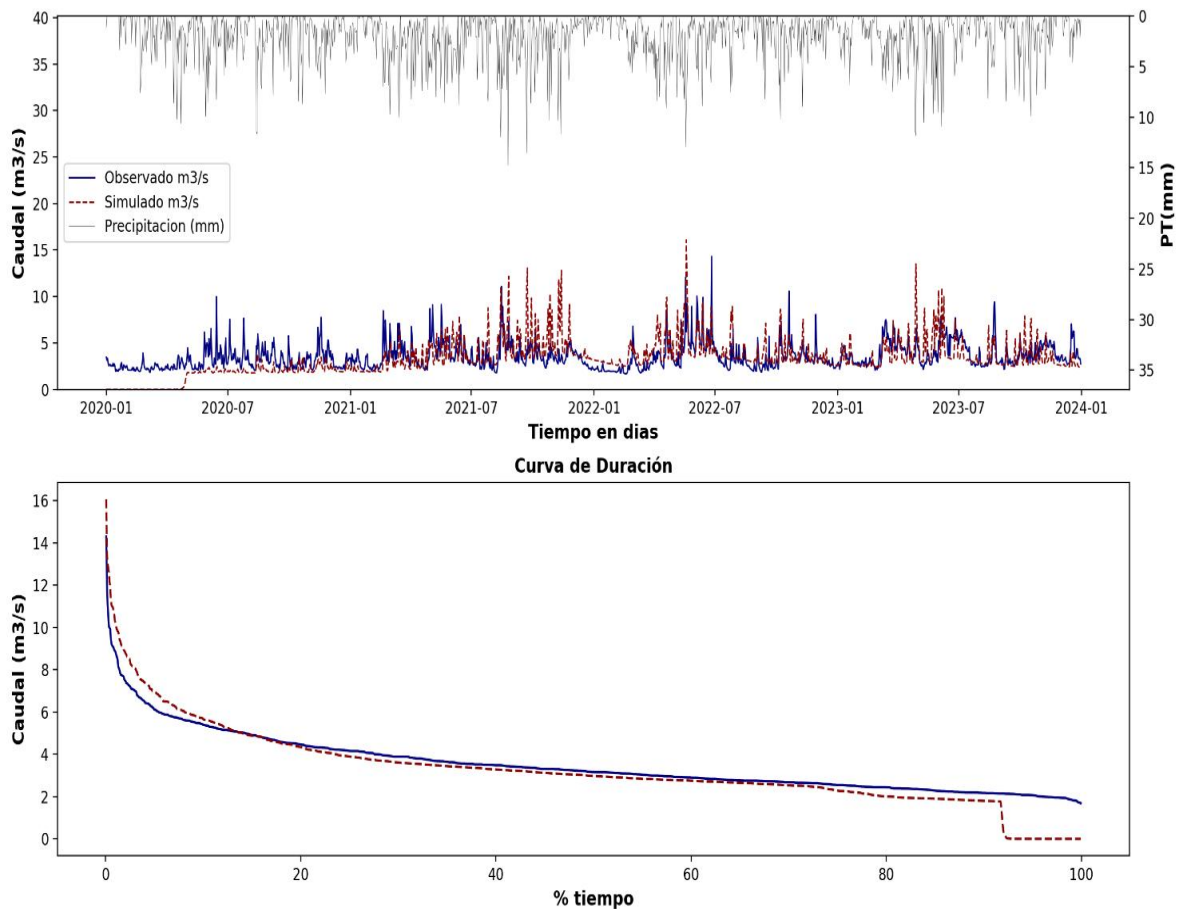
**Fuente:** Elaboración Propia

La comparación entre los caudales observados y simulados durante el periodo de validación (Figura 15) evidencia que el modelo reproduce de manera adecuada la dinámica temporal del caudal, capturando los patrones asociados a los eventos de precipitación. Esto

indica que los parámetros calibrados son estables y representativos del sistema. No obstante, se presentan discrepancias en la magnitud de algunos picos, especialmente en eventos de alta intensidad.

La curva de duración muestra una buena concordancia en el rango de caudales medios, confirmando la capacidad del modelo para representar el régimen hidrológico general. En conjunto, los resultados validan al modelo GR4J como una herramienta confiable para la simulación del comportamiento hidrológico, aunque sus limitaciones en la representación de eventos extremos y su sensibilidad a la variabilidad climática deben considerarse en la interpretación de los resultados.

**Figura 15:**  
*Validación de caudal observado vs caudal simulado vs precipitación y curva de duración.*



**Fuente:** Elaboración Propia.

El modelo GR4J incorpora de manera implícita el balance hídrico a través de sus estructuras de almacenamiento y parámetros, representando los procesos de transformación de la precipitación en escorrentía. No obstante, el análisis del balance hídrico a nivel del estudio permite verificar la coherencia física de los resultados obtenidos, asegurando que la relación entre precipitación, evapotranspiración y caudal sea consistente con el comportamiento hidrológico de la cuenca. En este sentido, el balance hídrico no sustituye la modelación, sino que la complementa como un mecanismo de verificación de la consistencia hidrológica de las simulaciones. De manera complementaria, los valores anuales de las variables hidrológicas empleadas en el análisis del balance hídrico pueden consultarse en el Anexo correspondiente, específicamente en la carpeta “02\_Hidrologia”, en el archivo “GR4J\_en”, donde se presentan los resultados detallados del modelo.

### **6.3 Etapa 3: Simulación de oferta ante escenarios de cambio climático**

A partir de lo anterior, se procedió a la descarga de la información cruda de los modelos de circulación global (GCM) ACCESS-CM2, CanESM5, EC-EARTH3, MIROC6, NorESM2-MM y CMCC-ESM2, correspondientes a los escenarios SSP seleccionados (SSP126, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5). Posteriormente, mediante el lenguaje Python, se aplicaron técnicas de downscaling y se construyó un ensamble multi-modelo mediante el método REA (Reliability Ensemble Averaging), con el fin de reducir la incertidumbre asociada a los modelos individuales. Este proceso permitió obtener series proyectadas de precipitación y temperatura para el periodo 2015–2100 para sus respectivas estaciones.

A partir de las representaciones mostradas en la figura 16, se evidencia que la precipitación proyectada para la cuenca del río Combeima presenta una alta variabilidad interanual a lo largo del siglo XXI, sin una tendencia claramente monotónica en todos los escenarios SSP. Aunque algunos escenarios muestran ligeras disminuciones o incrementos en

determinados periodos, el comportamiento general está dominado por fluctuaciones que reflejan la incertidumbre inherente a los modelos climáticos y la variabilidad natural del sistema. Este resultado es consistente con el comportamiento previamente identificado en las series históricas, donde la precipitación no presenta tendencias marcadas, sino una dinámica altamente variable influenciada por forzantes climáticos.

Un aspecto importante del análisis es el amplio rango de dispersión entre los modelos representado por el área sombreada, lo cual evidencia diferencias significativas en la magnitud de la precipitación proyectada. Esta dispersión pone de manifiesto que, aunque el ensamble multi-modelo (REA) permite reducir la incertidumbre individual de cada GCM, persiste una variabilidad considerable que limita la precisión de las proyecciones. En este sentido, los resultados deben interpretarse como posibles trayectorias del sistema climático y no como predicciones determinísticas, reforzando la necesidad de un enfoque basado en escenarios en la gestión del recurso hídrico.

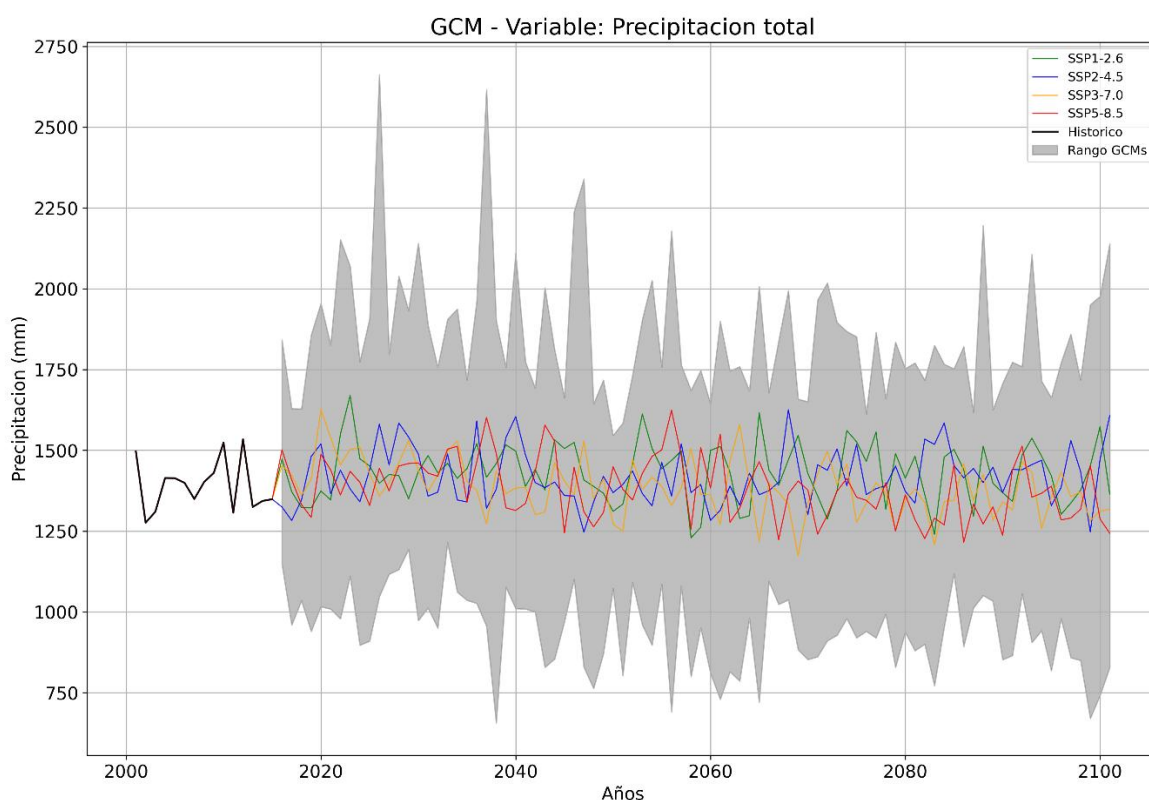
Al comparar los escenarios SSP, no se observa una separación completamente definida entre ellos en términos de precipitación total, lo que sugiere que, para esta variable, la señal del cambio climático puede ser menos evidente que en otras variables como la temperatura. Sin embargo, esto no implica ausencia de impacto, ya que las diferencias entre escenarios pueden manifestarse en la distribución temporal de la precipitación y en la frecuencia de eventos extremos, aspectos que no siempre son capturados únicamente mediante valores promedio anuales.

Estos resultados indican que la principal afectación futura en la oferta hídrica no necesariamente provendrá de una disminución significativa de la precipitación total, sino de cambios en su variabilidad, estacionalidad y concentración temporal. Esto es relevante en el contexto de la modelación hidrológica realizada, donde se evidenció que el sistema es altamente sensible a eventos extremos, los cuales controlan la generación de caudales. En

consecuencia, incluso sin cambios drásticos en los totales anuales, la disponibilidad hídrica puede verse comprometida por una redistribución de las lluvias.

En consecuencia, la problemática hídrica futura no se explica únicamente por cambios en la precipitación total, sino por su variabilidad y distribución temporal, lo que incrementa la probabilidad de eventos de déficit hídrico.

**Figura 16:**  
*Comportamiento intra-anual de la variable precipitación estación El secreto 21210080.*



**Fuente:** Elaboración Propia.

En la figura 17, se presenta el análisis de la estacionalidad de la precipitación proyectada para la estación El Secreto (21210080), donde se compara el comportamiento mensual histórico con los diferentes escenarios SSP. En términos generales, se observa que los valores proyectados se mantienen dentro de rangos similares al comportamiento histórico, sin evidenciar cambios abruptos en la magnitud mensual de la precipitación. Este resultado sugiere que, a escala intra-anual, el régimen pluviométrico de la cuenca tiende a conservar su

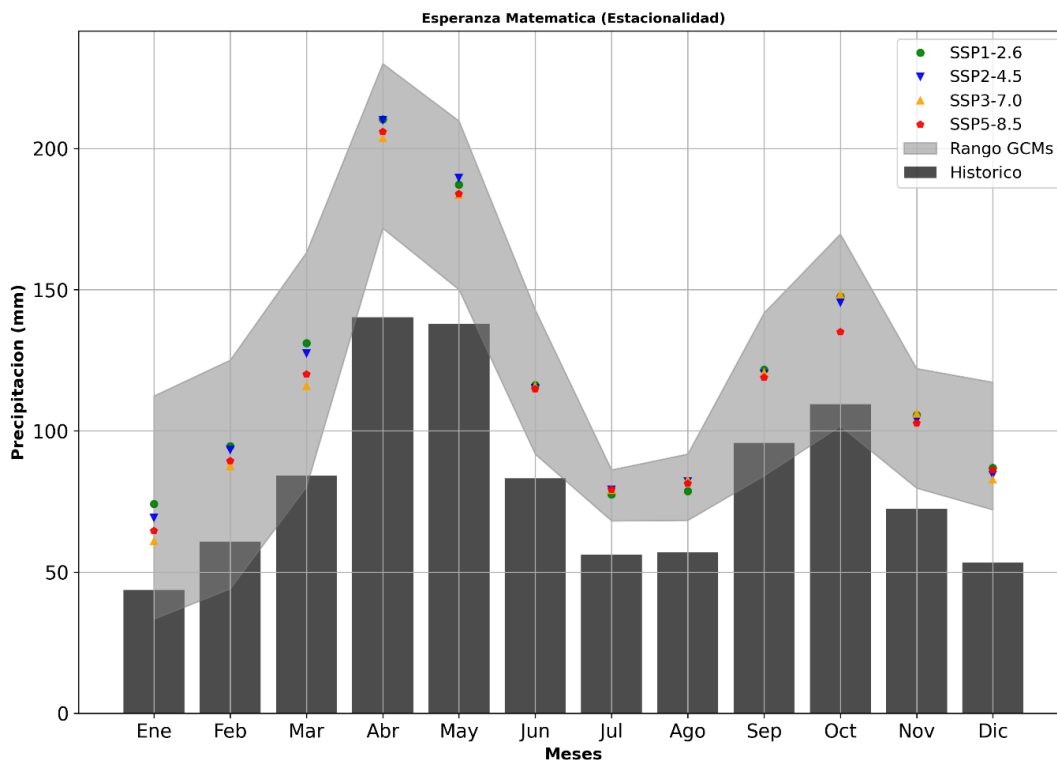
estructura estacional, lo cual es consistente con lo reportado por el IPCC (2021) para regiones tropicales, donde las señales de cambio en precipitación suelen ser menos evidentes que en otras variables climáticas.

No obstante, un aspecto relevante del análisis es la dispersión observada entre los modelos de circulación global, especialmente durante los meses de mayor precipitación, como abril y mayo. Esta variabilidad refleja la incertidumbre inherente a las proyecciones climáticas y pone en evidencia que los modelos presentan diferencias en la estimación de la intensidad de los eventos lluviosos. En particular, los escenarios de mayores emisiones (SSP3-7.0 y SSP5-8.5) tienden a mostrar una mayor amplitud en el rango de valores, lo que sugiere que el incremento en la temperatura global podría estar asociado a una mayor inestabilidad en el régimen de lluvias.

La conservación del patrón estacional no implica estabilidad hidrológica. Por el contrario, el hecho de que los meses húmedos continúen concentrando la mayor parte de la precipitación, pero con una mayor dispersión entre modelos, indica que los eventos lluviosos podrían volverse más intensos o irregulares. Esto es particularmente relevante considerando que, como se evidenció en el análisis de series y outliers, la cuenca responde de manera sensible a eventos extremos, los cuales tienen un peso determinante en la generación de caudales.

Asimismo, durante los meses secos (junio–agosto), aunque los valores proyectados no muestran cambios significativos en magnitud, la persistencia de condiciones de baja precipitación, combinada con el incremento de la temperatura, podría intensificar los periodos de déficit hídrico debido al aumento de la evapotranspiración. Este efecto refuerza la idea de que la disponibilidad hídrica futura no depende únicamente de la cantidad de precipitación, sino de su interacción con otras variables climáticas.

**Figura 17:**  
Evolución anual de la precipitación proyectada en diferentes SSP estación El secreto 21210080.

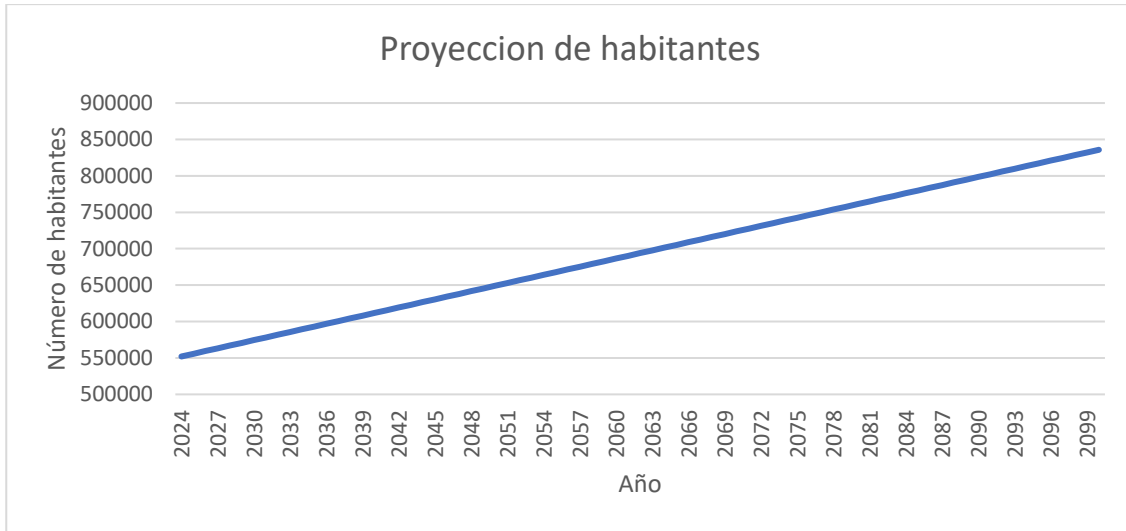


Fuente: Elaboración Propia.

### 6.3.1 Proyección y demanda hídrica de población de Ibagué

Los resultados de la proyección poblacional para el municipio de Ibagué figura 18, evidencian un crecimiento sostenido a lo largo del periodo 2024–2100, estimado mediante el método aritmético. Se proyecta que la población pase de aproximadamente 552.035 habitantes en 2024 a 835.781 habitantes en el año 2100, lo que representa un incremento de 283.746 habitantes, equivalente a un crecimiento del 33,94%. Este comportamiento refleja una tendencia continua de expansión demográfica que incide directamente en el aumento de la demanda de recursos básicos, particularmente el recurso hídrico.

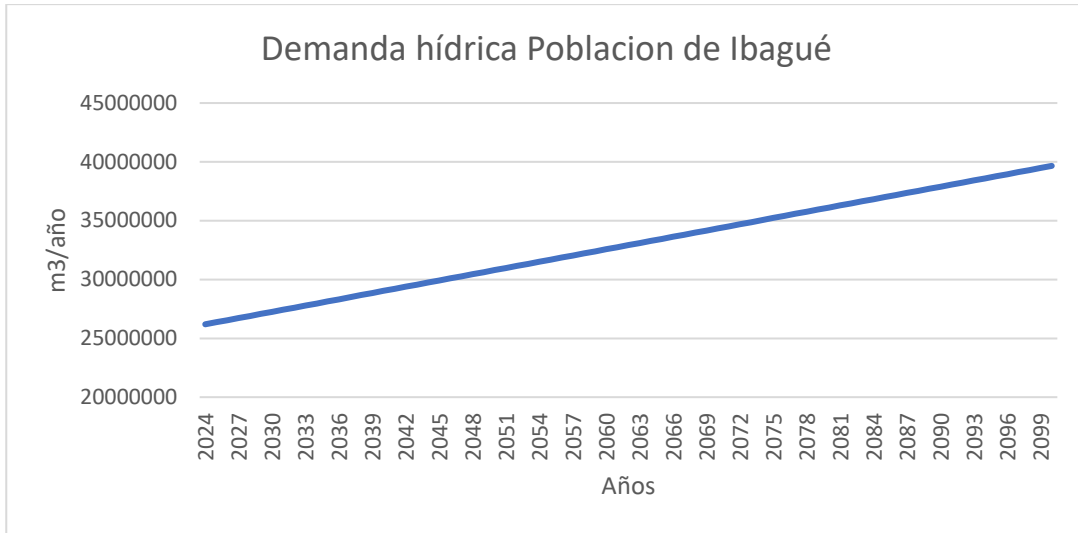
**Figura 18:**  
*Proyección de habitantes para el año 2100*



**Fuente:** Elaboración Propia.

En coherencia con este crecimiento poblacional, la demanda hídrica proyectada figura 19, muestra un incremento progresivo a lo largo del mismo periodo de análisis. Considerando una dotación de 130 L/hab·día, acorde con las condiciones geográficas y de consumo de la región, se estima un aumento total de 13.463.747,7 m<sup>3</sup> en la demanda anual de agua. Este incremento guarda una relación directa con el crecimiento poblacional proyectado, evidenciando que la presión sobre el recurso hídrico está principalmente determinada por factores antrópicos.

**Figura 19:**  
*Demanda hídrica de la población de Ibagué.*



**Fuente:** Elaboración Propia.

Se observa que la demanda hídrica mantiene una tendencia creciente sin presentar periodos de estabilización, lo que implica que el sistema de abastecimiento deberá responder a requerimientos cada vez mayores. Este comportamiento adquiere mayor relevancia al contrastarlo con los resultados de oferta hídrica, donde no se evidencian incrementos significativos en la disponibilidad de agua, sino una alta variabilidad asociada a las condiciones climáticas futuras.

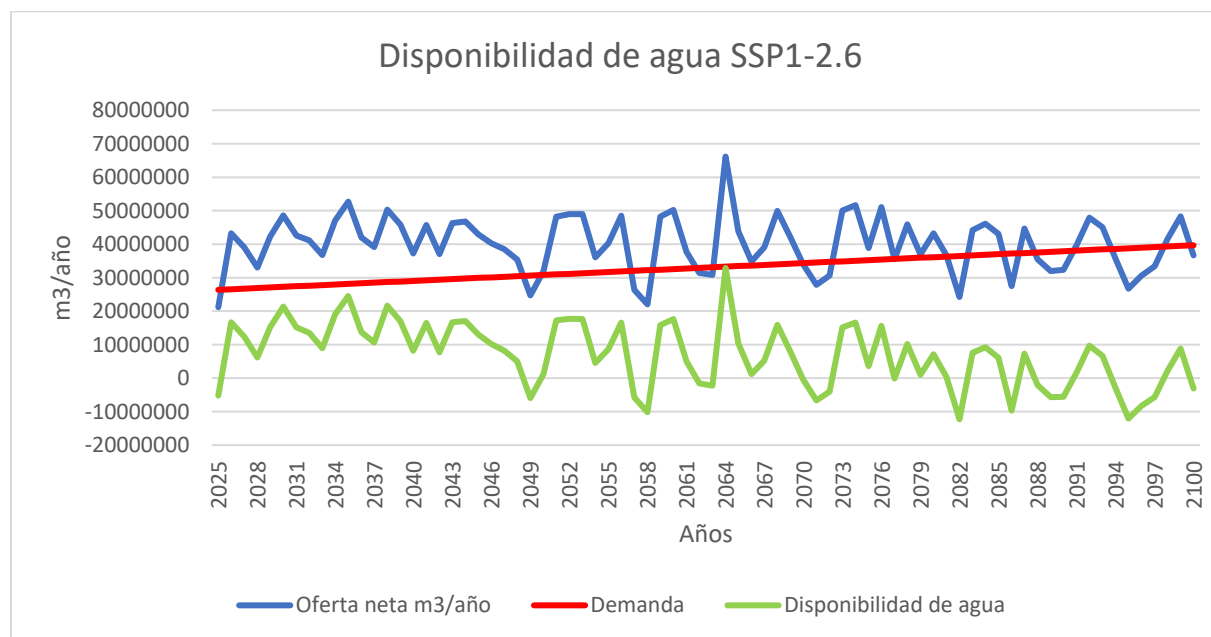
### 6.3.2 Disponibilidad de recurso hídrico en el escenario SSP1-2.6

A partir de la figura 20, los resultados de la disponibilidad hídrica bajo el escenario SSP1-2.6 evidencian que, aunque la oferta hídrica (línea azul) se mantiene relativamente estable a lo largo del periodo de análisis, la demanda (línea roja) presenta un crecimiento sostenido, lo que genera una reducción progresiva en la disponibilidad de agua (línea verde). En términos generales, se observa que la disponibilidad tiende a disminuir con el tiempo, presentando incluso valores negativos en algunos periodos los cuales se presenta 35 años la disponibilidad de oferta hídrica es menor a 0.

Este comportamiento pone en evidencia que la estabilidad relativa del clima en escenarios de bajas emisiones no se traduce necesariamente en condiciones de seguridad hídrica. Por el contrario, la presencia de valores negativos en la disponibilidad indica que el sistema entra en condiciones de déficit incluso sin cambios drásticos en la oferta, lo cual resalta el papel dominante de la presión antrópica en la configuración del balance hídrico.

Adicionalmente, la variabilidad de la oferta genera periodos alternados de superávit y déficit, lo que implica que la disponibilidad del recurso no es constante en el tiempo, sino que depende de la coincidencia entre eventos de alta o baja precipitación y los niveles de demanda. Este comportamiento es coherente con los análisis previos de variabilidad climática y presencia de eventos extremos, los cuales controlan la generación de caudales. En este sentido, el sistema presenta una alta sensibilidad a las condiciones climáticas, lo que introduce incertidumbre en la disponibilidad futura del recurso.

**Figura 20:**  
*Disponibilidad de agua en el escenario SSP1-2.6*



**Fuente:** Elaboración Propia.

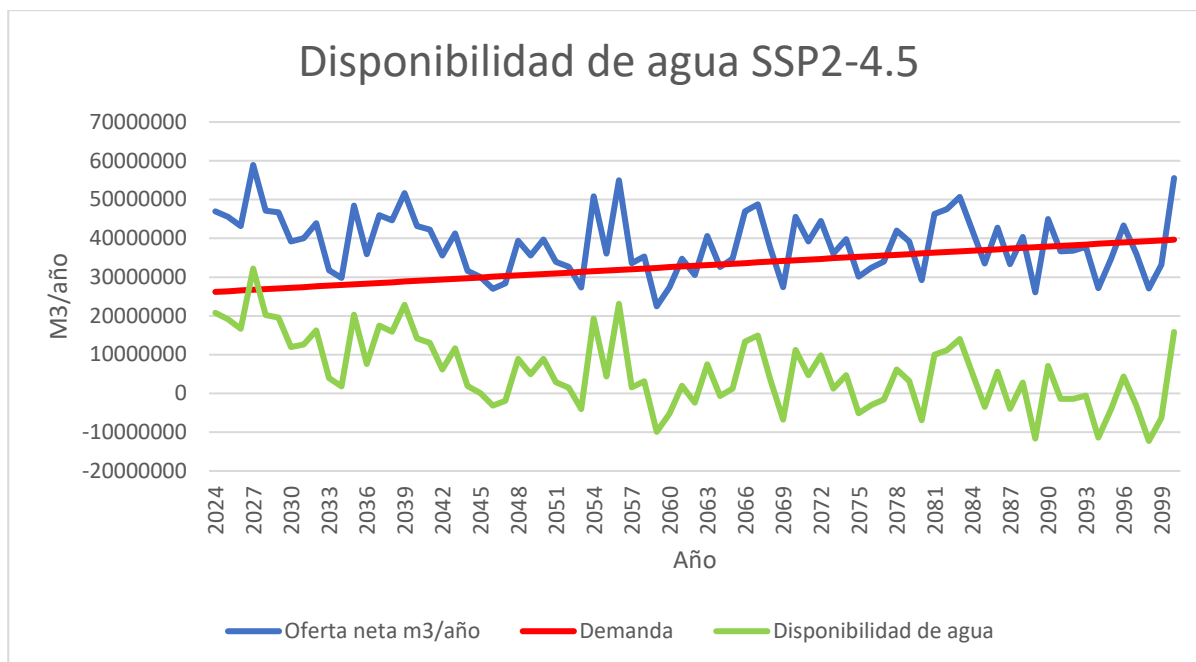
### **6.3.3 Disponibilidad de recurso hídrico en el escenario SSP2-4.5**

Para escenario SSP2-4.5 de la figura 21, los resultados evidencian una intensificación de la variabilidad en la disponibilidad hídrica, acompañada de una mayor frecuencia de condiciones de déficit en comparación con el escenario SSP1-2.6. Aunque la oferta hídrica mantiene un comportamiento similar en términos de magnitud, se observa una mayor dispersión en los valores, lo que refleja una mayor influencia de la variabilidad climática sobre el sistema.

Este escenario muestra una transición hacia condiciones de mayor vulnerabilidad, donde la estabilidad del sistema comienza a verse comprometida no tanto por una reducción sistemática de la oferta, sino por su irregularidad temporal. La presencia de valores negativos más frecuentes en la disponibilidad indica que el sistema pierde capacidad de respuesta frente a periodos de baja oferta, especialmente cuando estos coinciden con niveles elevados de demanda.

Asimismo, la relación entre oferta y demanda evidencia que el margen de disponibilidad se reduce de manera progresiva, lo que implica que el sistema opera cada vez más cerca de su límite. Este comportamiento sugiere que pequeñas variaciones en la oferta, asociadas a cambios en la precipitación o a eventos climáticos, pueden generar impactos significativos en la disponibilidad del recurso, incrementando el riesgo de desabastecimiento.

**Figura 21:**  
*Disponibilidad de agua en el escenario SSP2-4.5*



**Fuente:** Elaboración Propia.

#### 6.3.4 Disponibilidad de recurso hídrico en el escenario SSP3-7.0

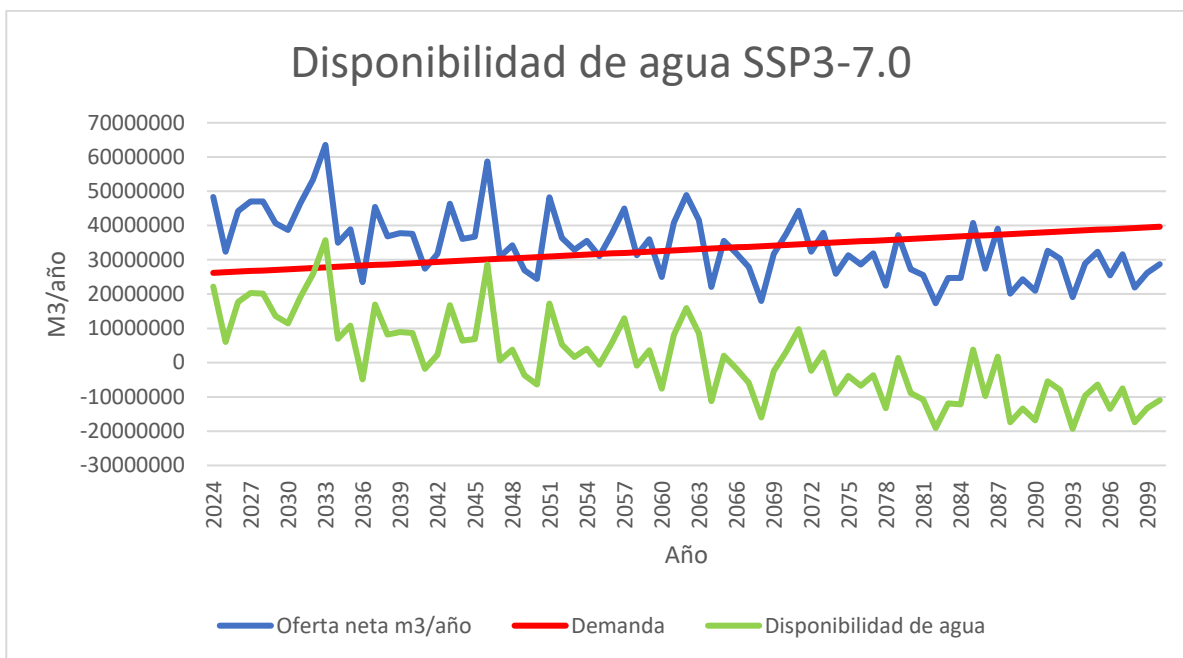
Los resultados correspondientes al escenario SSP3-7.0 de la figura 22, muestran un cambio significativo en la dinámica del sistema, caracterizado por una tendencia más marcada hacia condiciones de déficit hídrico. La oferta hídrica presenta una mayor variabilidad y una ligera tendencia a la disminución en ciertos periodos, lo que, combinado con el crecimiento sostenido de la demanda, amplía la brecha entre ambas variables.

El escenario evidencia que el incremento en las emisiones no solo afecta la variabilidad del sistema, sino que comienza a impactar su capacidad de sostenimiento. La mayor frecuencia e intensidad de valores negativos en la disponibilidad indica que los periodos de déficit no son eventos aislados, sino condiciones recurrentes que pueden comprometer la continuidad del abastecimiento.

Adicionalmente, la interacción entre variabilidad climática y demanda creciente genera un sistema altamente inestable, donde los periodos de recuperación son cada vez menos

frecuentes y de menor magnitud. Este comportamiento sugiere que el sistema pierde resiliencia frente a perturbaciones, lo que incrementa su vulnerabilidad frente a escenarios climáticos más severos.

**Figura 22:**  
Disponibilidad de agua en el escenario SSP3-7.0



Fuente: Elaboración Propia.

### 6.3.5 Disponibilidad de recurso hídrico en el escenario SSP5-8.5

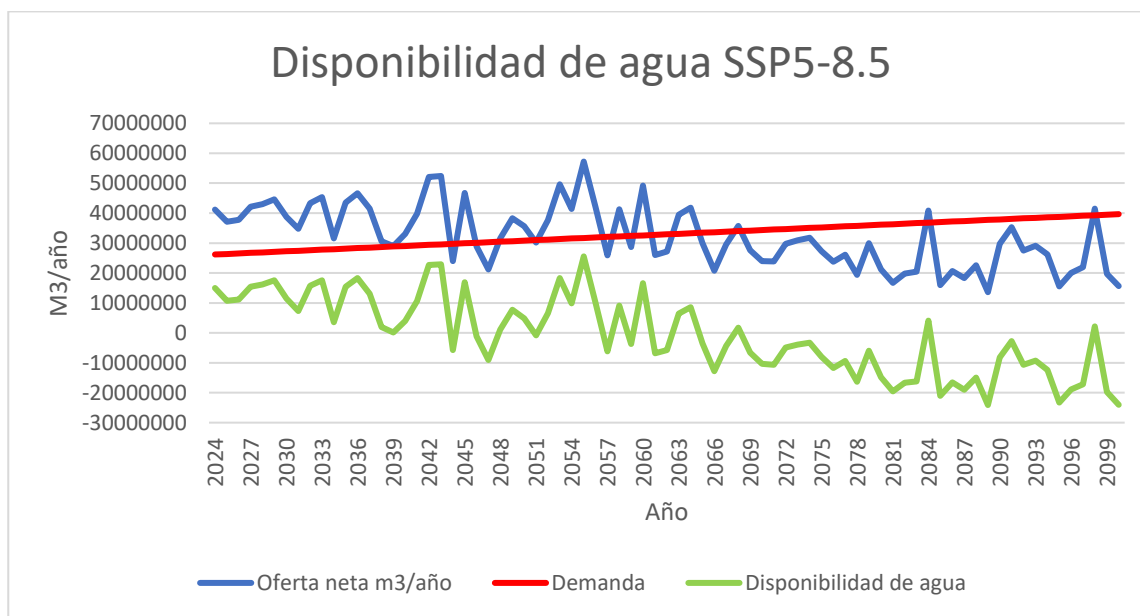
Por último, la Figura 23, correspondiente al escenario SSP5-8.5, representa la condición más crítica en términos de disponibilidad hídrica, evidenciando una tendencia sostenida hacia el déficit a lo largo del periodo de análisis. En este escenario, la oferta hídrica presenta una mayor irregularidad y, en algunos periodos, valores inferiores en comparación con los escenarios anteriores, mientras que la demanda continúa incrementándose de manera constante, superando la capacidad del sistema.

Este comportamiento pone en evidencia una ruptura en el equilibrio del sistema hídrico, donde la disponibilidad del recurso se ve comprometida de forma estructural. La persistencia de

valores negativos indica que el sistema no logra satisfacer la demanda en múltiples periodos, lo que implica un alto riesgo de desabastecimiento.

Asimismo, la magnitud de los déficits observados sugiere que la combinación entre la variabilidad climática y el crecimiento sostenido de la demanda genera condiciones que superan la capacidad de regulación natural de la cuenca. En este sentido, se evidencia que la disponibilidad hídrica está fuertemente condicionada por la relación entre oferta y demanda, donde incluso pequeñas variaciones en la oferta pueden desencadenar déficits estructurales. Este comportamiento resalta la necesidad de considerar escenarios de alta incertidumbre en la planificación del recurso hídrico, dado que las condiciones futuras podrían ser significativamente más críticas que las observadas históricamente.

**Figura 23:**  
*Disponibilidad de agua en el escenario SSP5-8.5*



**Fuente:** Elaboración Propia.

Los resultados obtenidos en la presente investigación guardan coherencia con el comportamiento previamente identificado en las series hidrometeorológicas analizadas en la Etapa 1, donde se evidenció una alta variabilidad temporal de la precipitación sin tendencias claras de incremento o disminución. Esta condición se refleja en la modelación hidrológica

desarrollada en la Etapa 2, donde el modelo GR4J logra reproducir de manera adecuada la dinámica general del caudal, particularmente en los valores medios, pero presenta limitaciones en la representación de eventos extremos. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en la literatura, donde se establece que modelos conceptuales parsimoniosos como GR4J son capaces de representar eficientemente el balance hídrico, aunque tienden a suavizar la respuesta hidrológica ante eventos de alta magnitud (Perrin et al., 2003; Pushpalatha et al., 2012).

En este sentido, los resultados de calibración y validación obtenidos, donde se evidencia un buen desempeño del modelo en términos de indicadores globales, son consistentes con estudios que señalan que la influencia de los eventos extremos sobre la eficiencia general del modelo es limitada cuando se emplean métricas integradas como el NSE. Esto implica que, aunque existen discrepancias en la simulación de picos de caudal, estas no comprometen la capacidad del modelo para representar la dinámica hidrológica del sistema en términos generales (Gupta et al., 2009c; Yu et al., 2012). Por tanto, los eventos extremos deben interpretarse como limitaciones inherentes a la estructura del modelo y no como fallas del proceso de modelación.

Adicionalmente, los resultados obtenidos en la Etapa 3 evidencian que la disponibilidad hídrica futura está fuertemente condicionada por la variabilidad climática y no necesariamente por cambios en los valores promedio de precipitación, lo cual coincide con estudios en regiones tropicales donde se ha demostrado que el cambio climático se manifiesta principalmente en alteraciones en la distribución temporal de las lluvias y en la frecuencia de eventos extremos. En este contexto, la modelación hidrológica confirma que la respuesta del sistema está dominada por la irregularidad de los aportes hídricos, lo que genera condiciones de incertidumbre en la disponibilidad del recurso.

En relación con las proyecciones climáticas utilizadas, el uso de técnicas de downscaling estadístico, específicamente el método Bias-Correction and Spatial Disaggregation (BCSD), es consistente con enfoques ampliamente validados en la literatura. Este tipo de metodologías permite corregir los sesgos de los modelos climáticos globales y generar series coherentes a escala local, preservando las propiedades estadísticas de las variables observadas. Estudios han demostrado que estas técnicas no requieren procesos adicionales de calibración hidrológica, dado que la corrección se realiza directamente sobre las variables de entrada, lo cual respalda la metodología aplicada en el presente estudio (Maurer & Hidalgo, 2008b; Wood et al., 2004).

Desde un enfoque crítico e integrador, la comparación con estudios similares permite establecer que los resultados obtenidos no son aislados, sino que responden a patrones ampliamente documentados en la literatura científica. En particular, se confirma que, el modelo GR4J es adecuado para la simulación de caudales medios en sistemas con alta variabilidad. Los eventos extremos no condicionan de manera determinante el desempeño global del modelo, finalmente la disponibilidad hídrica futura está más influenciada por la variabilidad climática y la interacción con la demanda que por cambios en los promedios de precipitación. En este sentido, los resultados refuerzan la idea de que la problemática hídrica en la cuenca del río Combeima es de carácter estructural, donde la presión antrópica y la variabilidad climática actúan de manera conjunta, generando escenarios de alta incertidumbre y vulnerabilidad.

## **7. Recomendaciones de adaptación**

Las recomendaciones de adaptación derivadas del presente estudio se fundamentan en los resultados obtenidos mediante la modelación hidrológica con el modelo GR4J y la evaluación de escenarios de cambio climático (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5).

Dichos resultados evidencian una tendencia consistente hacia la disminución de la oferta hídrica en la cuenca del río Combeima, acompañada de un incremento progresivo de la demanda, lo que configura un escenario de déficit hídrico estructural que compromete la sostenibilidad del sistema de abastecimiento del municipio de Ibagué. En este contexto, las estrategias de adaptación deben orientarse hacia una gestión integral del recurso hídrico, superando enfoques tradicionales centrados únicamente en el incremento de la oferta.

En primer lugar, se hace necesario fortalecer la gestión de la demanda hídrica, especialmente bajo escenarios de mayores emisiones donde el estrés hídrico se intensifica. En este sentido, entidades como IBAL, Cortolima y el IDEAM deben incorporar los resultados del estudio en sus procesos de planificación, promoviendo la reducción de pérdidas en redes de distribución, la optimización de las dotaciones per cápita y la implementación de programas de uso eficiente y ahorro del agua. Estas medidas permiten disminuir la presión sobre la fuente hídrica y aumentar la resiliencia del sistema frente a condiciones de variabilidad climática.

Adicionalmente, la disminución de los caudales base identificada en las simulaciones sugiere una afectación en los procesos de regulación natural de la cuenca, lo cual resalta la importancia de proteger y restaurar los ecosistemas estratégicos, especialmente en zonas de alta montaña y recarga hídrica. Estas acciones deben integrarse en instrumentos de planificación ambiental como el Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas (POMCA), promoviendo estrategias de conservación, restauración ecológica y soluciones basadas en la naturaleza que contribuyan a mejorar el Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) y, por ende, la estabilidad del régimen hidrológico.

Por otra parte, la variabilidad en la oferta hídrica proyectada bajo los distintos escenarios climáticos evidencia la necesidad de implementar mecanismos de regulación y almacenamiento del recurso. En este sentido, se recomienda evaluar la viabilidad de infraestructura hidráulica, como reservorios, así como el desarrollo de sistemas de captación en

periodos de alta disponibilidad hídrica. Estas medidas permitirían reducir la dependencia del régimen natural de caudales y aumentar la capacidad de adaptación del sistema frente a eventos extremos.

Asimismo, es fundamental incorporar los efectos del cambio climático en los instrumentos de planificación territorial, tales como el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) y los planes de gestión del riesgo. La inclusión de estos resultados como insumo técnico permitiría establecer restricciones al uso del suelo en zonas vulnerables, orientar el crecimiento urbano de manera sostenible y priorizar inversiones en seguridad hídrica, fortaleciendo la toma de decisiones a nivel local y regional.

Finalmente, considerando las limitaciones inherentes al modelo GR4J, especialmente en la representación de eventos extremos y la incertidumbre asociada a los escenarios climáticos, se recomienda complementar los análisis con enfoques de modelación más robustos, así como fortalecer la red de monitoreo hidrometeorológico. De igual manera, es importante promover procesos continuos de actualización, calibración y validación de los modelos, con el fin de mejorar la confiabilidad de los resultados y su aplicabilidad en la gestión integral del recurso hídrico.

## 8. Conclusiones

Se concluye que el análisis hidrometeorológico permitió validar la calidad y consistencia de la información utilizada, garantizando su aplicabilidad en la modelación hidrológica; no obstante, la presencia de variabilidad climática y tendencias en las series evidencia que el sistema no responde a condiciones estacionarias, lo cual introduce incertidumbre en la estimación de la oferta hídrica futura y limita el uso de enfoques tradicionales basados en datos históricos.

El modelo GR4J presenta un desempeño adecuado en la simulación del comportamiento hidrológico de la cuenca bajo condiciones actuales, permitiendo estimar la oferta hídrica de forma confiable; sin embargo, su estructura conceptual simplificada limita la representación de eventos extremos y procesos espaciales complejos, por lo que sus resultados deben interpretarse como tendencias robustas más que como predicciones exactas.

La oferta hídrica en la cuenca del río Combeima presenta una tendencia sostenida de disminución bajo todos los escenarios de cambio climático evaluados, lo que indica una alteración estructural del régimen hidrológico; esta condición implica que la disponibilidad futura del recurso no dependerá únicamente de la variabilidad natural, sino de cambios persistentes en los patrones climáticos.

El crecimiento proyectado de la demanda hídrica supera la capacidad de oferta del sistema en escenarios futuros, generando condiciones de déficit hídrico que se intensifican bajo escenarios de mayores emisiones; esta desarticulación evidencia que la problemática no radica únicamente en la disponibilidad del recurso, sino en la forma en que este es gestionado y planificado.

La alta dependencia del municipio de Ibagué respecto a la cuenca del río Combeima incrementa la vulnerabilidad del sistema de abastecimiento frente a la variabilidad climática, especialmente bajo la influencia de fenómenos como el ENSO, lo que resalta la necesidad de incorporar enfoques de gestión del riesgo hídrico en la planificación territorial.

La interacción entre las características morfométricas de la cuenca, la variabilidad climática y los escenarios de cambio climático genera un efecto combinado que amplifica la reducción de la oferta hídrica, evidenciando que el comportamiento del sistema hidrológico responde a múltiples factores interrelacionados que deben ser considerados de manera integrada.

La sostenibilidad del sistema de abastecimiento del municipio de Ibagué dependerá en mayor medida de la capacidad institucional para adaptarse a condiciones cambiantes, que, de la disponibilidad absoluta del recurso, lo que implica la necesidad de incorporar la incertidumbre climática como un elemento estructural en la toma de decisiones.

La influencia de la variabilidad climática, particularmente asociada al fenómeno ENSO, introduce una alta variabilidad interanual en la precipitación y los caudales, lo que afecta la estabilidad del sistema hidrológico y refuerza la necesidad de considerar estos forzantes climáticos en la modelación y planificación del recurso hídrico.

Las características morfométricas de la cuenca, como su forma alargada y las condiciones de pendiente, generan una respuesta hidrológica atenuada y distribuida en el tiempo, lo que influye directamente en la regulación natural del sistema y en la forma en que se manifiestan los eventos de escasez y disponibilidad hídrica.

La disminución de los caudales base observada en las simulaciones sugiere una posible afectación en los procesos de almacenamiento y liberación del agua en la cuenca, lo que

implica una reducción en la capacidad de regulación hídrica y un aumento en la vulnerabilidad frente a periodos prolongados de sequía.

Al incorporar de escenarios de cambio climático mediante modelos del CMIP6 y técnicas de downscaling permite obtener una aproximación más realista de las condiciones futuras; sin embargo, estos procesos también introducen incertidumbre, lo que implica que los resultados deben ser utilizados como herramientas para la toma de decisiones bajo riesgo y no como predicciones determinísticas.

La relación entre oferta y demanda hídrica evidencia una transición hacia condiciones de estrés hídrico en la cuenca, lo que implica la necesidad de replantear los esquemas actuales de gestión del recurso, priorizando estrategias de adaptación sobre enfoques tradicionales basados únicamente en la disponibilidad histórica.

La dependencia del sistema de abastecimiento de una única fuente hídrica limita la resiliencia del territorio frente a escenarios de cambio climático, lo que sugiere la necesidad de diversificar las fuentes de abastecimiento y fortalecer estrategias de almacenamiento y regulación del recurso.

La integración de herramientas de análisis hidrometeorológico, modelación hidrológica y proyecciones climáticas permitió generar una visión sistémica del comportamiento de la cuenca, evidenciando que la gestión del recurso hídrico debe abordarse desde un enfoque interdisciplinario que articule variables físicas, climáticas y socioeconómicas.

## 9. Anexos

Para visualizar los anexos y resultados obtenidos del presente proyecto, se puede dirigir al siguiente link. Debido a por temas de peso del archivo no se puede adjuntar en el formato solicitado.

[Evaluación de la oferta hídrica disponible para el sistema de abastecimiento del municipio de Ibaqué ante escenarios de cambio climático](#)

## 10. Bibliografía

Âassian, V. A., Perrin, C., Michel, C., Usart-Sanchez, I., & Lavabre, J. (2001). Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. [www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol)

Adedeji, O., Reuben, O., & Olatoye, O. (2014). Global Climate Change. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 02(02), 114–122. <https://doi.org/10.4236/gep.2014.22016>

Anderson, M. C., Peters, N. E., Amkoisc, B., AndenoD, M. P., Beven, K. J., Lh, R. U., Davis, R. E., Enpmuq, E. T., ccnarm, P., Cny, D. M., Curd, M., Him, D., J McDowll, J. J., McKnight, D. M., & Oyehlide, L. (1995). Hydrological processes. In *Publishers Since 1807 HYPREB* (Vol. 9).

Atiah, W. A., Johnson, R., Muthoni, F. K., Mengistu, G. T., Amekudzi, L. K., Kwabena, O., & Kizito, F. (2023). Bias correction and spatial disaggregation of satellite-based data for the detection of rainfall seasonality indices. *Heliyon*, 9(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17604>

Beven, K. J. . (2012). *Rainfall-runoff modelling : the primer*. Wiley-Blackwell.

Bi, D., Dix, M., Marsland, S., O'farrell, S., Sullivan, A., Bodman, R., Law, R., Harman, I., Srbinovsky, J., Rashid, H. A., Dobrohotoff, P., Mackallah, C., Yan, H., Hirst, A., Savita, A., Dias, F. B., Woodhouse, M., Fiedler, R., & Heerdegen, A. (2020). Configuration and spin-up of ACCESS-CM2, the new generation Australian Community Climate and Earth System Simulator Coupled Model. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 70(1), 225–251.  
<https://doi.org/10.1071/ES19040>

Blöschl, G., Hall, J., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Merz, B., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilibashi, A., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Claps, P., Fiala, K., Frolova, N., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., ... Živković, N. (2017). Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 357(6351), 588–590.  
<https://doi.org/10.1126/science.aan2506>

Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938–6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>

Chow Ven Te, Maidment David, & Mays LArry. (1988). *Applied Hydrology*.

Cortolima. (2020, October 7). SIEMBRAZUL, un proyecto que protegerá la fuente hídrica de los ibaguereños.

Duan, C., Wang, P., Cao, W., Wang, X., Wu, R., & Cheng, Z. (2021). Improving the spring air temperature forecast skills of BCC\_CSM1.1 (m) by spatial disaggregation and bias correction: Importance of trend correction. *Atmosphere*, 12(9).  
<https://doi.org/10.3390/atmos12091143>

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.

<https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>

Farhan, Y., Anbar, A., Enaba, O., & Al-Shaikh, N. (2015). Quantitative Analysis of Geomorphometric Parameters of Wadi Kerak, Jordan, Using Remote Sensing and GIS. *Journal of Water Resource and Protection*, 07(06), 456–475. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2015.76037>

Giorgi, F., & Gutowski, W. J. (2015). Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. In *Annual Review of Environment and Resources* (Vol. 40, pp. 467–490). Annual Reviews Inc. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021217>

Grubbs, F. E. (1969). *American Society for Quality Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples* (Vol. 11, Number 1).

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009a). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009b). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009c). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>

Haarsma, R., Acosta, M., Bakhshi, R., Bretonnière, P. A., Caron, L. P., Castrillo, M., Corti, S., Davini, P., Exarchou, E., Fabiano, F., Fladrich, U., Franco, R. F., García-Serrano, J., Von Hardenberg, J., Koenigk, T., Levine, X., Meccia, V. L., Van Noije, T., Van Den Oord, G., ... Wyser, K. (2020). HighResMIP versions of EC-Earth: EC-Earth3P and EC-Earth3P-HR -

Description, model computational performance and basic validation. *Geoscientific Model Development*, 13(8), 3507–3527. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3507-2020>

Helsel, D. R., Hirsch, R. M., Ryberg, K. R., Archfield, S. A., & Gilroy, E. J. (n.d.). *Statistical Methods in Water Resources*.

IDEAM, I. H. M. y E. A. (2018). *Estudio Nacional del Agua*.

IDEAM, I. H. M. y E. A. (2022). *Estudio Nacional Del Agua*.

IPCC. (2022). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability* (pp. 3–34). Cambridge University Press.  
<https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>

IPCC. (2023). IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers*. (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, ... Y. Park, Eds.).  
<https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>

IPCC. (2021). Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Edited by. [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

Katz, R. W., & Brown, B. G. (n.d.). *EXTREME EVENTS IN A CHANGING CLIMATE: VARIABILITY IS MORE IMPORTANT THAN AVERAGES*.

Klemeš, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1), 13–24. <https://doi.org/10.1080/02626668609491024>

Knutti, R., Furrer, R., Tebaldi, C., Cernak, J., & Meehl, G. A. (2010). Challenges in combining projections from multiple climate models. *Journal of Climate*, 23(10), 2739–2758.  
<https://doi.org/10.1175/2009JCLI3361.1>

Kundzewicz, Z. W., & Robson, A. J. (2004). Change detection in hydrological records - A review of the methodology. *Hydrological Sciences Journal*, 49(1), 7–19.

<https://doi.org/10.1623/hysj.49.1.7.53993>

Le Lay, M., Galle, S., Saulnier, G. M., & Braud, I. (2007). Exploring the relationship between hydroclimatic stationarity and rainfall-runoff model parameter stability: A case study in West Africa. *Water Resources Research*, 43(7). <https://doi.org/10.1029/2006WR005257>

Legates, D. R., & McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233–241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>

Lorenz, C., Portele, T. C., Laux, P., & Kunstmann, H. (2021). Bias-corrected and spatially disaggregated seasonal forecasts: A long-term reference forecast product for the water sector in semi-arid regions. *Earth System Science Data*, 13(6), 2701–2722. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2701-2021>

Lovato T, Navarra A, Peano D, & Lovino D. (2022, February 10). CMIP6 Simulations With the CMCC Earth System Model (CMCC-ESM2).

Maidment, D. R., San, N. Y., Washington, F., Auckland Bogota, D. C., Lisbon, C., Madrid, L., City, M., Montreal, M., Delhi, N., & Juan, S. (n.d.). HANDBOOK OF HYDROLOGY Part 1 Hydrologic Cycle.

Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A. M., Chandler, R. E., Kendon, E. J., Widmann, M., Brienen, S., Rust, H. W., Sauter, T., Themel, M., Venema, V. K. C., Chun, K. P., Goodess, C. M., Jones, R. G., Onof, C., Vrac, M., & Thiele-Eich, I. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48(3). <https://doi.org/10.1029/2009RG000314>

Maurer, E. P., & Hidalgo, H. G. (2008a). Hydrology and Earth System Sciences Utility of daily vs. monthly large-scale climate data: an intercomparison of two statistical downscaling methods. In *Hydrol. Earth Syst. Sci* (Vol. 12). [www.hydrol-earth-syst-sci.net/12/551/2008/](http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/12/551/2008/)

Maurer, E. P., & Hidalgo, H. G. (2008b). Hydrology and Earth System Sciences Utility of daily vs. monthly large-scale climate data: an intercomparison of two statistical downscaling methods. In *Hydrol. Earth Syst. Sci* (Vol. 12). [www.hydrol-earth-syst-sci.net/12/551/2008/](http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/12/551/2008/)

Mays, L. (2005). *Water Resources Engineering*.

Mecchia, M., Sauro, F., Piccini, L., De Waele, J., Sanna, L., Tisato, N., Lira, J., & Vergara, F. (2014). Geochemistry of surface and subsurface waters in quartz-sandstones: Significance for the geomorphic evolution of tepui table mountains (Gran Sabana, Venezuela). *Journal of Hydrology*, 511, 117–138. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.029>

Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., & Stouffer, R. J. (2008). Climate change: Stationarity is dead: Whither water management? In *Science* (Vol. 319, Number 5863, pp. 573–574). <https://doi.org/10.1126/science.1151915>

Ministerio de Ambiente, V. y D. T. (2010). Decreto 3930 de 2010.

Ministerio de Ambiente, V. y desarrollo territorial. (2003). definicion nivel de complejidad proyeccion poblacion.

ministerio de hacienda, & ministerio de ambiente. (n.d.). Diagnostico de la morfometría.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (1983). MODEL EVALUATION GUIDELINES FOR SYSTEMATIC QUANTIFICATION OF ACCURACY IN WATERSHED SIMULATIONS. In *Transactions of the ASABE* (Vol. 50, Number 3).

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). MODEL EVALUATION GUIDELINES FOR SYSTEMATIC QUANTIFICATION OF ACCURACY IN WATERSHED SIMULATIONS. In Transactions of the ASABE (Vol. 50, Number 3).

Moriasi, 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. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>

Nash, E. J., & Sutcliffe, I. V. (1970). RIVER FLOW FORECASTING THROUGH CONCEPTUAL MODELS PART I-A DISCUSSION OF PRINCIPLES\*.

NOAA. (2025). National Weather Service Climate prediction Center.

O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J. F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. Geoscientific Model Development, 9(9), 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. Journal of Hydrology, 303(1–4), 290–306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>

Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology, 279(1–4), 275–289. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)

Perrin, C., Oudin, L., Andreassian, V., Rojas-Serna, C., Michel, C., & Mathevet, T. (2007). Impact of limited streamflow data on the efficiency and the parameters of rainfall-runoff models. *Hydrological Sciences Journal*, 52(1), 131–151. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.1.131>

Philander, S. G. (2001). El Niño Southern Oscillation (Enso) Models. In *Encyclopedia of Ocean Sciences* (pp. 827–832). Elsevier. <https://doi.org/10.1006/rwos.2001.0401>

Pierce, D. W., Cayan, D. R., & Thrasher, B. L. (n.d.). Statistical Downscaling Using Localized Constructed Analogs (LOCA)\*. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14>

Poveda German, Mesa Oscar, & Waylen Peter. (2001). Nonlinear forecasting of river flows in Colombia based upon ENSO and its associated economic value for hydropower generation.

Pushpalatha, R., Perrin, C., Moine, N. Le, & Andréassian, V. (2012). A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations. *Journal of Hydrology*, 420–421, 171–182. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.055>

Randall, D. A., Wood, R. A., Bony, S., Colman, R., Fichefet, T., Fyfe, J., Kattsov, V., Pitman, A., Shukla, J., Srinivasan, J., Stouffer, R. J., Sumi, A., Taylor, K. E., Manzini, E., Matsuno, T., McAvaney, B., Wood, R., Bony, S., Colman, R., ... Taylor, K. (2007). 8 Climate Models and Their Evaluation Coordinating Lead Authors: Lead Authors: Review Editors: This chapter should be cited as.

Ras 2017 (2017).

Ras 2017 (2017).

Redacción Ibagué, & El Olfato. (2024). Río Combeima y quebrada Cay de Ibagué registran disminución en sus caudales.

Refsgaard, J. (1997). Validation-and-Intercomparison-of-Different-Updating-Procedures-for-Real-Time-Forecasting.

Reusser, D. E., Blume, T., Schaefli, B., & Zehe, E. (2009). Hydrology and Earth System Sciences Analysing the temporal dynamics of model performance for hydrological models. In Hydrol. Earth Syst. Sci (Vol. 13). [www.hydrol-earth-syst-sci.net/13/999/2009/](http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/13/999/2009/)

Ropelewski C.F, & Halpert M.S. (1987). Global and Regional scale precipitation patterns associated whit the El niño/southern oscillation.

Sampieri Roberto. (2014). Metodologia de la investigacion.

Schumm, S. A. (1966). EVOLUTION OF DRAINAGE SYSTEMS AND SLOPES IN BADLANDS AT PERTH AMBOY, NEW JERSEY.

<http://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsabulletin/article-pdf/67/5/597/3431756/i0016-7606-67-5-597.pdf>

Seland, Ø., Bentsen, M., Olivíe, D., Toniazzo, T., Gjermundsen, A., Graff, L. S., Debernard, J. B., Gupta, A. K., He, Y. C., Kirkevåg, A., Schwinger, J., Tjiputra, J., Schanke Aas, K., Bethke, I., Fan, Y., Griesfeller, J., Grini, A., Guo, C., Ilicak, M., ... Schulz, M. (2020).

Overview of the Norwegian Earth System Model (NorESM2) and key climate response of CMIP6 DECK, historical, and scenario simulations. *Geoscientific Model Development*, 13(12), 6165–6200. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-6165-2020>

Singh, V. P. (n.d.). Water Resources Publications.

Steffens, K., Larsbo, M., Moeys, J., Kjellström, E., Jarvis, N., & Lewan, E. (2013). Modelling pesticide leaching under climate change: parameter vs. climate input uncertainty. <https://doi.org/10.5194/hessd-10-10461-2013>

Swart, N. C., Cole, J. N. S., Kharin, V. V., Lazare, M., Scinocca, J. F., Gillett, N. P., Anstey, J., Arora, V., Christian, J. R., Hanna, S., Jiao, Y., Lee, W. G., Majaess, F., Saenko, O. A., Seiler, C., Seinen, C., Shao, A., Sigmond, M., Solheim, L., ... Winter, B. (2019). The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3). *Geoscientific Model Development*, 12(11), 4823–4873. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-4823-2019>

Tatebe, H., Ogura, T., Nitta, T., Komuro, Y., Ogochi, K., Takemura, T., Sudo, K., Sekiguchi, M., Abe, M., Saito, F., Chikira, M., Watanabe, S., Mori, M., Hirota, N., Kawatani, Y., Mochizuki, T., Yoshimura, K., Takata, K., O’Ishi, R., ... Kimoto, M. (2019). Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geoscientific Model Development*, 12(7), 2727–2765. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019>

Teegavarapu, R. S. V., & Chandramouli, V. (2005). Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records. *Journal of Hydrology*, 312(1–4), 191–206. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.02.015>

Tidjani, A. M., Togbévi, Q. F., Tovihoudji, P. G., Akponikpè, P. B. I., & Vanclooster, M. (2026). Applicability of the Lumped GR4J Model for Modeling the Hydrology of the Inland Valleys of the Sudanian Zones of Benin. *Water (Switzerland)*, 18(3). <https://doi.org/10.3390/w18030340>

Todini, E. (2007). Hydrological catchment modelling: past, present and future. In *Hydrological Earth Syst. Sci* (Vol. 11, Number 1). [www.hydrological-earth-syst-sci.net/11/468/2007](http://www.hydrological-earth-syst-sci.net/11/468/2007)

Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Kiehl, J. (2009). Earth’s global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(3), 311–323. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1>

Universidad de Ibagué. (2024). Ficha de caracterización municipio de Ibagué.

Wang, S., Leslie, L., Rai, T., Speer, M., & Kuleshov, Y. (2020). Analysis of a southerly buster event and associated solitary waves. *Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science*, 69(1), 205–215. <https://doi.org/10.1071/es19015>

Wilby, R. L., Charles, S. P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., & Mearns, L. O. (2004). *Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods*. Document history.

Wilks Daniel. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* Second Edition.

Wood, A. W., Leung, L. R., Sridhar, V., & Lettenmaier, D. P. (2004). HYDROLOGIC IMPLICATIONS OF DYNAMICAL AND STATISTICAL APPROACHES TO DOWNSCALING CLIMATE MODEL OUTPUTS.

World Meteorological Organization. (2008). *Guide to Hydrological Practice Volume I Hydrology-From Measurement to Hydrological Information*.

Yu, C., Gao, B., & Muñoz-Carpena, R. (2012). Effect of dense vegetation on colloid transport and removal in surface runoff. *Journal of Hydrology*, 434–435, 1–6. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2012.02.042>

Yue, S., & Wang, C. Y. (2002). Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test. *Water Resources Research*, 38(6), 4-1-4–7. <https://doi.org/10.1029/2001wr000861>