

Recopilación y análisis de información Hidro climatológica para  
el diagnóstico y modelación hidrológica, para la formulación del Plan de  
Ordenamiento del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río Guavio.

Autor

Victor Santiago Cordoba Borja

Pasantía



Facultad de Ciencias Ambientales

Universidad Santo Tomás

Bogotá D.C

2026

Recopilación y análisis de información Hidro climatológica para  
el diagnóstico y modelación hidrológica, para la formulación del Plan de  
Ordenamiento del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río Guavio.

Autor

Victor Santiago Cordoba Borja

Informe final de pasantía presentado como opción de grado para optar al título  
profesional de Ingeniero Ambiental.

Directora

Ing. Dayam Soret Calderon Rivera

Codirectora

Ing. Iraidys Sierra Garzón



Facultad de Ciencias Ambientales

Universidad Santo Tomás

Bogotá D.C.

2026

## **Resumen.**

El presente trabajo de pasantía se desarrolló en la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) con el objetivo de aportar al proceso de formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH) en la cuenca del río Guavio, mediante la recopilación, depuración, análisis y modelación de información hidroclimatológica. La necesidad de este estudio surge a partir de los conflictos de uso y disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca, asociados a la presión de actividades antrópicas y a la variabilidad climática, lo que exige herramientas técnicas robustas que permitan comprender la dinámica hidrológica del sistema.

Metodológicamente, el trabajo se estructuró en varias fases que incluyeron la recopilación de datos de estaciones hidrometeorológicas y análisis estadístico de las series de precipitación y temperatura, y la implementación de un modelo hidrológico. Se seleccionó una estrategia de modelación basada en la combinación del modelo conceptual GR4J y la plataforma RS MINERVE, con el fin de integrar la simplicidad y robustez del primero con la capacidad de representación espacial del segundo. Esta articulación permitió abordar de manera más completa los procesos de generación y propagación de escorrentía dentro de la cuenca.

El proceso de calibración del modelo se realizó mediante la comparación entre caudales observados y simulados, utilizando indicadores de desempeño hidrológico como el coeficiente de Nash-Sutcliffe, el coeficiente de correlación y la eficiencia de Kling-Gupta. Los resultados evidenciaron un desempeño aceptable del modelo, con una adecuada representación de la dinámica temporal del caudal, aunque con limitaciones en la simulación de eventos extremos, los cuales tienden a ser subestimados.

En términos generales, el modelo permitió reproducir el comportamiento hidrológico de la cuenca y generar insumos relevantes para la estimación de la oferta hídrica. Estos resultados constituyen una base técnica importante para la toma de decisiones en el marco del PORH, permitiendo identificar patrones de disponibilidad del recurso, periodos críticos y posibles escenarios de gestión. No obstante, los resultados deben interpretarse considerando las incertidumbres asociadas a la calidad de los datos y a las simplificaciones propias del modelo.

**Palabras clave:** Modelación hidrológica, GR4J, RS MINERVE, Recurso hídrico, Cuenca del río Guavio, Oferta hídrica, Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH)

## **Abstract.**

This internship was carried out at the Regional Autonomous Corporation of Cundinamarca (CAR) with the objective of contributing to the formulation of the Water Resource Management Plan (PORH) for the Guavio River basin, through the collection, refinement, analysis, and modeling of hydroclimatological information. The need for this study arises from conflicts regarding water use and availability in the basin, associated with the pressure of human activities and climate variability, which demands robust technical tools to understand the hydrological dynamics of the system.

The methodology involved several stages, including data collection from hydrometeorological stations of precipitation and temperature time series, and the implementation of a hydrological model. A combined modeling approach was adopted using the GR4J conceptual rainfall-runoff model and the RS MINERVE platform, allowing the integration of a parsimonious model structure with a semi-distributed spatial representation. This approach enhanced the capacity to simulate runoff generation and flow propagation processes within the basin .

Model calibration was performed by comparing observed and simulated streamflow data, using performance indicators such as the Nash-Sutcliffe efficiency, Pearson correlation coefficient, and Kling-Gupta efficiency. The results showed an acceptable model performance, with a good representation of the temporal dynamics of streamflow, although peak flows were generally underestimated.

Overall, the model proved to be a useful tool for representing the hydrological behavior of the basin and for generating relevant inputs for water availability assessment. These findings contribute to water resource planning by identifying critical periods and supporting decision-making processes. However, the results should be interpreted considering uncertainties related to data quality and model simplifications.

**Keywords:** Hidrological modeling, GR4J, RS MINERVE, Water resources, Guavio river basin, Water availability, Water Resource Management Plan.

## Contenido

|                                                                                                                                         |                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Resumen.....                                                                                                                            | 3                                    |
| Abstract.....                                                                                                                           | 4                                    |
| 1. Introducción.....                                                                                                                    | 7                                    |
| 2. Objetivos.....                                                                                                                       | 8                                    |
| 2.1 Objetivo General .....                                                                                                              | 8                                    |
| 2.2 Objetivos Específicos .....                                                                                                         | 8                                    |
| 3. Marco Referencial .....                                                                                                              | 9                                    |
| 3.1 Marco contextual .....                                                                                                              | 9                                    |
| 3.1.1 Contexto general del recurso hídrico en Colombia .....                                                                            | 9                                    |
| 3.1.2 Contexto institucional.....                                                                                                       | 11                                   |
| 3.1.3 Integración entre datos hidroclimatológicos y modelación hidrológica en el contexto de la planificación hídrica en Colombia ..... | 12                                   |
| 3.1.4 Contexto geográfico del área de estudio.....                                                                                      | 14                                   |
| 4. Marco Teórico.....                                                                                                                   | 20                                   |
| 4.1 Fundamentos de la hidrología de cuencas .....                                                                                       | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| 4.2 Procesos hidrológicos .....                                                                                                         | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| 4.3 Modelación hidrológica.....                                                                                                         | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| 4.4 Modelo hidrológico GR4J .....                                                                                                       | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| 4.5 Modelo hidrológico RSMINERVE .....                                                                                                  | 30                                   |
| 4.6 Importancia de la modelación hidrológica en los PORH .....                                                                          | 31                                   |
| 5. Marco Legal.....                                                                                                                     | 32                                   |
| 5.1 Marco normativo e institucional para la gestión del recurso hídrico en Colombia....                                                 | 32                                   |
| 5.2 Documentos técnicos y lineamientos metodológicos para el modelamiento hidrológico.....                                              | 33                                   |
| 5.3 Relación entre normatividad y modelación hidrológica.....                                                                           | 34                                   |
| 6. Desarrollo de la Pasantía. ....                                                                                                      | 35                                   |
| 6.1 Descripción general de las actividades realizadas.....                                                                              | 35                                   |
| 6.2 Procesamiento y análisis de la información hidroclimatológica. ....                                                                 | 39                                   |
| 6.3 Implementación del modelo hidrológico.....                                                                                          | 39                                   |

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.4 Configuración topológica y estructuración espacial del modelo hidrológico en RS MINERVE ..... | 45 |
| 6.5 Estrategia de regionalización hidrológica.....                                                | 47 |
| 6.6 Proceso de calibración del modelo. ....                                                       | 49 |
| 6.7 Indicadores de desempeño utilizados en la calibración.....                                    | 50 |
| 7. RESULTADOS.....                                                                                | 55 |
| 7.1 Desempeño del modelo hidrológico .....                                                        | 55 |
| 7.2 Análisis del comportamiento hidrológico simulado .....                                        | 56 |
| 7.3 Implicaciones para la gestión del recurso hídrico .....                                       | 61 |
| 8. Referencias .....                                                                              | 66 |
| 9. Anexos. ....                                                                                   | 69 |

## **1. Introducción**

La planificación y gestión eficiente del recurso hídrico se han convertido en prioridades estratégicas frente a los crecientes desafíos ambientales, sociales y económicos que enfrentan las cuencas hidrográficas en Colombia. La cuenca del río Guavio presenta conflictos de uso y disponibilidad del agua, debido a la interacción de múltiples factores antrópicos como las actividades domésticas, industriales, agropecuarias y mineras. Estas condiciones demandan un abordaje técnico riguroso y una articulación efectiva entre los datos disponibles, los modelos hidrológicos y los instrumentos de planificación como los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH).

Este proyecto de pasantía busca aportar al proceso de formulación técnica del PORH en la cuenca del río Guavio, mediante la recopilación, organización y análisis detallado de la información hidroclimatológica disponible, como insumo fundamental para el diagnóstico y la modelación hidrológica. El objetivo es generar lineamientos que permitan conectar de manera más clara y coherente los resultados técnicos con metas de ordenamiento hídrico que sean realistas, sostenibles y alineadas con las condiciones físicas y normativas del territorio.

El documento se organiza en varios apartados. En primer lugar, se plantea el problema que da origen al proyecto, explicando el contexto actual de la cuenca del río Guavio y las limitaciones que enfrenta la planificación hídrica en esta región. Luego, se presentan los objetivos, tanto general como específicos, que orientan el desarrollo del trabajo. El marco referencial recoge los conceptos clave y las normas que sirven de base para el análisis. La metodología describe el proceso de recopilación, revisión y sistematización de información técnica y normativa relevante. Finalmente, se detallan los resultados esperados, como una forma de anticipar el valor que puede aportar esta propuesta a los procesos de gestión el recurso hídrico en la cuenca del río Guavio y, por extensión, a otros territorios con dinámicas similares.

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

- Analizar información hidro climatológica y articular modelos hidrológicos para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico para la cuenca del rio Guavio

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Realizar el análisis exploratorio de los datos hidro-climatológicos requeridos para modelación hidrológica.
- Evaluar los modelos hidrológicos de agua aplicados o propuestos en los PORH.
- Proponer lineamientos para la articulación técnica entre resultados de modelación y objetivos de calidad en el contexto de los PORH.
- Valorar los escenarios de uso actual y potencial del recurso hídrico en la cuenca del Río Guavio, con base a los resultados obtenidos de la modelación hidrológica y el análisis de los datos como insumo para la formulación del PORH

### **3. Marco Referencial**

#### **3.1 Marco contextual**

##### **3.1.1 Contexto general del recurso hídrico en Colombia**

La gestión del recurso hídrico en Colombia constituye un elemento fundamental para el desarrollo sostenible del país, debido a la alta dependencia de múltiples sectores económicos y sociales respecto al agua superficial y subterránea. En términos de disponibilidad, Colombia es reconocida como una potencia hídrica, con una oferta estimada cercana a 1.963 km<sup>3</sup>/año, lo que representa aproximadamente el 5% de la oferta hídrica superficial mundial, y un rendimiento hídrico promedio de 56,2 l/s·km<sup>2</sup>, significativamente superior al promedio global. Asimismo, el país presenta un caudal medio anual del orden de 71.800 m<sup>3</sup>/s, derivado de una escurrimiento aproximada de 2.265 km<sup>3</sup>/año, lo cual evidencia una elevada disponibilidad natural del recurso (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente) 2018).

No obstante, esta aparente abundancia contrasta con una creciente presión sobre el recurso hídrico, asociada principalmente al incremento en la demanda. A nivel nacional, la demanda hídrica agregada ha alcanzado valores del orden de 35.877 millones de m<sup>3</sup>/año, siendo el sector agropecuario el mayor consumidor, seguido por los usos domésticos, industriales y energéticos (MinAmbiente, 2018). Esta demanda se concentra espacialmente en regiones con alta densidad poblacional y desarrollo económico, como la cuenca Magdalena–Cauca, donde la relación entre oferta y demanda es más crítica.

En este contexto, aunque Colombia dispone de una alta oferta hídrica a escala nacional, la distribución espacial desigual del recurso, la concentración de la demanda y la variabilidad climática generan condiciones de presión significativa sobre las fuentes hídricas. Esto se traduce en problemas de disponibilidad local, conflictos por el uso del agua y afectaciones en la calidad del recurso, especialmente en zonas con alta intervención antrópica. Por tanto, se evidencia que la relación entre oferta y demanda no es homogénea, y que en diversas cuencas del país ya se presentan niveles de estrés hídrico, lo que justifica la necesidad de una gestión integral y planificada del recurso.

La planificación hídrica requiere herramientas técnicas que permitan comprender el comportamiento hidrológico de las cuencas y anticipar escenarios futuros de oferta y demanda. En este sentido, la recopilación y análisis de información hidroclimatológica constituye la base para la formulación de instrumentos de planificación como los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH). En el contexto colombiano, la planificación del recurso hídrico no solo responde a una necesidad técnica, sino también a un mandato normativo establecido en el marco de la gestión ambiental del país. La Ley 99 de 1993

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

establece los principios generales para la gestión del medio ambiente y define el agua como un recurso de dominio público cuya administración debe orientarse hacia su uso sostenible (Congreso de Colombia, 1993).

Adicionalmente, el Decreto 1076 de 2015, que compila la normativa del sector ambiente, reglamenta la planificación, ordenación y manejo del recurso hídrico, estableciendo la obligatoriedad de formular instrumentos como los PORH para la gestión integral del agua a nivel de cuenca (Presidencia de la República de Colombia, 2015). Asimismo, la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico define lineamientos estratégicos orientados a garantizar la sostenibilidad del recurso, promoviendo la planificación basada en información técnica, la gestión por cuencas y la articulación entre oferta y demanda (Ministerio de Ambiente, 2010).

En conjunto, este marco normativo evidencia que la planificación hídrica en Colombia es un proceso obligatorio y estructurado, sustentado tanto en herramientas técnicas como en lineamientos legales, cuyo propósito es asegurar la disponibilidad, calidad y uso eficiente del agua en el largo plazo.

El diagnóstico hidrológico de una cuenca requiere la integración de variables climáticas, hidrológicas y fisiográficas que permitan caracterizar los procesos de precipitación, escorrentía, infiltración y almacenamiento de agua. La ausencia de información organizada y validada limita la capacidad de planificación y la toma de decisiones en materia de gestión hídrica. En este contexto, los modelos hidrológicos se convierten en herramientas fundamentales para la gestión del recurso hídrico, ya que permiten representar matemáticamente el funcionamiento de una cuenca, simular su respuesta ante diferentes condiciones climáticas y antrópicas, y proyectar escenarios futuros de disponibilidad hídrica. Su aplicación facilita la comprensión de la dinámica de los sistemas hídricos y fortalece la formulación de estrategias orientadas a la sostenibilidad del recurso.

En Colombia, la relevancia de la modelación hídrica ha sido reconocida institucionalmente mediante la formulación de lineamientos técnicos específicos. La *Guía metodológica para la modelación del recurso hídrico continental superficial* desarrollada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales establece que la modelación constituye un instrumento clave para la evaluación, predicción y gestión del agua, al proporcionar soporte técnico para la estimación de oferta hídrica, análisis de variabilidad, evaluación de impactos y formulación de escenarios prospectivos (IDEAM, 2017). Esta guía resalta que los modelos permiten transformar datos observados en información estratégica, útil para la toma de decisiones en procesos de ordenamiento y planificación del recurso.

Asimismo, la incorporación de modelos en la gestión hídrica responde a la necesidad de reducir la incertidumbre asociada a la disponibilidad y comportamiento del agua frente a factores como el cambio climático, la expansión urbana, la presión agrícola y la

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

transformación del uso del suelo. En este sentido, la modelación no solo cumple una función descriptiva, sino también predictiva y evaluativa, permitiendo identificar riesgos, optimizar la asignación del recurso y diseñar medidas de adaptación y manejo integral. Su importancia radica en que conecta el análisis técnico con la toma de decisiones, consolidándose como un componente esencial dentro de los procesos de gestión integrada del recurso hídrico.

### **3.1.2 Contexto institucional**

El presente trabajo se desarrolla en el marco de la pasantía realizada en la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, entidad encargada de la administración de los recursos naturales renovables dentro de su jurisdicción. En el contexto institucional colombiano, las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) son entes corporativos de carácter público creados por la Ley 99 de 1993, dotados de autonomía administrativa y financiera, cuya función principal es ejecutar las políticas, planes, programas y proyectos sobre medio ambiente y recursos naturales renovables dentro de sus respectivas áreas territoriales (Congreso de Colombia, 1993). Estas entidades constituyen la máxima autoridad ambiental en sus jurisdicciones y desempeñan un papel estratégico en la gestión integral del recurso hídrico, el control ambiental y la planificación sostenible del territorio.

La CAR Cundinamarca ejerce su jurisdicción sobre gran parte del departamento de Cundinamarca, así como sobre algunos municipios de departamentos vecinos, cubriendo un territorio estratégico por su relevancia ecológica, económica y poblacional. Su ámbito de acción incluye múltiples cuencas hidrográficas, ecosistemas altoandinos, páramos y zonas de producción agrícola e industrial, lo que convierte su gestión en un componente esencial para la sostenibilidad regional. Dentro de este marco, la entidad tiene la responsabilidad de formular y ejecutar instrumentos de planificación ambiental orientados a la conservación y uso sostenible del recurso hídrico, entre los cuales se encuentra el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH).

El PORH constituye el principal instrumento técnico para regular el uso del agua superficial en las cuencas hidrográficas, estableciendo objetivos de calidad, asignación del recurso y lineamientos de manejo que permitan garantizar la sostenibilidad hídrica a largo plazo. Su formulación y actualización requieren soporte técnico robusto, en el cual la modelación hidrológica adquiere un papel determinante al permitir evaluar escenarios de oferta, demanda y disponibilidad del recurso. En este contexto, la pasantía se desarrolla específicamente en la subdirección encargada de los procesos técnicos asociados a la planificación y gestión hídrica, dependencia que cumple funciones relacionadas con la evaluación, seguimiento y formulación de estrategias para la administración sostenible del agua dentro de la jurisdicción de la corporación. Esta subdirección se articula dentro del organigrama institucional como

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

una unidad estratégica de soporte técnico, cuya labor es fundamental para la toma de decisiones en materia ambiental y para la consolidación de instrumentos como el PORH.

### **3.1.3 Integración entre datos hidroclimatológicos y modelación hidrológica en el contexto de la planificación hídrica en Colombia**

En el marco de la gestión integral del recurso hídrico en Colombia, la integración entre información hidroclimatológica y modelación hidrológica constituye un componente estratégico para la formulación de instrumentos técnicos orientados al ordenamiento y aprovechamiento sostenible del agua. Esta articulación permite traducir registros observados de variables climáticas e hidrológicas en escenarios cuantitativos de disponibilidad hídrica, fundamentales para la toma de decisiones en procesos de planificación ambiental y territorial. En este sentido, las bases de datos hidroclimatológicas no solo cumplen una función descriptiva, sino que se convierten en insumos esenciales para la construcción de diagnósticos y proyecciones requeridas por la normativa nacional en materia de recurso hídrico (IDEAM, 2017).

La legislación colombiana reconoce la necesidad de sustentar la gestión hídrica en información técnica confiable. Instrumentos como el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH), reglamentado en el marco del Decreto 1076 de 2015 y desarrollado mediante lineamientos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, exigen la caracterización integral de la oferta, demanda, calidad y riesgos asociados al recurso hídrico. Dentro de este proceso, la recopilación, depuración y validación de datos hidroclimatológicos constituye una etapa obligatoria, ya que permite establecer condiciones base para la modelación y posterior formulación de estrategias de manejo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

El uso de información histórica proveniente de estaciones meteorológicas e hidrométricas facilita la identificación de tendencias, estacionalidades y anomalías en variables como precipitación, temperatura, evapotranspiración y caudal. Estas series, una vez homogenizadas y completadas, se convierten en entradas fundamentales para modelos hidrológicos que permiten simular el comportamiento de las cuencas frente a diferentes escenarios. En territorios donde la información presenta discontinuidades o limitaciones espaciales, la modelación adquiere un rol complementario, al generar estimaciones que fortalecen el análisis técnico requerido para la planificación hídrica (IDEAM, 2017).

En el contexto de los PORH, la integración entre datos observados y simulaciones hidrológicas permite estimar la oferta hídrica superficial, identificar presiones sobre el recurso y evaluar la sostenibilidad de los usos actuales y futuros. Esta aproximación favorece la definición de caudales ambientales, la priorización de medidas de conservación y la

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

delimitación de zonas críticas para la gestión. Así, la modelación no se concibe como un ejercicio aislado, sino como un soporte técnico dentro de un marco regulatorio orientado a garantizar la administración eficiente del recurso hídrico en función de criterios ecológicos, sociales y productivos (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, 2020).

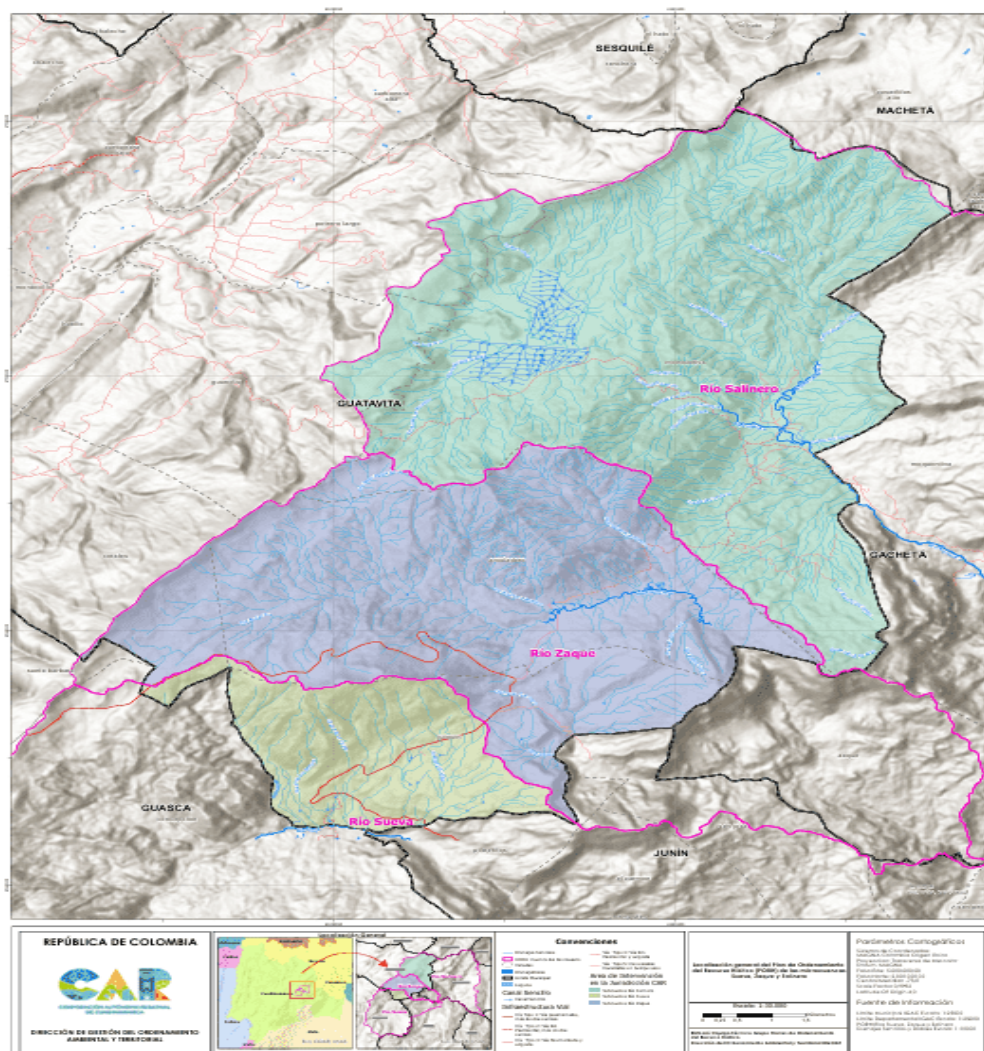
De esta manera, la integración entre información hidroclimatológica y modelación hidrológica en Colombia responde no solo a necesidades científicas, sino también a exigencias normativas y de política pública. Su aplicación fortalece la formulación de instrumentos de ordenamiento, contribuyendo a una gestión basada en evidencia y alineada con los principios de sostenibilidad establecidos para la conservación del patrimonio hídrico nacional.

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

### 3.1.4 Contexto geográfico del área de estudio

El área de estudio se localiza en la cuenca hidrográfica del río Guavio, ubicada en el sector nororiental del departamento de Cundinamarca, en la región Andina de Colombia, dentro de la vertiente oriental de la Cordillera Oriental. Esta cuenca se caracteriza por presentar condiciones fisiográficas propias de sistemas montañosos andinos, con fuertes gradientes altitudinales, relieves escarpados y una red hidrográfica densa que favorece la generación de escorrentía superficial. La zona de estudio comprende principalmente las subcuencas de los ríos Salinero, Zaque y Sueva, las cuales constituyen tributarios importantes del río Guavio y representan unidades hidrológicas estratégicas para el análisis de la oferta hídrica regional.

*Figura 1. Mapa de ubicación y delimitación geográfica de la zona de estudio*



Fuente: (CAR, 2026)

## Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

Geográficamente, el territorio presenta un relieve predominantemente montañoso, con pendientes pronunciadas, valles estrechos y cauces encañonados que generan respuestas hidrológicas rápidas frente a eventos de precipitación. Estas características topográficas influyen directamente sobre los procesos de escorrentía, infiltración y transporte de sedimentos, condicionando el comportamiento hidrológico de las subcuencas. El rango altitudinal oscila aproximadamente entre los 2.000 y 3.500 m s. n. m., lo cual genera variaciones importantes en las condiciones climáticas, edáficas y de cobertura vegetal.

Desde el punto de vista climático, este gradiente altitudinal produce diferencias en variables como temperatura media, humedad relativa, radiación solar y régimen de lluvias. En las zonas de mayor elevación predominan temperaturas más bajas, mayor nubosidad y cambios en la intensidad y frecuencia de precipitación, mientras que en sectores de menor altitud se presentan condiciones relativamente más cálidas y dinámicas hidrológicas diferenciadas. Estas variaciones influyen de manera directa sobre los procesos de evapotranspiración y sobre la disponibilidad efectiva del recurso hídrico en cada sector de la cuenca.

En términos edáficos, la altitud condiciona la formación y distribución de suelos con propiedades diferenciadas en textura, profundidad, permeabilidad, contenido de materia orgánica y capacidad de retención de humedad. En zonas altas predominan suelos orgánicos asociados a ecosistemas de páramo y bosque altoandino, caracterizados por una elevada capacidad de almacenamiento hídrico. Por el contrario, en áreas de menor altitud se presentan suelos más variables, influenciados por procesos erosivos y actividades productivas. Estas propiedades determinan la infiltración, la generación de escorrentía y la regulación natural del agua.

En cuanto a cobertura vegetal, el gradiente altitudinal favorece la presencia de diferentes formaciones ecosistémicas, entre ellas bosques andinos, bosques altoandinos, matorrales, pastizales y ecosistemas de páramo. Cada uno cumple funciones específicas en la regulación hídrica, como la interceptación de la lluvia, protección del suelo, reducción de la erosión y mantenimiento de caudales base. En consecuencia, las variaciones climáticas, edáficas y de cobertura vegetal configuran un sistema hidrológico heterogéneo, donde la disponibilidad y dinámica del agua responden a múltiples interacciones biofísicas que deben ser consideradas dentro de los procesos de planificación y modelación hídrica.

El área presenta un régimen bimodal característico de la región Andina colombiana, con dos periodos lluviosos predominantes entre marzo–mayo y septiembre–noviembre, y dos periodos relativamente secos entre diciembre–febrero y junio–agosto. La precipitación media anual presenta variaciones espaciales importantes debido a los efectos orográficos asociados a la Cordillera Oriental, registrándose valores aproximados entre 1.500 y 3.000 mm anuales.

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

Asimismo, las temperaturas medias varían según la altitud, alcanzando valores cercanos a 8 °C en zonas elevadas y hasta 18 °C en sectores más bajos de las subcuencas.

Desde la perspectiva ambiental, el área de estudio incluye ecosistemas estratégicos de alta montaña, entre ellos páramos, bosques altoandinos y sectores intervenidos por actividades humanas. Estos ecosistemas conforman una matriz ecológica fundamental para la regulación hídrica, conservación de biodiversidad y estabilidad ecosistémica regional. Particularmente, los páramos cumplen una función esencial como reguladores naturales del agua debido a su alta capacidad de retención hídrica, acumulación de materia orgánica y liberación gradual hacia las cuencas abastecedoras (Instituto Humboldt, 2018).

Por su parte, el bosque altoandino actúa como zona de transición ecológica que contribuye a la protección del suelo, regulación microclimática y conectividad ecosistémica. Su cobertura vegetal favorece la infiltración, disminuye la erosión y aporta estabilidad a los caudales base, desempeñando un papel esencial en la sostenibilidad hídrica de las subcuencas (IDEAM, 2017). Sin embargo, la expansión agropecuaria, urbana y la transformación del uso del suelo han generado procesos de fragmentación ecológica y presión sobre estos sistemas naturales.

Estas dinámicas antrópicas alteran la capacidad reguladora de los ecosistemas, incrementando la escorrentía superficial, reduciendo la infiltración y afectando la calidad del agua por arrastre de sedimentos y contaminantes. En consecuencia, la conservación de páramos y bosques altoandinos no solo representa una prioridad ambiental, sino también una estrategia fundamental para garantizar la seguridad hídrica regional.

Diversos estudios han evidenciado que la transformación de coberturas naturales hacia usos agropecuarios reduce la capacidad de retención de agua del suelo, incrementa su densidad aparente y disminuye significativamente la infiltración, afectando la función ecosistémica de almacenamiento y liberación gradual del recurso hídrico (Cárdenas et al., 2024). Estos cambios generan mayores tasas de escorrentía y disminuyen la disponibilidad de agua durante periodos de estiaje, comprometiendo la estabilidad de la oferta hídrica regional.

De manera complementaria, investigaciones desarrolladas en ecosistemas de páramo intervenidos por actividades agrícolas evidencian que las modificaciones en el uso del suelo impactan directamente la calidad fisicoquímica y microbiológica de las fuentes superficiales. En cuencas donde se registró una transformación cercana al 15 % de las coberturas naturales, se identificaron incrementos en concentraciones de nitratos, potasio y contaminación microbiológica, afectando la aptitud del recurso para abastecimiento humano y otros usos productivos (Rey-Romero et al., 2022). Estos resultados demuestran que la presión antrópica no solo modifica la dinámica hidrológica, sino también la calidad del agua disponible en las cuencas altoandinas.

## Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

En consecuencia, la transformación progresiva de páramos y bosques altoandinos representa una amenaza significativa para la seguridad hídrica, especialmente en escenarios donde la demanda de agua continúa en aumento. La incorporación de estas dinámicas de cambio de uso del suelo dentro de procesos de diagnóstico, planificación y modelación resulta indispensable para comprender la evolución de la oferta hídrica y formular estrategias orientadas a la sostenibilidad del recurso en el largo plazo.

La red hidrográfica de las subcuencas presenta alta densidad de drenaje y cauces con gradientes hidráulicos elevados, generando variaciones significativas de caudal en respuesta a la variabilidad climática. Estas condiciones son típicas de sistemas montañosos donde la pendiente favorece tiempos de respuesta hidrológica reducidos e incrementa la sensibilidad frente a eventos intensos de precipitación (IDEAM, 2017). En este contexto, los ríos Salinero, Zaque y Sueva presentan características propias de sistemas fluviales altoandinos, como cauces encajonados, lechos rocosos, alta energía hidráulica y fluctuaciones estacionales marcadas.

Estas corrientes desempeñan un papel determinante en el abastecimiento hídrico de las poblaciones rurales cercanas, especialmente para consumo doméstico, riego agrícola, abrevadero pecuario y pequeños usos productivos asociados a economías campesinas. En varias veredas y asentamientos dispersos, el acceso al agua depende directamente de captaciones superficiales derivadas de estas fuentes, convirtiéndolas en ejes estratégicos para la seguridad hídrica local.

Adicionalmente, estos ríos sostienen ecosistemas asociados como bosques de galería, humedales de montaña, zonas riparias y fragmentos de bosque andino que dependen de la conectividad hídrica y del mantenimiento de caudales ecológicos. Los bosques de galería contribuyen a la estabilización de orillas, regulación térmica y provisión de hábitat para flora y fauna, mientras que los humedales favorecen la retención hídrica y la recarga subterránea. La permanencia de estos ecosistemas depende directamente de la estabilidad hidrológica de las corrientes superficiales.

En consecuencia, la dinámica hidrológica de los ríos Salinero, Zaque y Sueva no solo condiciona la disponibilidad del recurso para las comunidades humanas, sino también la integridad ecológica del territorio. Su análisis dentro de procesos de planificación y modelación resulta fundamental para comprender la interacción entre oferta hídrica, demanda local y sostenibilidad ecosistémica bajo escenarios de variabilidad climática y transformación territorial.

Desde el punto de vista socioambiental, el área de estudio corresponde principalmente a zonas rurales donde el recurso hídrico es utilizado para múltiples actividades productivas y

## Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

domésticas. Entre las principales actividades económicas se destacan la agricultura de cultivos transitorios y permanentes —como papa, maíz, frijol, arveja, hortalizas y frutales de clima frío— así como la ganadería bovina de leche y doble propósito, representativas de los territorios altoandinos de Cundinamarca (Gobernación de Cundinamarca, 2023). Estas actividades dependen directamente de la disponibilidad de agua superficial para riego, sostenimiento pecuario y abastecimiento de las unidades productivas.

La dependencia del recurso hídrico convierte a las corrientes superficiales y nacimientos en elementos estratégicos para la estabilidad económica y social del territorio. En escenarios de disminución de caudales o deterioro de la calidad del agua, la productividad agrícola y pecuaria se ve comprometida, generando impactos sobre la seguridad alimentaria y los ingresos de las comunidades campesinas.

No obstante, la expansión de actividades productivas ha generado procesos de transformación del paisaje mediante la sustitución de coberturas naturales por pastos y cultivos, reduciendo la extensión de ecosistemas estratégicos y modificando la estructura ecológica del territorio. La conversión de bosques y vegetación nativa hacia usos agropecuarios altera la capacidad de infiltración, incrementa la compactación del suelo y favorece mayores tasas de escorrentía superficial, disminuyendo la capacidad de regulación hídrica de las subcuencas y aumentando la vulnerabilidad frente a eventos extremos (IDEAM, 2017).

Adicionalmente, el recurso hídrico constituye la principal fuente de abastecimiento doméstico para comunidades campesinas, veredas y centros poblados dispersos del nororiente de Cundinamarca. Estas poblaciones dependen de captaciones superficiales, acueductos veredales y esquemas comunitarios de distribución, lo que incrementa la necesidad de garantizar condiciones adecuadas de cantidad y calidad del agua para asegurar su bienestar y permanencia en el territorio (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2022).

La presión sobre las fuentes hídricas ha aumentado progresivamente debido al crecimiento de la demanda y a la expansión de actividades agrícolas y pecuarias que compiten por el uso del recurso. Esta situación, sumada a la transformación del uso del suelo y a la disminución de coberturas naturales, ha intensificado los riesgos de reducción en la disponibilidad hídrica y deterioro de la calidad del agua, evidenciando la necesidad de implementar instrumentos de planificación orientados al uso sostenible del recurso (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

En este contexto, las subcuencas de los ríos Salinero, Zaque y Sueva adquieren especial relevancia debido a su función en la regulación hídrica y mantenimiento de la oferta de agua

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

dentro de la cuenca del río Guavio. Estas corrientes abastecen comunidades rurales, actividades productivas y ecosistemas estratégicos asociados, aportando estabilidad al balance hídrico regional y amortiguando los efectos de la variabilidad climática.

Por esta razón, la caracterización hidroclimatológica y el análisis hidrológico de estas subcuencas constituyen insumos fundamentales para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH). Estos procesos permiten establecer bases técnicas sólidas para la evaluación de la oferta hídrica, identificación de escenarios de presión y definición de estrategias orientadas a la gestión sostenible del agua en la región. En consecuencia, el estudio de estas subcuencas trasciende el análisis local y se consolida como un componente estratégico para la planificación integral del recurso hídrico dentro de la jurisdicción ambiental correspondiente.

## **4. Marco Teórico**

### **4.1 Fundamentos de la hidrología de cuencas**

La hidrología de cuencas constituye la base científica para el análisis y comprensión del comportamiento del agua dentro de un territorio delimitado naturalmente por divisorias topográficas. Una cuenca hidrográfica se define como la unidad espacial dentro de la cual el agua proveniente de la precipitación se distribuye mediante procesos como infiltración, escorrentía superficial, almacenamiento temporal y flujo subterráneo, convergiendo finalmente hacia un punto común de salida (IDEAM, 2017). El estudio hidrológico de cuencas permite comprender la dinámica del ciclo hidrológico y su interacción con las características físicas del territorio, incluyendo el relieve, el tipo de suelo, la cobertura vegetal y las condiciones climáticas predominantes (UNESCO, 2012).

El comportamiento hidrológico de una cuenca está determinado por la interacción entre factores climáticos y fisiográficos, los cuales influyen directamente en la generación de caudales y en la disponibilidad del recurso hídrico. La variabilidad espacial y temporal de la precipitación, junto con las características geomorfológicas de la cuenca, condiciona la respuesta hidrológica frente a eventos de lluvia (WMO, 2008). En cuencas de montaña como las localizadas en la Cordillera Oriental, las pendientes pronunciadas y los gradientes altitudinales generan respuestas hidrológicas rápidas, caracterizadas por incrementos súbitos de caudal y tiempos de concentración relativamente cortos (IDEAM, 2019).

El análisis de estos procesos permite estimar la oferta hídrica y establecer criterios técnicos para la gestión y planificación del recurso hídrico. En consecuencia, la hidrología de cuencas se consolida como una disciplina fundamental para la toma de decisiones relacionadas con el aprovechamiento sostenible del agua, la prevención de riesgos hidrológicos y la formulación de instrumentos de ordenamiento territorial y ambiental (FAO, 2015).

### **4.2 Procesos hidrológicos**

Los procesos hidrológicos corresponden al conjunto de fenómenos físicos mediante los cuales el agua circula a través de los diferentes componentes del ciclo hidrológico dentro de una cuenca hidrográfica. Estos procesos incluyen la precipitación, la infiltración, la evapotranspiración, el almacenamiento en el suelo y la escorrentía superficial, los cuales se

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

encuentran interrelacionados y determinan la disponibilidad hídrica del sistema. El análisis de dichos procesos resulta fundamental para comprender el comportamiento de las fuentes hídricas y establecer relaciones entre las variables climáticas y los caudales generados en los ríos (WMO, 2008; FAO, 2015).

La precipitación constituye la principal entrada de agua a la cuenca y representa el factor más importante en la generación de escurrimiento. Su distribución espacial y temporal depende de factores climáticos y orográficos, produciendo variaciones significativas en la disponibilidad de agua dentro del territorio. Una parte del agua precipitada es interceptada por la vegetación, otra se infiltra en el suelo y el excedente se transforma en escurrimiento superficial (UNESCO, 2012).

La infiltración corresponde al proceso mediante el cual el agua penetra en el suelo, contribuyendo a la recarga de acuíferos y al mantenimiento del flujo base en los ríos. Este proceso depende de variables como la textura del suelo, la cobertura vegetal, la pendiente del terreno y la humedad antecedente (FAO, 2015). Por su parte, el escurrimiento superficial se genera cuando la intensidad de la precipitación supera la capacidad de infiltración del suelo o cuando este alcanza condiciones de saturación. Este mecanismo constituye una de las principales formas de generación de caudales, especialmente en cuencas de montaña donde las pendientes favorecen el transporte rápido del agua hacia los cauces principales (IDEAM, 2019).

La evapotranspiración corresponde al proceso combinado de evaporación desde la superficie del suelo y transpiración de la vegetación, representando una de las principales pérdidas de agua dentro del balance hídrico de la cuenca. La interacción entre todos estos procesos define el régimen hidrológico y condiciona la disponibilidad de agua a lo largo del tiempo, influyendo directamente en la respuesta de la cuenca frente a eventos extremos y escenarios de variabilidad climática (WMO, 2008).

#### **4.3 Modelación hidrológica**

La modelación hidrológica constituye una herramienta fundamental para la representación matemática de los procesos que intervienen en el ciclo hidrológico dentro de una cuenca hidrográfica. Los modelos hidrológicos permiten simular la relación entre variables climáticas, como la precipitación y la evapotranspiración, y variables hidrológicas como el caudal, facilitando el análisis del comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones. Estos modelos se fundamentan en ecuaciones matemáticas que describen los procesos físicos del ciclo hidrológico y permiten estimar la respuesta de la cuenca frente a variaciones climáticas o cambios en el uso del suelo (WMO, 2008; UNESCO, 2012).

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

La aplicación de modelos hidrológicos permite generar series simuladas de caudales, estimar la oferta hídrica y evaluar escenarios futuros de disponibilidad de agua. Estas herramientas resultan especialmente útiles en cuencas donde la información hidrométrica es limitada o presenta discontinuidades, ya que permiten complementar los registros observados mediante simulaciones (IDEAM, 2017). Asimismo, la modelación facilita la evaluación de impactos asociados a la variabilidad climática, la expansión agrícola y las transformaciones del territorio, contribuyendo al desarrollo de estrategias de manejo más robustas frente a escenarios de incertidumbre (FAO, 2015).

La confiabilidad de los resultados depende en gran medida de la calidad de los datos hidroclimatológicos utilizados y del proceso de calibración del modelo. Una adecuada selección de parámetros, junto con la verificación de consistencia de las series de entrada, permite reducir incertidumbres y mejorar la representatividad de las simulaciones. En este contexto, indicadores de desempeño como el coeficiente de Nash-Sutcliffe son ampliamente utilizados para evaluar la capacidad predictiva de los modelos hidrológicos y determinar su nivel de ajuste frente a datos observados.

En el contexto de la planificación del recurso hídrico, la modelación hidrológica constituye un elemento clave para la toma de decisiones técnicas relacionadas con la asignación, conservación y manejo del agua. Su aplicación fortalece la formulación de instrumentos como los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico, al proporcionar bases cuantitativas para la evaluación de la oferta hídrica, la identificación de conflictos por uso y la definición de medidas orientadas a la sostenibilidad del sistema hídrico (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

#### **4.4 Modelo hidrológico GR4J**

El modelo GR4J corresponde a un modelo hidrológico conceptual de tipo lluvia–escorrentía desarrollado para simular el comportamiento hidrológico de cuencas mediante el uso de series de precipitación y evapotranspiración potencial como variables de entrada. Este modelo fue desarrollado por Charles Perrin, Claude Michel y Vazken Andréassian en el marco de investigaciones realizadas en el laboratorio de hidrología de INRAE en Francia, con el propósito de diseñar un modelo parsimonioso capaz de representar eficientemente la respuesta hidrológica diaria de una cuenca (Perrin et al., 2003).

El modelo se basa en una representación simplificada de los procesos de almacenamiento y transferencia de agua dentro de la cuenca mediante cuatro parámetros calibrables que controlan el almacenamiento en el suelo, el intercambio subterráneo y la propagación del flujo hacia la salida del sistema. Debido a su estructura conceptual relativamente simple, el modelo GR4J permite obtener resultados confiables con requerimientos moderados de

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

información de entrada, lo que ha favorecido su aplicación en diferentes contextos hidrológicos y climáticos (Perrin et al., 2003).

Una de las principales ventajas del modelo GR4J es su capacidad para reproducir adecuadamente la variabilidad temporal de los caudales utilizando un número reducido de parámetros, lo que facilita su calibración y aplicación en cuencas con disponibilidad limitada de información hidrológica. El modelo permite simular tanto los caudales base como los picos de escorrentía asociados a eventos de precipitación, proporcionando resultados consistentes para análisis de oferta hídrica y evaluación de escenarios de gestión (Pushpalatha et al., 2011).

Debido a estas características, el modelo GR4J ha sido ampliamente utilizado en estudios hidrológicos y procesos de planificación del recurso hídrico, especialmente en regiones donde se requiere estimar caudales a partir de información climática disponible. Su robustez, simplicidad conceptual y eficiencia computacional lo convierten en una herramienta adecuada para la modelación de cuencas de tamaño medio y para la generación de insumos técnicos orientados a la toma de decisiones en gestión hídrica.

- **Parámetros del modelo GR4J**

Los cuatro parámetros calibrables son:

$X_1$ : capacidad del reservorio de producción [mm].

$X_2$ : coeficiente de intercambio subterráneo [mm].

$X_3$ : capacidad del reservorio de enrutamiento [mm].

$X_4$ : tiempo base de la función de transferencia [días].

La interpretación física de estos parámetros facilita el análisis de sensibilidad y la evaluación del comportamiento hidrológico bajo distintos escenarios climáticos (Perrin et al., 2003).

Con el fin de profundizar en la estructura conceptual del modelo y comprender la forma en que se representan los procesos hidrológicos dentro de la cuenca, es pertinente describir las ecuaciones fundamentales que rigen el funcionamiento del modelo GR4J. Estas ecuaciones permiten modelar la transformación de la precipitación en escorrentía a través de una serie de reservorios conceptuales que simulan los procesos de almacenamiento, transferencia y liberación del agua en el sistema hidrológico.

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

El modelo se fundamenta en un balance hídrico diario en el que la precipitación total se descompone en diferentes componentes, incluyendo infiltración, almacenamiento en el suelo, percolación y escorrentía directa. La representación matemática de estos procesos se realiza mediante funciones no lineales que dependen de los parámetros característicos del modelo, los cuales son calibrados a partir de datos observados (Perrin et al., 2003).

A continuación, se presentan las ecuaciones principales que definen el comportamiento del modelo GR4J, las cuales constituyen la base para la simulación de la respuesta hidrológica de la cuenca.

- **Balance hídrico diario**

GR4J opera a escala diaria y se fundamenta igualmente en una ecuación de balance hídrico:

$$P_n = P - E$$

donde:

$P_n$  es la precipitación neta,

$P$  es la precipitación total,

$E$  es la evapotranspiración potencial.

Dependiendo del signo de  $P_n$ , el modelo simula procesos de producción de escorrentía o de recarga del almacenamiento.

- **Reservorio de producción:**

El primer componente del modelo es el **reservorio de producción**, que controla la generación de escorrentía efectiva. Su comportamiento se rige por una relación no lineal entre el almacenamiento  $S$  y la precipitación neta:

$$S(t) = S(t - 1) + P_s - E_s$$

donde  $P_s$  y  $E_s$  representan las fracciones de precipitación y evapotranspiración que interactúan con el reservorio.

El parámetro  $X_1$  define la capacidad máxima de almacenamiento del reservorio y controla la sensibilidad del modelo ante eventos de precipitación.

- **Función de transferencia y reservorio de enrutamiento**

La escorrentía generada se transfiere mediante una función de distribución temporal, basada en una curva tipo unidad hidrológica, antes de ingresar al reservorio de enrutamiento, cuya dinámica se expresa como:

$$Q_r = \frac{R}{X_3}$$

donde:

$R$  es el almacenamiento en el reservorio de enrutamiento,  
 $X_3$  es el tiempo característico de vaciado del reservorio.

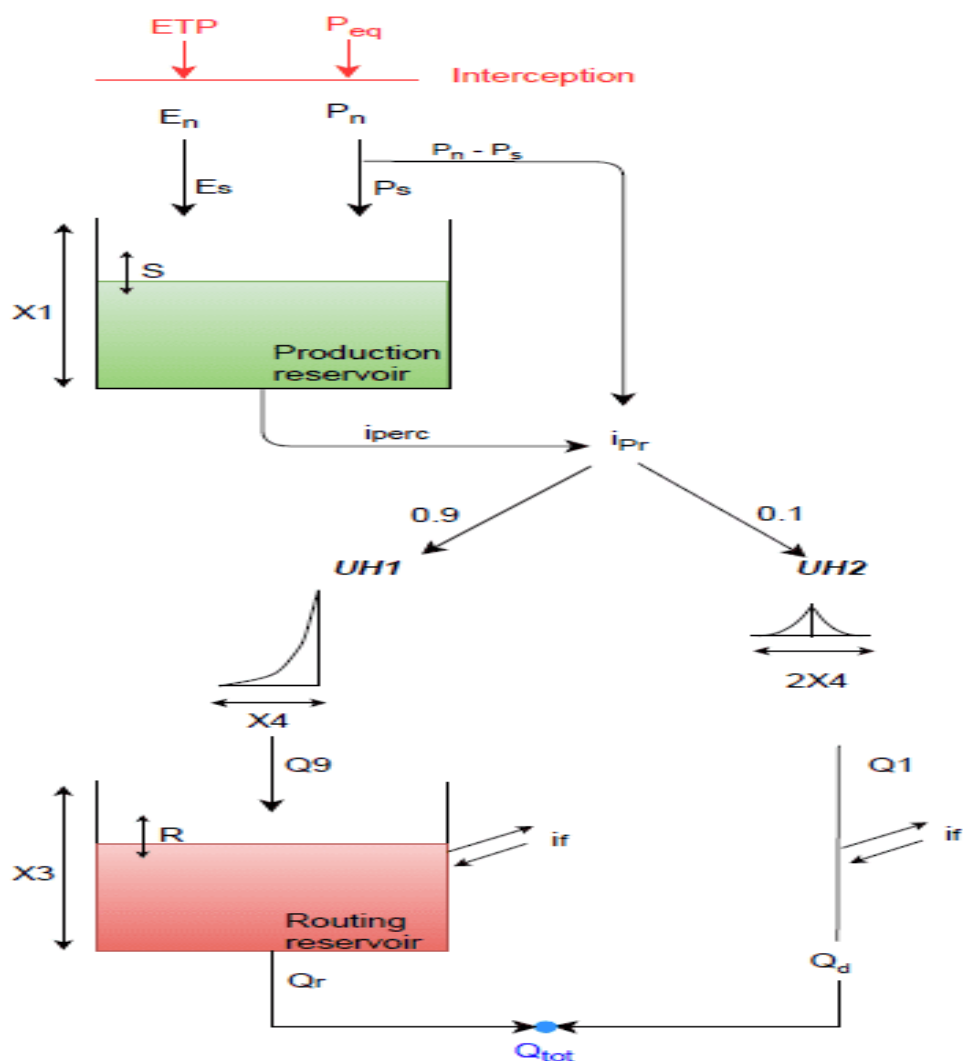
Este esquema permite reproducir el retardo hidrológico entre la precipitación y la respuesta del caudal en la salida de la cuenca y para la ejecución del modelo GR4J, el primer cálculo consiste en restar la precipitación potencial neta  $P_n$  o una capacidad de evapotranspiración  $E_n$ . En el modelo esta operación es estimada como si la capacidad de interceptación fuera cero, por tanto:

$$\text{Si } P \geq E, \text{ entonces } P_n = P - E \text{ y } E_n = 0$$

$$\text{Si } P < E, \text{ entonces } P_n = 0 \text{ y } E_n = E - P$$

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

Figura 2. Esquema de tanques para el modelo GR4J propuesto por Perrin et al (2003).



Fuente: RS Minerve Technical Manual (2018)

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

- **Almacenamiento de producción.** En el caso en que  $P_n$  no es cero, una parte  $P_s$  de  $P_n$  entra al tanque de producción:

$$P_s = \frac{x_1 \left( 1 - \left( \frac{S}{x_1} \right)^2 \right) \tanh \left( \frac{P_n}{x_1} \right)}{1 + \frac{S}{x_1} \tanh \left( \frac{P_n}{x_1} \right)}$$

Donde  $P_n$  es determinada como una función del nivel  $S$  en el tanque, donde  $x_1$  (mm) es la máxima capacidad del tanque de producción. Cuando  $E_n$  no es cero, una tasa real de evaporación es determinada como una función del nivel en el almacenamiento de producción con el fin de calcular la cantidad  $E_s$  de agua que se evaporará del tanque.

$$E_s = \frac{S \left( 2 - \left( \frac{S}{x_1} \right)^2 \right) \tanh \left( \frac{E_n}{x_1} \right)}{1 + \left( 1 - \frac{S}{x_1} \right) \tanh \left( \frac{E_n}{x_1} \right)}$$

Así pues, el contenido de agua en el tanque de producción se actualiza como:

$$S = S - E_s + P_s$$

Es importante resaltar que  $S$  nunca puede exceder a  $x_1$ . Una cantidad  $P_{perc}$  se escapa como percolación del almacenamiento de producción. Este valor se calcula de la siguiente manera:

$$i_{perc} = S \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{4S}{9x_1} \right) \right]^4 \right\}^{-\frac{1}{4}}$$

De la expresión anterior se concluye que la percolación no contribuye mucho al caudal, por esta razón es importante para la simulación de eventos mínimos. El valor de  $i_{perc}$  es siempre menor que  $S$ . El nuevo nivel en el tanque queda definido como:

$$S = S - i_{perc}$$

Luego, la cantidad de agua  $i_{pr}$  que alcanza las funciones de distribución está dada por:

$$i_{pr} = i_{perc} + (P_n + P_s)$$

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

Posteriormente, el valor de  $i_{pr}$  se divide en dos componentes de flujo: el 90% de  $i_{pr}$  se distribuye por medio de una hidrógrafa unitaria  $UH1$  y luego por un tanque de distribución no lineal. El 10% restante de  $i_{pr}$  es distribuido por medio de una hidrógrafa unitaria  $UH2$ . Con  $UH1$  y  $UH2$  es factible simular el tiempo de rezago entre el evento de lluvia y el caudal pico resultante. Las ordenadas de ambas hidrógrafas son usadas en el modelo para distribuir la precipitación efectiva sobre varios intervalos de tiempo sucesivos, además  $UH1$  y  $UH2$  dependen del parámetro  $x_4$ , expresado en días. Sin embargo,  $UH1$  tiene un tiempo base de  $x_4$  días, mientras que  $UH2$  tiene un tiempo base de  $2x_4$  días. El parámetro  $x_4$  puede tomar valores reales y debe ser mayor a 0.5 días.

Las ordenadas de ambas hidrógrafas se derivan de las curvas-S correspondientes (proporción acumulada de la entrada con el tiempo) denotadas por  $SH1$  y  $SH2$ , respectivamente. Así pues,  $SH1$  (definida a lo largo del tiempo  $t$ ) se estima de la siguiente forma:

$$SH1(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ \left(\frac{t}{x_4}\right)^{5/2}, & 0 < t < x_4 \\ 1, & t \geq x_4 \end{cases}$$

Así mismo,  $SH2$  se define por:

$$SH2 = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ \frac{1}{2}\left(\frac{t}{x_4}\right)^{5/2}, & 0 < t < x_4 \\ 1 - \frac{1}{2}\left(2 - \frac{t}{x_4}\right)^{5/2}, & x_4 < t < 2x_4 \\ 1, & t \geq 2x_4 \end{cases}$$

Finalmente, las ordenadas de  $UH1$  y  $UH2$  están dadas por:

$$UH1_j = SH1_j - SH_{j-1}$$

$$UH2_j = SH2_j - SH_{j-1}$$

Donde  $j$  es entero.

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

Luego, para cada tiempo  $k$ , los flujos salientes  $Q9$  y  $Q1$  asociados a las respectivas hidrógrafas  $UH1$  y  $UH2$  (provenientes de la convolución correspondiente) se estiman como:

$$Q9 = 0.9 \sum_{j=1}^l (UH1_j * i_{Pr_{k-j-l}})$$

$$Q1 = 0.1 \sum_{j=1}^m (UH2_j * i_{Pr_{k-j-l}})$$

Donde  $Q9 [L/T]$  es el flujo unitario de  $UH1$ ,  $Q1 [L/T]$  corresponde con el flujo unitario de  $UH2$ ,  $j [T]$  es un día ( $j \in \mathbb{Z}^+$ ),  $l [T]$  equivale al valor entero de  $x_4 + 1$ , mientras que  $m [T]$  es el valor entero de  $2x_4 + 1$ .

Ahora bien, se define una función de intercambio ( $i_F$ ) con el exterior no atmosférico produce un intercambio de agua subterránea de acuerdo con la siguiente ecuación (la interpretación física de esta función no es directa):

$$i_F = x_2 \left( \frac{R}{x_3} \right)^{7/2}$$

Donde  $R$  es el nivel del tanque de distribución,  $x_2$  es el coeficiente de intercambio de aguas subterráneas (el cual es positivo en el caso que se importa agua, negativo cuando hay pérdidas y cero cuando no hay intercambio de aguas). Entre más alto el nivel del tanque de distribución  $R$  mayor es el intercambio. Asimismo,  $x_3$  equivale a la capacidad de almacenamiento del tanque de distribución.

- **Almacenamiento de distribución no lineal.** El valor de  $R$  se actualiza adicionando el término  $i_F$  y la salida de  $Q9$  proveniente de  $UH1$ :

$$R = \max(0; R + Q9 + i_F)$$

Así pues, del tanque de distribución sale una descarga  $Q'_r$  definida por:

$$Q'_r = R \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{R}{x_3} \right)^4 \right]^{-1/4} \right\}$$

Luego, el nuevo nivel en el tanque de distribución es:

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

$$R = R - Q'_r$$

De manera análoga, el flujo  $Q_1$  de la hidrógrafa  $UH_2$  también tiene el intercambio de flujo mencionado y se define como:

$$Q'_d = Q_1 + i_F$$

Finalmente, los modelos del flujo quedan así:

$$Q_r = Q'_r * A$$

$$Q_d = Q'_d * A$$

Donde  $A$  es el área de la cuenca modelada. Por tanto, el caudal total será:

$$Q_{Tot} = Q_r + Q_d$$

#### 4.5 Modelo hidrológico RSMINERVE

El modelo hidrológico RSMINERVE es una herramienta de modelación hidrológica semidistribuida diseñada para simular el comportamiento del ciclo hidrológico en cuencas hidrográficas mediante la integración de variables climáticas, fisiográficas e hidrológicas. Fue desarrollado por el equipo de investigación del Hydrology Research Group of EPFL, liderado por Anton J. Schleiss y colaboradores, en el marco de proyectos orientados a la gestión integrada del agua en sistemas complejos (García Hernández et al., 2017). Su propósito principal fue disponer de una plataforma flexible y robusta para la simulación hidrológica y la gestión operativa de recursos hídricos, particularmente en regiones montañosas y cuencas con alta variabilidad espacial.

A diferencia de otros modelos cerrados o de acceso restringido, RSMINERVE se distribuye como software de acceso libre para fines académicos, técnicos e institucionales, lo que ha favorecido su adopción en universidades, centros de investigación y entidades gestoras del recurso hídrico. Esta condición de libre disponibilidad lo convierte en una herramienta estratégica para proyectos de planificación hídrica en contextos donde se requieren soluciones técnicamente sólidas sin depender de licencias comerciales elevadas (EPFL, 2023).

El modelo permite representar de manera conceptual los principales procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca, incluyendo la precipitación, la infiltración, el almacenamiento en el suelo, la generación de escorrentía superficial, el flujo subterráneo y la propagación de caudales a través de la red de drenaje. Su estructura se basa en la subdivisión de la cuenca en unidades hidrológicas homogéneas, lo que posibilita capturar con mayor detalle la

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

variabilidad espacial de las condiciones fisiográficas y climáticas dentro del área de estudio (García Hernández et al., 2017).

RSMINERVE permite la simulación continua de caudales a partir de series temporales de variables hidroclimatológicas como la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración potencial. Asimismo, incorpora módulos especializados para procesos como acumulación y fusión de nieve, reservorios conceptuales y transferencia de flujo en cauces, lo que amplía su aplicabilidad en distintos contextos hidrológicos. Su estructura modular permite adaptar la configuración a las características específicas de cada cuenca, facilitando su uso en estudios de planificación y gestión del recurso hídrico (Hingray et al., 2010).

Una de sus principales ventajas es la capacidad para integrar información espacial proveniente de sistemas de información geográfica, representando con mayor precisión variables como topografía, uso del suelo y distribución de estaciones hidroclimatológicas. Esta funcionalidad resulta especialmente útil en estudios de planificación territorial e hídrica, donde la heterogeneidad espacial condiciona la respuesta hidrológica. Además, permite procesos de calibración y validación mediante comparación entre caudales simulados y observados, fortaleciendo la confiabilidad de los resultados (García Hernández et al., 2017).

En consecuencia, el uso de RSMINERVE en estudios hidrológicos permite estimar la oferta hídrica, analizar la variabilidad temporal de los caudales y generar insumos técnicos fundamentales para la formulación de instrumentos como los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico. Su enfoque integrado y su adaptabilidad lo convierten en una herramienta adecuada para el análisis de cuencas andinas, donde la complejidad fisiográfica y climática exige enfoques de modelación que articulen dimensiones espaciales y temporales del ciclo hidrológico.

#### **4.6 Importancia de la modelación hidrológica en los PORH**

La modelación hidrológica constituye un componente fundamental dentro de los procesos de formulación de los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico, debido a que permite estimar la oferta hídrica y analizar el comportamiento de las fuentes de agua bajo diferentes condiciones climáticas y escenarios de uso. Los modelos hidrológicos proporcionan herramientas técnicas que permiten evaluar la disponibilidad de agua en una cuenca, identificar periodos críticos de escasez y establecer criterios para la asignación sostenible del recurso hídrico.

En el contexto de los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico, la modelación hidrológica permite integrar información hidro climatológica con variables fisiográficas y de uso del suelo, generando resultados que sirven como base para la toma de decisiones en materia de gestión hídrica. Estos análisis permiten establecer lineamientos técnicos

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

orientados a garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico y a prevenir conflictos asociados a la competencia por el agua. La confiabilidad de los resultados obtenidos depende de la calidad de la información utilizada y de la adecuada representación de los procesos hidrológicos dentro del modelo.

## 5. Marco Legal

### 5.1 Marco normativo e institucional para la gestión del recurso hídrico en Colombia

La gestión del recurso hídrico en Colombia se desarrolla bajo un marco normativo que integra principios de sostenibilidad, gobernanza ambiental y planificación técnica del agua como bien de uso público. Este conjunto de instrumentos legales e institucionales orienta la formulación de estrategias para la conservación, aprovechamiento y regulación del recurso hídrico, especialmente a través de herramientas como los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH).

En este contexto, la modelación hidrológica y el análisis hidroclimatológico se consolidan como insumos fundamentales para respaldar la toma de decisiones y garantizar una gestión territorial basada en evidencia científica.

*Tabla 1. Instrumentos normativos y técnicos aplicables a la gestión y modelación del recurso hídrico en Colombia*

| Instrumento          | Año  | Alcance principal                                                                           | Relación con el estudio                                                            |
|----------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Ley 99 de 1993       | 1993 | Crea el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y define competencias de autoridades ambientales. | Sustenta institucionalmente la planificación y administración del recurso hídrico. |
| Decreto 1076 de 2015 | 2015 | Compila la normativa ambiental vigente y regula la gestión integral del agua.               | Define lineamientos para concesiones, vertimientos y planificación hídrica.        |

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

| <b>Instrumento</b>                                             | <b>Año</b> | <b>Alcance principal</b>                                                              | <b>Relación con el estudio</b>                                  |
|----------------------------------------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico | 2010       | Establece principios estratégicos para la gestión sostenible del agua.                | Reconoce la cuenca hidrográfica como unidad de planificación.   |
| Resolución 1257 de 2021                                        | 2021       | Define metodología para la formulación de Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico. | Exige análisis hidroclimatológico y estudios de oferta hídrica. |
| Resolución 0751 de 2018                                        | 2018       | Establece lineamientos para monitoreo y evaluación de calidad hídrica.                | Aporta criterios para caracterización ambiental de la cuenca.   |
| Resolución 0958 de 2018                                        | 2018       | Orienta recopilación, validación y análisis de datos hidroclimáticos.                 | Fundamenta la depuración y consistencia de series de entrada.   |
| IDEAM                                                          | Permanente | Generación de información hidrometeorológica oficial.                                 | Fuente primaria para datos observados y validación del modelo.  |
| MADS                                                           | Permanente | Dirección de políticas ambientales nacionales.                                        | Define lineamientos regulatorios y técnicos.                    |

Elaboración propia.

## **5.2 Documentos técnicos y lineamientos metodológicos para el modelamiento hidrológico**

Más allá del marco jurídico, el desarrollo de estudios de oferta hídrica y simulación hidrológica requiere la aplicación de documentos técnicos especializados que orienten la selección metodológica, la calidad de datos y la interpretación de resultados. En Colombia, estas directrices han sido consolidadas principalmente por el IDEAM y por lineamientos internacionales adoptados en proyectos de planificación hídrica.

Entre los documentos técnicos más relevantes se encuentran las guías para evaluación de oferta hídrica superficial, manuales de análisis hidrológico y lineamientos para modelación lluvia–escorrentía. Estos documentos establecen procedimientos para el tratamiento de series temporales, análisis de consistencia, regionalización hidrológica y calibración de modelos conceptuales como GR4J.

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

En investigaciones aplicadas a cuencas hidrográficas, el uso de modelos hidrológicos constituye una herramienta clave para representar matemáticamente la dinámica del sistema. En este sentido, GR4J se destaca por su estructura parsimoniosa y capacidad de simulación continua a escala diaria, permitiendo transformar variables climáticas en caudales simulados mediante cuatro parámetros fundamentales.

Tabla 2. Documentos técnicos para análisis hidrológico y modelación.

| Documento técnico                                      | Entidad             | Aplicación en el estudio                         |
|--------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------|
| Guía metodológica para evaluación de la oferta hídrica | IDEAM               | Estimación de disponibilidad hídrica superficial |
| Manual de análisis hidrológico                         | IDEAM               | Procesamiento estadístico e hidrológico          |
| Protocolos de calidad de datos meteorológicos          | IDEAM               | Validación y depuración de series                |
| Documentación técnica de RS MINERVE                    | HydroCosmos         | Implementación computacional del modelo          |
| Publicaciones científicas sobre GR4J                   | Comunidad académica | Fundamentación conceptual y calibración          |

Elaboración propia.

### 5.3 Relación entre normatividad y modelación hidrológica

La formulación de instrumentos como el PORH exige que la información empleada en la toma de decisiones sea técnicamente robusta y metodológicamente verificable. Por ello, la modelación hidrológica no debe entenderse únicamente como un ejercicio académico, sino como un soporte técnico para la gobernanza del agua.

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

En este marco, la integración entre bases hidroclimatológicas, herramientas de simulación y lineamientos regulatorios permite construir escenarios de oferta hídrica con utilidad práctica en la planificación territorial. La simulación mediante GR4J, apoyada en plataformas como RS MINERVE, facilita la representación del comportamiento hidrológico de la cuenca del río Guavio, generando información relevante para la definición de estrategias de manejo y uso sostenible del recurso.

Así, el modelamiento se articula directamente con la legislación colombiana al proporcionar evidencia cuantitativa para sustentar decisiones en concesiones, regulación de caudales, planificación hídrica y protección ecosistémica. En consecuencia, la aplicación de metodologías hidrológicas rigurosas fortalece la capacidad institucional para formular instrumentos de ordenamiento hídrico ajustados a la realidad ambiental del territorio.

## **6. Desarrollo de la Pasantía.**

### **6.1 Descripción general de las actividades realizadas.**

Durante el desarrollo de la pasantía, desempeñé funciones de apoyo técnico en la Dirección de Gestión del Ordenamiento Ambiental y Territorial (DGOAT) de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), participando en actividades asociadas al análisis y procesamiento de información hidroclimatológica como soporte para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH) de la cuenca del río Guavio.

Mi participación dentro del proceso se enfocó principalmente en la recopilación, organización y validación de información proveniente de estaciones hidrometeorológicas de precipitación, temperatura y caudal, utilizadas como insumo para el análisis hidrológico de las subcuencas estudiadas. Asimismo, desarrollé actividades relacionadas con la depuración y tratamiento de series temporales, incluyendo revisión de consistencia, identificación de datos atípicos, manejo de vacíos de información y estructuración de bases de datos requeridas para los procesos de modelación.

Como parte del apoyo técnico brindado durante la pasantía, participé en el procesamiento y análisis preliminar de información hidroclimatológica orientada a la caracterización hidrológica de las subcuencas de los ríos Salinero, Zaque y Sueva. Adicionalmente, apoyé la implementación y parametrización inicial del modelo hidrológico GR4J en la plataforma RS MINERVE, mediante la organización de datos de entrada, estructuración de información climática y verificación de consistencia de los insumos utilizados en la simulación.

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

Estas actividades permitieron aportar insumos técnicos para la evaluación de la oferta hídrica y apoyar los procesos desarrollados por la DGOAT dentro del marco del PORH. De igual manera, la experiencia fortaleció mis competencias en hidrología aplicada, análisis estadístico de información climática, procesamiento de datos ambientales y modelación hidrológica, permitiéndome comprender la importancia de estas herramientas en los procesos de planificación territorial, gestión sostenible del recurso hídrico y toma de decisiones ambientales dentro de un contexto institucional.

El proceso desarrollado durante la pasantía se estructuró en diferentes fases metodológicas que permitieron abordar de manera sistemática la caracterización hidrológica de las subcuencas de estudio.

En una primera fase, participé en la consulta y evaluación de diferentes herramientas y modelos de modelación hidrológica, con el propósito de construir una base metodológica que permitiera identificar la funcionalidad, alcance y aplicabilidad de cada alternativa en función de las características de la cuenca de estudio. Este análisis permitió apoyar la selección de la herramienta más adecuada para el desarrollo del modelo hidrológico empleado en el proyecto. (Ver Anexo 1).

Posteriormente, en una segunda fase, desarrollé actividades relacionadas con la identificación, recopilación y organización de información proveniente de estaciones hidrometeorológicas, considerando registros de precipitación, temperatura y caudal. Para ello, realicé la consulta de bases de datos oficiales, principalmente del IDEAM (Ver tabla 3), así como la verificación de la disponibilidad, continuidad y calidad de las series temporales. Adicionalmente, apoyé el proceso de depuración de datos mediante la evaluación de valores atípicos, vacíos de información y consistencia interna de las series, con el fin de garantizar la confiabilidad de los datos utilizados en las etapas posteriores de análisis y modelación.

*Tabla 3. Estaciones hidroclimatológicas tomadas en cuenta para el estudio*

| Nombre               | Código   | Fecha Instalación | categoría           | SERIE TEMPORAL | LATITUD  | LONGITUD   |
|----------------------|----------|-------------------|---------------------|----------------|----------|------------|
| EL AMOLADERO         | 35060200 | 15/04/1972        | Pluviométrica       | 1972-2024      | 4.959389 | -73.584361 |
| GACHETA              | 35065010 | 15/09/1972        | Climática Ordinaria | 1962-2023      | 4.830389 | -73.646472 |
| HACIENDA HATO GRANDE | 35070490 | 15/07/1982        | Pluviométrica       | 1982-2024      | 4.857972 | -73.745389 |

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

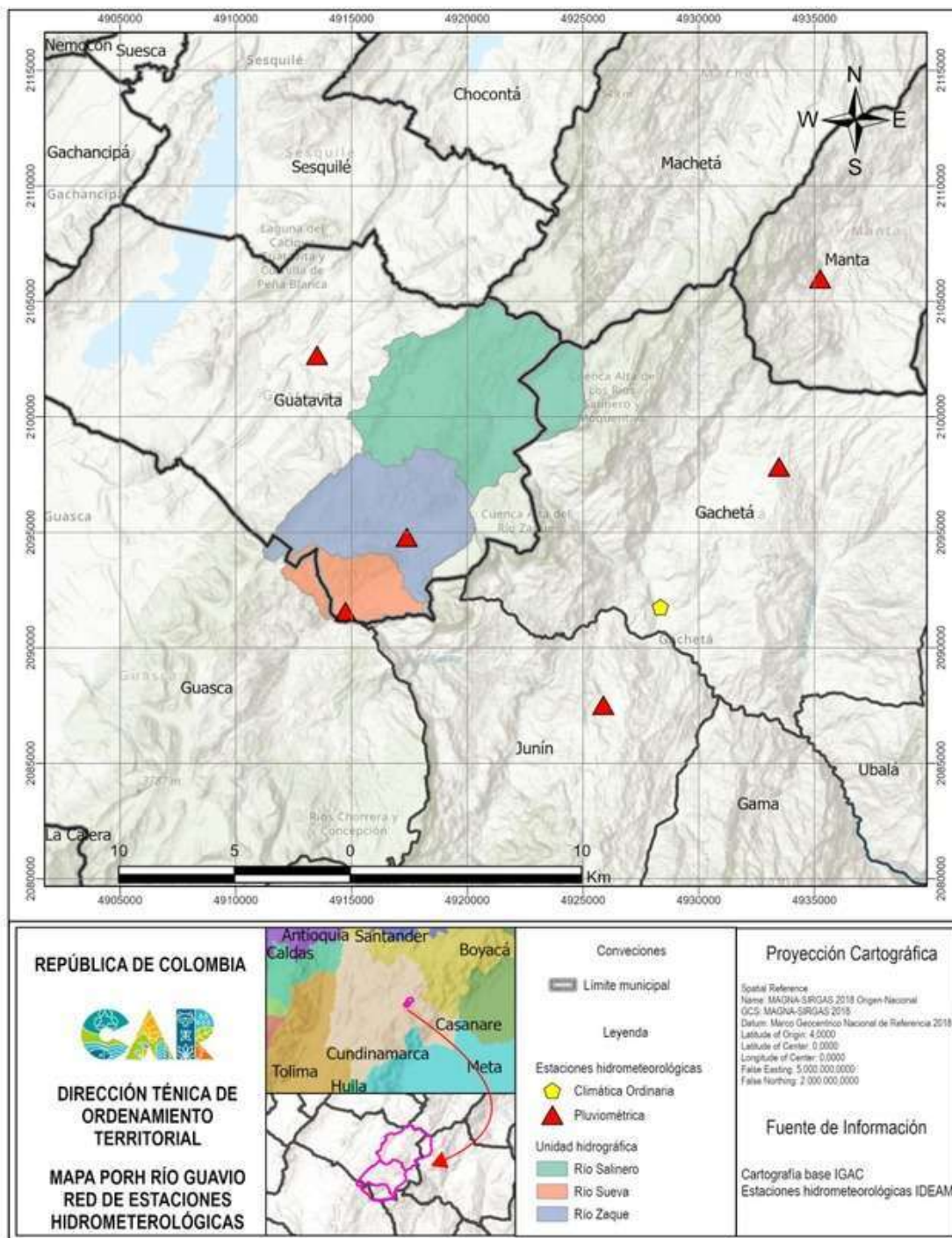
|               |          |            |               |           |          |            |
|---------------|----------|------------|---------------|-----------|----------|------------|
| JUNIN         | 35060050 | 15/05/1962 | Pluviométrica | 1962-2025 | 4.885694 | -73.600361 |
| POTRERITOS    | 35060160 | 15/08/1972 | Pluviométrica | 1972-2024 | 4.828806 | -73.769278 |
| POTRERO LARGO | 21200780 | 15/03/1985 | Pluviométrica | 1985-2024 | 4.792222 | -73.668722 |
| TASAJERAS     | 35060170 | 15/02/1972 | Pluviométrica | 1972-2024 | 4.929222 | -73.780472 |

Elaboracion propia.

En una tercera fase, participé en el análisis hidroclimatológico de la información recopilada, incluyendo la evaluación de la variabilidad temporal de la precipitación, el análisis de tendencias, la identificación de patrones estacionales, la caracterización estadística de las series temporales y la creación del modelo topológico. Este proceso permitió consolidar un diagnóstico del régimen climático de la zona de estudio, evidenciando un comportamiento bimodal característico de la región andina y una alta variabilidad interanual, aspectos fundamentales para la adecuada representación de los procesos hidrológicos dentro del modelo desarrollado.

*Figura 2. Mapa de la ubicación de las estaciones pluviométricas y climática en el área de estudio.*

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.



Fuente: (CAR, 2026)

## **6.2 Procesamiento y análisis de la información hidroclimatológica.**

El procesamiento de la información hidroclimatológica constituyó una etapa crítica dentro del desarrollo de la pasantía, ya que permitió transformar los datos crudos en insumos técnicamente válidos para la modelación hidrológica. En este sentido, se aplicaron diferentes herramientas estadísticas y gráficas para evaluar la calidad y comportamiento de las series de precipitación.

Se realizaron análisis de homogeneidad y consistencia mediante la construcción de series temporales, diagramas de caja (box plots) y análisis de anomalías (ver anexo 2), lo cual permitió identificar la presencia de valores extremos y evaluar su coherencia con el comportamiento climático regional. Los resultados evidenciaron que las series presentan una distribución altamente asimétrica, con predominancia de valores bajos y eventos extremos aislados, característica típica de variables pluviométricas en regiones tropicales (IDEAM, 2018).

La combinación de estas dos herramientas gráficas resulta particularmente útil para distinguir entre eventos extremos de origen climático y posibles errores o inconsistencias en los registros, así como para evaluar la magnitud de la variabilidad temporal de la precipitación. En este sentido, el análisis conjunto del box plots y las anomalías constituye un paso clave en la validación de la calidad de los datos, previo a su incorporación en el modelo hidrológico.

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que las series de precipitación seleccionadas son aptas para ser utilizadas como insumo en el modelo hidrológico, siempre que se consideren las características estadísticas identificadas durante el análisis preliminar. Este proceso de evaluación previa garantiza que la información incorporada al modelo sea consistente, representativa y adecuada para la calibración, reduciendo las incertidumbres asociadas a la calidad de los datos y contribuyendo a una simulación más confiable de los procesos hidrológicos del área de estudio.

## **6.3 Implementación del modelo hidrológico.**

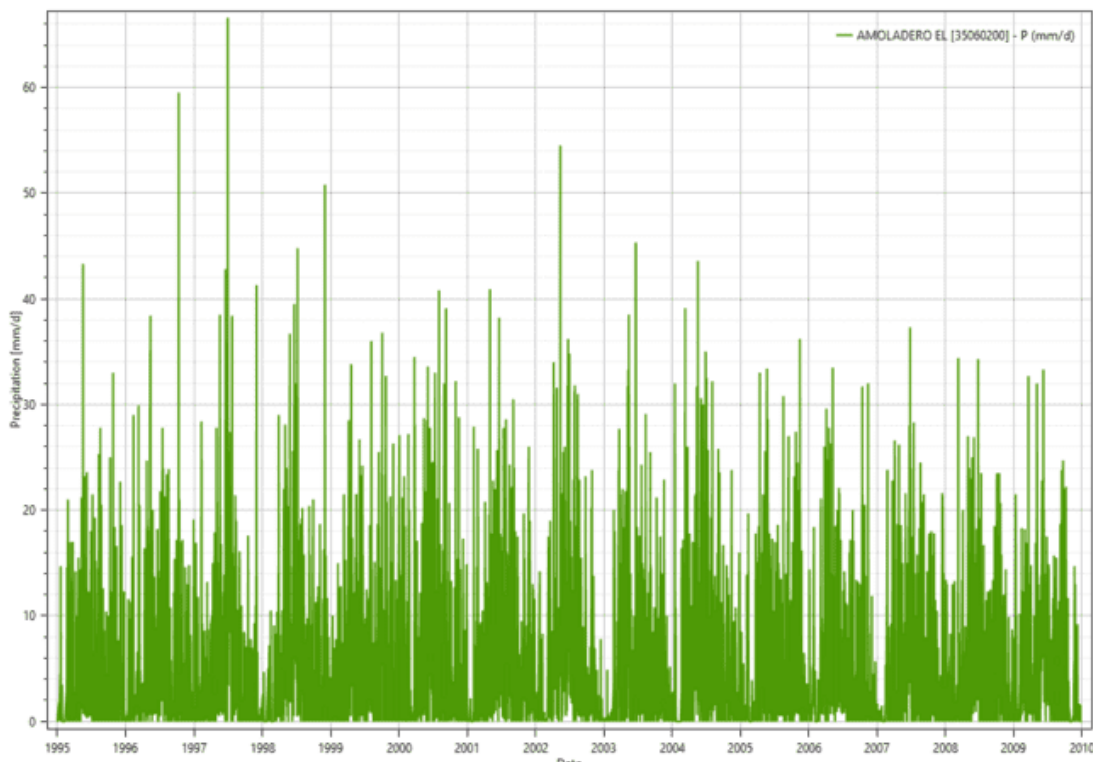
La implementación del modelo hidrológico constituyó una de las etapas centrales del desarrollo de la pasantía, en la medida en que permitió integrar de manera coherente la información hidroclimatológica previamente procesada con una estructura conceptual capaz de representar los procesos físicos dominantes en la generación de escorrentía. Para este propósito, se adoptó un enfoque combinado que articula el modelo conceptual lluvia–escorrentía GR4J con la plataforma de modelación hidrológica RS MINERVE, lo cual permitió aprovechar tanto la robustez conceptual del primero como la capacidad de representación espacial del segundo.

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

La elección de este modelo responde a criterios técnicos asociados a la disponibilidad de información, la escala de análisis y la necesidad de garantizar estabilidad numérica en el proceso de simulación. En contextos donde la información hidrométrica es limitada, los modelos conceptuales de baja parametrización como GR4J han demostrado un desempeño adecuado, reduciendo el riesgo de sobreajuste y facilitando la interpretación de los resultados (Beven, 2012).

En términos operativos, la implementación del modelo implicó la construcción de una base de datos integrada que incluyó las series temporales de precipitación, temperatura y caudal, debidamente procesadas y validadas. La precipitación se incorporó como variable de entrada principal.

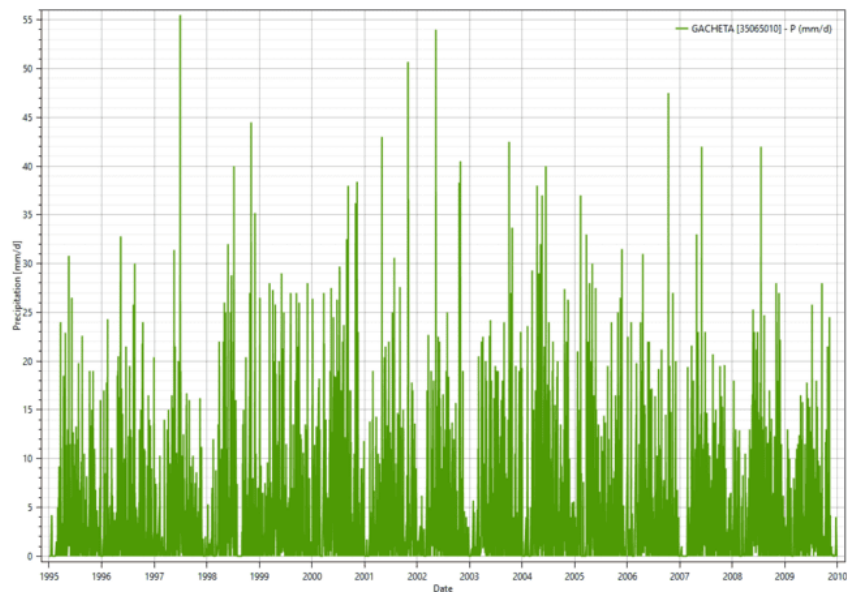
*Figura 3. Base de datos de precipitación utilizada en el modelo computacional de la estación EL AMOLADERO 35060200.*



Elaboracion propia.

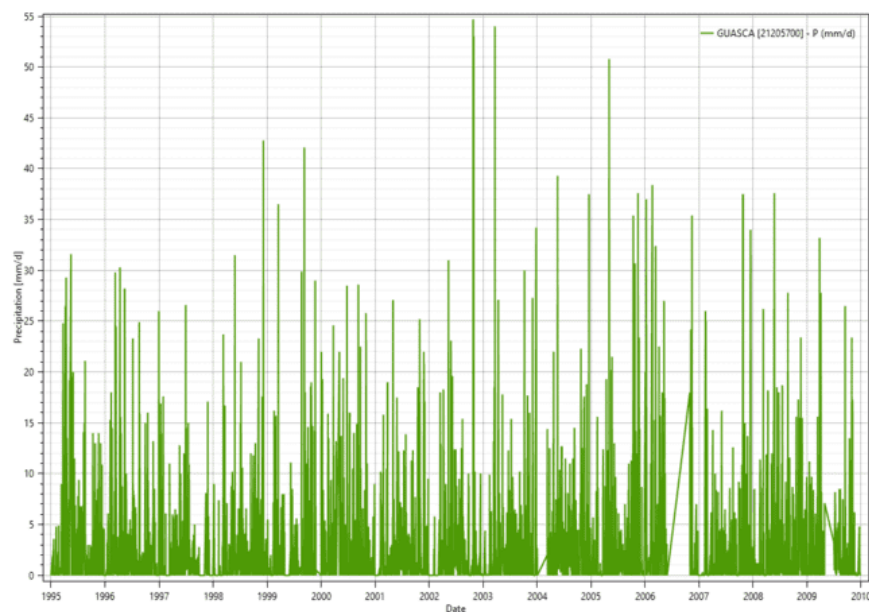
Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

*Figura 4. Base de datos de precipitación utilizada en el modelo computacional de la estación GACHETA 32065010.*



Elaboracion propia.

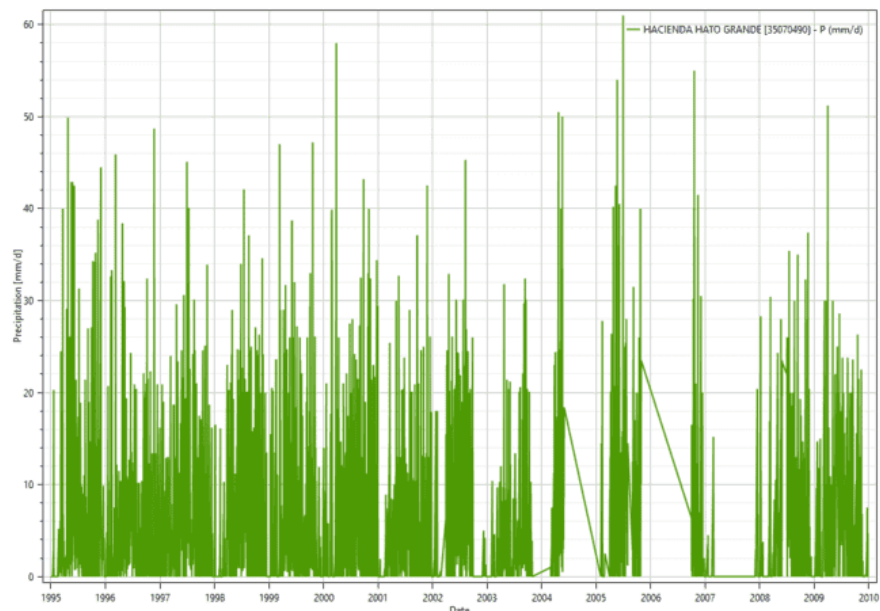
*Figura 5. Base de datos de precipitación utilizada en el modelo computacional de la estación GUASCA 21205700*



Elaboracion propia.

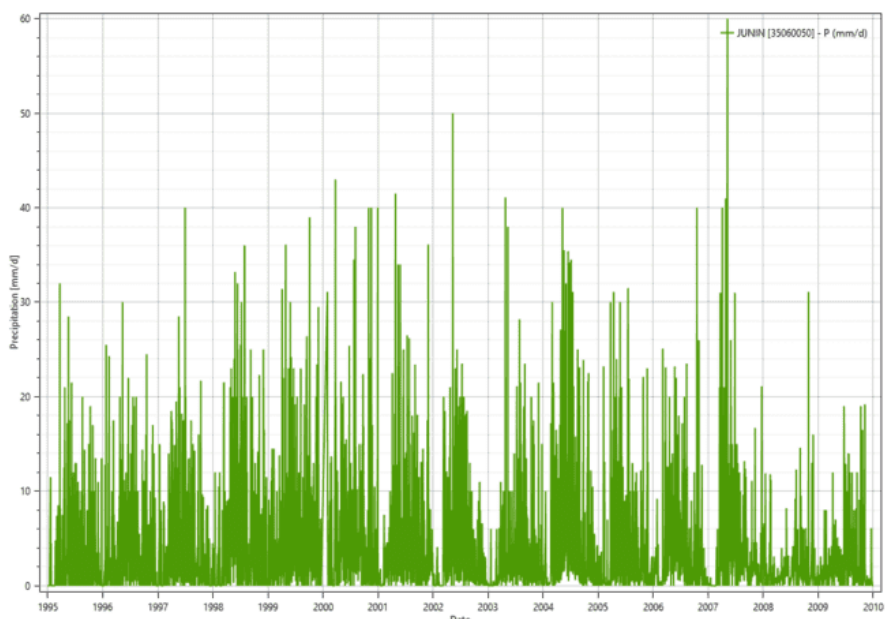
Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

*Figura 6. Base de datos de precipitación utilizada en el modelo computacional de la estación HACIENDA HATO GRANDE 35070490.*



Elaboracion propia.

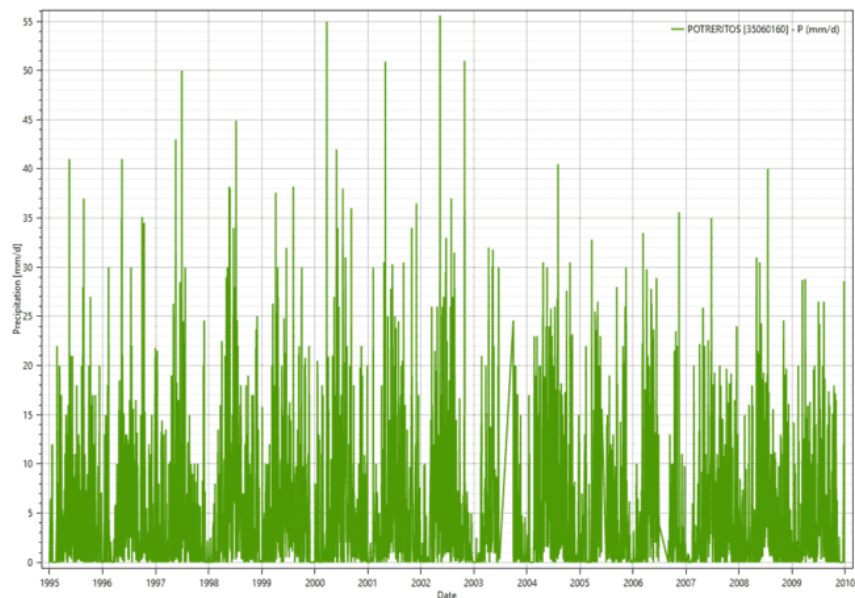
*Figura 7. Base de datos de precipitación utilizada en el modelo computacional de la estación JUNIN 35060050.*



Elaboracion propia.

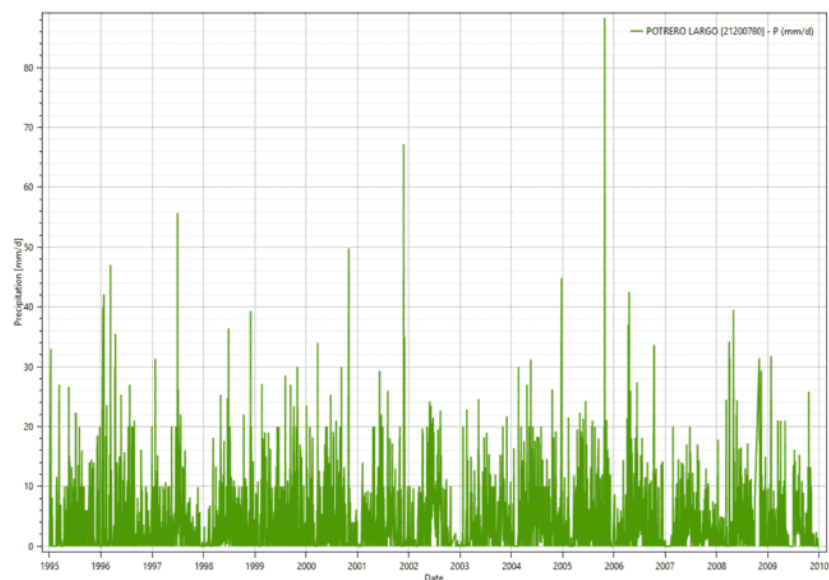
Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

*Figura 8. Base de datos de precipitación utilizada en el modelo computacional de la estación POTRERITOS 35060160.*



Elaboracion propia.

*Figura 9. Base de datos de precipitación utilizada en el modelo computacional de la estación POTRERO LARGO 35060160.*

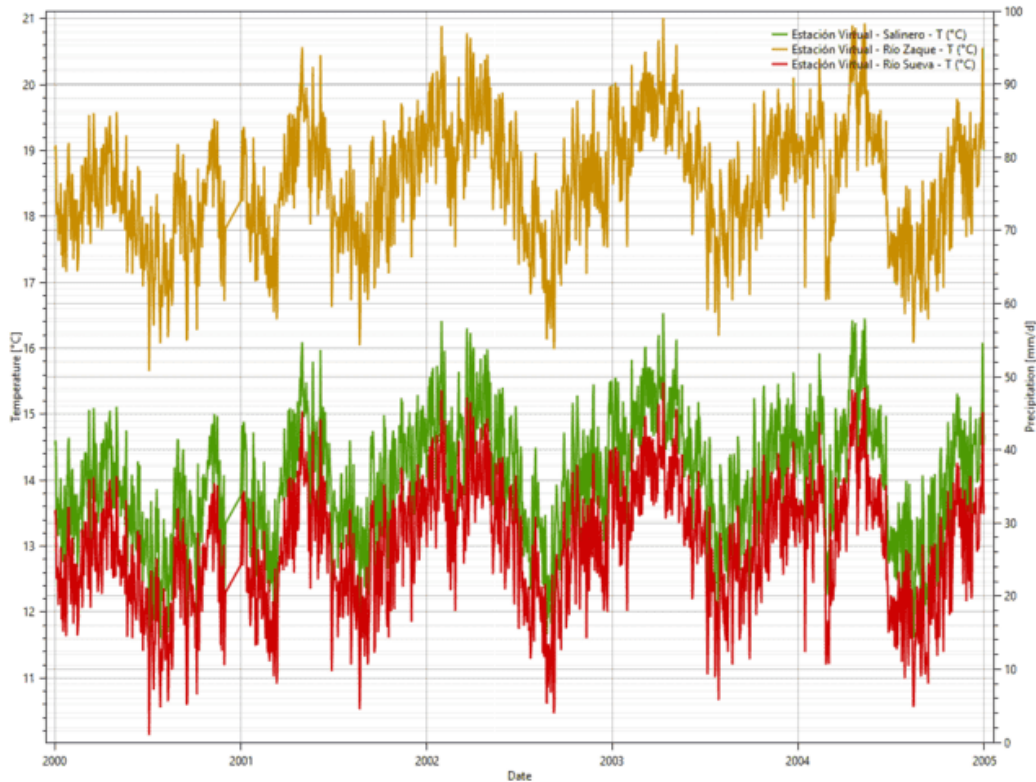


Elaboracion propia.

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

mientras que la temperatura fue utilizada como variable auxiliar para representar procesos indirectos como la evapotranspiración, en función de la configuración del modelo.

*Figura 10. Base de datos de temperatura utilizada en el modelo computacional de las estaciones virtuales asignada a las subcuencas.*



Elaboracion propia.

Adicionalmente, se establecieron estaciones virtuales dentro del sistema, con el fin de mejorar la representación espacial de la precipitación mediante técnicas de interpolación, permitiendo así asignar valores representativos a cada subcuenca.

Esta base constituye el insumo principal para la ejecución del modelo hidrológico, permitiendo asegurar la coherencia temporal y espacial de los datos utilizados en la simulación.

El análisis de la base de datos de temperatura empleada en el modelo computacional evidencia un comportamiento térmico relativamente estable a lo largo del periodo 2000–2005, aunque con variaciones estacionales claramente definidas entre las estaciones virtuales asignadas a las subcuencas. En términos generales, se observa una oscilación cíclica anual

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

que refleja la influencia del régimen climático regional sobre la cuenca, con incrementos de temperatura en periodos secos y descensos asociados a temporadas de mayor precipitación.

La estación virtual correspondiente al río Salinero presenta los valores térmicos más altos del conjunto, con registros promedio cercanos a 18–20 °C y picos superiores a 20 °C. Este comportamiento sugiere condiciones altitudinales y de exposición solar diferentes respecto a las demás subcuencas, lo cual influye directamente en la evapotranspiración potencial y, por ende, en la respuesta hidrológica del sistema.

Por su parte, las estaciones virtuales del río Zaque y río Sueva muestran valores más bajos y relativamente similares entre sí, con promedios ubicados entre 12 °C y 15 °C. No obstante, la estación del río Sueva registra las temperaturas mínimas más marcadas, evidenciando una mayor amplitud térmica y posibles condiciones microclimáticas asociadas a mayores elevaciones o coberturas vegetales más densas.

La coherencia temporal entre las tres series indica que los datos fueron correctamente integrados y responden a patrones climáticos regionales compartidos. Esta consistencia es fundamental para garantizar la robustez del modelo hidrológico, ya que la temperatura constituye una variable clave en la estimación de procesos como evaporación, almacenamiento hídrico y balance energético dentro de cada subcuenca.

En conjunto, la base de datos térmica utilizada proporciona una representación espacialmente diferenciada y temporalmente consistente de las condiciones climáticas de la cuenca, fortaleciendo la capacidad del modelo para reproducir adecuadamente la dinámica hidrológica bajo distintos escenarios meteorológicos.

#### **6.4 Configuración topológica y estructuración espacial del modelo hidrológico en RS MINERVE**

El proceso de estructuración del modelo en RS MINERVE incluyó la delimitación de subcuencas, la definición de nodos hidrológicos y la conexión de los distintos elementos mediante un esquema topológico que reproduce la red de drenaje natural. Cada subcuenca fue representada mediante un módulo GR4J independiente este método permite capturar el gradiente orográfico de la cuenca, asignando un peso estadístico mayor a las estaciones cercanas a los centroides de las subcuencas de interés, lo que permitió capturar las diferencias en la respuesta hidrológica en función de sus características específicas. Esta configuración favorece una mayor flexibilidad en el análisis, al permitir la calibración diferenciada de parámetros y la evaluación de escenarios a nivel local.

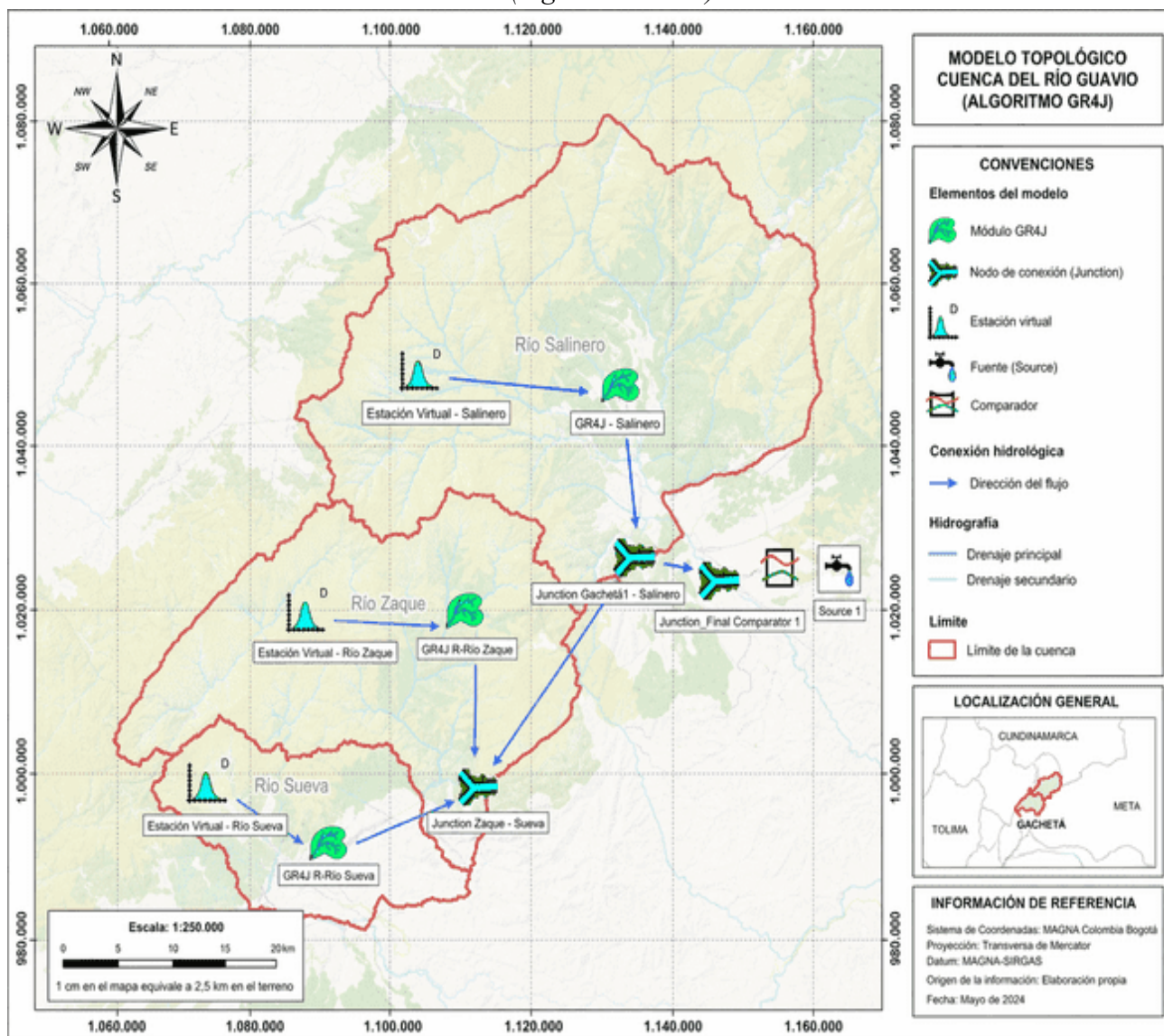
La representación espacial y estructural del modelo se consolidó mediante la construcción de un esquema topológico que reproduce la red de drenaje de la cuenca y la interconexión entre

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

sus diferentes componentes. Este esquema permite visualizar la organización de las subcuencas, los puntos de control y las rutas de flujo dentro del sistema modelado.

En este contexto, la figura 7 presenta el modelo topológico implementado en RS MINERVE, en el cual se identifican los nodos hidrológicos, las conexiones entre subcuencas y la estructura general del sistema de simulación.

*Figura 11. Mapa del Modelo Topológico empleado para la obtención de caudales diarios en la cuenca (algoritmo GR4J).*



Elaboración propia.

Asimismo, se implementaron mecanismos de enrutamiento del flujo que permiten simular la propagación del agua a través de la red hidrográfica, considerando tiempos de viaje y procesos de almacenamiento intermedio. Este componente es fundamental para garantizar la coherencia temporal del modelo, ya que permite reproducir adecuadamente el desfase entre la ocurrencia de la precipitación y la respuesta en caudal en los puntos de salida de la cuenca.

Desde el punto de vista numérico, la implementación del modelo requirió la definición de un paso de tiempo adecuado, el cual fue establecido en escala diaria, en concordancia con la resolución de los datos disponibles y con la estructura del modelo GR4J. Esta decisión permitió garantizar la estabilidad del modelo y evitar errores asociados a la discretización temporal, los cuales pueden afectar significativamente la calidad de las simulaciones en modelos hidrológicos (Singh, 1995).

Adicionalmente, se realizó una verificación preliminar del comportamiento del modelo mediante simulaciones iniciales, con el objetivo de identificar posibles inconsistencias en la configuración, tales como errores en la conexión de nodos, valores atípicos en los parámetros o problemas en la asignación de datos de entrada. Este proceso de validación interna permitió ajustar la estructura del modelo antes de proceder a la etapa de calibración, reduciendo así la incertidumbre en los resultados finales.

En conjunto, la implementación del modelo hidrológico permitió construir una herramienta robusta para la simulación de la respuesta hidrológica de la cuenca, integrando información climática, características fisiográficas y procesos de transformación lluvia–escorrentía en un marco conceptual coherente. Esta base metodológica resulta fundamental para el desarrollo de las etapas posteriores de calibración, validación y análisis de resultados, así como para su aplicación en la gestión del recurso hídrico en el contexto del PORH.

## **6.5 Estrategia de regionalización hidrológica.**

Dada la ausencia de registros hidrométricos continuos en los puntos de cierre de las subcuencas Salinero, Zaque y Sueva, se implementó una estrategia de regionalización hidrológica basada en la transferencia de parámetros (procedimiento de donación de parámetros). Este enfoque es ampliamente utilizado en la modelación de cuencas no instrumentadas (PUB - *Predictions in Ungauged Basins*), permitiendo inferir la respuesta hidrológica de una unidad hidrográfica a partir de una cuenca donante con características biofísicas similares (Blöschl et al., 2013).

En este contexto, la utilización de una parametrización homogénea respondió principalmente a criterios de disponibilidad de información hidrometeorológica, escala de análisis y

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

homogeneidad fisiográfica general de la cuenca de estudio. Aunque cada subcuenca puede presentar respuestas hidrológicas particulares asociadas a diferencias en cobertura vegetal, pendiente, almacenamiento y dinámica de escorrentía, la limitada disponibilidad de registros continuos dificultó la implementación de procesos de calibración independientes para cada unidad hidrográfica. En consecuencia, se optó por una parametrización regional que permitiera mantener coherencia metodológica en la simulación hidrológica y comparabilidad entre resultados, reconociendo que esta simplificación constituye una fuente potencial de incertidumbre dentro del proceso de modelación.

La adopción de una parametrización regional para el modelo GR4J se sustentó en tres criterios técnicos principales:

- **Homogeneidad hidromorfométrica:** Las subcuencas analizadas presentan similitudes en descriptores físicos como pendientes medias escarpadas, tiempos de concentración comparables y una respuesta hidroclimática influenciada por el régimen bimodal característico de la vertiente oriental de la Cordillera Oriental. Según Wagener et al. (2007), la similitud fisiográfica entre cuencas constituye un criterio válido para la transferencia de parámetros asociados a almacenamiento y transferencia de flujo, particularmente en modelos conceptuales de tipo lluvia–escorrentía.
- **Continuidad geológica y edafológica:** El predominio de formaciones sedimentarias del Cretácico y la presencia de suelos tipo Inceptisol-Andisol en las zonas de páramo de la región del Guavio sugieren un comportamiento relativamente homogéneo en procesos de infiltración, retención y percolación del agua. Bajo estas condiciones, se asumió que los reservorios de producción y enrutamiento representados en el modelo GR4J operan bajo dinámicas hidrológicas comparables entre subcuencas (Perrin et al., 2003).
- **Principio de parsimonia:** La utilización de un conjunto único de parámetros regionales permitió reducir el riesgo de sobreajuste asociado a la calibración individual de subcuencas sin registros observados suficientes. Este criterio favorece la estabilidad estructural del modelo y mantiene coherencia en el balance hídrico general del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH), minimizando incertidumbres derivadas de ajustes paramétricos sin soporte observacional robusto (Hrachowitz et al., 2013).

No obstante, se reconoce que la regionalización hidrológica implica simplificaciones inherentes que pueden limitar la capacidad del modelo para representar particularidades locales de ciertas subcuencas, especialmente aquellas relacionadas con diferencias en cobertura vegetal, almacenamiento subterráneo o respuesta hidrológica frente a eventos extremos. Por esta razón, los resultados obtenidos deben interpretarse como aproximaciones

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

hidrológicas regionales útiles para procesos de planificación y gestión del recurso hídrico, más que como representaciones exactas del comportamiento individual de cada unidad hidrográfica.

## **6.6 Proceso de calibración del modelo.**

La calibración del modelo hidrológico constituye una etapa fundamental dentro del proceso de modelación, ya que permite ajustar los parámetros del modelo con el fin de reproducir de la manera más fiel posible la respuesta hidrológica observada en la cuenca. En este estudio, la calibración se realizó utilizando como cuenca de referencia el río Gachetá, específicamente en la estación hidrológica Puente Holguín, debido a la disponibilidad, continuidad y confiabilidad de los registros de caudal. Este enfoque resulta consistente con metodologías de regionalización hidrológica, en las cuales se emplean cuencas instrumentadas como base para la transferencia de parámetros hacia zonas con información limitada.

El proceso de calibración se desarrolló mediante la comparación sistemática entre los caudales observados y los caudales simulados por el modelo GR4J, ajustando iterativamente sus cuatro parámetros principales (X1, X2, X3 y X4). Estos parámetros controlan procesos fundamentales como el almacenamiento en el suelo, el intercambio subterráneo, la capacidad de enrutamiento y la respuesta temporal del sistema (Perrin et al., 2003).

La calibración se efectuó para el periodo comprendido entre **2000 y 2005**, utilizando registros diarios continuos de entrada y salida hidrológica, con el propósito de garantizar que el modelo reprodujera adecuadamente la dinámica observada en la cuenca durante un intervalo representativo de variabilidad climática e hidrológica.

La optimización de parámetros se realizó considerando funciones objetivo ampliamente utilizadas en hidrología, las cuales permiten evaluar la calidad del ajuste desde diferentes perspectivas estadísticas y físicas.

Se reconoce que la ausencia de una etapa formal de validación independiente constituye una limitación metodológica del presente estudio, debido a que restringe la capacidad de evaluar la robustez del modelo bajo diferentes periodos hidrológicos. No obstante, los resultados obtenidos permiten establecer una aproximación preliminar al comportamiento hidrológico de la cuenca y generar insumos técnicos útiles para procesos de planificación hídrica a escala regional.

## 6.7 Indicadores de desempeño utilizados en la calibración

- **Coefficiente de Nash-Sutcliffe (NSE):**

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

Este coeficiente mide la capacidad predictiva del modelo respecto a la media observada. Valores cercanos a 1 indican un ajuste óptimo, mientras que valores inferiores a 0 evidencian un desempeño deficiente (Nash & Sutcliffe, 1970).

- **Coefficiente de correlación de Pearson ®:**

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2}}$$

Este estadístico evalúa la relación lineal entre las series observadas y simuladas, reflejando el grado de sincronía temporal entre ambas (Pearson, 1895).

- **Eficiencia de Kling-Gupta (KGE):**

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

donde:

$$\alpha = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}}, \beta = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}}$$

Este indicador integra correlación, sesgo y variabilidad relativa, permitiendo una evaluación más equilibrada del desempeño del modelo hidrológico (Gupta et al., 2009).

En términos metodológicos, la calibración se llevó a cabo mediante un enfoque iterativo de prueba y error asistido, evaluando distintas combinaciones paramétricas hasta alcanzar un ajuste aceptable entre las series simuladas y observadas. Este procedimiento permitió identificar rangos de valores físicamente coherentes para los parámetros, evitando soluciones hidrológicamente no realistas (Beven, 2012).

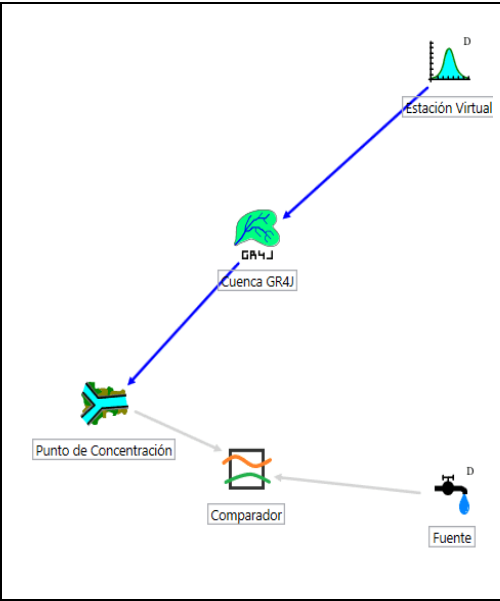
Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

La aplicación conjunta de estos indicadores permitió validar el comportamiento del modelo desde diferentes dimensiones: precisión global, relación estructural y capacidad de reproducir la variabilidad del sistema. De esta forma, el periodo 2000–2005 constituyó la base técnica para consolidar un modelo calibrado con consistencia estadística y representatividad hidrológica.

Como parte de la estructuración del modelo para el proceso de calibración, se definió un esquema topológico que representa la organización de la cuenca de referencia, incluyendo los nodos hidrológicos, las conexiones entre subcuencas y los puntos de control utilizados para la comparación de caudales.

En este sentido, la Tabla 2 presenta la configuración del modelo topológico implementado, en la cual se detallan los elementos estructurales considerados en la simulación.

Tabla 4. Modelo topológico para la calibración de los parámetros del algoritmo GR4J.

|                                                                                    |              |                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | Ítem         | Definición                                                                                                                            |
|                                                                                    | V station 1  | Estación Virtual de la cuenca de la Rio Gachetá                                                                                       |
|                                                                                    | Gr4J_1       | Cuenca del río Gacheta, analizada mediante modelo GR4J                                                                                |
|                                                                                    | Juntion_1    | Punto de concentración y análisis de caudales para la estación hidrológica Puente Holguín                                             |
|                                                                                    | Comparador_1 | Comparación de resultados de la simulación, respecto a los caudales de la estación Puente Holguín con los resultados de la modelación |
|                                                                                    | Source_1     | Datos cargados desde la base de datos, definiendo las series temporales del flujo                                                     |

Elaboración Propia.

Una vez obtenidos los parámetros calibrados, se procedió a su transferencia hacia las subcuencas de interés, bajo el supuesto de similitud hidrológica. Este procedimiento permitió extender la capacidad predictiva del modelo a zonas donde no se dispone de información directa de caudal. La aplicación de este enfoque implicó la asignación de parámetros a cada subcuenca, considerando sus características fisiográficas y climáticas.

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

En este contexto, la Tabla 5 presenta los valores de los parámetros asignados a cada subcuenca modelada, los cuales fueron utilizados en la simulación distribuida del sistema hidrológico.

*Tabla 5. Parámetros del modelo GR4J para las subcuencas analizadas.*

| Estación                        | Área de la cuenca (m <sup>2</sup> ) | X1 (mm)   | X2 (m/s) | X3 (mm) | X4 (días) |
|---------------------------------|-------------------------------------|-----------|----------|---------|-----------|
| Estacion virtual-<br>sueva Rio  | 233864355.64                        | 0.1000547 | 2E-07    | 315     | 1.18      |
| Estacion virtual-<br>zaque Rio  | 54128866.87259                      | 0.1000547 | 2E-07    | 315     | 1.18      |
| Estacion virtual-<br>Salinero - | 173092508.2569                      | 0.1000547 | 2E-07    | 315     | 1.18      |

elaboración Propia.

La estimación de parámetros del modelo GR4J constituye una etapa crítica dentro del proceso de simulación hidrológica, ya que define la capacidad del sistema para reproducir adecuadamente la relación entre precipitación, almacenamiento y escorrentía. En esta investigación, la calibración paramétrica se abordó bajo un enfoque regionalizado, priorizando la coherencia estructural del modelo sobre la individualización extrema de cada subcuenca. Esta estrategia permitió consolidar una configuración hidrológicamente consistente para el análisis distribuido de la cuenca.

La sensibilidad del modelo evidenció que la dinámica simulada depende principalmente del equilibrio entre producción y enrutamiento del flujo, lo cual confirma la relevancia de los parámetros asociados al almacenamiento y transferencia interna del agua. En términos metodológicos, este comportamiento es coherente con la naturaleza conceptual de GR4J, cuyo diseño parsimonioso concentra la respuesta hidrológica en un conjunto reducido de variables con alta capacidad explicativa (Perrin et al., 2003).

Los valores obtenidos durante el proceso de calibración deben interpretarse dentro del contexto de las limitaciones asociadas a la disponibilidad y calidad de la información hidrometeorológica utilizada. Aunque algunos parámetros presentan valores alejados de rangos comúnmente reportados en la literatura para cuencas andinas, estos resultados reflejan el proceso de ajuste necesario para representar el comportamiento hidrológico observado bajo condiciones de incertidumbre en los datos de entrada, vacíos temporales y limitada densidad de estaciones hidrometeorológicas. Diversos estudios han señalado que, en modelos

## Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

conceptuales como GR4J, los parámetros calibrados no siempre poseen una interpretación física directa, sino que funcionan como coeficientes de ajuste orientados a mejorar la representación matemática de la respuesta hidrológica de la cuenca (Perrin et al., 2003).

Respecto a los parámetros optimizados, el valor de  $x_1$  (capacidad del reservorio de producción) tendió hacia el límite inferior del algoritmo de búsqueda. Físicamente, esto sugiere que, bajo las condiciones de saturación de los suelos de la cuenca (predominio de zonas de páramo y alta humedad relativa) y la pendiente escarpada, el almacenamiento en el suelo es mínimo antes de generar escorrentía directa. No obstante, se reconoce que este valor es un artefacto de la optimización numérica para compensar la falta de datos de evapotranspiración real local, y representa una oportunidad de mejora para futuras modelaciones con mayor resolución edafológica.

Desde la perspectiva del desempeño, la validación se sustentó en métricas estadísticas ampliamente aceptadas en modelación hidrológica, específicamente el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) y la eficiencia de Kling-Gupta (KGE). La selección conjunta de estos indicadores permitió evaluar no solo la precisión global del modelo, sino también su capacidad para representar patrones temporales, sesgos y variabilidad hidrológica (Gupta et al., 2009).

Los resultados obtenidos durante la calibración muestran que el modelo logró representar de manera general la dinámica hidrológica observada en la cuenca, particularmente en eventos de magnitud media y alta. Sin embargo, se identificaron limitaciones en la representación de ciertos periodos hidrológicos, especialmente asociados a eventos extremos y fluctuaciones de caudal de baja magnitud, lo cual puede estar relacionado con la incertidumbre inherente a los datos de entrada, la resolución temporal de la información y las simplificaciones conceptuales propias del modelo GR4J. En este sentido, los resultados obtenidos deben interpretarse como una aproximación hidrológica regional útil para procesos de planificación y evaluación del recurso hídrico, más que como una representación exacta del comportamiento natural de la cuenca.

Adicionalmente, la aplicación de una lógica paramétrica homogénea entre subcuencas permitió mantener coherencia metodológica y facilitar la comparabilidad interna de los resultados obtenidos. Aunque esta aproximación puede reducir la sensibilidad frente a particularidades hidrológicas locales, resultó funcional para el alcance regional del estudio y las condiciones de información disponibles durante el proceso de modelación.

En consecuencia, la combinación entre análisis de sensibilidad, calibración iterativa y evaluación estadística permitió desarrollar un modelo hidrológico capaz de representar tendencias generales del comportamiento lluvia-escorrentía en la cuenca del río Guavio. Aunque el modelo presenta limitaciones asociadas a disponibilidad de información, parametrización regional y simplificaciones conceptuales, constituye una herramienta

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

técnica útil para apoyar procesos de análisis hidrológico y planificación del recurso hídrico dentro del contexto del PORH. Este enfoque metodológico se alinea con recomendaciones internacionales sobre evaluación de desempeño e interpretación de incertidumbre en modelos hidrológicos conceptuales (Beven, 2012; Pushpalatha et al., 2011).

## **7. RESULTADOS.**

### **7.1 Desempeño del modelo hidrológico**

Los resultados de la modelación hidrológica evidencian que el modelo implementado logra reproducir de manera coherente la dinámica general del sistema hidrológico de la cuenca. La comparación entre los caudales simulados y observados muestra una adecuada correspondencia en la temporalidad de los eventos de escorrentía, así como en los periodos de ascenso y recesión del hidrograma.

El análisis de desempeño, basado en indicadores estadísticos, muestra valores de eficiencia moderados, destacándose un coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) obtenido fue de 0.4067. Si bien este valor se sitúa por debajo del umbral de 0.50 propuesto por Moriasi et al. (2007) para cuencas con datos de alta calidad, en el contexto de la cuenca del Río Guavio caracterizada por una compleja orografía andina y una red de estaciones pluviométricas con vacíos de información significativos el resultado refleja la capacidad del modelo para capturar la estacionalidad y la magnitud de los caudales medios. La desviación se atribuye principalmente a la subestimación de caudales pico en eventos extremos, lo cual es una limitación inherente a la resolución temporal de los datos de entrada y a la estructura conceptual del modelo GR4J en zonas de alta montaña.

Adicionalmente, los valores de correlación de Pearson ( $\sim 0.70$ ) y eficiencia de Kling-Gupta ( $\sim 0.68$ ) reflejan una adecuada representación de la estructura temporal de los datos, lo cual indica que el modelo captura de manera consistente las relaciones entre precipitación y escorrentía.

El ajuste de los parámetros del modelo se realizó con el objetivo de minimizar las diferencias entre los caudales simulados y observados, garantizando al mismo tiempo la coherencia física de los valores obtenidos. Este proceso permitió identificar un conjunto óptimo de parámetros que representan adecuadamente el comportamiento hidrológico de la cuenca de referencia.

Los valores finales de los parámetros calibrados constituyen el resultado del proceso de optimización, reflejando las características hidrológicas predominantes de la cuenca.

*Tabla 6. Resultados para la función objetivo.*

| <b>Categoría</b>                                                        | <b>Variable</b>           | <b>Valor</b> |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------|
| <b>Best parameters</b>                                                  | GR4J - X1                 | 0.1000547    |
|                                                                         | GR4J - X2                 | 2.00E-07     |
|                                                                         | GR4J - X3                 | 315          |
|                                                                         | GR4J - X4                 | 1.18         |
| <b>Best indicators values for selected comparator:<br/>Comparator 1</b> | Nash                      | 0.40674976   |
|                                                                         | Nash-ln                   | 0.56000807   |
|                                                                         | Pearson Correlation Coeff | 0.70140399   |
|                                                                         | Kling-Gupta Efficiency    | 0.68521317   |
|                                                                         | Bias Score                | 0.99559015   |
|                                                                         | RRMSE                     | 0.85779076   |
|                                                                         | Relative Volume Bias      | 0.06640671   |
|                                                                         | Normalized Peak Error     | -0.35105531  |
|                                                                         | Peirce Skill Score        | 0            |
|                                                                         | Overall Accuracy          | 0.98960613   |
|                                                                         | Heidke Skill Score        | 0            |
| <b>Resultado global</b>                                                 | Best OF value             | 0.86916944   |

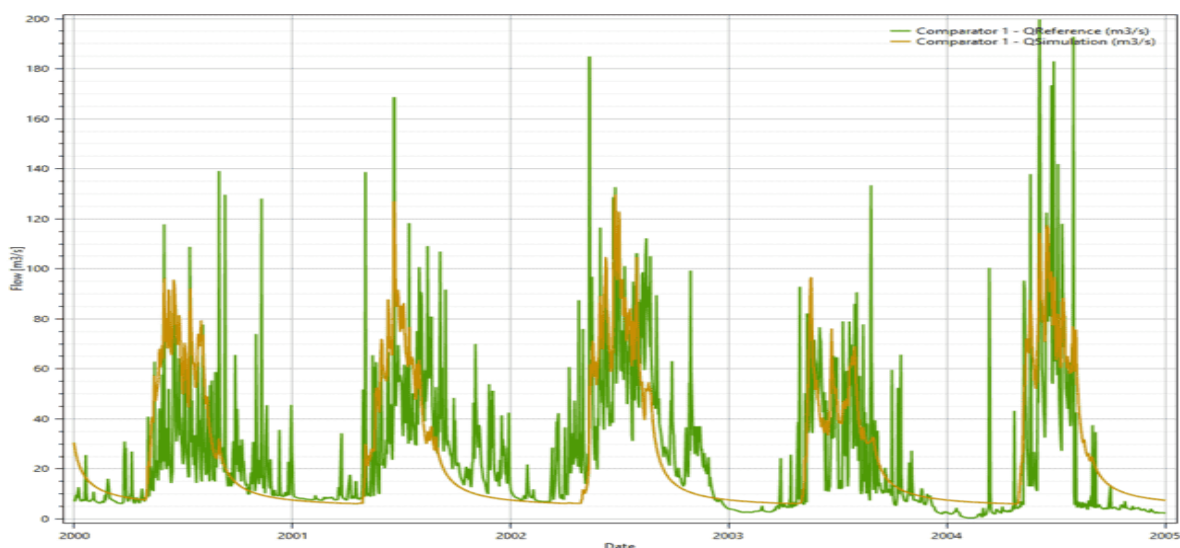
Elaboracion propia.

## 7.2 Análisis del comportamiento hidrológico simulado

El hidrograma generado a partir de la simulación muestra un comportamiento hidrológico consistente con las características fisiográficas de la cuenca, evidenciando respuestas rápidas ante eventos de precipitación, propias de sistemas montañosos con pendientes pronunciadas.

Se observa que el modelo reproduce adecuadamente la ocurrencia temporal de los eventos de escorrentía, manteniendo sincronización entre los picos de precipitación y las respuestas de caudal. Sin embargo, se identifican discrepancias en la magnitud de los picos máximos, los cuales tienden a ser subestimados por el modelo, lo que indica una limitación en la representación de eventos extremos.

*Figura 12. Resultado de calibración del modelo*



Elaboracion propia.

La etapa de calibración del modelo se desarrolló en el periodo comprendido entre el 01 de enero de 2000 y el 01 de enero de 2005, intervalo que fue seleccionado estratégicamente por presentar una consistencia hidrológica adecuada entre las series de caudal observado y simulado, así como una disponibilidad y calidad de datos suficientemente homogénea. Este rango temporal permite evaluar el desempeño del modelo bajo diferentes condiciones hidrológicas (eventos húmedos y periodos de recesión), garantizando que la calibración no esté sesgada hacia un único tipo de comportamiento de la cuenca.

A partir del análisis comparativo del hidrograma, se evidencia que el modelo logra reproducir de manera satisfactoria la dinámica general del sistema, capturando con coherencia la temporalidad de los eventos de escorrentía, así como la tendencia en los periodos de ascenso y recesión del caudal. La correspondencia en la forma global de ambas curvas indica que los procesos fundamentales de transformación lluvia–escorrentía y enrutamiento han sido correctamente representados en términos estructurales.

No obstante, es importante establecer una salvedad técnica relevante: el modelo presenta limitaciones en la representación de los picos extremos de caudal, donde se observa una

## Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

subestimación en comparación con los valores registrados. Este comportamiento es típico en procesos de calibración inicial o intermedia, y puede estar asociado a una respuesta amortiguada del modelo, derivada de la parametrización de los reservorios, la escala temporal de simulación o la simplificación en la representación espacial de la precipitación. En términos hidrológicos, esto sugiere que el modelo aún no captura completamente los procesos de generación rápida de escorrentía superficial o eventos intensos de precipitación que producen crecidas abruptas.

Adicionalmente, se identifican ciertas oscilaciones en la señal simulada, las cuales, aunque no invalidan el comportamiento global del modelo, sí indican la necesidad de un ajuste más fino en los parámetros de almacenamiento y transferencia para lograr una respuesta más suavizada y físicamente representativa.

A pesar de estas diferencias puntuales, el desempeño general del modelo puede considerarse robusto dentro del contexto de calibración, ya que reproduce adecuadamente la mayoría de los eventos y mantiene coherencia en la evolución temporal del caudal. Esto permite afirmar que el modelo se encuentra en un estado funcional sólido, con una capacidad significativa para representar la respuesta hidrológica de la cuenca.

En este sentido, el ejercicio de calibración no solo se logró satisfactoriamente, sino que también permitió identificar con claridad las fortalezas y limitaciones del modelo, lo cual constituye un resultado altamente valioso desde el punto de vista técnico. Más allá de alcanzar un ajuste numérico, el proceso ha facilitado la comprensión profunda del comportamiento hidrológico de la cuenca y de la sensibilidad de los parámetros del modelo, consolidando una base sólida para futuras etapas de optimización.

Con el proceso de calibración consolidado y los parámetros ajustados para cada unidad hidrológica, se procede a evaluar la respuesta integrada del sistema mediante el análisis del caudal total generado por las tres subcuencas modeladas. Esta etapa permite observar la contribución conjunta de los ríos Sueva, Zaque y Salinero dentro de la dinámica general de la cuenca, ofreciendo una visión más completa del comportamiento hidrológico regional.

La representación del caudal total constituye un insumo clave para interpretar la capacidad del modelo en escenarios agregados, ya que evidencia cómo interactúan espacialmente los aportes individuales y cómo se manifiestan en la descarga acumulada del sistema. A diferencia del análisis por subcuenca, esta aproximación permite identificar patrones globales de respuesta, sincronización hidrológica y magnitud de los eventos de escorrentía en términos integrados.

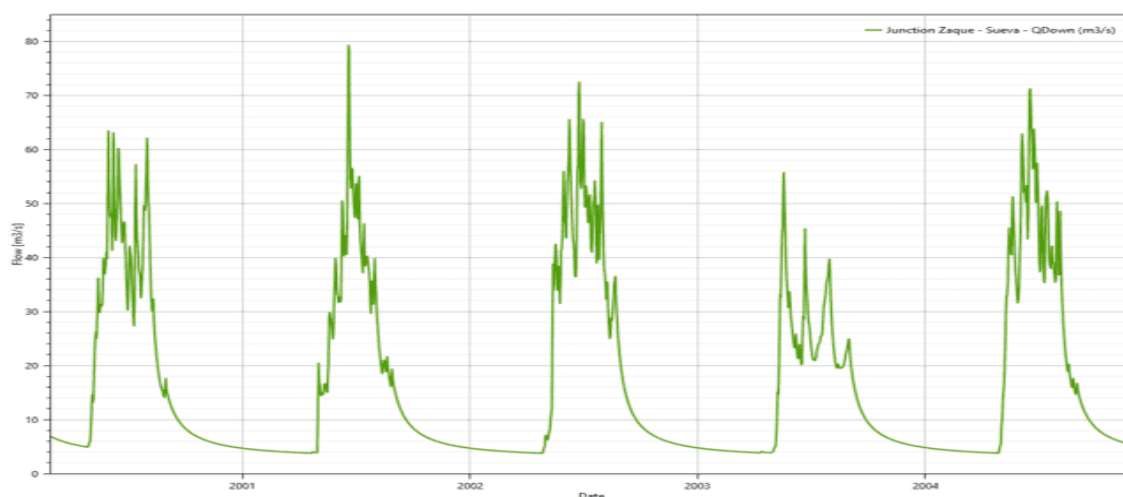
Desde una perspectiva metodológica, la evaluación del caudal total resulta esencial para validar la coherencia del esquema distribuido implementado, puesto que refleja la efectividad

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

de la estructura topológica, la parametrización adoptada y la conectividad entre nodos hidrológicos. Asimismo, permite verificar si la suma de las respuestas locales reproduce adecuadamente la dinámica esperada a escala de cuenca.

En este contexto, la visualización de las series temporales de caudal total proporciona una herramienta de análisis para examinar la estabilidad del modelo, la amplitud de los eventos hidrológicos y la representatividad de los periodos de recesión. Su interpretación contribuye a fortalecer la confiabilidad del sistema modelado y a sustentar su aplicación en estudios de oferta hídrica, planificación territorial y toma de decisiones orientadas a la gestión sostenible del recurso.

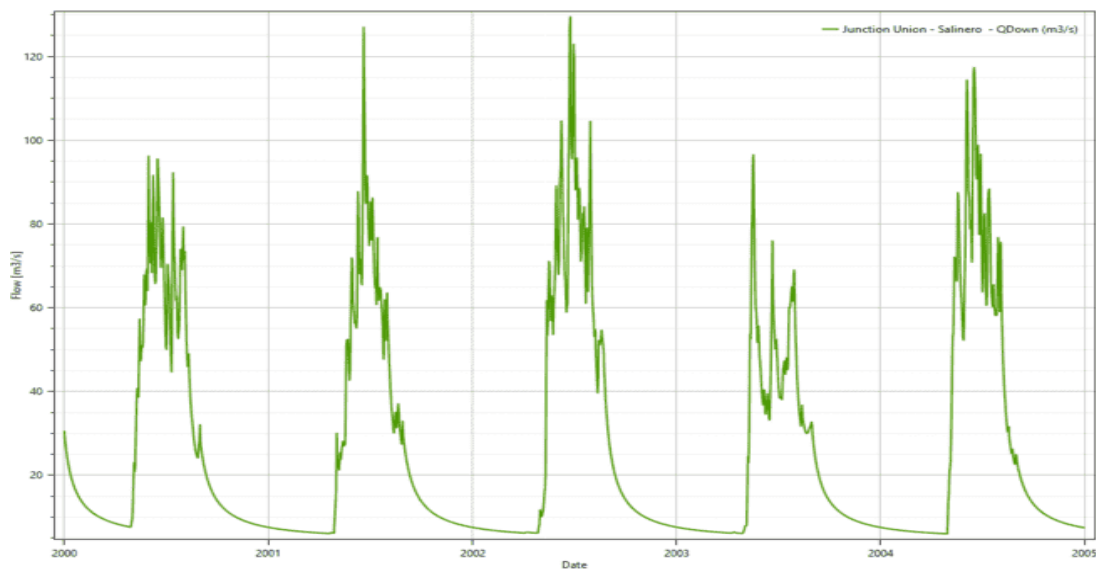
*Figura 13. Caudal simulado en la unión hidrológica de la subcuenca Zaque y Sueva.*



Elaboracion propia.

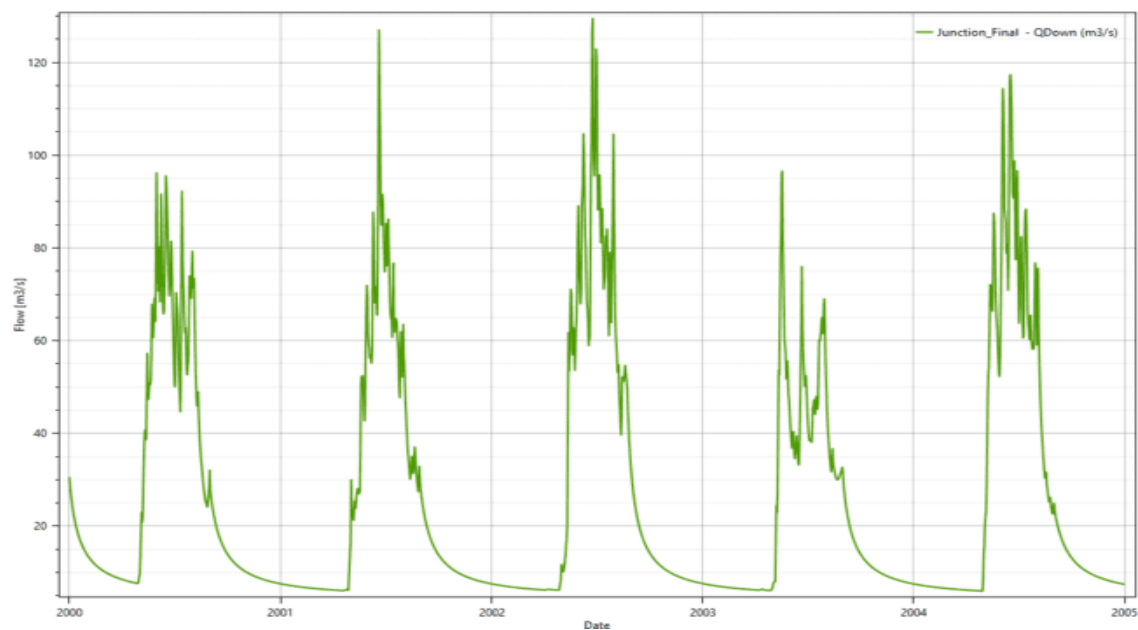
*Figura 14. Caudal simulado en la unión hidrológica de la subcuenca Sueva y la unión anterior.*

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.



Elaboracion propia.

*Figura 15. Series temporales del caudal total simulado en la unión hidrológica final de las subcuencas modeladas.*



Elaboracion propia.

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

### **7.3 Implicaciones para la gestión del recurso hídrico**

Los resultados obtenidos a partir de la modelación hidrológica no solo representan una aproximación técnica al comportamiento hídrico de la cuenca del río Guavio, sino que constituyen una herramienta estratégica para la planificación y gestión integral del recurso hídrico dentro del marco del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH). Su importancia radica en la capacidad de transformar información hidroclimatológica en criterios cuantificables para la toma de decisiones relacionadas con disponibilidad hídrica, regulación de usos del agua y sostenibilidad ambiental de la cuenca.

Metodológicamente, el proceso de modelación se desarrolló a partir de la integración de información hidroclimatológica previamente depurada y validada, incorporando series de precipitación, temperatura y caudal dentro de un esquema conceptual lluvia–escorrentía implementado en RS MINERVE mediante el algoritmo GR4J. La estructuración del modelo incluyó la delimitación de subcuencas, definición de nodos hidrológicos, configuración topológica de la red de drenaje y asignación de parámetros hidrológicos calibrados bajo criterios de similitud fisiográfica e hidrológica. Asimismo, la calibración se realizó mediante un procedimiento iterativo de ajuste entre caudales observados y simulados, utilizando indicadores estadísticos como NSE, KGE y coeficiente de correlación de Pearson, ampliamente empleados para evaluar el desempeño de modelos hidrológicos conceptuales.

Desde una perspectiva científica, los resultados obtenidos presentan un comportamiento coherente con lo reportado en estudios hidrológicos desarrollados en cuencas andinas de alta montaña, donde la precipitación presenta una marcada variabilidad temporal y espacial asociada a dinámicas atmosféricas regionales y condiciones fisiográficas complejas (IDEAM, 2019). La identificación de un régimen bimodal de precipitación y la presencia de alta variabilidad interanual coinciden con investigaciones realizadas en regiones hidrográficas de la cordillera Oriental colombiana, las cuales evidencian que la respuesta hidrológica de este tipo de cuencas se encuentra altamente condicionada por fenómenos de variabilidad climática como El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) (Poveda et al., 2011).

En este sentido, los resultados de la modelación permiten interpretar que la cuenca del río Guavio presenta una sensibilidad significativa frente a cambios en los patrones de precipitación, lo que implica riesgos potenciales tanto de disminución de oferta hídrica en periodos secos como de aumento de caudales en temporadas de alta precipitación. Este comportamiento es consistente con lo planteado por Buytaert et al. (2006), quienes destacan que las cuencas altoandinas poseen una elevada vulnerabilidad hidrológica debido a la dependencia directa de los ecosistemas reguladores de montaña y a la variabilidad climática propia de estas regiones.

## Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

Adicionalmente, la depuración y validación de series hidroclimatológicas permitió evidenciar una problemática recurrente en estudios hidrológicos en Colombia: la presencia de vacíos de información, discontinuidad temporal y limitaciones en la cobertura espacial de las estaciones hidrometeorológicas. Diversos autores han señalado que estas deficiencias representan una de las principales fuentes de incertidumbre en procesos de modelación hidrológica y evaluación de oferta hídrica (Xu et al., 2014). En consecuencia, el desarrollo de procesos de control de calidad y análisis de consistencia de datos no constituye únicamente una etapa metodológica complementaria, sino un componente fundamental para garantizar la robustez y confiabilidad de los resultados obtenidos.

Desde el punto de vista técnico, la modelación hidrológica permitió generar estimaciones del comportamiento hidrológico que facilitan la identificación de periodos críticos de escasez, la evaluación de disponibilidad hídrica y la comprensión de la dinámica de respuesta de las subcuencas frente a eventos de precipitación. No obstante, el desempeño del modelo presentó limitaciones asociadas principalmente a la disponibilidad y resolución de la información de entrada, especialmente en sectores con baja densidad de estaciones hidrometeorológicas y registros discontinuos. Aunque los indicadores estadísticos de calibración evidenciaron un ajuste funcional aceptable entre caudales simulados y observados, se identificaron diferencias en la representación de algunos eventos extremos y variaciones temporales puntuales, situación frecuente en modelos conceptuales aplicados en cuencas de montaña con alta variabilidad climática.

En este contexto, es importante reconocer que los resultados obtenidos no deben interpretarse como representaciones exactas del comportamiento natural de la cuenca, sino como aproximaciones condicionadas por la calidad de los datos de entrada, la escala de análisis y las simplificaciones inherentes al modelo utilizado. Esta limitación ha sido ampliamente discutida en la literatura científica, donde se reconoce que todo modelo hidrológico implica incertidumbres asociadas a procesos de calibración, parametrización y representación espacial de variables ambientales (Beven, 2012). De igual forma, la aplicación de parámetros regionalizados bajo criterios de similitud hidrológica puede reducir la sensibilidad del modelo frente a particularidades locales de cada subcuenca, aunque mejora la estabilidad general del esquema distribuido.

En términos de gestión territorial, los resultados adquieren una relevancia significativa al proporcionar criterios técnicos para la regulación de captaciones, conservación de caudales ecológicos y priorización de áreas estratégicas para restauración hidrológica. La literatura especializada resalta que la incorporación de herramientas de modelación en instrumentos de planificación hídrica permite reducir la toma de decisiones basada únicamente en observaciones puntuales o criterios administrativos, favoreciendo procesos sustentados en evidencia científica y análisis predictivos (UNESCO, 2020).

## Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

Asimismo, los resultados obtenidos evidencian la necesidad de fortalecer las estrategias de monitoreo hidrometeorológico en la cuenca del río Guavio. La existencia de estaciones con registros incompletos o discontinuos limita la capacidad de representar adecuadamente la dinámica hidrológica del territorio, especialmente bajo escenarios de variabilidad y cambio climático. En este contexto, diferentes investigaciones han señalado que el fortalecimiento de redes de monitoreo constituye una medida prioritaria para mejorar la gestión adaptativa del recurso hídrico y aumentar la capacidad institucional frente a eventos hidrológicos extremos (IPCC, 2021).

Desde el componente social y territorial, las implicaciones de los resultados también son relevantes. Una gestión hídrica sustentada en información técnica robusta contribuye a disminuir conflictos asociados al acceso y distribución del agua, particularmente en territorios donde convergen actividades agropecuarias, consumo doméstico y conservación ambiental. Sin embargo, diversos estudios sobre gobernanza del agua coinciden en que la efectividad de los instrumentos de planificación no depende exclusivamente de la calidad técnica de los modelos empleados, sino también de la articulación entre instituciones, actores locales y comunidades usuarias del recurso (Ostrom, 2009). Por esta razón, los resultados de la modelación deben entenderse como herramientas de apoyo para la construcción de procesos participativos de gestión y no únicamente como productos técnicos de uso institucional.

En consecuencia, la incorporación de herramientas de modelación hidrológica dentro del PORH representa un avance importante en la evaluación técnica del recurso hídrico y en la generación de escenarios de planificación territorial. No obstante, su verdadero alcance depende de la capacidad de integrar los resultados obtenidos con estrategias de monitoreo continuo, fortalecimiento institucional, participación comunitaria y actualización permanente de información hidroclimatológica. Bajo esta perspectiva, la modelación hidrológica deja de ser únicamente un ejercicio computacional y se convierte en un instrumento de soporte para la toma de decisiones ambientales orientadas hacia la sostenibilidad y la seguridad hídrica de la cuenca del río Guavio.

Los resultados obtenidos a partir de la modelación hidrológica no solo representan una aproximación técnica al comportamiento hídrico de la cuenca del río Guavio, sino que constituyen una herramienta estratégica para la planificación y gestión integral del recurso hídrico dentro del marco del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH). Su importancia radica en la capacidad de transformar información hidroclimatológica en criterios cuantificables para la toma de decisiones relacionadas con disponibilidad hídrica, regulación de usos del agua y sostenibilidad ambiental de la cuenca.

## Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

Desde una perspectiva científica, los resultados obtenidos presentan un comportamiento coherente con lo reportado en estudios hidrológicos desarrollados en cuencas andinas de alta montaña, donde la precipitación presenta una marcada variabilidad temporal y espacial asociada a dinámicas atmosféricas regionales y condiciones fisiográficas complejas (IDEAM, 2019). La identificación de un régimen bimodal de precipitación y la presencia de alta variabilidad interanual coinciden con investigaciones realizadas en regiones hidrográficas de la cordillera Oriental colombiana, las cuales evidencian que la respuesta hidrológica de este tipo de cuencas se encuentra altamente condicionada por fenómenos de variabilidad climática como El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) (Poveda et al., 2011).

En este sentido, los resultados de la modelación permiten interpretar que la cuenca del río Guavio presenta una sensibilidad significativa frente a cambios en los patrones de precipitación, lo que implica riesgos potenciales tanto de disminución de oferta hídrica en periodos secos como de aumento de caudales en temporadas de alta precipitación. Este comportamiento es consistente con lo planteado por Buytaert et al. (2006), quienes destacan que las cuencas altoandinas poseen una elevada vulnerabilidad hidrológica debido a la dependencia directa de los ecosistemas reguladores de montaña y a la variabilidad climática propia de estas regiones.

Adicionalmente, la depuración y validación de series hidroclimatológicas permitió evidenciar una problemática recurrente en estudios hidrológicos en Colombia: la presencia de vacíos de información, discontinuidad temporal y limitaciones en la cobertura espacial de las estaciones hidrometeorológicas. Diversos autores han señalado que estas deficiencias representan una de las principales fuentes de incertidumbre en procesos de modelación hidrológica y evaluación de oferta hídrica (Xu et al., 2014). En consecuencia, el desarrollo de procesos de control de calidad y análisis de consistencia de datos no constituye únicamente una etapa metodológica complementaria, sino un componente fundamental para garantizar la robustez y confiabilidad de los resultados obtenidos.

Desde el punto de vista técnico, la modelación hidrológica permitió generar estimaciones de comportamiento hidrológico que facilitan la identificación de periodos críticos de escasez, la evaluación de disponibilidad hídrica y la comprensión de la dinámica de respuesta de las subcuencas frente a eventos de precipitación. Sin embargo, es importante reconocer que los resultados obtenidos no deben interpretarse como representaciones exactas del comportamiento natural de la cuenca, sino como aproximaciones condicionadas por la calidad de los datos de entrada, la escala de análisis y las simplificaciones inherentes al modelo utilizado. Esta limitación ha sido ampliamente discutida en la literatura científica, donde se reconoce que todo modelo hidrológico implica incertidumbres asociadas a procesos de calibración, parametrización y representación espacial de variables ambientales (Beven, 2012).

## Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

En términos de gestión territorial, los resultados adquieren una relevancia significativa al proporcionar criterios técnicos para la regulación de captaciones, conservación de caudales ecológicos y priorización de áreas estratégicas para restauración hidrológica. La literatura especializada resalta que la incorporación de herramientas de modelación en instrumentos de planificación hídrica permite reducir la toma de decisiones basada únicamente en observaciones puntuales o criterios administrativos, favoreciendo procesos sustentados en evidencia científica y análisis predictivos (UNESCO, 2020).

Asimismo, los resultados obtenidos evidencian la necesidad de fortalecer las estrategias de monitoreo hidrometeorológico en la cuenca del río Guavio. La existencia de estaciones con registros incompletos o discontinuos limita la capacidad de representar adecuadamente la dinámica hidrológica del territorio, especialmente bajo escenarios de variabilidad y cambio climático. En este contexto, diferentes investigaciones han señalado que el fortalecimiento de redes de monitoreo constituye una medida prioritaria para mejorar la gestión adaptativa del recurso hídrico y aumentar la capacidad institucional frente a eventos hidrológicos extremos (IPCC, 2021).

Desde el componente social y territorial, las implicaciones de los resultados también son relevantes. Una gestión hídrica sustentada en información técnica robusta contribuye a disminuir conflictos asociados al acceso y distribución del agua, particularmente en territorios donde convergen actividades agropecuarias, consumo doméstico y conservación ambiental. Sin embargo, diversos estudios sobre gobernanza del agua coinciden en que la efectividad de los instrumentos de planificación no depende exclusivamente de la calidad técnica de los modelos empleados, sino también de la articulación entre instituciones, actores locales y comunidades usuarias del recurso (Ostrom, 2009). Por esta razón, los resultados de la modelación deben entenderse como herramientas de apoyo para la construcción de procesos participativos de gestión y no únicamente como productos técnicos de uso institucional.

En consecuencia, la incorporación de herramientas de modelación hidrológica dentro del PORH representa un avance importante en la evaluación técnica del recurso hídrico y en la generación de escenarios de planificación territorial. No obstante, su verdadero alcance depende de la capacidad de integrar los resultados obtenidos con estrategias de monitoreo continuo, fortalecimiento institucional, participación comunitaria y actualización permanente de información hidroclimatológica. Bajo esta perspectiva, la modelación hidrológica deja de ser únicamente un ejercicio computacional y se convierte en un instrumento de soporte para la toma de decisiones ambientales orientadas hacia la sostenibilidad y la seguridad hídrica de la cuenca del río Guavio.

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

## 8. Referencias

Beven, K. (2012). *Rainfall-runoff modelling: The primer* (2nd ed.). Wiley-Blackwell. DOI:[10.1002/9781119951001](https://doi.org/10.1002/9781119951001)

Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., & Savenije, H. (Eds.). (2013). *Runoff prediction in ungauged basins: Synthesis across processes, places and scales*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139235761>

Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP). (2015). *RS MINERVE: Manual técnico del modelo hidrológico e hidráulico*. CREALP. <https://crealp.github.io/rsminerve-releases/>

Congreso de Colombia. (1993). *Ley 99 de 1993, por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial No. 41.146. [https://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_0099\\_1993.html](https://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0099_1993.html)

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). (2019). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá (POMCA río Bogotá)*. CAR. <https://www.car.gov.co/vercontenido/267>

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

EPFL. (2023). *RS MINERVE technical documentation and software distribution*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. <https://crealp.github.io/rsminerve-releases/>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2015). *FAO's work in sustainable mountain development and watershed management—A 2015 update. Mountain Research and Development*, 35(3), 299–304. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-15-00061.1>

García Hernández, J., Horton, P., Tobin, C., & Schleiss, A. J. (2014). *RS MINERVE user manual* (Version 2.8). Laboratory of Hydraulic Constructions, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). <https://crealp.github.io/rsminerve-releases/>

Gobernación de Cundinamarca. (2023). *Perfil agropecuario de Cundinamarca*. Secretaría del Agrocampesinado, Gobernación de Cundinamarca. <https://www.cundinamarca.gov.co/dependencias/seagro>

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

Hingray, B., Schaefli, B., Mezghani, A., & Hamdi, Y. (2010). Signature-based model calibration for hydrological prediction in mountain catchments. *Hydrological Sciences Journal*, 55(6), 1002–1016. <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.505572>

Hrachowitz, M., Savenije, H. H. G., Blöschl, G., McDonnell, J. J., Sivapalan, M., Pomeroy, J. W., Arheimer, B., Blume, T., Clark, M. P., Ehret, U., Fenicia, F., Freer, J. E., Gelfan, A., Gupta, H. V., Hughes, D. A., Hut, R. W., Montanari, A., Pande, S., Tetzlaff, D., ... Cudennec, C. (2013). A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB): A review. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6), 1198–1255. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.803183>

IDEAM. (2017). *Guía metodológica para la modelación del recurso hídrico continental superficial*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023793/023793.html>

IDEAM. (2018). *Atlas climatológico de Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>

IDEAM. (2019). *Estudio nacional del agua 2018*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023858/023858.html>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2014). *Estudios de suelos y zonificación ambiental en regiones andinas de Colombia*. IGAC. <https://www.igac.gov.co/>

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2018). *Páramos de Colombia: Biodiversidad y servicios ecosistémicos*. Instituto Humboldt. <http://reporte.humboldt.org.co/biodiversidad/2018/cap4/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Decreto 1076 de 2015: Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Diario Oficial No. 49.523. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. <https://www.minambiente.gov.co/documento-politica-nacional-para-la-gestion-integral-del-recurso-hidrico>.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Guía para el ordenamiento del recurso hídrico continental superficial*. Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico. <https://www.minambiente.gov.co/>

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2022). *Diagnóstico de abastecimiento rural en Colombia*. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

Monsalve Sáenz, G. (1995). *Hidrología en la ingeniería*. Escuela Colombiana de Ingeniería.

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

Pearson, K. (1895). Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 58, 240–242. <https://doi.org/10.1098/rspl.1895.0041>

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)

Pushpalatha, R., Perrin, C., Le Moine, N., & Andréassian, V. (2011). 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>

Rey-Romero, D. C., Domínguez, I., & Oviedo-Ocaña, E. R. (2022). Effect of agricultural activities on surface water quality from páramo ecosystems. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(3). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09876-5>

Singh, V. P. (1995). *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications.

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union*, 38(6), 913–920. <https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>

UNESCO. (2012). *The United Nations world water development report 4: Managing water under uncertainty and risk* (Vol. 1). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf00000215644>

Ven Te Chow, V., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.

Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P., Woods, R., & Zehe, E. (2007). Catchment classification and hydrologic similarity. *Geography Compass*, 1(4), 901–931. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2007.00039.x>

World Meteorological Organization (WMO). (2008). *Guide to hydrological practices: Hydrology – From measurement to hydrological information* (6th ed., Vol. I, WMO-No. 168). World Meteorological Organization. <https://library.wmo.int/idurl/4/35710>.

## 9. Anexos.

En este anexo 1 se presenta la caja de herramientas elaborada luego de la revisión de modelos y herramientas evaluadas para la ejecución del ejercicio de modelación hidrológica de la cuenca del río Guavio.

*Tabla 5. Modelos recopilados para la caja de herramientas.*

| Modelo    | Datos de entrada                                                                                                      | modo de uso                                                                                                                                      | salidas y productos                                                                                                                                                      | Ventajas y limitaciones                                                                      |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Water GAP | Series temporales de clima: precipitación, temperatura, radiación solar; mapas de uso de suelo / cubiertas vegetales; | Modelo global de recursos hídricos que simula balances de agua a nivel de rejilla, descarga de ríos, recarga de acuíferos, etc.; incluye efectos | Caudal de ríos; recarga de aguas subterráneas; variaciones de almacenamiento (suelo, nieve, vegetación, lagos, humedales); evaluaciones de escasez hídrica; mapas de uso | positivo: Cobertura global; incluye efectos humanos; bastante completo. Negativo: Resolución |

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

|                                                        |                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                        | topografía; suelo / textura del suelo; bases de datos de lagos/embalses/hu medales; datos de extracción humana de agua / infraestructura hidráulica.                                                                                     | humanos (extracciones, embalses). Se usa para evaluar disponibilidad hídrica, escenarios de cambio climático, sequías, presión de uso, etc.                                                                                                                                                                              | sostenible; énfasis en series temporales mensuales/anuales, también resoluciones espaciales                                                                                                     | espacial tiene límites; algunos parámetros tienen incertidumbres grandes; calibración local puede ser difícil                                                                                                                         |
| GSSHA (Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis) | DEM (modelo digital de elevaciones), mapas de uso/cobertura de suelo, vegetación; datos meteorológicos: lluvia, temperatura, evapotranspiración; parámetros hidráulicos de escorrentía y cuencas, red de canales, condiciones iniciales. | Modelo distribuido físico, orientado a cuencas, incluye escorrentía superficial y subsuperficial, flujo en canales, transporte de sedimentos, estructuras hidráulicas, drenaje, etc. Se usa para simulaciones detalladas de cuencas, estudios de inundaciones, manejo de sedimentos, impacto de cambios en uso de suelo. | escorrentía superficial, mapas de flujo infiltrado/subsuperficial, sedimentos (erosión & deposición), mapas de inundación, tiempos hasta el pico de escorrentía, volúmenes de escorrentía, etc. | positivo:<br>Muchos procesos; útil para estudios locales con datos buenos.<br>Negativo:<br>Requiere datos de alta resolución espacial; más costoso computacionalmente; más parámetros que calibrar; mayor esfuerzo de parametrización |
| HEC-HMS                                                | Hietogramas o series de precipitación, parámetros de pérdida (Green-Ampt), DEM para delineación (si se usa interfaz GIS), datos de caudal observados.                                                                                    | Combina módulos de pérdidas, transformación lluvia-escorrentía y rutinas de enrutamiento; muy adaptable (eventos o continuo).                                                                                                                                                                                            | Hidrogramas en puntos de salida, volúmenes por evento, estimaciones de picos de crecida, curvas para diseño hidráulico.                                                                         | Amplio uso en ingeniería hidráulica; documentación y soporte robusto; buena integración con GIS. La precisión depende de la selección de métodos y la calidad de datos.                                                               |

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| QUAL2K     | Modelo de calidad de agua tipo río-tramo (one-dimensional), diseñado para simular procesos de calidad (OD, nutrientes, demanda bioquímica) en cauces/lotes.                                                                                                                                | Divide el río en tramos y resuelve ecuaciones de transporte-reacción para variables de calidad; se usa para diseñar cargas, aguas residuales, simulaciones de DBO/OD.                                                                | Distribución longitudinal de oxígeno disuelto, DBO, nutrientes, concentraciones de contaminantes; curvas de carga admisible.                                | Específico para calidad de agua en ríos pero no modela procesos hidrológicos complejos como generación de escorrentía (necesita de caudales de entrada).                                                                                                                                           |
| RS MINERVE | Series meteorológicas: precipitación, temperatura, radiación. Series hidrométricas: Caudales. Series geomorfológicas o espaciales: divisiones de subcuencas, curvas de altitud, pendientes, etc. Información de estructuras hidráulicas: Parametros de embalses, compuertas, canales, etc. | Delimita la cuenca o zona de modelado, aplica, calibra y valida los datos de entrada y generación de series de caudal, propagación por cauces y evaluación de escenarios (embalses, operaciones, eventos extremos, cambio climático) | Mapas y series temporales, resultados hidraulicos como: cotas y caudales de canales o estructuras, tasas de llenado de embalses, posibles zonas inundables. | Integra hidrología y elementos hidráulicos (útil para estudiar gestión de embalses, operación de centrales, mitigación de avenidas) y Modular y semi-distribuido: permite combinar modelos conceptuales distintos según las características locales (nieve, glaciación, llanura, cuenca montañosa) |

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

|                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vflo                             | Precipitación (puede ser pluviometría, radar, satélite), datos de suelo, uso de suelo/cobertura, topografía (DEM), mapas de áreas impermeables, condiciones iniciales, datos de flujo observados para calibración, evapotranspiración / temperatura etc. (Wikipedia)                                    | Modelo hidrológico distribuido, usa GIS para definir parámetros espaciales; se trabaja con red de drenaje, mapas de escorrentía, módulo para infiltrar / flujo superficial, etc. Aplicaciones como predicción de escorrentía, alertas de inundaciones, planificación de uso del suelo, etc. | Hidrogramas en puntos de salida; mapas espaciales de escorrentía; volumen y pico de flujo; distribución temporal del flujo; mapas de uso potencial / riesgo de inundaciones o escorrentías; estimaciones de recarga y humedad del suelo. | Muy detallado; puede representar espacialmente muchos procesos; útil para estudios locales con datos buenos; Pero requiere datos de alta resolución espacial; más costoso computacionalmente; más parámetros que calibrar; mayor esfuerzo de parametrización. |
| IHACRE S                         | Enfoque semi-empírico para modelación lluvia-escorrentía que separa respuesta rápida (convertidor no lineal) y enrutamiento lineal (unit hydrograph). Para este modelo se usan series de precipitación (horaria o diaria), evaporación/ET, series de caudal observadas para identificación/calibración. | Se identifica un módulo no lineal que transforma lluvia efectiva y un módulo lineal de enrutamiento; es muy usado para análisis de eventos y para estimación rápida de hidrogramas.                                                                                                         | Hidrogramas simulados, función unidad identificada, parámetros de respuesta de la cuenca.                                                                                                                                                | Flexible, útil para análisis de datos cortos; más empírico que físicamente explícito.                                                                                                                                                                         |
| Budyko-type water balance models | Familia de modelos de balance hídrico empírico-conceptual basados en la formulación de Budyko (relación entre precipitación,                                                                                                                                                                            | Estiman la fracción de precipitación que se evapotranspira vs la que se convierte en escorrentía basándose en índices de aridez; se usan                                                                                                                                                    | Estimaciones de evapotranspiración real, escorrentía media anual, indicadores de secas y balance hídrico.                                                                                                                                | Muy útiles para evaluación de balances anuales y macroscopio pero no sirven para simulación de eventos o                                                                                                                                                      |

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

|                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                               |                                                                                          |                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                  | evapotranspiración potencial y real). se usan datos de entrada como: Precipitación anual/mensual, PET/ET potencial, almacenamiento básico o parámetros de aridez; generalmente series temporales climáticas.                                           | mucho para análisis a escala regional y estudios de impacto climático.                                                        |                                                                                          | dinámica intraanual sin extensiones.                                                                                                       |
| HSPF (Hydrological Simulation Program — FORTRAN) | Precipitación, temperatura, radiación, uso del suelo, suelos, datos de caudal y carga para calibración. Este modelo es : Sistema de modelado continuo para cuencas que integra hidrología y calidad de agua (p. ej. carga de nutrientes y sedimentos). | Sistema de modelado continuo para cuencas que integra hidrología y calidad de agua (p. ej. carga de nutrientes y sedimentos). | Hidrogramas, concentración/descarga de contaminantes, sedimentos, balance de nutrientes. | Potente para análisis integrados de cantidad y calidad en cuencas. La única contra que se logra identificar es la parametrización extensa. |
| SHE model (Système Hydrologique Européen)        | Sistema integrado europeo de modelización hidrológica que resuelve procesos superficiales, subterráneos y en la atmósfera/vegetación con base física. Este sistema usa DEM, datos de suelo, vegetación, forzamientos climáticos,                       | Simulación distribuida y acoplada (similar a MIKE SHE); resuelve ecuaciones de flujo y energía.                               | Mapas de humedad, niveles freáticos, hidrogramas, mapas de inundación.                   | Muy completo y larga tradición académica pero requiere una demanda de datos y cómputo alta.                                                |

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

|                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                           |                                                                                                      |                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                        | parámetros hidrodinámicos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                           |                                                                                                      |                                                                                                        |
| Parflow                                                | DEM, suelos (permeabilidades), uso suelo, clima, condiciones de frontera freáticas.                                                                                                                                                                                                                                                 | Soluciona ecuaciones de flujo en malla distribuida, acopladas con procesos de infiltración y enrutamiento.                                | Niveles freáticos, caudales, mapas de humedad, etc.                                                  | Físicamente completo pero demandante en datos y cómputo.                                               |
| LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model)            | Modelo hidrológico e hidráulico integrado (con enfoque en grandes cuencas) desarrollado en Alemania; combina modelado de procesos de escorrentía y enrutamiento de ríos. Los datos de entrada que requiere el modelo es: Precipitación, evapotranspiración, datos de suelos, DEM, red de drenaje, datos de caudal para calibración. | Estructura modular: módulos para escorrentía, retención, enrutamiento y ajuste operacional. Usado en predicción de crecidas y planeación. | Hidrogramas, mapas de inundación, estados de almacenamiento en la cuenca.                            | Enfoque integral y probado en aplicaciones europeas; disponibilidad y documentación más regionalizadas |
| RAPID (Routing Application for Parallel computation of | Descargas entrantes por tramo (desde modelos lluvia-escorrentía), mapa de red fluvial (conectividad entre nodos), parámetros                                                                                                                                                                                                        | Toma caudales producidos por otro modelo (p.ej. un modelo de cuenca) y los enruta por la red fluvial para obtener caudales en salidas o   | Hidrogramas en puntos río abajo, tiempos de llegada de crestas, caudales a muy alta escala espacial. | Extremadamente eficiente en grandes dominios pero depende de calidad de entradas puntuales que la      |

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

|                                      |                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Discharge )                          | de tiempo de viaje/enrutamiento.                                                                                                                                                                                                | nodos; ideal para acoplamiento a modelos de alta resolución.                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                      | calidad de las salidas y su eficiencia sea del 100%                                                                                                                             |
| SWMM (Storm Water Management Model)  | Precipitación (eventos o series), características de subcuencas urbanas (impermeabilización, áreas, pendientes), parámetros de conductos y nodos (diámetros, pendientes), curvas de pérdida/infiltración (Green-Ampt o Horton). | Simula respuesta hidrológica (escorrentía en subcuencas) y hidráulica en redes (flow routing, almacenamiento, bombas, compuertas); se usa para diseño y operación de infraestructura urbana y gestión de aguas pluviales.                         | Hidrogramas en nodos, niveles y flujos en tuberías, inundaciones urbanas, volúmenes de retención requeridos, calidad de aguas pluviales si se activa módulo.         | Estándar para ingeniería urbanay muy detallado para redes pero no está pensado para grandes cuencas rurales o acuíferos profundos                                               |
| MIKE SHE                             | DEM, mapas de suelo y vegetación, series climáticas (precipitación, radiación, temperatura, viento, humedad), parámetros de acuífero, condiciones iniciales y límites.                                                          | Resolución distribuida en mallas o celdas; resuelve ecuaciones de flujo superficial (Navier-Stokes simplificadas / kinematic wave), de difusión e infiltración y flujo subterráneo (Darcy); se puede acoplar con modelos de calidad y sedimentos. | Mapas temporales de humedad del suelo, niveles freáticos, descarga en cauces, mapas de inundación, flujo superficial y subterráneo, salidas energéticas si acoplado. | Muy detallado y físicamente consistente; ideal para estudios integrados científicos y de gestión. Requiere ingentes datos y alto poder computacional; parametrización compleja. |
| VIC (Variable Infiltration Capacity) | Precipitación gridded o estaciones, temperatura, radiación, DEM, uso/cobertura del suelo, propiedades                                                                                                                           | Calcula infiltración variable por celda, almacenamiento en capas, escorrentía superficial y baseflow, acoplable                                                                                                                                   | Escorrentía por celda, balance hídrico, humedad del suelo distribuida, flujos de base, series temporales de caudales agregadas.                                      | Muy usado en estudios climáticos y de cuencas grandes; requiere datos espaciales y es computacionalm                                                                            |

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

|                                            |                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                            | de suelo por grilla, datos observados de caudal para calibración.                                                                                                                                                            | a modelos de clima/atmósfera.                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                 | ente intensivo a alta resolución.                                                                                                                                                                                                                                                                |
| WEPP (Water Erosion prediction on Project) | Datos climáticos (precipitación, temperatura, etc.), topografía, suelos (textura, estructura, propiedades hidráulicas), manejo del uso de suelo/vegetación, cobertura vegetal, prácticas agrícolas/riego, datos de pendiente | Aunque su foco es la erosión, incluye modelo hidrológico para escurrimiento, flujo superficial, separación de lo que se infiltra, lo que fluye, etc. Se usa para pronósticos de erosión, diseño de prácticas de conservación, estimaciones de sedimentos, respuesta al uso de suelo. | Salida de hidrología: escurrimiento superficial, flujo subsuperficial, evapotranspiración; además de salidas específicas de erosión: cantidad de sedimento removido, transporte de sedimento, deposición, pérdidas de suelo; también mapas, perfiles de cuenca. | Integra erosión hidrología y es aplicable en agricultura y zonas con uso intensivo y cuenta buen soporte pero No es óptimo para cuencas muy grandes si se requiere detalle fino y su precisión depende de la calidad de los datos tambien calibración de parte de sedimentos puede ser compleja. |

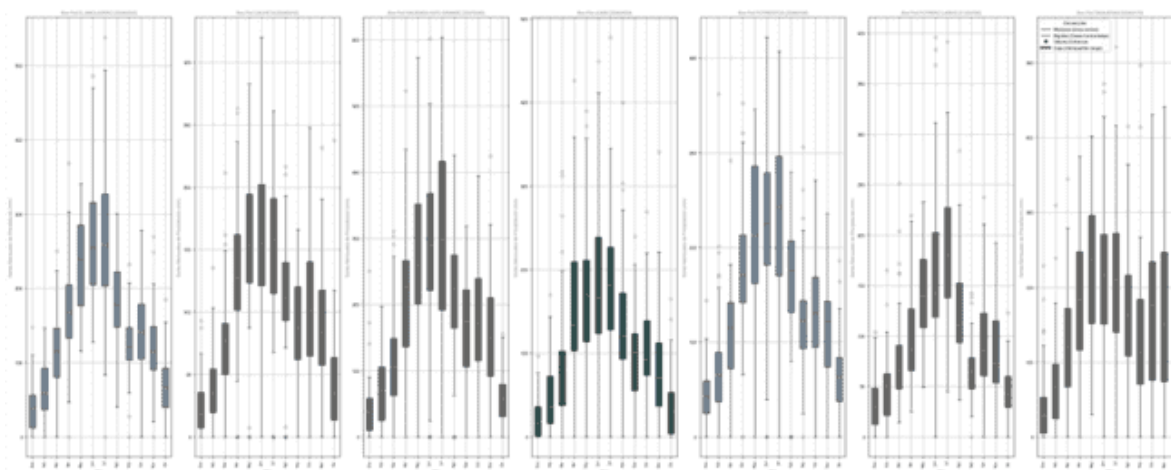
Elaboracion propia.

En este anexo 2 se presentan los resultados detallados del análisis estadístico aplicado a las series hidroclimatológicas, incluyendo pruebas de normalidad, análisis de tendencias y evaluación de valores atípicos.

Estos análisis constituyen la base para la validación de los datos de entrada del modelo, asegurando la confiabilidad de las simulaciones realizadas.

*Figura 9. Box plots que representan la dispersión de los datos de precipitación analizados.*

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.



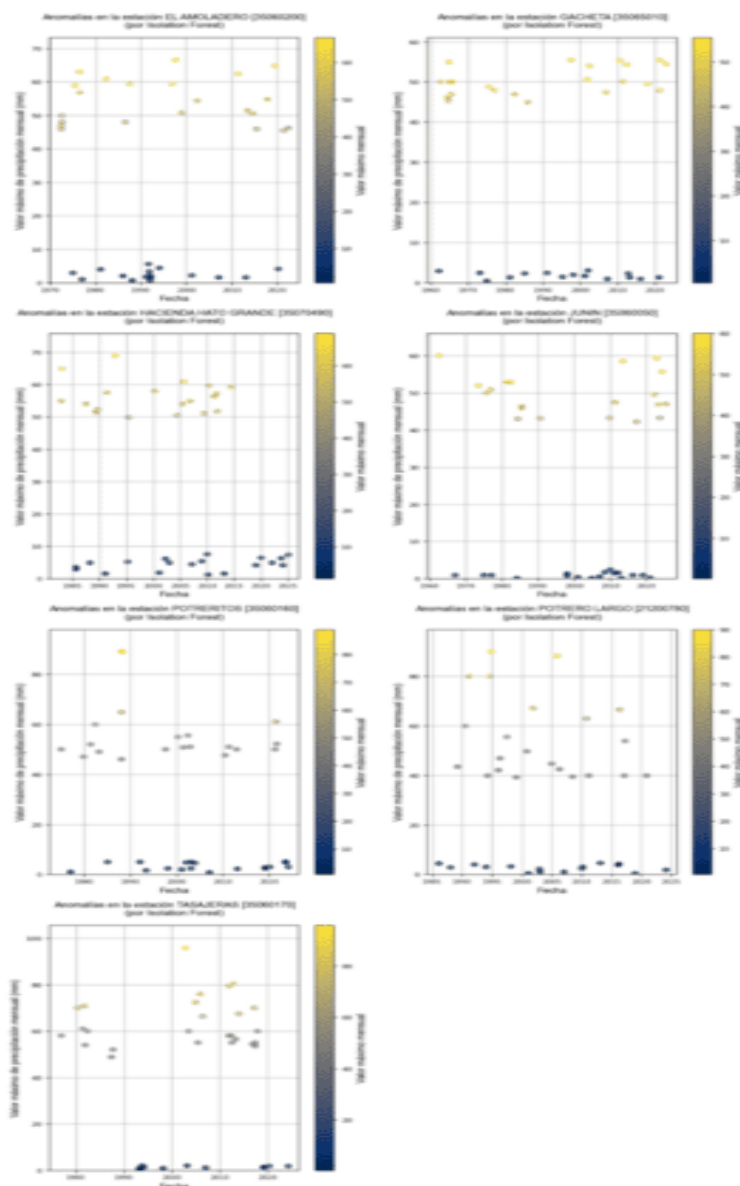
Elaboracion propia.

La amplitud del rango intercuartílico varía entre estaciones, lo que refleja diferencias en la variabilidad de la precipitación asociadas a condiciones climáticas locales y a factores espaciales como la altitud y la ubicación geográfica. Algunas estaciones presentan una mayor dispersión de los datos, indicando una mayor variabilidad intraanual e interanual, mientras que otras muestran distribuciones más concentradas alrededor de la mediana. Los valores atípicos identificados en los box plots corresponden principalmente a eventos de precipitación extrema, los cuales, dada su coherencia con el régimen climático regional.

Por su parte, el análisis de las anomalías de precipitación permite identificar periodos con desviaciones significativas respecto a las condiciones promedio. Las anomalías positivas reflejan episodios con precipitaciones superiores a la media histórica, asociados generalmente a temporadas lluviosas intensas o a eventos climáticos particulares, mientras que las anomalías negativas indican periodos secos o déficits de precipitación.

*Figura 10. Grafica de anomalías.*

# Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

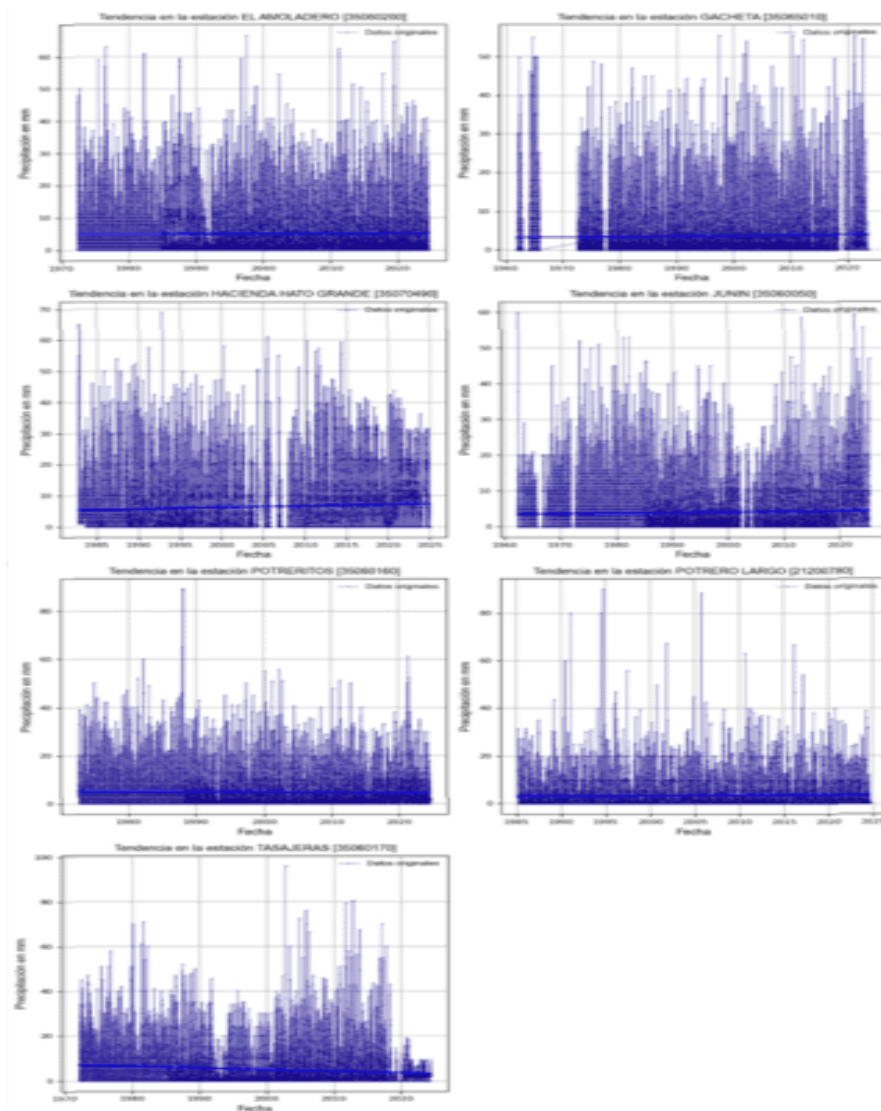


Elaboracion propia.

Adicionalmente, se efectuó el análisis de tendencias temporales, el cual indicó la ausencia de cambios monotónicos significativos en las series de precipitación, sugiriendo que la variabilidad observada responde principalmente a fluctuaciones naturales del sistema climático. Este resultado es relevante, ya que permite asumir condiciones de cuasi-estacionariedad en el proceso de modelación, reduciendo incertidumbres asociadas a cambios estructurales en las series.

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

*Figura 11. Grafica de análisis de tendencia temporal por estaciones.*



Elaboracion propia.

El análisis de las gráficas de tendencia de las series de precipitación muestra que, en general, las estaciones presentan comportamientos diferenciados, con tendencias de baja magnitud y, en algunos casos, con pendientes cercanas a cero. Este resultado sugiere que, para el periodo analizado, no se evidencian cambios monotónicos marcados en los volúmenes de precipitación, sino más bien una variabilidad dominada por fluctuaciones interanuales y estacionales.

En algunas estaciones se identifican tendencias ligeramente crecientes, asociadas a incrementos graduales en la precipitación media, mientras que en otras se observan tendencias levemente decrecientes. Sin embargo, la baja pendiente de las líneas de tendencia

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

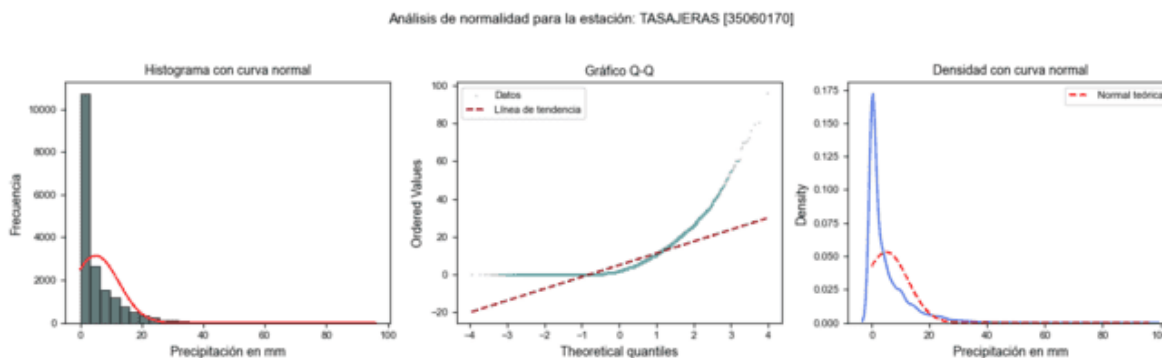
y la alta dispersión de los datos alrededor de estas indican que dichos cambios no son dominantes frente a la variabilidad natural del sistema climático. Este comportamiento es coherente con lo observado previamente en el análisis de anomalías, donde se evidenció una alternancia recurrente de periodos húmedos y secos sin una dirección claramente persistente en el tiempo.

se evalúa la distribución estadística de las series de precipitación mediante el análisis de normalidad, con el objetivo de verificar el grado de ajuste de los datos a una distribución normal teórica. Este análisis constituye un paso fundamental en la etapa previa a la modelación hidrológica, ya que muchos métodos estadísticos y procedimientos de calibración asumen, explícita o implícitamente, la normalidad de las variables de entrada.

Las gráficas de normalidad se obtuvieron combinando histogramas de frecuencia con curvas normales teóricas, gráficos cuantílico–cuantílico (Q–Q) y funciones de densidad de probabilidad, construidas a partir de la media y la desviación estándar de cada serie. Estas herramientas permiten evaluar visualmente la simetría de la distribución, la presencia de colas pesadas y la ocurrencia de valores extremos, aspectos característicos de las variables hidro climatológicas, en este caso de la precipitación.

*Figura 12. Graficas del análisis de normalidad para la estación TASAJERAS [35060170]*

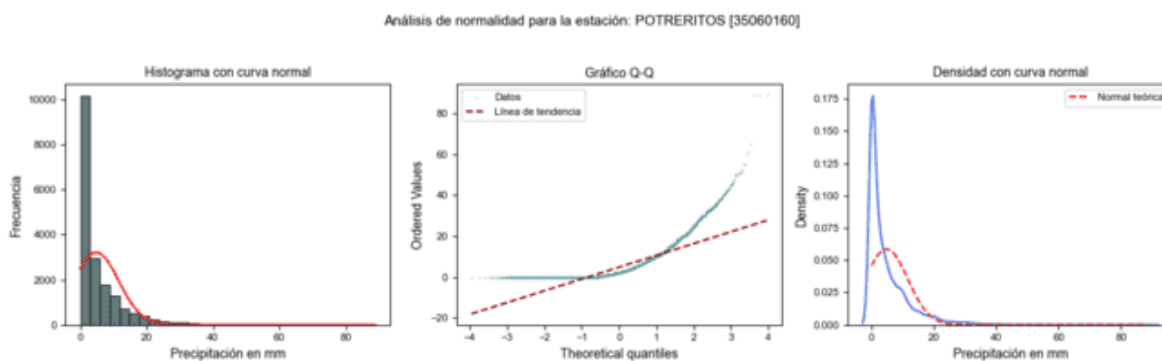
Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.



Elaboracion propia.

evidencia una distribución claramente asimétrica, con una alta concentración de valores de precipitación en los rangos bajos y una cola derecha extendida asociada a eventos de lluvia intensa. En el histograma, la curva normal teórica no se ajusta adecuadamente a la distribución empírica, especialmente en los valores extremos. El gráfico Q–Q muestra desviaciones sistemáticas respecto a la línea de referencia, principalmente en los cuantiles superiores, lo que confirma la presencia de colas pesadas y la no normalidad de la serie.

*Figura 13. Graficas del análisis de normalidad para la estación POTRERITOS [35060160]*



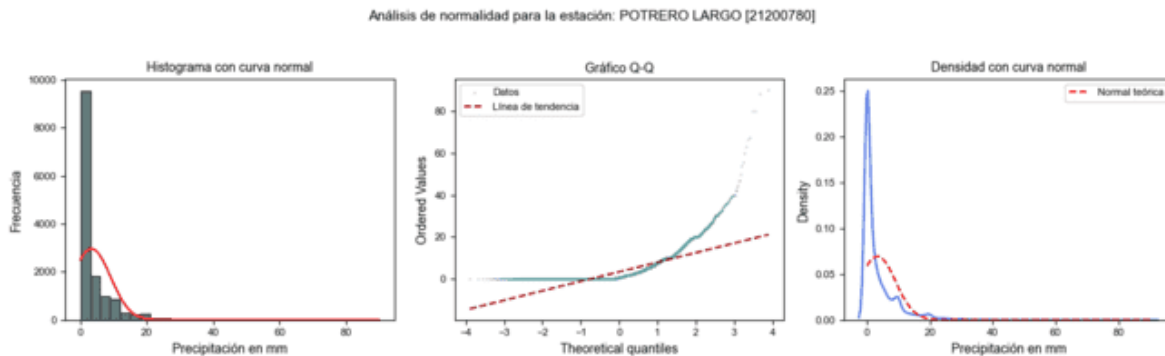
Elaboracion propia.

En la estación Potreritos, las gráficas de normalidad muestran un comportamiento similar, con una marcada asimetría positiva. La densidad empírica presenta un pico pronunciado en valores bajos de precipitación, mientras que los valores altos se distribuyen de manera dispersa. El gráfico Q–Q evidencia una separación progresiva de los puntos respecto a la

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

línea normal teórica, indicando que la serie no cumple el supuesto de normalidad. La presencia de eventos extremos refuerza la naturaleza no gaussiana de la precipitación y su carácter altamente variable.

*Figura 14. Graficas del análisis de normalidad para la estación POTRERO LARGO [21200780]*

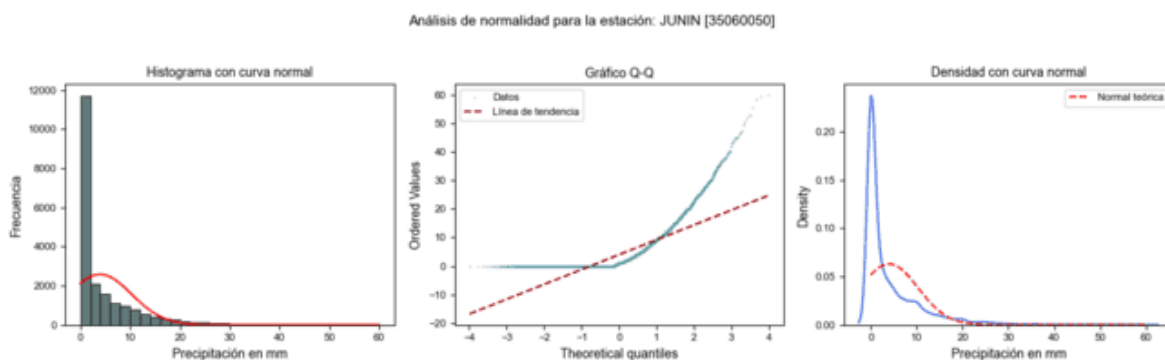


Elaboracion propia.

La distribución de la precipitación en la estación Potrero Largo presenta una desviación significativa respecto a la normalidad, caracterizada por una fuerte concentración de datos en los primeros intervalos del histograma y una cola derecha extensa. La curva normal superpuesta subestima la frecuencia de eventos intensos, lo cual se refleja también en el gráfico Q-Q, donde los cuantiles superiores observados superan ampliamente los valores teóricos. Este patrón indica que la serie está dominada por eventos de baja magnitud y episodios extremos ocasionales, propios de regímenes pluviométricos tropicales.

*Figura 15. Graficas del análisis de normalidad para la estación JUNIN [35060050]*

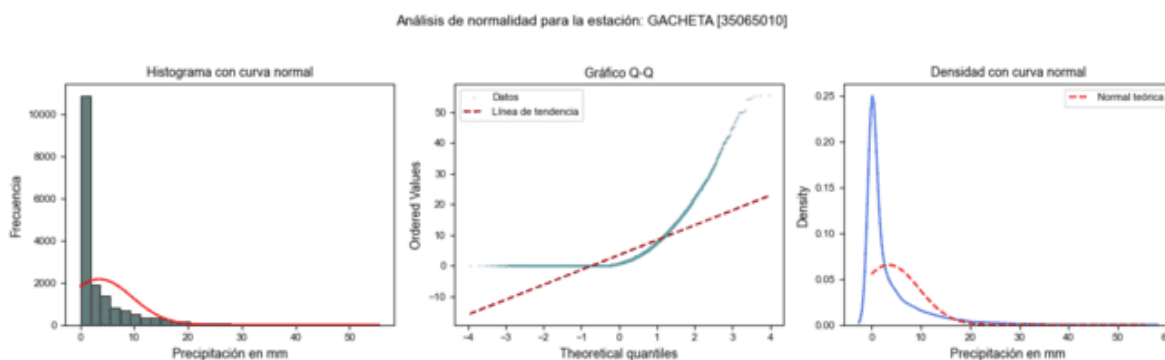
Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.



Elaboracion propia.

Las gráficas de normalidad de la estación Junín evidencian una distribución no simétrica, con un claro sesgo hacia valores altos de precipitación. La discrepancia entre la densidad empírica y la curva normal teórica es notable a lo largo de toda la distribución. En el gráfico Q–Q se observan desviaciones tanto en los cuantiles bajos como en los altos, lo que sugiere que la serie presenta una distribución más concentrada en los valores bajos y colas más pesadas que las de una distribución normal. Esto confirma la no normalidad de los datos y la influencia de eventos extremos.

*Figura 16. Graficas del análisis de normalidad para la estación GACHETÁ [35065010]*



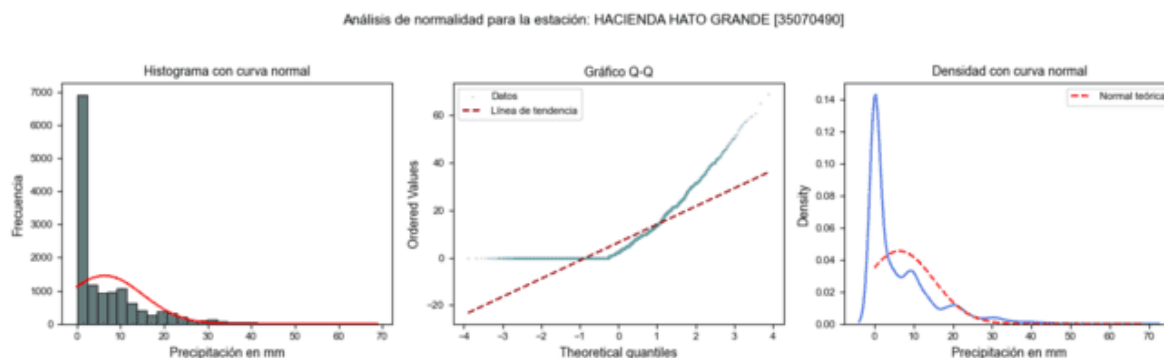
Elaboracion propia.

En la estación Gachetá, la evaluación gráfica de la normalidad muestra un comportamiento similar al de las demás estaciones, con una distribución asimétrica y una clara desviación respecto a la normal teórica. La densidad empírica presenta un sesgo positivo, y el gráfico Q–Q evidencia una curvatura ascendente en los cuantiles superiores, lo que indica la

Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

presencia de lluvias intensas poco frecuentes, pero de gran magnitud. Estos resultados reflejan una alta variabilidad temporal y una distribución no gaussiana de la precipitación.

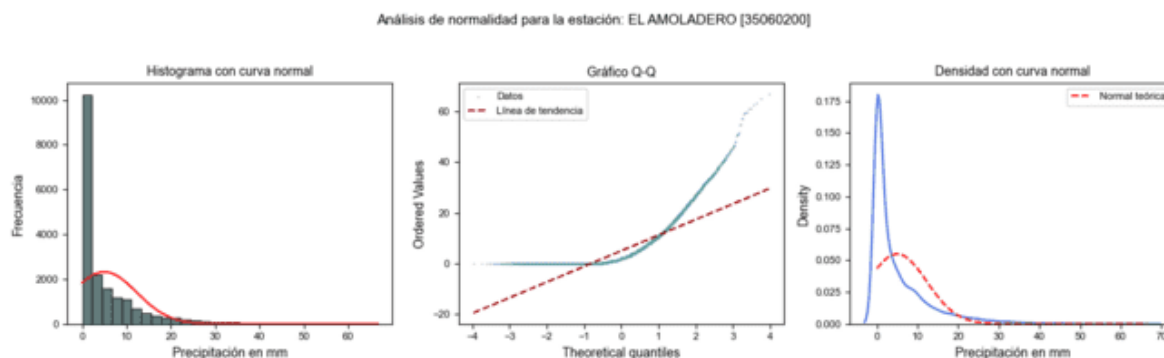
*Figura 17. Graficas del análisis de normalidad para la estación HACIENDA HATO GRANDE [35070490]*



Elaboracion propia.

La serie de precipitación de la estación Hato Grande presenta una distribución con fuerte concentración de valores bajos y una cola derecha extendida. La superposición de la curva normal muestra un ajuste deficiente, particularmente en los extremos de la distribución. El gráfico Q–Q confirma esta desviación, mostrando una separación significativa de los puntos respecto a la línea de referencia en los cuantiles altos. Este comportamiento reafirma la no normalidad de la serie y la importancia de considerar métodos estadísticos no paramétricos o transformaciones de los datos.

*Figura 18. Graficas del análisis de normalidad para la estación AMOLADERO EL [35060200]*



Elaboracion propia.

## Informe Final – Recopilación y análisis de información hidro-climatológica para el diagnóstico y modelación hidrológica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico en la cuenca del Río Guavio.

La estación El Amoladero presenta una distribución de precipitación altamente asimétrica, con una densidad empírica claramente distinta de la normal teórica. Los gráficos Q–Q muestran desviaciones sistemáticas en casi toda la extensión de la distribución, evidenciando tanto colas pesadas como una concentración de datos en valores bajos. Este patrón es característico de series pluviométricas influenciadas por eventos extremos y refuerza la necesidad de utilizar distribuciones probabilísticas alternativas para su análisis y modelación.

A partir del análisis integral de las series hidroclimatológicas, que incluyó la evaluación de la continuidad y longitud de los registros, la variabilidad temporal, la detección de valores atípicos, el análisis de anomalías, la identificación de tendencias y la caracterización de la distribución estadística de los datos, se establece un diagnóstico sólido sobre la calidad y representatividad de la información utilizada. Los resultados obtenidos evidencian que las series de precipitación analizadas presentan un comportamiento físicamente consistente con el régimen climático de la zona de estudio, caracterizado por una alta variabilidad temporal, marcada estacionalidad y la ocurrencia de eventos extremos.

El análisis de homogeneidad y de tendencias sugiere que, para el periodo considerado, las series no presentan rupturas estructurales significativas ni cambios monotónicos dominantes que comprometan su uso en procesos de modelación continua. Asimismo, la identificación de valores atípicos y anomalías permitió distinguir entre eventos extremos de origen climático y posibles inconsistencias en los registros, lo que contribuyó a fortalecer la confiabilidad de los datos seleccionados.

Por otro lado, el análisis de normalidad confirmó que las series de precipitación no se ajustan a una distribución normal, presentando asimetría positiva y colas pesadas, condición inherente a este tipo de variables hidroclimatológicas. En consecuencia, para la etapa de modelación hidrológica se reconoce la necesidad de emplear enfoques metodológicos capaces de representar adecuadamente esta variabilidad, ya sea mediante transformaciones estadísticas, el uso de distribuciones probabilísticas alternativas o la aplicación de modelos que no requieran el cumplimiento estricto del supuesto de normalidad.