ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA LA OPTIMIZACION Y CONSTRUCCION DE SISTEMAS DE ACUEDUCTO EN EL MUNICIPIO DE BRICEÑO BOYACA

ESTUDIOS HIDROLÓGICOS PARA EL SISTEMA DE ACUEDUCTO (BALANCE HÍDRICO, ELABORACIÓN DE CURVAS DE NIVEL IDF Y CARACTERÍSTICAS DE LAS FUENTES) – CAMPO GRANDE / SAN JOAQUÍN



JUAN LUIS BELTRÁN BELTRÁN
ING CIVIL
Esp. Gestión Integrada del Recurso Hídrico
MP 68202 – 266082 STD

Municipio de Briceño

BUCARAMANGA

Diciembre de 2025

TABLA DE CAMBIOS

Número del informe:	**Elaboró:**	**Revisó:**	**Fecha:**
Primer Informe	Ing. Esp. Juan Luis Beltrán	Ing. Esp. Adonai Rallón	Diciembre de 2025

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 9
2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO 10
2.1 OBJETIVO GENERAL 10
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 10
3. ALCANCE DEL ESTUDIO 11
4. ASPECTOS GENERALES 12
4.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO 12
4.2 CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO 13
4.2.1 Clima 13
4.2.2 Temperatura 13
4.2.3 Humedad relativa 14
4.3 ESTADO DE LOS RECURSOS NATURALES 14
4.3.1 Hidrografía 14
4.3.2 Principales cuencas hidrográficas de la región 15
4.3.3 Geología 16
5. HIDROLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO 17
5.1 CUENCA HIDROGRÁFICA 17
5.1.1 Cobertura del suelo 19
5.1.2 Tipo de suelo 21
5.1.3 Número de curva 22

5.2 CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS 23
5.2.1 Área de la cuenca 25
5.2.2 Pendiente media de la cuenca 25
5.2.3 Longitud del cauce principal 26
5.2.4 Pendiente media del cauce principal 26
5.2.5 Orden de la cuenca 27
5.2.6 Densidad de drenaje 28
5.2.7 Coeficiente de compacidad 28
5.2.8 Factor de forma de Horton 29
5.2.9 Coeficiente de circularidad de Miller 30
5.3 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN 32
5.3.1 Cálculo del tiempo de concentración 32
5.3.2 Comparación del tiempo de concentración 33
5.4 CURVA HIPSOMÉTRICA 34
6. ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA 36
6.1 POLÍGONOS DE THIESSEN 36
6.2 ANÁLISIS DE CONSISTENCIA DE REGISTROS 37
6.3 PRECIPITACIÓN ANUAL 38
6.4 PRECIPITACIÓN MENSUAL 38
6.5 PRECIPITACIÓN MÁXIMA DIARIA MULTIANUAL 41
6.6 CURVAS DE INTENSIDAD, DURACIÓN Y FRECUENCIA 41

6.6.1 Curva de masa de precipitación 44

6.6.2 Hietogramas de precipitación 44

6.6.3 Tormenta de diseño 45

6.7 CAUDAL MÁXIMO PROBABLE DEL EFLUENTE PRINCIPAL 46

6.7.1 Caudal máximo por el método tránsito de avenidas 46

7. ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA 50

7.1 MODELOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN EMPLEADOS 50

7.1.1 Cenicafé 50

7.1.2 Thornthwaite 51

7.1.3 Turc 52

7.2 EVALUACIÓN TEMPORAL DE LA TEMPERATURA 53

7.3 OFERTA HÍDRICA HISTÓRICA 55

7.4 BALANCE HÍDRICO DE LA MICROCUENCA 57

7.5 AFORO DE LA CORRIENTE SUPERFICIAL 59

7.5.1 Procedimiento de realización del aforo 59

7.5.2 Principales resultados del aforo 60

8. CONCLUSIONES 63

REFERENCIAS 65

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Porcentaje de cobertura del suelo en la microcuenca objeto de estudio..... 21

Tabla 2. Números de curva1 para diferentes coberturas del suelo. 22

Tabla 3. Número de curva para la microcuenca objeto de estudio. 23

Tabla 4. Clasificación de las cuencas de acuerdo con su pendiente media. 26

Tabla 5. Clasificación de las cuencas de acuerdo con su densidad de drenaje..... 28

Tabla 6. Clasificación de las cuencas de acuerdo con su índice de compacidad. 29

Tabla 7. Clasificación de las cuencas de acuerdo con su factor de forma. 29

Tabla 8. Clasificación de las cuencas de acuerdo con su coeficiente de circularidad. 30

Tabla 9. Resumen de propiedades geomorfológicas de las microcuencas objeto de análisis. 31

Tabla 10. Resumen de los tiempos de concentración por diferentes métodos. 33

Tabla 11. Estaciones hidroclimáticas cercanas al área de estudio. 36

Tabla 12. Número de días sin registro de precipitación y porcentaje de datos faltantes anuales. 39

Tabla 13. Precipitación máxima diaria multianual. 41

Tabla 14. Curva de aguaceros puntuales para la estación hidrológica objeto de estudio. 44

Tabla 15. Hietogramas de precipitación para la estación hidrológica objeto de estudio. 45

Tabla 16. Resumen de resultados de la simulación del tránsito de avenidas. 49

Tabla 17. Estación climática con información disponible en el área de estudio. 50

Tabla 18. Oferta hídrica mensual en el área de estudio. 56

Tabla 19. Balance hídrico de la cuenca objeto de estudio. 58

Tabla 17. Resumen de resultados del aforo en los puntos de monitoreo..... 60

Tabla 18. Estadística descriptiva de los resultados del aforo. 62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio: general (a) y especifica (b). 12

Figura 2. Modelo digital de elevaciones para el área de estudio. 18

Figura 3. Delimitación de la microcuenca hidrográfica en el sitio objeto de estudio. 19

Figura 4. Coberturas del suelo en la microcuenca objeto de estudio. 20

Figura 5. Mapa de pendientes (a) y cauce más largo (b) en la microcuenca objeto de estudio. .. 26

Figura 6. Orden de corrientes de la microcuenca objeto de estudio. 27

Figura 7. Isohipsas de elevación en la microcuenca objeto de estudio. 34

Figura 8. Curva hipsométrica de la cuenca objeto de estudio. 35

Figura 9. Áreas aferentes de las estaciones con información en el área de estudio. 37

Figura 10. Precipitación mensual multianual de la estación hidrológica objeto de estudio. 40

Figura 11. Precipitación anual estación hidrológica objeto de estudio. 40

Figura 12. Distribución de los parámetros de regresión IDF para las diferentes regiones de Colombia. 43

Figura 13. Curvas IDF para la estación Aguas Claras. 43

Figura 14. Tormenta de diseño para la evaluación hidráulica de las estructuras. 46

Figura 15. Modelo hidrológico conceptual del área de estudio (a) y resultados de la abstracción del flujo en la microcuenca de mayor área. 48

Figura 16. Retraso de la onda dinámica en el transito de avenidas. 49

Figura 17. Temperatura mensual multianual de la estación climática objeto de estudio. 54

Figura 18. Temperatura anual estación climática objeto de estudio. 54

Figura 19. Aforo de la quebrada San Joaquín. 59

1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio hidrológico de la cuenca que abastece al acueducto veredal Campo Grande del municipio de Briceño evalúa la disponibilidad y comportamiento del recurso hídrico superficial con el fin de determinar su aptitud para el abastecimiento de un acueducto veredal, en cumplimiento de los lineamientos establecidos en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2020), en particular lo referente a la caracterización de la oferta, permanencia y confiabilidad de las fuentes hídricas. Los análisis climáticos efectuados muestran que la cuenca presenta una precipitación media anual de 1300 mm , valor que se enmarca en el régimen húmedo característico de la región Andina colombiana.

Asimismo, la evapotranspiración potencial estimada mediante los métodos de Cenicafe, Thornthwaite y Turc se sitúa en 720mm/año . La relación directa entre precipitación y demanda atmosférica permite establecer la presencia de un superávit hídrico anual positivo, condición indispensable para la selección de fuentes superficiales según los criterios de suficiencia y seguridad hídrica definidos por el RAS 2020. Esta condición se ve reforzada por los registros multianuales del excedente hídrico, que en la mayoría de los años supera los 200 mm, alcanzando valores superiores a 1000 mm en periodos húmedos.

El comportamiento intraanual de la oferta hídrica evidencia máximos marcados durante los periodos de lluvias (marzo–mayo y octubre–noviembre), y déficits moderados en la temporada seca (junio–agosto), patrón hidrometeorológico coherente con la dinámica climática andina y consistente con los requerimientos del RAS sobre la evaluación de la permanencia del recurso en escenarios de variabilidad climática. En este sentido, la cuenca abastecedora demuestra una capacidad natural de regulación, favorecida por su cobertura vegetal y su disponibilidad continua de excedente. Como resultado del aforo se obtuvo un caudal de 5.63 L/s, un flujo más que suficiente para abastecer al acueducto veredal de Campo Grande en Briceño (Boyacá) cuyo demanda de agua máxima diaria se estima en 1.73 L/s, con un caudal ecológico de 1.41 L/s. En este sentido, la cuenca abastecedora demuestra una capacidad natural de regulación, favorecida por su cobertura vegetal y su disponibilidad continua de excedente.

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

2.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento hidrológico de la cuenca de aporte en el sitio proyectado para la bocatoma del acueducto de la vereda Campo Grande del municipio de Briceño, mediante la realización de un balance hídrico que permita verificar la suficiencia y coherencia del diseño de las obras hidráulicas de captación de agua superficial, conforme a los lineamientos establecidos en la normativa ambiental, hidrológica e hidráulica vigente en Colombia.

2.2 Objetivos específicos

- Analizar información técnica, confiable y pertinente proveniente de fuentes primarias y oficiales, como el IDEAM, levantamientos topográficos y aforos, necesarios para el análisis hidrológico e hidráulico requerido en la verificación de las obras hidráulicas.
- Determinar los caudales de diseño asociados a diferentes probabilidades de ocurrencia en la cuenca donde se proyecta la bocatoma, así como analizar y definir las variables hidrológicas necesarias involucradas en el dimensionamiento de la estructura.
- Determinar el perfil de flujo de la corriente para determinar la cota de inundación de la bocatoma para determinar sus condiciones hidráulicas de funcionamiento, evaluando su impacto sobre la infraestructura y el entorno natural.

3. ALCANCE DEL ESTUDIO

El alcance del presente estudios incluye las actividades y análisis necesarios para determinar la funcionalidad hidráulica de la bocatoma de la vereda Campo Grande proyectada en el acueducto veredal del municipio de Briceño frente a las condiciones hidrológicas típicas del sitio. A continuación, se detalla los alcances específicos:

Estudio Hidrológico:

- Identificar la cuenca de captación que aporta escorrentía al cauce que a traviesa la obra hidráulica objeto de estudio.
- Obtener y procesar los datos históricos de lluvia para determinar los valores de diseño considerando diferentes periodos de retorno.
- Determinar del caudal máximo esperado mediante métodos como el Método Racional, SCS, HEC-HMS, Muskingum o modelos análogos adecuados al tamaño de la cuenca.
- Evaluar del tiempo que tarda el agua en alcanzar el punto más bajo de la cuenca para definir escenarios críticos.

Estudio Hidráulico:

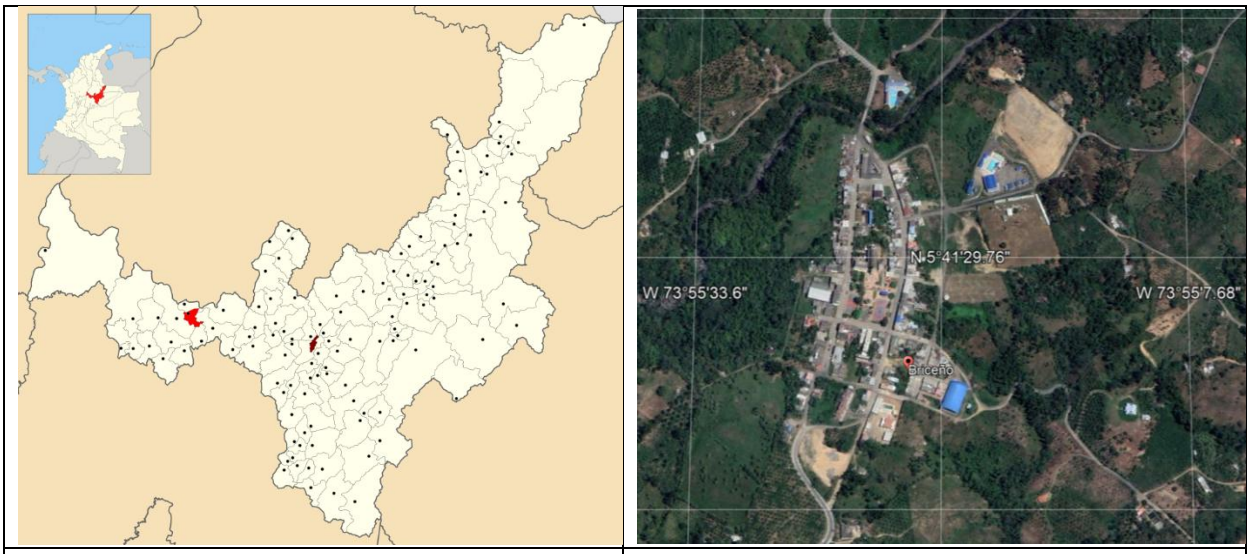
- Analizar el comportamiento del flujo en el cauce considerando su geometría, pendiente, rugosidad y caudal, utilizando herramientas de flujo no estacionario como HEC-RAS.
- Determinar la capacidad hidráulica de la estructura propuesta para garantizar su correcto funcionamiento frente a escenarios de inundación.
- Evaluar las condiciones hidráulicas aguas arriba y aguas debajo de la obra hidráulica de interés para asegurar velocidades no erosivas.

4. ASPECTOS GENERALES

4.1 Ubicación del área de estudio

El municipio de Briceño, ubicado en el departamento de Boyacá, se encuentra geográficamente asentado en la región Andina oriental de Colombia, sobre el flanco occidental de la cordillera Oriental (Figura 1). Su territorio se sitúa aproximadamente a los 5°41’ de latitud norte y 73°55’ de longitud oeste, en un entorno caracterizado por relieves quebrados, pendientes pronunciadas y formaciones montañosas propias de esta unidad fisiográfica. La cabecera municipal se localiza a una altitud cercana a los 1340 msnm, en un área donde convergen ecosistemas de ladera y zonas de transición hacia ambientes más húmedos y cálidos en sectores bajos del municipio.

Figura 1. *Ubicación del área de estudio: general (a) y especifica (b).*



(a) *(b)*

Fuente: Google Earth

Briceño limita al norte con los municipios de Tununguá y Albania, mientras que al oriente se encuentra en contacto con los territorios de Chiquinquirá y Saboyá. Hacia el sur, su frontera está definida por los municipios de Pauna y Caldas, y hacia el occidente comparte límites nuevamente con el municipio de Pauna. Su área total es de aproximadamente 47.8 km², con una marcada

predominancia de zona rural, y su territorio se distribuye en veredas como Betania, Buenavista, Campo Grande, Diamante, Minachal, Moray, Palo Blanco, Santa Isabel, Tabor, Tarpeya, Yopos, Centro Rural, Cucaita y Media Luna. El municipio se caracteriza por una topografía montañosa que condiciona su dinámica territorial y su vocación agrícola, influida por la humedad y las variaciones térmicas propias de la región.

4.2 Características de la zona de estudio

4.2.1 Clima

El municipio de Briceño (Boyacá) presenta un clima templado–húmedo, propio de los sectores montañosos de la cordillera Oriental. Su rango altitudinal, que oscila entre aproximadamente 900 y 2000 msnm, genera variaciones térmicas asociadas a la topografía y a la exposición solar. La temperatura media anual se mantiene generalmente entre 18 °C y 22 °C, con valores ligeramente más cálidos en las zonas bajas y más frescos en los sectores elevados. La precipitación media anual se sitúa alrededor de 1800 a 2200 mm, distribuida bajo el patrón bimodal típico de la región andina, con dos periodos lluviosos marcados (abril–mayo y septiembre–noviembre) y dos periodos secos relativos (enero–febrero y julio–agosto). Estas condiciones climáticas favorecen la presencia de una alta disponibilidad hídrica superficial, reflejada en quebradas permanentes y áreas de recarga, así como una cobertura vegetal densa en las laderas, lo cual contribuye a la regulación del caudal en las microcuencas que abastecen al municipio.

4.2.2 Temperatura

La temperatura en el municipio de Briceño (Boyacá) presenta una variabilidad estacional moderada, influenciada principalmente por la altitud y por la configuración del relieve montañoso de la cordillera Oriental. Los meses más cálidos suelen registrarse entre enero y marzo, cuando la disminución de la nubosidad y el aumento de la radiación solar permiten alcanzar temperaturas máximas promedio cercanas a los 23–24 °C, especialmente en las zonas más bajas del municipio. En contraste, los meses más frescos corresponden a mayo–junio y octubre, periodos en los que la mayor humedad atmosférica y el incremento de la cobertura nubosa durante las temporadas de

lluvia generan temperaturas mínimas promedio entre 16 °C y 18 °C. Esta amplitud térmica diaria y estacional, aunque moderada por la altitud, es característica de las zonas templadas de montaña, donde el clima mantiene condiciones estables y favorables tanto para la disponibilidad hídrica como para el desarrollo de actividades agropecuarias.

4.2.3 Humedad relativa

La humedad relativa en el municipio de Briceño (Boyacá) se mantiene elevada durante la mayor parte del año, influenciada por su configuración montañosa, la presencia de bosques andinos y la alta disponibilidad hídrica local. Los valores promedio suelen oscilar entre 70% y 75% durante los meses secos de enero y febrero, cuando la radiación solar es mayor y la cobertura nubosa disminuye. En los periodos lluviosos de abril–mayo y septiembre–noviembre, la mayor nubosidad y el aumento de la humedad atmosférica elevan la humedad relativa a valores cercanos al 80%–85%. Estas condiciones propician la formación frecuente de neblina en las zonas altas y favorecen el mantenimiento de vegetación densa y ecosistemas subandinos característicos del municipio. La humedad sostenida contribuye al equilibrio hídrico de las microcuencas, fortaleciendo los procesos de recarga y la disponibilidad de caudales que abastecen el sistema de acueducto municipal.

4.3 Estado de los recursos naturales

4.3.1 Hidrografía

La hidrografía del municipio de Briceño (Boyacá) se caracteriza por una red de drenaje típica de zonas montañosas de la cordillera Oriental, conformada por corrientes superficiales de régimen predominantemente pluvial y con cauces de pendiente pronunciada. El territorio hace parte de la cuenca media del río Suárez, a través de sistemas de microcuencas que drenan hacia este eje hídrico regional. Entre las corrientes más representativas se encuentra el río Minero, que atraviesa el municipio y actúa como colector principal de numerosas quebradas de ladera. A este se suman cursos secundarios de importancia, como las quebradas La Bella, Moray, Campo Grande, Palo Blanco, La Sapa y Tabor, las cuales presentan caudales permanentes y aportes significativos durante los periodos de lluvia. Los caudales medios de estas quebradas generalmente se

encuentran dentro del rango de 0.05 a 0.20 m³/s, dependiendo de la altitud, la cobertura vegetal y la intensidad de las precipitaciones. Esta red hidrográfica cumple un papel esencial en la regulación del drenaje natural del municipio, en el abastecimiento de los sistemas de acueducto rural y en el sostenimiento de ecosistemas riparios que favorecen la conservación del suelo, la biodiversidad y la estabilidad de las laderas dentro del territorio municipal.

4.3.2 Principales cuencas hidrográficas de la región

La hidrografía regional asociada al municipio de Briceño (Boyacá) forma parte del sistema hidrográfico de la vertiente del río Magdalena, en un territorio donde las corrientes superficiales descienden desde las laderas de la cordillera Oriental y se integran a cuencas de importancia estratégica para el occidente de Boyacá. La configuración montañosa del municipio da lugar a una red de drenaje densa, con quebradas de régimen pluvial permanente y cauces de pendiente pronunciada que cumplen funciones esenciales en la regulación hídrica, el abastecimiento de agua para consumo humano y el sostenimiento de ecosistemas ribereños.

- Cuenca del río Chicamocha (alta): constituye la unidad hidrográfica principal en la que se integra Briceño. Esta cuenca actúa como el colector regional que recibe los aportes de las corrientes de montaña del municipio y regula el drenaje hacia el sistema del río Suárez y, posteriormente, hacia el río Magdalena.

- Cuenca del río Piedras: es la cuenca más relevante a escala municipal. El río Piedras se forma a partir de la confluencia de las quebradas Guayabal, Zapote y Sabamá, actuando como el eje de drenaje interno del territorio. Su régimen es netamente pluvial y presenta caudales permanentes que aumentan significativamente durante las temporadas lluviosas.

- Microcuenca de la quebrada Guayabal: considerada estratégica, debido a que provee el recurso hídrico para el acueducto del casco urbano y varias veredas. Presenta aportes constantes producto de la cobertura vegetal de las zonas altas y de la configuración de laderas húmedas.

- Microcuenca de la quebrada Zapote: se desarrolla en la zona norte del municipio y reúne afluentes como las quebradas Negra, Rastrojera y Agua Blanca. Su aporte es fundamental

para el volumen que finalmente forma el río Piedras, especialmente durante la época de lluvias.

- Microcuenca de la quebrada Sabamá: drena desde sectores elevados hacia el centro del municipio, recibiendo aportes de quebradas como Diamante, Negra, Minachal y Laguna Verde. Presenta un comportamiento torrencial en época húmeda y constituye un componente clave en la regulación hídrica regional.

4.3.3 Geología

El subsuelo de Briceño está conformado predominantemente por rocas sedimentarias del Cretácico Superior, entre las que destacan secuencias alternantes de areniscas, lutitas, limolitas y niveles calcáreos, pertenecientes a unidades geológicas como las formaciones Rosablanca, Tablazo y Guadalupe, las cuales afloran ampliamente en las laderas y divisorias montañosas del municipio. En sectores más bajos y en los valles estrechos se desarrollan depósitos cuaternarios coluviales y aluviales, compuestos por gravas, arenas y limos transportados por las quebradas locales que desembocan en el río Piedras. Estos materiales recientes presentan mayor susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa, especialmente en épocas de alta precipitación. Entre las principales unidades geológicas presentes en el municipio se destacan:

- Formaciones sedimentarias: Constituidas por areniscas medianas a finas intercaladas con lutitas y limolitas. Estas unidades favorecen la infiltración y recarga hídrica en zonas de ladera, y son responsables de la presencia de manantiales y escurrimientos subterráneos.

- Rocas calcáreas y niveles margosos: Localizados en algunos sectores del occidente y centro del municipio, donde afloran capas ricas en carbonatos que influyen en la calidad geoquímica local y en procesos de disolución superficial.

- Depósitos aluviales y coluviales recientes: Presentes en los fondos de valle estrechos y en abanicos de depósito al pie de laderas. Están conformados por materiales heterométricos de baja cohesión que soportan actividades agrícolas y parte de la infraestructura vial y de acueducto rural.

5. HIDROLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

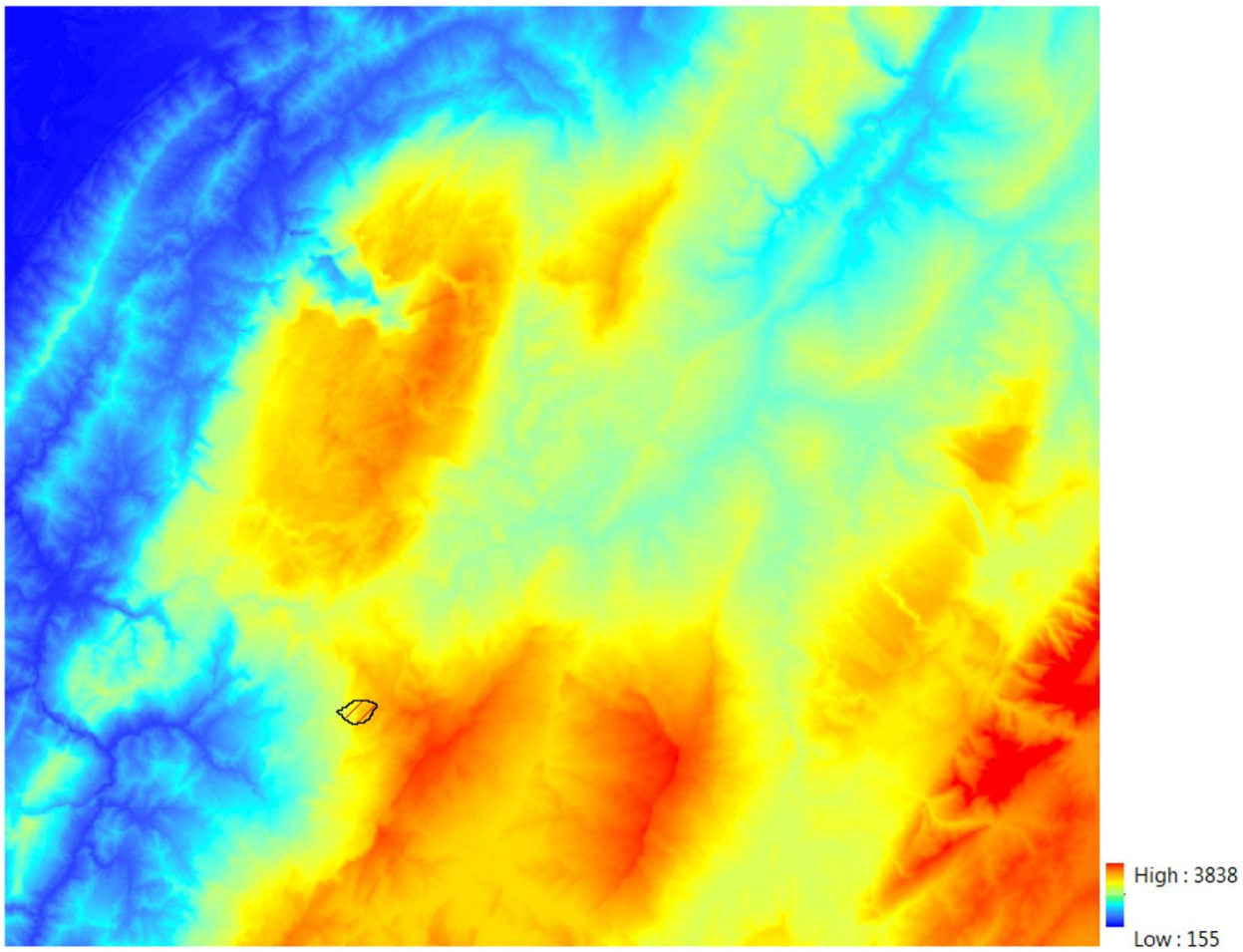
En la presente sección se presenta los resultados relacionados con el análisis geomorfológico de la cuenca que drena al punto de captación de la bocatoma proyectada en el acueducto veredal del municipio de Briceño (Boyacá).

5.1 Cuenca hidrográfica

La cuenca es aquella unidad morfológica integral en la que el agua precipitada escurre hacia las partes topográficas bajas que por medio de interconexiones superficiales que convergen hacia un cauce superficial. Por medio del sistema de drenaje superficial el agua se concentra en un punto de salida sobre el cual se estima la producción máxima de caudal. La delimitación de una cuenca hidrográfica está dada por la divisoria de aguas, la cual depende exclusivamente de la topografía. Ahora, la producción máxima de caudal surge de la integración de aspectos topográficos, edafológicos, usos del suelo y geomorfológicos. Los cuáles serán tenidos en cuenta para los cálculos posteriores.

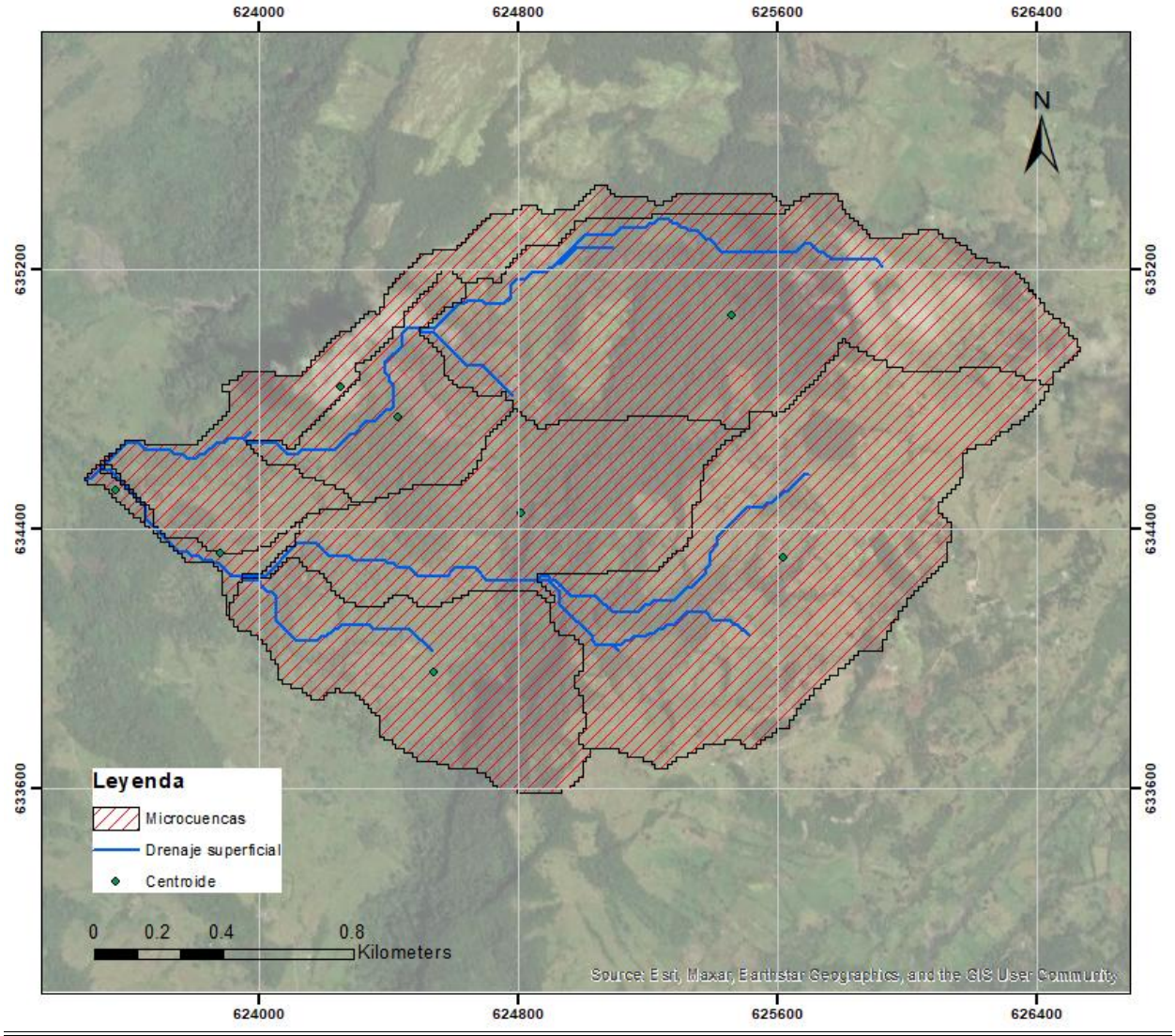
Para determinar el caudal máximo se delineó la cuenca hidrográfica con punto de cierre en el lugar donde tendrá lugar el proyecto. La delineación de la cuenca hidrográfica se apoyó en información topográfica primaria y modelos digitales de elevaciones (DEM; por sus siglas en inglés). Estos DEM permiten visualizar y analizar la topografía de una región, así como modelar procesos geomorfológicos y otros fenómenos relacionados con la elevación. El DEM para el presente proyecto fue obtenido del ASF Data Search con información del satélite Alos Palsar el cual tiene información en alta resolución del terreno corregida (12.5x12.5 m) (Figura 2).

Figura 2. *Modelo digital de elevaciones para el área de estudio.*



A partir del DEM se empleó el software ArcGis para realizar la delimitación de la cuenca hidrográfica empleando las herramientas de geoprocesamiento espacial. En la Figura 3 se muestra la microcuenca hidrográfica que drena al sitio objeto de estudio. Se puede apreciar que la cuenca tiene dos corrientes afluentes que alimentan la corriente principal, tiende a ser una microcuenca alargada con una mínima intervención antrópica.

Figura 3. *Delimitación de la microcuenca hidrográfica en el sitio objeto de estudio.*

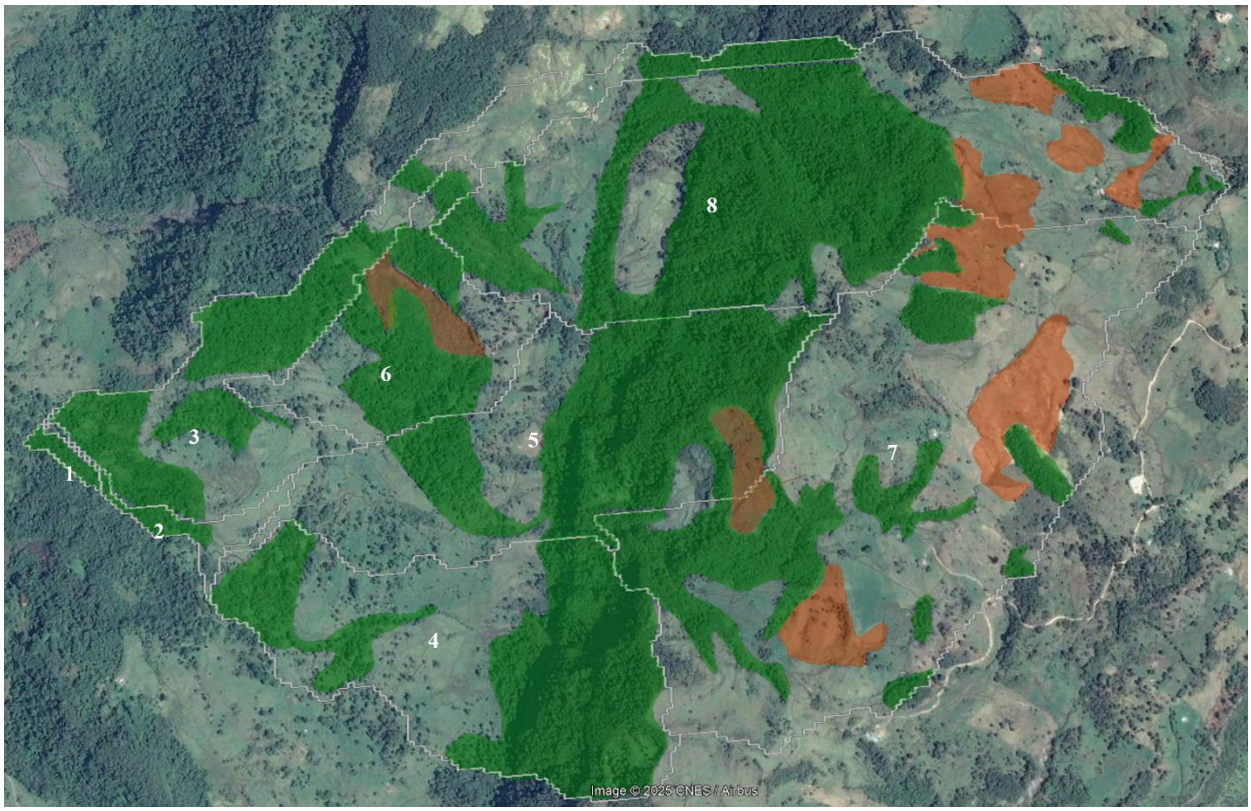


5.1.1 Cobertura del suelo

La vegetación predominante en las microcuencas objeto de estudio es pastizal con destinación principalmente bovina seguido de parches bosque húmedo montañoso y subandino (Figura 4). Los bosques húmedos montanos están compuestos principalmente por especies de encenillo (Weinmannia pubescens), roble andino (Quercus humboldtii), mano de oso (Oreopanax spp.), arrayán (Myrcianthes leucoxyla) y yarumo (Cecropia peltata), acompañadas por sotobosques densos de helechos, musgos y epífitas. En las partes más bajas y húmedas predominan los bosques

riparios asociados a quebradas y nacimientos de agua, que cumplen una función esencial en la protección de cauces y la regulación hídrica. En el área de estudio se aprecia de forma general cuatro coberturas del suelo: bosque natural (verde), pastizal pobre (naranja), afloramiento del suelo (marrón) y pastizal optimo (sin achurar).

Figura 4. *Coberturas del suelo en la microcuenca objeto de estudio.*



**Nota. ■: bosque natural; ■: afloramiento suelo; ■: pastizal pobre.*

Fuente: Google Earth.

En la Tabla 1 muestra el porcentaje de área aferente para cada una de las coberturas identificadas en las microcuenca objeto de estudio. Se puede apreciar que la cobertura dominante es un pastizal abierto en condiciones aceptables (49%), seguido de bosque natural altoandino (45%). La principal actividad antrópica que se observa en la región de estudio es ganadería extensiva y algunos cultivos de ladera.

Tabla 1. *Porcentaje de cobertura del suelo en la microcuenca objeto de estudio.*

	Cobertura del suelo (Ha)					
Microcuenca	*Pastizal aceptable*	*Pastizal pobre*	*Bosque*	*Afloramientos rocoso*	**Área total (Ha)**	**Área total (%)**
1			1.0		1.0	0.3%
2	1.3		2.0		3.3	0.9%
3	16.9		20.3		37.2	10.6%
4	19.9		26.3		46.2	13.1%
5	20.8		28.3	1.6	50.7	14.4%
6	10.7		10.3	2.5	23.5	6.7%
7	64.4	12.1	20.3	0.8	97.7	27.7%
8	37.4	6.7	48.7		92.8	26.3%
Total	**171**	**19**	**157**	**5**	**352**	**100%**

5.1.2 Tipo de suelo

En el municipio predominan suelos derivados de materiales coluviales y residuales, originados por la descomposición de rocas sedimentarias y por el arrastre de partículas desde las laderas circundantes. Estos suelos se desarrollan principalmente sobre depósitos del Terciario y Cuaternario y presentan variaciones en su profundidad, textura y grado de evolución según la altitud, la pendiente y las condiciones de drenaje del terreno. Edafológicamente, los Inceptisoles son los de mayor presencia, con texturas franco-limosas y franco-arcillosas, buena capacidad de retención hídrica y niveles de fertilidad de moderados a bajos. En sectores más inestables y con pendientes pronunciadas predominan los Entisoles, suelos jóvenes, delgados y con limitada evolución, que presentan mayor susceptibilidad a procesos erosivos y restricciones para el uso agrícola.

En las áreas de valle, terrazas fluviales y zonas de relieve moderado, los suelos tienden a ser más profundos y con mejores condiciones de drenaje, lo que favorece el establecimiento de cultivos y actividades agropecuarias de carácter sostenible. Por el contrario, en zonas altas y en laderas con fuerte inclinación se observan perfiles más someros, pedregosos y con mayor vulnerabilidad frente a la erosión hídrica, por lo cual su vocación se orienta hacia la conservación, la protección de coberturas vegetales y la regulación hídrica de las microcuencas. Estos contrastes

edáficos influyen directamente en la aptitud del territorio, la dinámica de uso del suelo y la capacidad de soporte para actividades productivas y ecosistémicas.

5.1.3 Número de curva

El número de curva se calcula integrando diferentes características del suelo: cobertura, textura, capacidad de infiltración y pendiente del terreno. Para la microcuenca objeto de estudio se identificaron dos coberturas del suelo con un grupo de suelo hidrológico B, de acuerdo con las características generales de la región. Se tuvieron en cuenta los números de curva recomendados en la literatura y el Manual de Drenaje de carreteras del INVIAS (Tabla 2.9 y Tabla 2.10) y bibliografía especializada (VenTe Chow, 1994).

Tabla 2. *Números de curva1 para diferentes coberturas del suelo.*

Descripción del uso de la tierra		Grupo hidrológico del suelo			
		A	B	C	D
Tierra cultivada[1]:	sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
	con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales:	condiciones pobres	68	79	86	89
	condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas		30	58	71	78
Bosques:	troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas,	45	66	77	83
	cubierta buena[2]	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.					
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más		39	61	74	80
condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%		49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)		89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)		81	88	91	93
Residencial[3]:					
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable[4]				
1/8 acre o menos	65	77	85	90	92
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.[5]		98	98	98	98
Calles y carreteras:					
Pavimentados con cunetas y alcantarillados[5]		98	98	98	98
grava		76	85	89	91
tierra		72	82	87	89

Fuente: Hidrología aplicada (VenTe Chow, 1994).

Teniendo en cuenta que la Resolución 0330 del 2017 recomienda periodos de retorno no menores a 50 años para obras de captación superficial, el número de curva seleccionada corresponde para un periodo de retorno de 50 años. De acuerdo con el tipo de suelo y coberturas encontradas los números de curva seleccionados son Pastizal abierto en condiciones aceptables (CN=69), pastizal en condiciones pobres (CN=79), bosque alto andino en condiciones óptimas (CN=55) y afloramiento del suelo (CN=82). En promedio, la cuenca hidrográfica objeto de estudio tiene un numero de curva promedio de 62 (Tabla 3).

Tabla 3. *Número de curva para la microcuenca objeto de estudio.*

	Número de curva relativo (-)				
Microcuenca	*Pastizal aceptable*	*Pastizal pobre*	*Bosque*	*Afloramiento rocoso*	**NC (-)**
1			57		55
2	92		111		61
3	1164		1119		61
4	1376		1445		61
5	1434		1557	130	62
6	739		566	201	64
7	4446	959	1114	69	67
8	2580	529	2681		62
				Promedio	**62**

5.2 Características geomorfológicas

Las características geomorfológicas de una cuenca son variables que determinan principalmente cómo fluye el agua sobre la superficie, la velocidad del flujo y cantidad de agua generada por la cuenca. Sin embargo, no existe una característica única que integre estos tres factores, por lo que se emplean múltiples parámetros para analizar en conjunto el comportamiento del flujo superficial en la cuenca. Estas características geomorfológicas son fundamentales en el análisis hidrológico dado que permiten conocer la respuesta de la cuenca ante eventos de lluvia, afectando la generación de escorrentía, el comportamiento de crecidas y, consecuentemente, el diseño de obras hidráulicas.

Las características geomorfológicas fueron calculadas con el software ArcGis empleando el DEM del área de estudio. En su mayoría, las características geomorfológicas fueron extraídas de la tabla de propiedades geométricas de los diferentes elementos generados. En otros casos fue necesario elaborar un raster especializado (pendiente) para realizar el cálculo respectivo. El resumen de las características geomorfológicas de las microcuencas objeto de análisis se presenta en la Tabla 9. El procedimiento general fue el siguiente:

i. Rellenar: elimina pequeñas depresiones, que no representan las características reales del terreno, en el DEM. Estas depresiones pueden interrumpir el flujo continuo del agua en la simulación del flujo superficial.

ii. Dirección de flujo: calcula la dirección en la que el agua fluirá desde cada celda de un DEM, basándose en la pendiente más pronunciada hacia las celdas vecinas. Como resultado se obtuvo una capa raster que indica hacia dónde se movería el agua en cada punto del terreno.

iii. Acumulación de flujo: calcula la cantidad de flujo que pasa por cada celda del terreno, sumando todas las celdas aguas arriba que contribuyen a ella, usando como base el raster de dirección de flujo. El resultado es una capa que muestra las rutas donde el agua tiende a concentrarse, permitiendo identificar cauces, riachuelos y corrientes principales.

iv. Flujo de trabajo: define las corrientes principales dentro de una cuenca a partir del raster de acumulación de flujo. Funciona estableciendo un umbral mínimo de acumulación: las celdas cuya acumulación de flujo supera ese valor se consideran parte de una corriente o cauce.

v. Cuenca: genera un raster donde cada celda está asociada a un área de contribución o subcuenca específica, basándose en el raster de dirección de flujo, acumulación de flujo y flujo de trabajo. Esta herramienta divide una cuenca hidrográfica en subcuencas más pequeñas, lo que permite un análisis hidrológico más detallado, como la evaluación del aporte hídrico por sectores o el modelado distribuido del escurrimiento.

vi. Pendiente: calcula la pendiente del terreno en cada celda de un DEM. La pendiente representa el ángulo de inclinación con respecto a una superficie horizontal y es fundamental en el análisis hidrológico porque influye directamente en la velocidad del escurrimiento, la erosión y la capacidad de infiltración del agua. Superficies más inclinadas tienden a generar escorrentía más rápida, mientras que pendientes suaves favorecen la infiltración.

5.2.1 Área de la cuenca

El área de la cuenca es una característica geomorfológica clave que determina directamente el volumen total de agua que puede ser drenado hacia un punto específico del sistema fluvial. Cuanto mayor es el área, mayor es la superficie disponible para captar la lluvia y generar escorrentía, lo que generalmente se traduce en un mayor caudal drenado. Además, el tamaño de la cuenca influye en el tiempo de concentración, afectando la rapidez con la que el agua llega al cauce principal, por lo que conocer el área es fundamental para estimar caudales máximos y diseñar infraestructuras hidráulicas. La cuenca tiene un área total de 3.52 km^2, con microcuencas que varían entre 0.01-0.977 km^2.

5.2.2 Pendiente media de la cuenca

La pendiente de la cuenca influye directamente en la velocidad con la que el agua se desplaza hacia el cauce principal. Una pendiente pronunciada acelera el escurrimiento superficial, aumentando la rapidez con la que se genera el caudal y, por tanto, puede provocar picos de flujo más altos y rápidos. Por el contrario, una pendiente suave retarda el movimiento del agua, favoreciendo la infiltración y reduciendo la magnitud y velocidad del caudal drenado. En la microcuenca objeto de estudio predomina un relieve medianamente accidentado en el cual predominan pendientes accidentadas (Tabla 4). La pendiente media de las microcuencas fue obtenida interpolando cada uno de los pixeles con información de pendiente, obteniendo un promedio de 0.32 m/m (Figura 5a).

Tabla 4. *Clasificación de las cuencas de acuerdo con su pendiente media.*

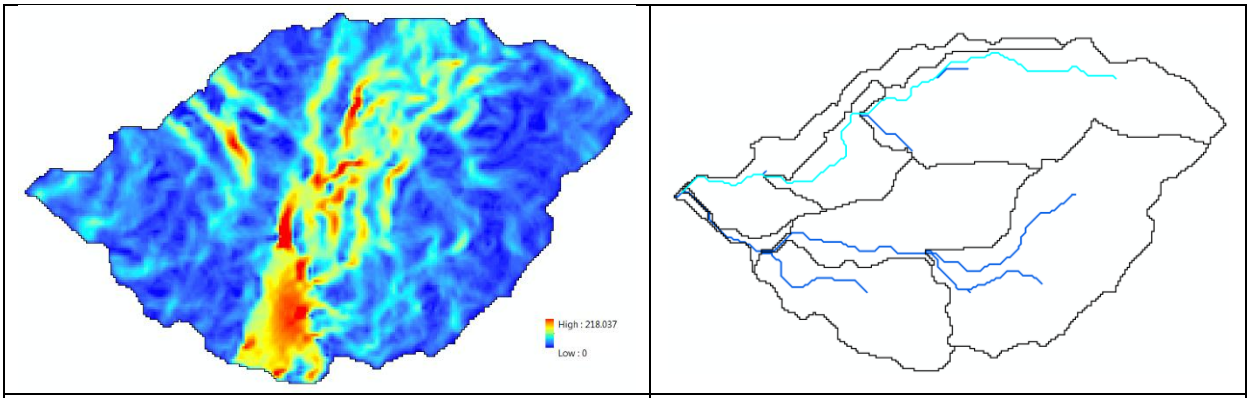
Pendiente media (%)	Tipo de Relieve
0 – 3	Plano
3 – 7	Suave
7 – 12	Medianamente Accidentado
12 – 20	Accidentado
20 – 35	Fuertemente Accidentado
35 – 50	Muy fuertemente Accidentado
50 – 75	Escarpado
> 75	Muy Escarpado

Fuente: *Reyes Barroso y Carvajal. Universidad del Valle 2010.*

5.2.3 Longitud del cauce principal

La longitud del cauce principal afecta el tiempo que tarda el agua en recorrer la cuenca hasta el punto de salida, influyendo en el patrón y la magnitud del caudal drenado (Figura 5b). Un cauce más largo generalmente implica un tiempo de concentración mayor, lo que puede diluir y retrasar el pico de escorrentía, mientras que un cauce corto permite que el agua llegue más rápido, generando aumentos bruscos en el caudal. El cauce principal tiene una longitud total de 3.12 km.

Figura 5. *Mapa de pendientes (a) y cauce más largo (b) en la microcuenca objeto de estudio.*



(a) (b)

5.2.4 Pendiente media del cauce principal

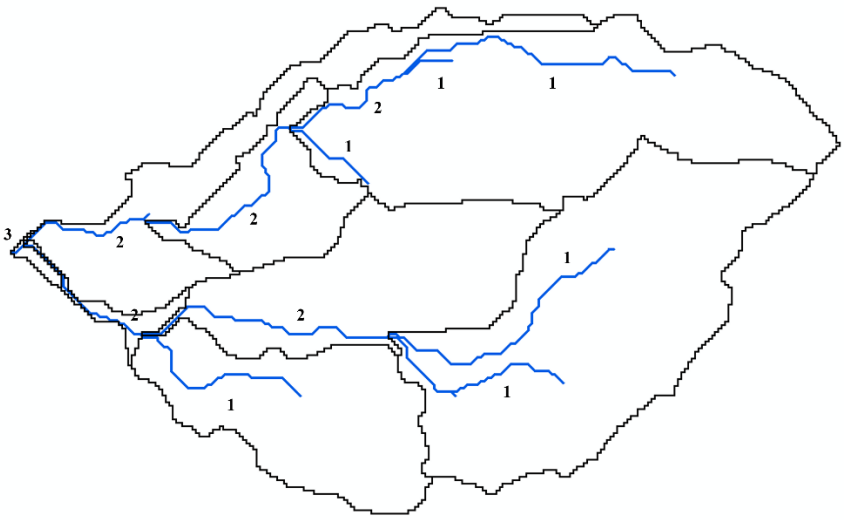
La pendiente del cauce principal es crucial porque determina la velocidad con la que el agua se desplaza en la cuenca. Una pendiente pronunciada acelera el flujo, aumentando la capacidad

del cauce para transportar grandes volúmenes de agua rápidamente, lo que puede generar crecidas más intensas y riesgos de erosión. En cambio, una pendiente suave reduce la velocidad del agua, favoreciendo la acumulación y almacenamiento temporal, y moderando los picos de caudal. Para tener una mayor precisión en el cálculo de la pendiente media del cauce principal se empleó la información derivada del estudio topográfico sobre la sección de corriente que traspasa el lugar del proyecto. El cauce principal tiene una pendiente promedio de 0.146 m/m.

5.2.5 Orden de la cuenca

El orden de la cuenca se refiere a la jerarquía y complejidad de su red de drenaje, influye en la cantidad y distribución del caudal drenado. Cuencas con un orden más alto tienen sistemas de canales más desarrollados y ramificados, lo que facilita la convergencia de flujos provenientes de múltiples subcuencas, aumentando el volumen y la regularidad del caudal en el cauce principal. Además, un orden alto suele asociarse con tiempos de respuesta más complejos, lo que impacta en la gestión de crecidas y en la planificación del uso del recurso hídrico. La microcuenca objeto de análisis presenta un máximo orden de corriente tres (Figura 6), típico de una microcuenca pequeña andina de pendiente moderada. Esto significa que la microcuenca puede atenuar tormentas de corta duración, sin embargo, en tormentas de larga duración la saturación del suelo puede influir en el aumento del caudal.

Figura 6. *Orden de corrientes de la microcuenca objeto de estudio.*



5.2.6 Densidad de drenaje

La densidad de drenaje indica qué tan desarrollada está la red de drenaje en la cuenca. Una alta densidad de drenaje sugiere un terreno con escasa infiltración y alta escorrentía superficial, lo que generalmente se traduce en una respuesta hidrológica rápida y caudales máximos más elevados. En cambio, una baja densidad puede reflejar suelos más permeables o topografía suave, favoreciendo la infiltración y reduciendo la velocidad y magnitud del caudal.

$$DD = \frac{Longitud\ de\ cauces}{Área} \quad \left[\frac{km}{km^2}\right]$$

En la Tabla 5 se presenta la clasificación de las cuencas de acuerdo con su densidad de drenaje. La microcuenca objeto de estudio tiene en promedio una densidad de drenaje muy alta (4.5 km/km^2). En ese sentido, se espera que la microcuenca tenga una respuesta hidrológica rápida, con caudales picos atenuados ligeramente por la red de drenaje.

Tabla 5. *Clasificación de las cuencas de acuerdo con su densidad de drenaje.*

Densidad de drenaje (km/km2)	Categoría
< 1.0	Bajo
1.1 – 2.0	Moderado
2.1 – 3.0	Alto
> 3.0	Muy alto

Fuente: Reyes Barroso y Carvajal. Universidad del Valle 2010.

5.2.7 Coeficiente de compacidad

El coeficiente de compacidad es un indicador que compara el área de una cuenca con la de un círculo de perímetro equivalente, por lo que refleja cuán circular o alargada es la forma de la cuenca. Un valor cercano a uno indica una cuenca muy compacta, lo que favorece la concentración rápida del escurrimiento y, por tanto, mayores picos de caudal en menor tiempo. En cambio, valores mayores a uno representan cuencas más alargadas, donde el agua tarda más en llegar al cauce principal, generando respuestas hidrológicas más atenuadas.

$$Kc = 0.28 * \frac{Perimetro\ de\ la\ cuenca}{\sqrt{Área\ de\ la\ cuenca}}\ [-]$$

En la Tabla 6 se presentan la clasificación de las cuencas de acuerdo con su índice de compacidad. Para las microcuencas objeto de análisis se obtuvo un Kc promedio de 8.3 por lo que tiene una forma rectangular oblonga como se observa en la Figura 3.

Tabla 6. *Clasificación de las cuencas de acuerdo con su índice de compacidad.*

Valor del índice de compacidad	Índice de Compacidad
1.0 – 1.25	Redonda a ovalada redonda
1.26 – 1.50	De ovalada redonda a ovalada oblonga
1.51 – 1.75	De ovalada oblonga a rectangular oblonga
>1.75	Rectangular oblonga

Fuente: FAO 1985.

5.2.8 Factor de forma de Horton

El factor de forma de Horton relaciona el área de la cuenca con el cuadrado de la longitud de su cauce principal. Un valor cercano a uno indica una cuenca más circular, lo que suele asociarse con una respuesta hidrológica rápida y caudales pico elevados, ya que el agua drena casi simultáneamente desde diferentes partes. En contraste, valores bajos indican cuencas alargadas, con respuestas más lentas y caudales más moderados.

$$Hf = \frac{Área}{(Longitud\ del\ cauce\ principal)^2}\ [-]$$

En la Tabla 7 se presentan la clasificación de las cuencas de acuerdo con su factor de forma. Para las microcuencas objeto de análisis se obtuvo un Hf promedio de 1.0 por lo que tiene una forma muy ensanchada ensanchada como se observa en la Figura 3.

Tabla 7. *Clasificación de las cuencas de acuerdo con su factor de forma.*

Valor del factor de forma	Forma de la cuenca

< 0.22	Muy alargada
0.221 – 0.300	Alargada
0.301 – 0.37	Ligeramente alargada
0.371 – 0.45	Ni alargada, ni ensanchada
0.451 – 0.60	Ligeramente ensanchada
0.601 – 0.80	Ensanchada
0.801 – 1.20	Muy ensanchada
>1.2	Rodeando el desagüe

Fuente: FAO 1985.

5.2.9 Coeficiente de circularidad de Miller

El coeficiente de circularidad de Miller mide qué tan cercana es la forma de una cuenca a un círculo perfecto, comparando su área con la de un círculo que tenga el mismo perímetro. Los valores varían entre cero (forma muy alargada) y uno (forma perfectamente circular). Cuencas con un coeficiente cercano a uno tienden a generar escorrentías rápidas y picos de caudal elevados, ya que el agua llega casi al mismo tiempo al cauce principal. En cambio, valores bajos indican una forma más alargada, lo que favorece una respuesta hidrológica más atenuada.

$$Cc = 4 * \pi * \frac{Área}{(Perimetro\ de\ la\ cuenca)^2}\ [-]$$

En la Tabla 8 se presentan la clasificación de las cuencas de acuerdo con su coeficiente de circularidad. Para las microcuencas objeto de análisis se obtuvo un Cc promedio de 0.2 por lo que tiene una forma alargada, coherente con lo observado en el factor de forma de Horton, como se observa en la Figura 3.

Tabla 8. *Clasificación de las cuencas de acuerdo con su coeficiente de circularidad.*

Valores del coeficiente de circularidad	Interpretación
< 1.0	Cuenca alargada
= 1.0	Cuenca cuadrada o circular
> 1.0	Cuenca achatada

Fuente: FAO 1985.

Tabla 9. *Resumen de propiedades geomorfológicas de las microcuencas objeto de análisis.*

Microcuenca	Área cuenca (km^2)	Perímetro (km)	Pendiente cuenca (m/m)	Longitud del cauce principal (km)	Longitud del cauce principal (km)	Pendiente del cauce principal (m/m)	Densidad de drenaje (km/km^2)	Coeficiente de compacidad (-)	Factor de forma de Horton (-)	Coeficiente de circularidad de Miller (-)
1	0.010	0.9	0.250	0.054	0.054	0.392	5.2	8.6	3.52	0.17
2	0.033	2.4	0.193	0.594	0.594	0.024	17.8	12.9	0.09	0.08
3	0.372	7.7	0.244	0.533	0.533	0.084	1.4	12.6	1.31	0.08
4	0.462	4.0	0.488	0.782	0.782	0.074	1.7	5.9	0.76	0.36
5	0.507	4.8	0.478	1.021	1.021	0.167	2.0	6.7	0.49	0.28
6	0.235	3.5	0.331	0.857	0.857	0.136	3.7	7.1	0.32	0.25
7	0.977	6.1	0.219	1.116	1.978	0.127	2.0	6.2	0.78	0.33
8	0.928	6.0	0.363	1.683	2.203	0.167	2.4	6.3	0.33	0.32

5.3 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es el lapso que tarda una gota de agua en desplazarse desde el punto más alejado de la cuenca hasta su salida. Su interpretación determina la rapidez con que la cuenca responde a un evento de lluvia. Un tiempo de concentración corto implica una respuesta rápida y la posibilidad de caudales pico elevados en poco tiempo, aumentando el riesgo de inundaciones. En cambio, un tiempo más largo permite una respuesta más gradual.

5.3.1 Cálculo del tiempo de concentración

En la literatura se pueden encontrar diversas formulaciones para el cálculo del tiempo de concentración. En el segundo capítulo del Manual de Drenaje de carreteras del INVIAS se resume las principales formulaciones empleadas en el territorio nacional. A continuación, se presentan las ecuaciones y cálculos de las formulaciones seleccionadas para el presente análisis hidrológico:

- Ecuación de Témez:

$$T_C = 0.3\left(\frac{L}{S^{0.25}}\right)^{0.76}$$

- Ecuación de Williams:

$$T_C = 0.683\left(\frac{LA^{0.4}}{DS^{0.25}}\right)$$

- Ecuación de Johnstone y Cross:

$$T_C = 2.6\left(\frac{L}{S^{0.5}}\right)^{0.5}$$

- Ecuación de Giandotti:

$$T_C = \frac{4A + 1.50L}{25.3\ (LS)^{0.5}}$$

- Ecuación de VT Chow:

$$T_C = 0.273\left(\frac{L}{S^{0.5}}\right)^{0.64}$$

- Ecuación del cuerpo de ingenieros de los EU:

$$T_C = 0.28\left(\frac{L}{S^{0.25}}\right)^{0.76}$$

Donde:

Símbolo	Parámetro	Unidad (Ecuación)
Tc	Tiempo de concentración	h
L	Longitud del cauce principal	km
A	Área de la cuenca	km^2
S	Pendiente del cauce principal	% (Témez, Williams); m/km (Johnstone y Cross); m/m (Giandotti, VT Chow, Cuerpo de ingenieros)
D	Diámetro de una cuenca circular con área A	km

5.3.2 Comparación del tiempo de concentración

En la Tabla 10 se resumen los tiempos de concentración obtenidos de las diferentes formulaciones seleccionadas. La selección de los métodos se fundamentó en la información disponible y las características geomorfológicas de la microcuenca objeto de análisis. De esta forma, el tiempo de concentración de la de la cuenca hidrográfica de análisis es de 1.42 h (86 minutos), el cual será adoptado en el presente análisis hidrológico.

Tabla 10. *Resumen de los tiempos de concentración por diferentes métodos.*

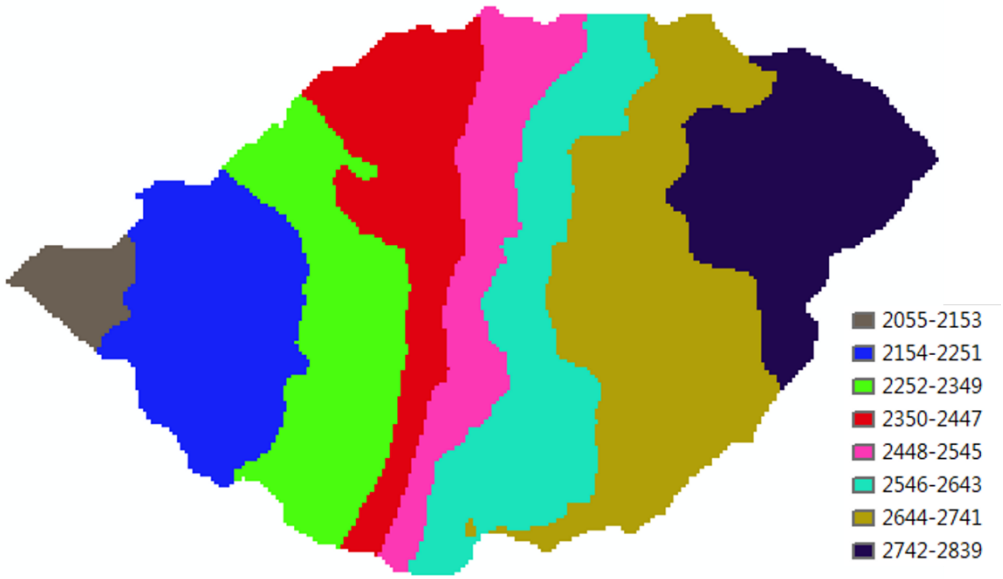
	Tiempo de concentración (h)						
Microcuenca	*Témez*	*Williams*	*Johnstone y Cross*	*Giandotti*	*VT Chow*	*Cuerpo de ingenieros de los EU*	**Promedio (h)**
1	0.024	0.021	0.14	0.13	0.06	0.04	0.07
2	0.093	0.407	0.91	0.54	0.65	0.38	0.50
3	0.087	0.209	0.63	0.61	0.40	0.28	0.37
4	0.109	0.310	0.78	0.64	0.54	0.38	0.46
5	0.127	0.327	0.73	0.42	0.49	0.40	0.42

6	0.114	0.312	0.70	0.37	0.47	0.36	0.39
7	0.119	0.359	0.82	0.55	0.82	0.70	0.56
8	0.160	0.508	0.94	0.47	0.80	0.72	0.60

5.4 Curva hipsométrica

La curva hipsométrica es una representación gráfica que muestra la distribución del área de la cuenca en función de la altitud. Esta curva permite analizar la forma del relieve de la cuenca y su grado de erosión. Una curva convexa indica un terreno joven, con altitudes elevadas y poca erosión, mientras que una curva cóncava representa una cuenca más erosionada y madura. En la Figura 7 se muestra las isohipsas para la microcuenca objeto de estudio, la cual dominan las elevaciones inferiores a 2350 msnm (71%).

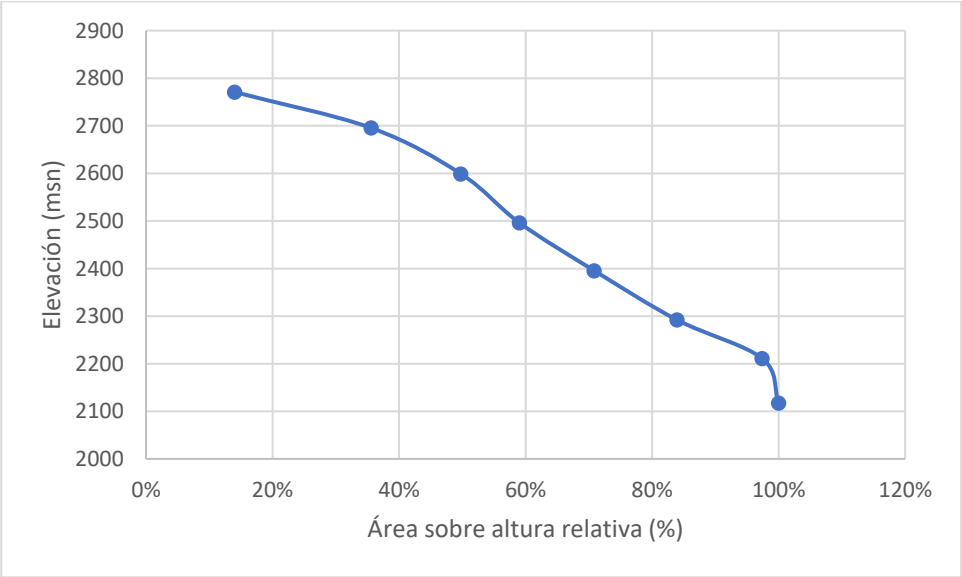
Figura 7. *Isohipsas de elevación en la microcuenca objeto de estudio.*



En la Figura 8 se muestra la curva hipsométrica para la cuenca objeto de estudio, en esta se puede evidencia una forma suavemente convexa en la parte superior y más cóncava hacia el final sugiere una cuenca madura con procesos erosivos avanzados. Gran parte del área de la cuenca se encuentra en elevaciones medias, lo que indica una topografía suavemente inclinada y un relieve

moderado. La caída más pronunciada al final de la curva refleja zonas bajas con poca pendiente, posiblemente asociadas a áreas de acumulación o fondo de valle.

Figura 8. *Curva hipsométrica de la cuenca objeto de estudio.*



6. ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA

Los datos de precipitación fueron obtenidos de la red de monitoreo climático del IDEAM. Las estaciones meteorológicas más cercana al área de estudio con información disponible reciente son (Tabla 11): La Pradera, Jesus María, Pauna y Saboyá La Granja. En su mayoría, las estaciones son pluviométricas con tecnología convencional cuya fecha de instalación varia. Las estaciones seleccionadas tienen una relación espacial directa con la cuenca que drena hacia el punto de salida de interés. Para efectos del análisis de la precipitación se emplearon los últimos 24 años de registros de precipitación (2000-2024).

Tabla 11. *Estaciones hidroclimáticas cercanas al área de estudio.*

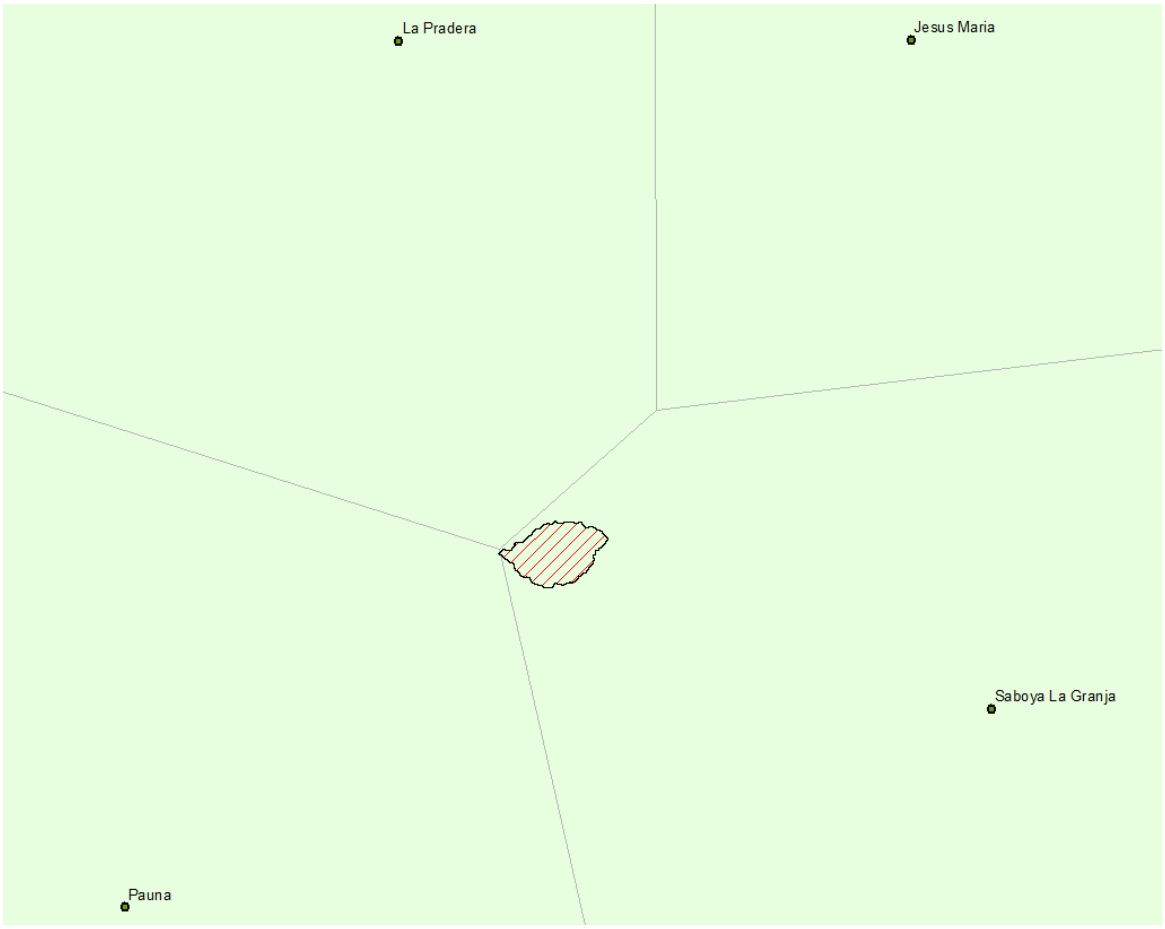
						Coordenadas	
ID	**Nombre**	**Código**	**Tipo**	**Fecha de instalación**	**Fecha de suspensión**	*Longitud*	*Latitud*
1	Briceño	23120110	Pluviométrica	15/05/1960	15/12/1960	-73.95	5.70
2	Albania	23120100	Pluviométrica	15/11/1959	12/02/1974	-73.92	5.78
3	El Porvenir	24010060	Pluviométrica	15/01/1946	15/01/1947	-73.80	5.70
4	Simijaca	24011010	Pluviométrica	15/06/1974	15/08/1975	-73.85	5.62
5	Santa Rita	23120120	Pluviométrica	15/04/1961	31/07/2008	-73.92	5.60
6	Pauna	23120140	Pluviométrica	15/04/1993		-73.98	5.65
7	La Pradera	23120220	Pluviométrica	15/08/1980		-73.91	5.87
8	Caldas	24010420	Pluviométrica	15/11/1964	31/12/1990	-73.87	5.55
9	Jesus María	24010210	Pluviométrica	15/03/1958		-73.78	5.87
10	Gachantiva	24010810	Pluviométrica	15/08/1980		-73.55	5.75
11	Saboyá La Granja	24045360	Pluviométrica	25/05/2009		-73.76	5.70

6.1 Polígonos de Thiessen

En la Figura 9 se muestra el área aferente de las estaciones seleccionadas con información disponible en el área de estudio. Estas áreas aferentes fueron obtenidas mediante la metodología de Polígonos de Thiessen. Este proceso es esencial para representar correctamente la variabilidad espacial de la precipitación dentro de una cuenca, con el cual se le asigna un peso proporcional a cada estación según la superficie que influye, evitando promedios simples que no reflejan la

distribución real de la lluvia. En ese sentido, de acuerdo con los polígonos de Thiessen se puede apreciar que la cuenca objeto de estudio es influida en su totalidad por la estación Pauna (23120140).

Figura 9. *Áreas aferentes de las estaciones con información en el área de estudio.*



6.2 Análisis de consistencia de registros

Se realizó un análisis de consistencia para evaluar la calidad de los datos provenientes de la estación hidrológica. Para esto, se determinó el porcentaje de datos faltantes anuales como se muestra en la Tabla 12. Se puede apreciar que entre octubre-diciembre del 2011 y 2023 no se registraron datos de precipitación. No obstante, los datos faltantes no superan el 20% de los registros totales por lo que fueron completados con la tendencia media multianual. En ese sentido,

en el análisis de precipitación fueron tenidos en cuenta todos los datos comprendidos entre 2000-2024.

6.3 Precipitación anual

En la Figura 11 se muestra el patrón de precipitación multianual de la estación hidrológica objeto de estudio. De forma general, se puede aprecia una alta variabilidad interanual en la precipitación posiblemente relacionados con el cambio climático. Se observan picos significativos en los años 2007, 2010–2011 y 2021–2022, asociados a la influencia del fenómeno La Niña, que intensifica las lluvias. En contraste, los años 2013 a 2015 reflejan condiciones más secas relacionadas con El Niño, evidenciando la sensibilidad climática de la región a las oscilaciones oceánicas-atmosféricas. La mayor precipitación registrada en el área de estudio es de 3349 mm en el año 2011 mientras que en el 2015 se registró la menor precipitación 2174 mm.

6.4 Precipitación mensual

El patrón de precipitación multianual en el área de estudio obedece a un comportamiento bimodal, característico de la región Andina (Figura 10). Entre diciembre-febrero y junio-agosto se evidencian periodos de baja precipitación, opuesto a lo observado entre marzo-mayo y septiembre-noviembre. Para los periodos de baja precipitación, el mes que registra una menor lluvia es enero con valor de 60 mm. Mientras que, para los periodos de alta precipitación, el mes con una mayor precipitación es mayo con un valor de 364 mm.

Tabla 12. *Número de días sin registro de precipitación y porcentaje de datos faltantes anuales.*

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	DF
2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
2001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
2002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	30	0	17%
2003	0	12	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	4%
2004	0	29	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	8%
2005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
2006	0	28	0	0	0	0	0	0	30	31	0	0	24%
2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
2008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
2009	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
2010	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1%
2011	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
2012	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	1%
2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0%
2016	0	0	0	0	0	0	0	0	14	31	0	1	13%
2017	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1%
2018	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
2019	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1%
2020	7	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5%
2021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
2022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
2023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%
2024	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0%

Figura 10. *Precipitación mensual multianual de la estación hidrológica objeto de estudio.*

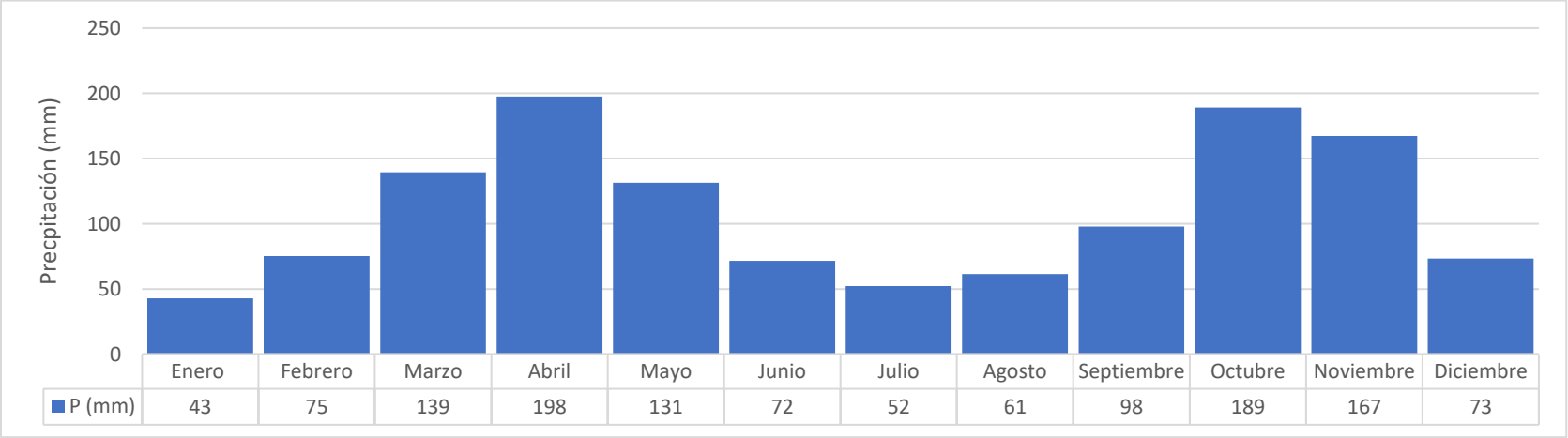
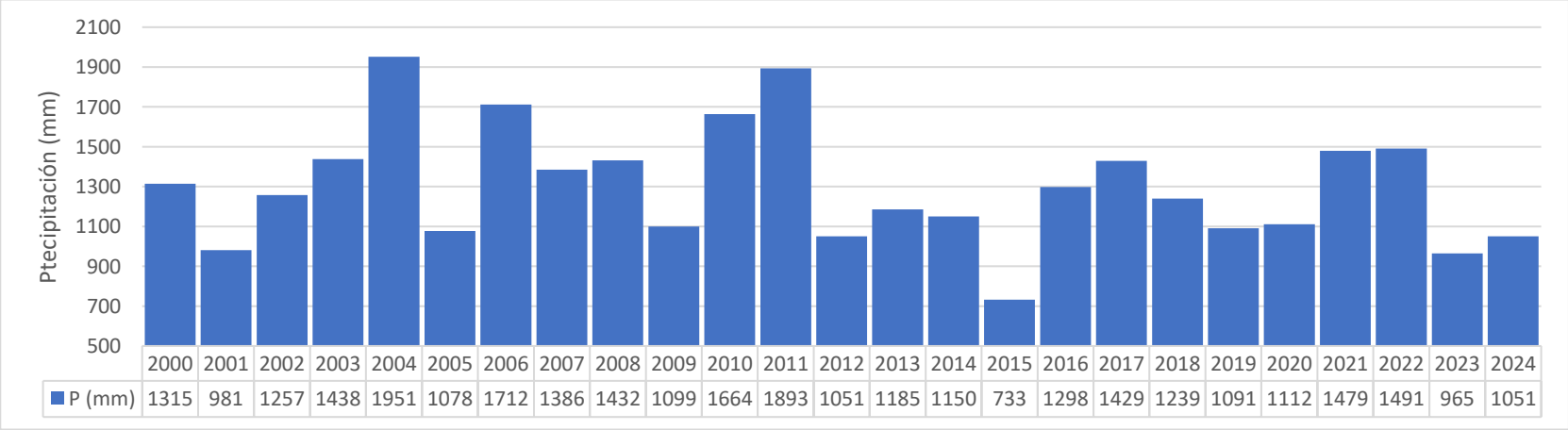


Figura 11. *Precipitación anual estación hidrológica objeto de estudio.*



6.5 Precipitación máxima diaria multianual

En la Tabla 13 se presenta la precipitación máxima diaria multianual para la estación hidrológica objeto de estudio, en la cual se puede apreciar un patrón ascendente de la precipitación máxima diaria. Este fenómeno ha sido asociado al cambio climático, el cual provoca cambios en los patrones normales de precipitación (periodos más largos de estiaje frente a lluvias torrenciales en periodos más cortos de tiempo). En cualquier caso, la precipitación máxima promedio diaria multianual es de 75 mm [Ecuación 1].

Tabla 13. *Precipitación máxima diaria multianual.*

Año	Precipitación máxima diaria	Año	Precipitación máxima diaria
2000	43	2013	38
2001	45	2014	34
2002	38	2015	31
2003	83	2016	37
2004	120	2017	61
2005	80	2018	54
2006	78	2019	49
2007	77	2020	46
2008	47	2021	62
2009	38	2022	35
2010	42	2023	36
2011	40	2024	40
2012	50		

$$\overline{P_{max}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{P_i}{n} = \frac{59 + 9 + \cdots + 66}{24} = 75\ mm$$ [Ecuación 1]

6.6 Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia

Las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) son una interpolación de la intensidad de precipitación, duración de la tormenta y periodo de retorno. Estas curvas son implementadas con la finalidad de obtener un valor máximo probable de intensidad de precipitación sujeto a las

características climáticas del área de estudio, sumado a las características geomorfológicas de la cuenca hidrográfica y el máximo riesgo probable. Debido a que en el área de estudio no se cuenta con unas curvas IDF se optó por emplear las curvas IDF sintéticas propuestas por el Manuel de Drenaje para Carreteras del INVIAS [Ecuación 2].

$$i = \frac{aT^b M^d}{\left(\frac{t}{60}\right)^c}$$	[Ecuación 2]

Donde:

i: intensidad de precipitación (mm/h)

T: periodo de retorno (años)

M: precipitación máxima promedio anual en 24h a nivel multianual (mm)

t: duración de la lluvia (minutos)

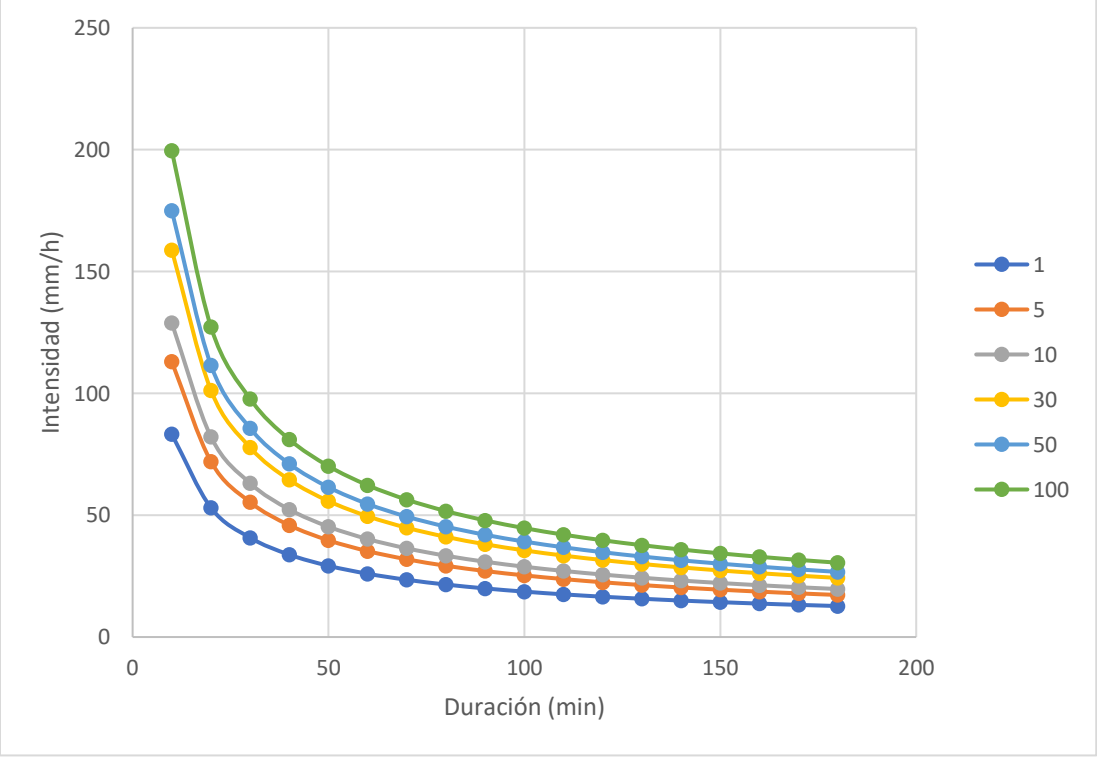
a, b, c, d: parámetros de ajuste de la regresión.

El área de estudio se ubica en la región Andina (R1) como se muestra en la Figura 12. En ese sentido, los parámetros de regresión para las curvas IDF sintéticas son: a=0.94, b=0.18, c=0.66 y d=0.83; de acuerdo con la Tabla 2.12 del manual del INVIAS. Por otro lado, la precipitación máxima diaria promedio multianual es de 135 mm [Ecuación 1]. Con esta información, se elaboraron las curvas de IDF para tormentas entre 10-180 minutos y diferentes periodos de retorno (2-100 años) para el área de estudio (Figura 13).

Figura 12. *Distribución de los parámetros de regresión IDF para las diferentes regiones de Colombia.*



Figura 13. *Curvas IDF para la estación Aguas Claras.*



6.6.1 Curva de masa de precipitación

A partir de las curvas IDF se pueden hallar las curvas de masas de aguaceros puntuales (Tabla 14). En esta Tabla se puede apreciar la cantidad de lluvia que precipita para diferentes tiempos de retorno, así como duraciones de tormenta en la estación hidrológica objeto de estudio.

Tabla 14. *Curva de aguaceros puntuales para la estación hidrológica objeto de estudio.*

		Tiempo de retorno (años)					
ID	***Duración (min)***	*1*	*5*	*10*	*30*	*50*	*100*
0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	10	13.9	18.8	21.5	26.5	29.2	33.3
2	20	17.7	24.0	27.4	33.7	37.2	42.4
3	30	20.4	27.7	31.6	38.9	42.8	48.9
4	40	22.5	30.6	34.9	43.0	47.4	54.1
5	50	24.4	33.1	37.7	46.5	51.2	58.4
6	60	26.0	35.3	40.2	49.6	54.6	62.3
7	70	27.4	37.2	42.5	52.3	57.6	65.8
8	80	28.7	39.0	44.5	54.8	60.4	68.9
9	90	29.9	40.6	46.4	57.1	62.9	71.8
10	100	31.1	42.2	48.1	59.3	65.3	74.5
11	110	32.1	43.6	49.7	61.3	67.5	77.0
12	120	33.1	44.9	51.3	63.2	69.6	79.4
13	130	34.0	46.2	52.7	65.0	71.6	81.7
14	140	34.9	47.4	54.1	66.7	73.5	83.8
15	150	35.8	48.6	55.4	68.3	75.3	85.9
16	160	36.6	49.7	56.7	69.9	77.0	87.8
17	170	37.4	50.8	57.9	71.4	78.6	89.7
18	180	38.1	51.8	59.1	72.8	80.2	91.5

6.6.2 Hietogramas de precipitación

A partir de la curva de masas de aguaceros puntuales es posible calcular los incrementos de lluvia puntuales de los hietogramas de precipitación para la estación hidrológica objeto de estudio.

Organizando esta información mediante el método de bloque alterno es posible visualizar los hietogramas de precipitación para tormentas con una duración de 180 minutos (Tabla 15).

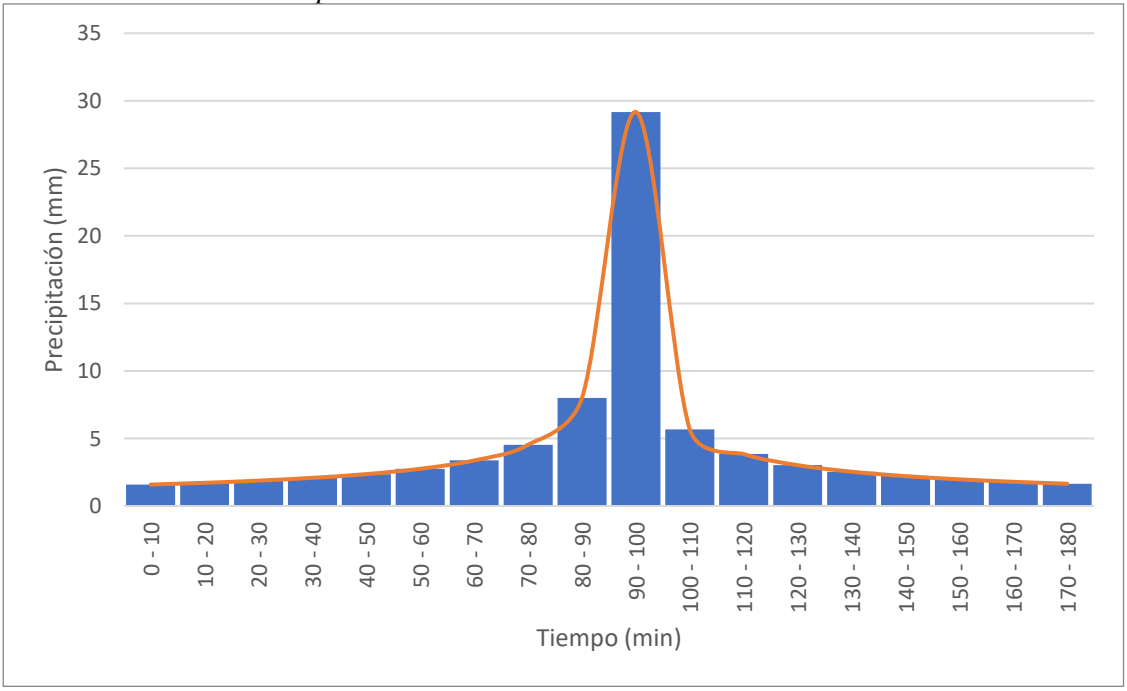
Tabla 15. *Hietogramas de precipitación para la estación hidrológica objeto de estudio.*

		Tiempo de retorno (años)					
ID	**Intervalo (min)**	*1*	*5*	*10*	*30*	*50*	*100*
1	0 - 10	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
2	10 - 20	0.8	1.1	1.3	1.6	1.7	2.0
3	20 - 30	0.9	1.2	1.4	1.7	1.9	2.1
4	30 - 40	1.0	1.3	1.5	1.9	2.1	2.4
5	40 - 50	1.1	1.5	1.7	2.1	2.4	2.7
6	50 - 60	1.3	1.8	2.0	2.5	2.8	3.1
7	60 - 70	1.6	2.2	2.5	3.1	3.4	3.9
8	70 - 80	2.2	2.9	3.3	4.1	4.5	5.2
9	80 - 90	3.8	5.2	5.9	7.3	8.0	9.1
10	90 - 100	13.9	18.8	21.5	26.5	29.2	33.3
11	100 - 110	2.7	3.7	4.2	5.1	5.7	6.5
12	110 - 120	1.8	2.5	2.8	3.5	3.8	4.4
13	120 - 130	1.4	2.0	2.2	2.7	3.0	3.5
14	130 - 140	1.2	1.6	1.9	2.3	2.5	2.9
15	140 - 150	1.1	1.4	1.6	2.0	2.2	2.5
16	150 - 160	0.9	1.3	1.5	1.8	2.0	2.3
17	160 - 170	0.9	1.2	1.3	1.6	1.8	2.0
18	170 - 180	0.8	1.1	1.2	1.5	1.7	1.9
	Total	**38.1**	**51.8**	**59.1**	**72.8**	**80.2**	**91.5**

6.6.3 Tormenta de diseño

De acuerdo con las recomendaciones establecidas en la normativa nacional fue seleccionada una tormenta de diseño con un periodo de retorno de 50 años y 180 minutos de duración, superior al tiempo de concentración medio (48.6 min).

Figura 14. *Tormenta de diseño para la evaluación hidráulica de las estructuras.*



6.7 Caudal máximo probable del efluente principal

6.7.1 Caudal máximo por el método tránsito de avenidas

El método de tránsito de avenidas es una técnica hidrológica empleada para estimar la variación temporal y espacial del caudal en un cauce natural o artificial, permitiendo determinar el caudal máximo o hidrograma de salida a partir de un hidrograma de entrada. Este método se fundamenta en los principios de continuidad y almacenamiento, considerando que el flujo que entra se almacena y sale de un tramo de cauce cambia con el tiempo debido a las condiciones hidráulicas, la pendiente, la rugosidad y la geometría del canal.

A diferencia de métodos directos como el racional, el tránsito de avenidas permite simular la propagación de la onda de crecida, evaluando la atenuación del caudal pico y el desfase del hidrograma conforme la corriente avanza aguas abajo. Su aplicación es fundamental en el diseño de bocatomas, embalses, canales y obras de paso, donde se requiere conocer el comportamiento real del flujo durante eventos de creciente.

El procedimiento puede desarrollarse mediante enfoques hidrológicos (como el método de Muskingum) ([Ecuación 3) o hidráulicos (resolviendo las ecuaciones de Saint Venant simplificadas) ([Ecuación 4), dependiendo del nivel de detalle requerido y de la información disponible.

$$I - Q = \frac{dS}{dt}$$	[Ecuación 3]

Donde:

I: caudal de entrada en el tramo (m^3/s).

Q: Caudal de salida den el tramo (m^3/s).

dS/dt: diferencial de almacenamiento (m^3/s).

$$S = K[XI + 1(1 - X)Q]$$	[Ecuación 4]

Donde:

K: constante de almacenamiento o tiempo de tránsito (s).

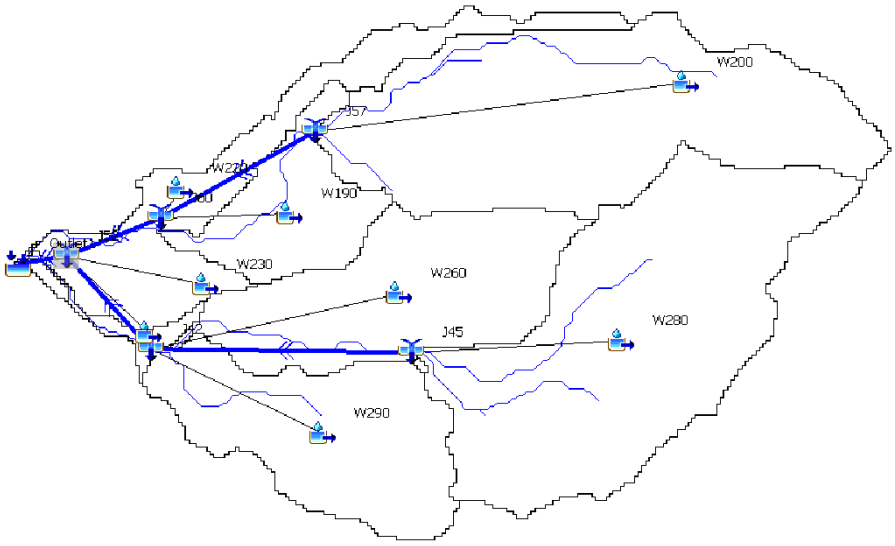
X: Factor de ponderación (-).

Q: Caudal de salida den el tramo (m^3/s).

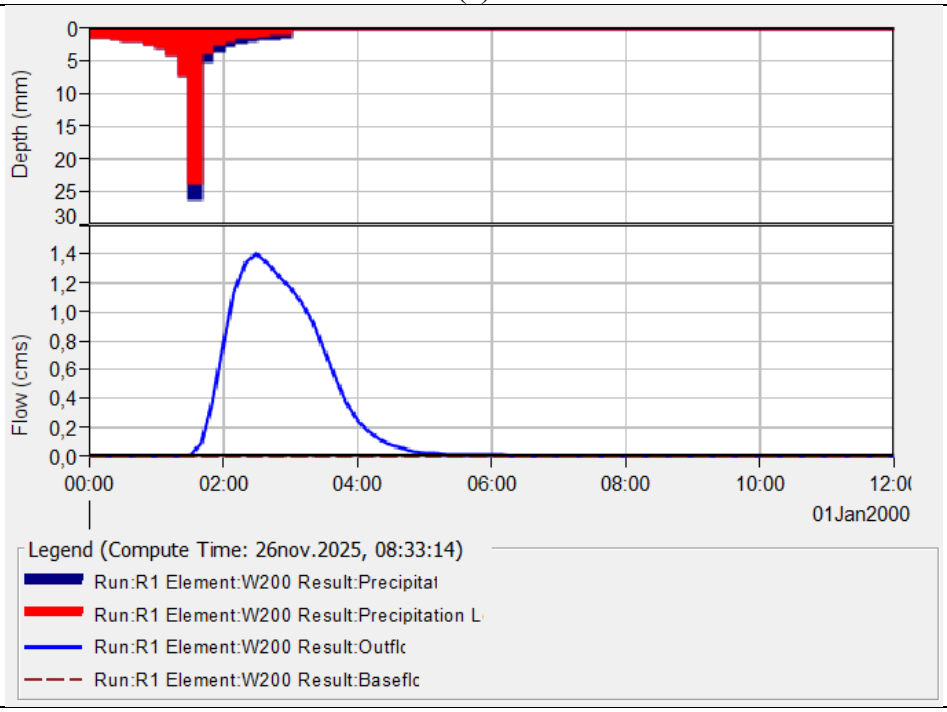
I: caudal de entrada en el tramo (m^3/s).

Para llevar a cabo la simulación del tránsito de avenidas en las microcuencas objeto de estudio se empleó el software HEC-HMS (Figura 15). El caudal máximo probable derivado de la tormenta de diseño y las características geomorfológicas de las microcuencas objeto de estudio fue de 6.1 m^3/s (Tabla 16) con un retraso de la onda dinámica de 90 minutos (Figura 16).

Figura 15. *Modelo hidrológico conceptual del área de estudio (a) y resultados de la abstracción del flujo en la microcuenca de mayor área.*



(a)



(b)

Figura 16. *Retraso de la onda dinámica en el transito de avenidas.*

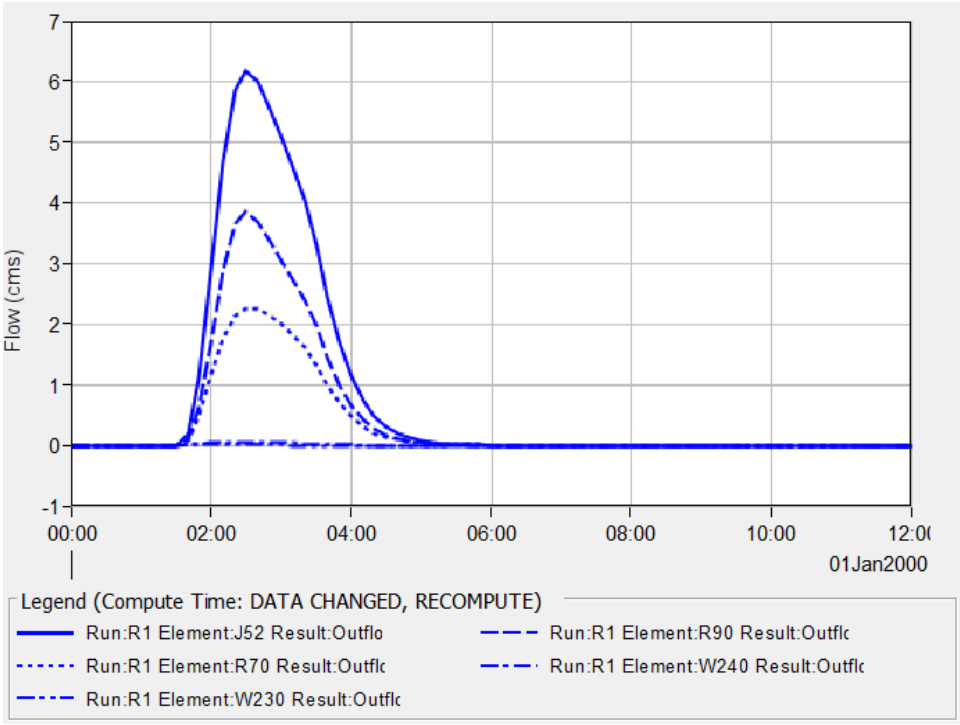


Tabla 16. *Resumen de resultados de la simulación del tránsito de avenidas.*

Project: CuencaCG Simulation Run: R1

Start of Run: 01ene.2000, 00:00
End of Run: 01ene.2000, 12:00
Compute Time:DATA CHANGED, RECOMPUTE

Basin Model: CuencaCG
Meteorologic Model: CuencaCG
Control Specifications:R1_contro

Show Elements: Initial Selection Volume Units: MM 1000 M3 Sorting: Watershed Explorer

Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
Outlet1	3.5	6.1	1 January 2000, 02:...	9.68

7. ESTIMACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA

Los datos de temperatura fueron obtenidos de la red de monitoreo climático del IDEAM. Las estaciones meteorológicas más cercana al área de estudio con información disponible reciente son (Tabla 17): Saboyá La Granja. La estación seleccionada es del tipo climática ordinaria con tecnología convencional cuya fecha de registros de temperatura comienza el 25/05/2009. La estación seleccionada tiene una relación espacial directa con la cuenca que drena hacia el punto de salida de interés. Para efectos del análisis de la precipitación se emplearon los últimos 16 años de registros de temperatura (2009-2025).

Tabla 17. *Estación climática con información disponible en el área de estudio.*

						Coordenadas	
ID	**Nombre**	**Código**	**Tipo**	**Fecha de instalación**	**Fecha de suspensión**	*Longitud*	*Latitud*
1	Saboyá La Granja	24015360	Climática ordinaria	25/05/2009		-73.76	5.70

7.1 Modelos de evapotranspiración empleados

7.1.1 Cenicafé

El método Cenicafé es una adaptación simplificada del método de Penman-Monteith desarrollada por el Centro Nacional de Investigaciones de Café para estimar la evapotranspiración de referencia (ETo) en regiones donde no siempre se cuenta con estaciones meteorológicas completas. El enfoque reduce la dependencia de variables como la velocidad del viento y la radiación neta, reemplazándolas por relaciones empíricas basadas en temperatura, humedad relativa y radiación solar, variables que sí están disponibles en la mayoría de las estaciones del país (Ecuación 5).

$ETP = 1.658e^{-0.0002h} \quad \left[\frac{mm}{día}\right]$	Ecuación 5

Donde,

h: elevación sobre el nivel del mar [m].

Su principal fortaleza es que fue calibrado bajo las condiciones típicas del clima colombiano, especialmente de zonas tropicales de montaña con alta humedad, nubosidad frecuente y fuertes oscilaciones térmicas. Esto permite que el método entregue estimaciones de evapotranspiración consistentes y estables en territorios donde los métodos estándar presentan mayor incertidumbre. En el contexto nacional, el método Cenicafé es ampliamente útil para estudios hidrológicos, balances hídricos agrícolas, planificación del riego y análisis de disponibilidad hídrica en cuencas, ya que permite obtener valores confiables de ETo aun con información climática limitada.

7.1.2 Thornthwaite

El método de Thornthwaite es un procedimiento empírico para estimar la evapotranspiración potencial (ETP) usando principalmente la temperatura media mensual y la latitud como variables de entrada. Es uno de los métodos más utilizados cuando la información meteorológica es limitada, ya que no requiere datos de radiación, viento ni humedad relativa. Su fundamento es la relación directa entre la energía disponible (representada por la temperatura) y la demanda evaporativa de la atmósfera. A partir de estas variables se calcula un índice de calor (I) y un coeficiente de ajuste (a) que permiten estimar la ETP mensual y corregirla según la duración del día (Ecuación 6).

$$TP = 1.6\left(\frac{10T_m}{I}\right)^a \left[\frac{cm}{mes}\right]$$ $$I = 12\left(\frac{T_{anual}}{5}\right)^{1.514}$$ $$a = 67610^{-9}I^3 - 771 * 10^{-7} * I^2 + 179 * 10^{-4} * I + 0.492$$	Ecuación 6

Donde,

T_m: temperatura mensual [°C]

I: índice de calor anual (eficiencia de temperatura)

Este método es especialmente útil en zonas de Colombia donde las estaciones meteorológicas registran pocos parámetros y donde se requiere una aproximación rápida de la evapotranspiración para estudios hidrológicos, balances hídricos o diagnósticos ambientales. Aunque no incorpora

todas las variables que influyen en el proceso, su simplicidad y bajo requerimiento de datos lo convierten en una herramienta práctica para áreas rurales y cuencas con información limitada, ofreciendo resultados aceptables en análisis a escala regional o de planificación.

7.1.3 Turc

El método de Turc es una fórmula empírica para estimar la evapotranspiración potencial (ETP) a partir de variables básicas como la temperatura media, la radiación solar global y, en su versión ajustada, la humedad relativa. Fue desarrollado para climas templados, pero ha mostrado buen desempeño en regiones húmedas, ya que incorpora de manera implícita los efectos de la nubosidad y de la disponibilidad energética (Ecuación 7).

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$ - Si $\frac{P}{L} > 0.316$ $$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad \left[\frac{mm}{año}\right]$$ - Si $\frac{P}{L} < 0.316$ $$ETR = P$$	Ecuación 7

Donde,

P: precipitación media anual [mm/año]

T: temperatura promedio anual [°C]

Su principal ventaja es la simplicidad y el bajo requerimiento de datos, lo que lo hace útil en zonas de Colombia donde no se dispone de datos completos o donde la alta humedad y nubosidad afectan la precisión de métodos basados únicamente en temperatura. En el territorio nacional, el método de Turc se emplea como alternativa práctica para balances hídricos, estudios de oferta hídrica y estimaciones preliminares de ETP en cuencas rurales, entregando valores consistentes

en regiones tropicales húmedas, especialmente en las zonas andinas y del piedemonte donde la disponibilidad de radiación suele ser limitada.

7.2 Evaluación temporal de la temperatura

La temperatura registrada en la estación objeto de estudio muestra un comportamiento mensual estable, con valores multianuales que oscilan entre 14 °C y 15 °C. Los meses más cálidos corresponden a abril y mayo, cuando la temperatura media alcanza aproximadamente 15.1–15.2 °C, mientras que los valores más bajos se presentan en enero y diciembre (14.0–14.3 °C). Esta baja amplitud térmica intraanual, cercana a 1°C, es característica de los climas templados de montaña donde la altitud regula fuertemente la variación de la temperatura (Figura 17).

En la serie anual se observa una tendencia más marcada (Figura 18). Entre 2009 y 2013, la temperatura media anual permanece relativamente constante, alrededor de 14.0–14.4 °C, pero a partir de 2014 se evidencia un incremento sostenido. Los picos más altos se presentan en 2016 (15.3–15.4 °C) y nuevamente en 2023–2024, cuando la temperatura alcanza los valores máximos de toda la serie, entre 15.7 y 16.0 °C. En conjunto, la temperatura anual muestra un aumento aproximado de 1 a 1.5 °C durante el periodo analizado, un comportamiento coherente con la influencia de eventos cálidos como El Niño y con las tendencias de calentamiento observadas en diversas zonas de la región Andina colombiana.

Figura 17. *Temperatura mensual multianual de la estación climática objeto de estudio.*

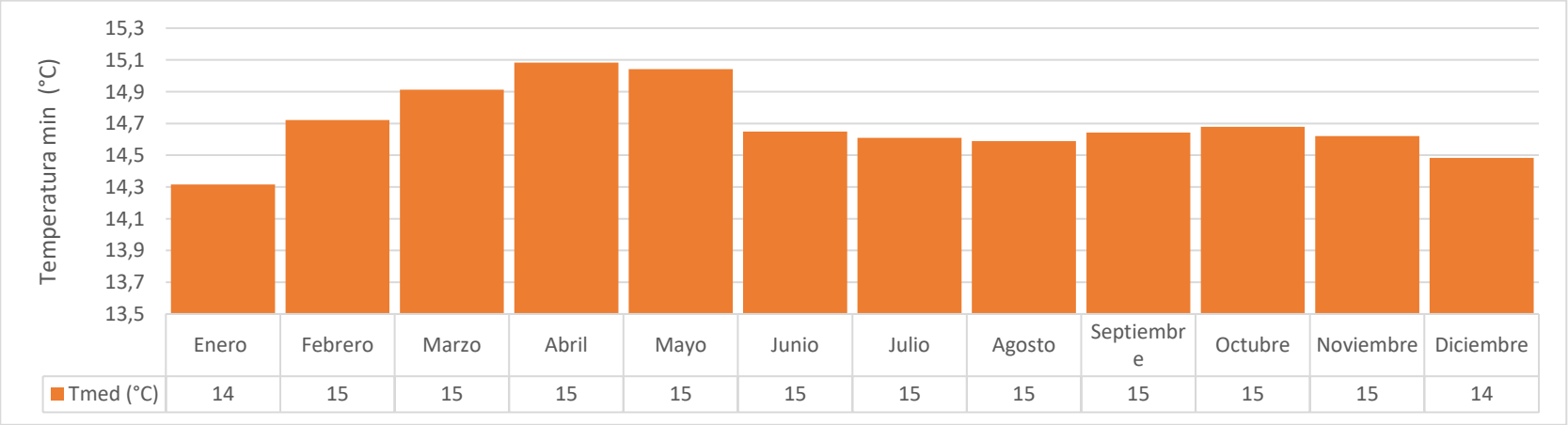
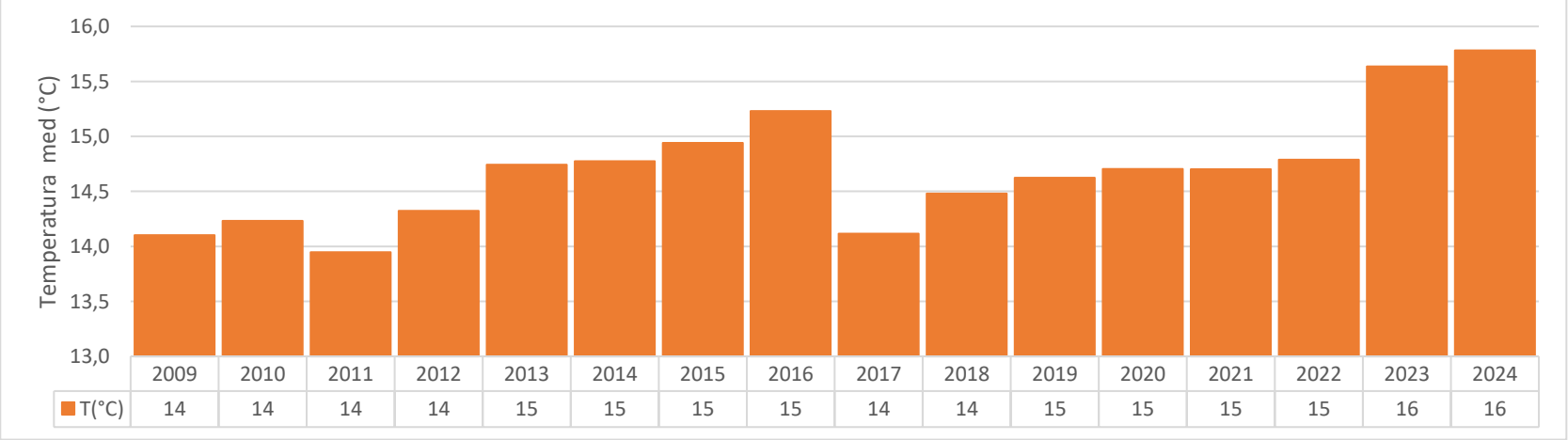


Figura 18. *Temperatura anual estación climática objeto de estudio.*



7.3 Oferta hídrica histórica

La oferta hídrica (excedente hídrico) del área de estudio muestra un comportamiento típico de la región andina, con altas disponibilidades de agua durante la mayor parte del año y una marcada variabilidad interanual influenciada por fenómenos climáticos como El Niño y La Niña (Tabla 18). En general, la oferta anual oscila entre 264 y 800 mm, aunque en años excepcionalmente húmedos, como 2011 (1084 mm) y 2010 (854 mm), los valores superan ampliamente el promedio. Por el contrario, años como 2015 (-30 mm) y 2018 (439 mm) presentan los menores excedentes, reflejando condiciones más secas asociadas a eventos cálidos.

A nivel estacional, las mayores disponibilidades se concentran en los periodos de lluvias de marzo a mayo y octubre a noviembre, cuando los excedentes mensuales frecuentemente superan los 100–180 mm. En contraste, los meses de junio a agosto muestran recurrentemente valores negativos, indicando déficit hídrico intraanual incluso en años generalmente húmedos. En algunos periodos secos también se observan déficits adicionales en diciembre o enero. El área cuenta con una oferta hídrica abundante, pero presenta una distribución estacional muy marcada, con sequía relativa a mitad de año y variaciones anuales dominadas por la dinámica del ENSO.

Tabla 18. *Oferta hídrica mensual en el área de estudio.*

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Oferta (mm)
2009	-19	46	160	108	-12	-13	-41	12	1	81	32	-42	314
2010	-54	7	35	218	89	-4	141	-28	212	89	104	44	854
2011	-4	65	136	257	108	7	2	27	20	159	198	109	1084
2012	4	15	46	195	26	-13	-32	-2	-22	10	30	8	264
2013	-61	40	113	142	77	-36	-47	29	-23	96	27	26	383
2014	-31	106	26	77	87	-40	-35	-31	0	46	109	36	350
2015	-9	-21	48	55	-33	-41	-47	-28	26	17	54	-50	-30
2016	-54	-18	24	173	74	-29	-13	-31	30	121	114	88	479
2017	-12	31	106	85	99	156	-34	70	2	70	97	-42	628
2018	28	12	102	130	130	-42	-27	-45	-12	142	83	-60	439
2019	-43	-9	57	84	57	-39	28	-52	21	95	88	10	297
2020	-23	-5	71	14	4	21	30	-17	103	-31	123	22	314
2021	-35	-36	88	144	93	53	-18	26	58	214	72	6	665
2022	-55	38	131	84	67	101	-5	-5	23	175	144	-22	673
2023	23	44	93	50	15	-26	-46	-28	-29	59	22	-13	163
2024	-66	-35	-38	147	80	95	-57	-40	10	67	68	8	238

7.4 Balance hídrico de la microcuenca

El balance hídrico anual de la cuenca objeto de estudio evidencia un comportamiento bimodal en la precipitación, con picos de lluvia en los meses de abril (198 mm) y octubre (189 mm), y valores mínimos en julio (52 mm) (Tabla 19). Este patrón genera un periodo seco entre julio y agosto, con la menor oferta hídrica (-8-38 mm), y un periodo húmedo entre octubre y noviembre, donde la oferta hídrica máxima alcanza (128-108 mm).

La evapotranspiración potencial (ETp) se mantiene prácticamente constante durante el año, con valores entre 58 y 62 mm, lo que indica una alta estabilidad térmica (temperaturas mensuales promedio entre 14 y 15 °C) y una baja variación de la demanda atmosférica de humedad. Esto permite que, una vez se inicia la temporada de lluvias, la recarga de humedad del suelo ocurra de manera rápida, alcanzando su máxima reserva de 50 mm en abril y manteniéndose constante el resto del año.

La escorrentía total presenta una marcada variación estacional. Los valores más bajos se registran en los meses secos (0 mm entre enero y marzo), mientras que los mayores se concentran entre octubre (128 mm), coincidiendo con los periodos de mayor precipitación. Entre abril y junio la escorrentía se mantiene elevada (entre 1 y 6 mm), lo que evidencia una alta generación de caudal superficial durante más de tres meses del año.

Al aplicar la deducción del 25% para el caudal ecológico, de acuerdo con lo establecido en el Decreto 1076 de 2015 y la Resolución 0865 de 2004 del MADS, se obtiene un caudal disponible que varía desde 2 mm en septiembre (mínimo anual) hasta 52 mm en abril (máximo). Durante la temporada lluviosa (abril a noviembre), los valores promedio del caudal disponible se mantienen alrededor de 20 mm, lo que representa una disponibilidad hídrica adecuada para el abastecimiento de una captación de agua, siempre que se contemple una regulación mínima para los meses de estiaje.

Tabla 19. *Balance hídrico de la cuenca objeto de estudio.*

Parámetro	Unidad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura mensual	ªC	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	14
Precipitación	mm	43	75	139	198	131	72	52	61	98	189	167	73
ET potencial	mm	60	58	62	61	62	60	61	61	60	61	60	60
Oferta hídrica	mm	-17	17	78	137	69	12	-8	1	38	128	108	13
Δ Reservas de la humedad en el suelo	mm	-17	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reserva de agua disponible	mm	33	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
ET efectiva	mm	43	58	62	61	62	60	52	61	60	61	60	60
Déficit	mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Excedente	mm	0	0	28	87	19	0	0	0	0	78	58	0
1/2 Excedente	mm	0	0	14	43	10	0	0	0	0	39	29	0
1/2 Escorrentía del mes anterior	mm	12	6	3	8	22	16	8	4	2	1	20	24
Escorrentía total	mm	**12**	**6**	**17**	**52**	**31**	**16**	**8**	**4**	**2**	**40**	**49**	**24**
Caudal ecológico (25%)	mm	3	2	4	13	8	4	2	1	0	10	12	6
Caudal disponible	mm	9	5	13	39	24	12	6	3	1	30	37	18
Oferta hídrica (PP-ETp)	mm	-17	17	78	137	69	12	-8	1	38	128	108	13

7.5 Aforo de la corriente superficial

7.5.1 Procedimiento de realización del aforo

Para estimar el caudal medio de la quebrada San Joaquín se realizó un aforo volumétrico (Figura 19), conforme a los lineamientos mínimos para la evaluación de fuentes hídricas superficiales (Resolución 0865 de 2004 del MAVDT). Esta normativa establece los procedimientos mínimos para la determinación del caudal ecológico y la evaluación del recurso hídrico. El aforo se efectuó durante siete días consecutivos (10/11/2025-16/11/2025) para abarcar diferentes condiciones meteorológicas de la zona de estudio. Las mediciones de caudal se realizaron en tres franjas horarias: 07:00, 12:00 y 16:00 horas; con el propósito de capturar las fluctuaciones de caudal asociadas a la temperatura, la evapotranspiración y los posibles aportes locales o variaciones por infiltración.

Figura 19. *Aforo de la quebrada San Joaquín.*



Se empleo el método volumétrico para aforar la corriente en dos puntos: Bocatoma antigua y Bocatoma nueva. Este método consiste en determinar el tiempo requerido para llenar un recipiente de volumen conocido, generalmente expresado en litros, bajo condiciones controladas de estabilidad del flujo. En cada punto de observación se realizaron seis repeticiones consecutivas con el fin de reducir la incertidumbre instrumental y operativa, y posteriormente se obtuvo el valor promedio del caudal instantáneo (Ecuación 8).

$$Q = \left(\sum_{i=0}^{n} \frac{V_i}{t_i}\right)/n$$	Ecuación 8

Donde:

Q: caudal (L/s).

V_i: volumen (L).

t: tiempo de recorrido (s).

n: numero de repeticiones de la medida (-).

7.5.2 Principales resultados del aforo

Los datos promedio diarios se procesaron estadísticamente para obtener el caudal medio semanal, el cual representa la condición hidrológica base del cuerpo de agua durante el periodo de monitoreo. Este valor se considera representativo para los cálculos de balance hídrico y estimación de la disponibilidad de agua para captación, conforme a lo dispuesto en el Decreto 1076 de 2015, que exige la caracterización hidrológica en un sistema de acueducto. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se resumen los resultados obtenidos en los dos puntos de medición.

Tabla 20. *Resumen de resultados del aforo en los puntos de monitoreo.*

Quebrada San Joaquín			
Día	**Toma 1**	**Toma 2**	**Toma 3**
1	6.34	4.79	5.78

Quebrada San Joaquín			
Día	**Toma 1**	**Toma 2**	**Toma 3**
2	6.36	4.91	5.93
3	6.11	5.22	5.97
4	4.15	4.74	5.89
5	7.53	4.14	6.22
6	6.62	4.69	5.77
7	6.35	4.91	5.76
Promedio	**6.21**	**4.77**	**5.90**

Se evidencian una variación diurna moderada entre las tres franjas horarias (07:00, 12:00 y 16:00 horas) de medición del caudal (4.15-6.22 L/s). Estas fluctuaciones responden principalmente a factores microclimáticos, fisiográficos y de dinámica hídrica superficial y subterránea característicos de la región andina subhúmeda. Durante las primeras horas de la mañana (07:00 h), los caudales tienden a ser relativamente mayores o estables, debido a que en la noche se presentan condensación de humedad atmosférica, formación de rocío y captación de neblina por la vegetación, lo que incrementa temporalmente la infiltración superficial y el aporte base al cauce. Este efecto es típico en ecosistemas de montaña con cobertura boscosa, donde la interceptación de neblina y la descarga subsuperficial lenta contribuyen a sostener el caudal base durante las primeras horas del día.

Hacia el mediodía (12:00 h) se observa, en la mayoría de los días, una disminución del caudal, asociada al incremento de la evapotranspiración potencial (ETp) y al aumento de la temperatura ambiente (alrededor de 19 °C). En esta franja horaria, la humedad del suelo disminuye por evaporación y por el consumo de agua de la vegetación, reduciendo el aporte subsuperficial al cauce y generando una caída temporal en el flujo superficial. En la tarde (16:00 h), los caudales tienden a recuperarse parcialmente o estabilizarse, debido al descenso de la radiación solar, la reducción de la evapotranspiración y, en algunos días, al inicio de lluvias convectivas propias de la zona andina durante la temporada húmeda.

En la Tabla 21 se muestra en análisis de estadística descriptiva sobre los dos puntos de monitoreo. El caudal medio de la quebrada San Joaquín es de 5.63 L/s, con una mediana de 5.78 L/s, lo que evidencia un flujo sostenido con pocas fluctuaciones a mediano plazo. La desviación estándar (0.87 L/s) refleja una moderada dispersión, lo cual es esperable en un punto con pequeñas variaciones locales del flujo. En términos generales los resultados demuestran un flujo sostenido, característico de las microcuencas altoandinas con un alto potencial de provisión de agua.

Tabla 21. *Estadística descriptiva de los resultados del aforo.*

Parámetro	Unidad	Quebrada San Joaquín
Medidas de tendencia central		
Media	m3/s	5.6276
Moda	m3/s	-
Mediana	m3/s	5.7800
Medidas de dispersión		
Varianza	(m3/s)^2	0.7526
Desviación estándar	m3/s	0.8675
Rango	m3/s	3.3900
Coeficientes adimensionales		
C. Asimetría	-	-0.0024
C. Curtosis	-	-0.2657
C. Variación	-	0.1542

8. CONCLUSIONES

- La cuenca presenta una oferta hídrica anual robusta, con excedentes que, según los cálculos de balance hídrico multianual, oscilan entre 200 y 600 mm/año, alcanzando valores máximos de hasta 1084 mm en 2011 y 854 mm en 2010. Estos excedentes reflejan una disponibilidad natural de agua suficiente y sostenida para satisfacer la demanda de un acueducto veredal, incluso bajo escenarios hidrológicos variables. Estos resultados fueron corroborados con el aforo realizado sobre la Quebrada San Joaquín la cual tiene un caudal medio de 5.63 L/s suficiente para abastecer el acueducto veredal Palo Blanco (QMH=1.72 L/s) y sostener el caudal ambiental (1.41 L/s) durante todo el año hidrológico.

- El análisis climático evidencia que la precipitación media anual de la cuenca se sitúa alrededor de 1300 mm, mientras que la evapotranspiración estimada con métodos como Thornthwaite y Turc se ubica en promedio entre 720 mm/año . La diferencia positiva entre ambas variables confirma la presencia de superávit hídrico en la mayor parte del año, condición favorable para la recarga superficial y subterránea. El balance hídrico positivo confirma la disponibilidad de agua de la quebrada San Joaquín para abastecer al acueducto veredal Campo Grande.

- La estacionalidad observada, con máximos de excedente en marzo–mayo y octubre–noviembre, y déficits moderados en junio–agosto, coincide con el comportamiento hidrometeorológico típico de la región Andina. Esta estabilidad climática permite proyectar con certeza la continuidad del abastecimiento, en concordancia con los criterios de confiabilidad exigidos por el RAS 2020, Título B (Fuentes de Abastecimiento).

- Los eventos de déficit registrados (especialmente en julio y agosto de algunos años) son de baja magnitud en comparación con los excedentes anuales, lo que indica que la cuenca mantiene capacidad de regulación natural, favorecida por su topografía y cobertura vegetal. Esta regulación cumple con los criterios de sostenibilidad establecidos en el RAS 2020, que exige evaluar la permanencia del recurso en condiciones climáticas extremas.

- La recurrencia de años húmedos, con excedentes superiores a 1893 mm (por ejemplo 2011), demuestra que la cuenca responde de forma directa a los eventos de mayor precipitación

asociados a La Niña, lo cual incrementa la disponibilidad del recurso. Este comportamiento hidrológico constituye un factor de seguridad adicional frente a la demanda de poblaciones rurales cuya dotación mínima, según el RAS 2020, es relativamente baja (≤130 L/hab.día).

- En conjunto, los resultados hidrológicos del informe muestran que la cuenca Campo Grande supera los requisitos de disponibilidad, permanencia y suficiencia establecidos en la normativa vigente para la selección de fuentes superficiales de abastecimiento. No obstante, es importante tener en cuenta que durante los meses de menor precipitación y mayor temperatura se llega a presentar un déficit hídrico por lo que se recomienda disponer de tanques de almacenamiento que amortigüen la variación de la oferta hídrica en los meses más secos del año.

REFERENCIAS

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (1997). GTC 154: Guía para la medición de caudales en corrientes naturales. Bogotá, Colombia: ICONTEC.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2010). Guía metodológica para la estimación de la disponibilidad hídrica en cuencas hidrográficas. Bogotá, Colombia: IDEAM.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2014). Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Santander. Bogotá, Colombia: IGAC.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá, Colombia: MADS.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS. (2015). Decreto 1076 de 2015: Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá, Colombia: MADS.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT. (2004). Resolución 0864 de 2004: Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del caudal ambiental o ecológico en cuerpos de agua superficiales. Diario Oficial No. 45.592.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio – MVCT. (2000). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2000. Título B: Abastecimiento de Agua Potable. Bogotá, Colombia: MVCT.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio – MVCT. (2017). Resolución 0330 de 2017: Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS). Diario Oficial No. 50.196.

Organización Meteorológica Mundial – OMM. (2012). Guía sobre las prácticas hidrológicas: Medición, análisis, predicción y gestión del caudal (Pub. No. 168). Ginebra, Suiza: OMM.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Applied Hydrology. New York, NY: McGraw-Hill Education.

Bedient, P. B., Huber, W. C., & Vieux, B. E. (2013). Hydrology and Floodplain Analysis (5th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.

Linsley, R. K., Franzini, J. B., Freyberg, D. L., & Tchobanoglous, G. (1992). Ingeniería hidráulica (3.ª ed.). México D.F., México: McGraw-Hill Interamericana.

Ven Te Chow. (1994). Hidrología aplicada. México D.F., México: McGraw-Hill.