



TGI
Grupo Energía Bogotá

AMBIENTAL

**CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE
INFLUENCIA, MEDIO ABIÓTICO**

3.2.4. HIDROLOGÍA

TABLA DE CONTENIDO

3.	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA	1
3.2	Medio Abiótico	1
3.2.4	Hidrología	1
3.2.4.1	Localización hidrográfica	1
3.2.4.2	Morfometría	3
3.2.4.2.1	Características Generales de la Cuenca	4
3.2.4.2.1.1	Área	4
3.2.4.2.1.2	Perímetro	5
3.2.4.2.1.3	Longitud de la corriente principal	5
3.2.4.2.1.4	Longitud Axial de la cuenca	6
3.2.4.2.1.5	Ancho máximo de la cuenca	6
3.2.4.2.2	Índices morfométricos relacionados con la forma de la cuenca	7
3.2.4.2.2.1	Factor de forma (Kf)	7
3.2.4.2.2.2	Índice de Gravelius o Coeficiente de Compacidad (Kc)	9
3.2.4.2.2.3	Índice de Alargamiento	10
3.2.4.2.3	Sistema de Drenaje	11
3.2.4.2.3.1	Orden de las Corrientes	11
3.2.4.2.3.2	Densidad de drenaje	13
3.2.4.2.3.3	Índice de sinuosidad	15
3.2.4.2.3.4	Índice de asimetría	17
3.2.4.2.3.5	Patrones de drenaje	18
3.2.4.2.4	Características del relieve	22
3.2.4.2.4.1	Altura media	22
3.2.4.2.4.2	Pendiente media de la cuenca	23
3.2.4.2.4.3	Pendiente media de la corriente principal	24
3.2.4.2.5	Tiempo de concentración	27
3.2.4.2.5.1	Kirpich	28
3.2.4.2.5.2	Temez	28
3.2.4.2.5.3	Bransby-Williams	28
3.2.4.2.5.4	California Culverts-Practice (1942)	29
3.2.4.2.5.5	Clark:	29
3.2.4.2.5.6	Giandotti	30
3.2.4.2.5.7	Jhonstone Cross	30
3.2.4.2.5.8	Passini	30
3.2.4.2.5.9	Pérez	31
3.2.4.2.5.10	Valencia y Zuluaga	31
3.2.4.3	Clasificación de los cursos de agua	32
	• Perenes:	32
	• Intermitentes:	32
	• Efímeros:	33
3.2.4.4	Identificación de sistemas lénticos y lóticos	33
3.2.4.4.1	Sistemas lóticos	33
3.2.4.4.2	Sistemas lénticos	36
3.2.4.5	Análisis de Estaciones	39
3.2.4.5.1	Precipitación	39
3.2.4.5.1.1	Análisis de consistencia y homogeneidad	41
3.2.4.5.1.2	Llenado de datos	50
3.2.4.5.1.3	Valores mensuales de la precipitación	51
3.2.4.5.1.4	Distribución espacial de la precipitación	55
3.2.4.5.2	Temperatura	58

3.2.4.6	Régimen hidrológico.....	60
3.2.4.6.1	Cálculo de caudales.....	61
3.2.4.6.2	Caudales máximos.....	62
3.2.4.6.2.1	Coeficiente de Escorrentía (C):.....	62
3.2.4.6.2.2	Cálculo de intensidades.....	64
3.2.4.6.2.3	Resultados caudales máximos.....	68
3.2.4.6.3	Caudales medios.....	69
3.2.4.6.3.1	Evapotranspiración potencial (ETP).....	70
3.2.4.6.3.2	Evapotranspiración real (ETr).....	71
3.2.4.6.4	Caudales mínimos.....	75
3.2.4.7	Indicadores hídricos.....	76
3.2.4.7.1	Índice de Aridez.....	76
3.2.4.7.2	Índice de Regulación Hídrica.....	77
3.2.4.8	Amenaza por inundación.....	80
3.2.4.9	Inventario de fuentes contaminantes.....	81
BIBLIOGRAFÍA.....		84

LISTADO DE FIGURAS

Figura 3-1	Localización general cuencas área de Influencia ECG Palestina.....	3
Figura 3-2	Órdenes de corrientes.....	12
Figura 3-3	Ordenes de corrientes cuencas ECG Palestina.....	12
Figura 3-4	Patrones de drenaje.....	19
Figura 3-5	Patrón de drenaje Quebrada Palmichal.....	20
Figura 3-6	Patrón de drenaje Directos río Campo Alegre - NN.....	21
Figura 3-7	Patrón de drenaje Quebrada Comeguadua.....	22
Figura 3-8	Altura media para las cuencas del área de influencia.....	23
Figura 3-9	Cuerpos de agua lóticos.....	36
Figura 3-10	Cuerpos de Agua Lénticos.....	39
Figura 3-11	Estaciones Hidrometeorológicas.....	40
Figura 3-12	Serie anomalías detectadas regresión multifase estación Arauca.....	42
Figura 3-13	Relación entre los saltos de la estación Arauca y el ONI.....	43
Figura 3-14	Corrección automática homogeneidad estación Arauca.....	44
Figura 3-15	Corrección de la homogeneidad estación Arauca.....	44
Figura 3-16	Serie anomalías detectadas regresión multifase estación La Esperanza.....	45
Figura 3-17	Relación entre los saltos de la estación La Esperanza y el ONI.....	45
Figura 3-18	Corrección de la homogeneidad estación La Esperanza.....	46
Figura 3-19	Serie anomalías detectadas regresión multifase estación Recuerdo.....	47
Figura 3-20	Relación entre los saltos de la estación Recuerdo y el ONI.....	47
Figura 3-21	Corrección de la homogeneidad estación El Recuerdo.....	48
Figura 3-22	Serie anomalías detectadas regresión multifase estación Termales.....	48
Figura 3-23	Relación entre los saltos de la estación Termales y el ONI.....	49

Figura 3-24 Ajuste por medias y mapeo de cuantiles estación Termales	50
Figura 3-25 Corrección de la homogeneidad estación Termales	50
Figura 3-26 Distribución mensual multianual y Total Anual Estación Arauca	53
Figura 3-27 Distribución mensual multianual y Total Anual Estación La Esperanza.....	53
Figura 3-28 Distribución mensual multianual y Total Anual Estación Termales	54
Figura 3-29 Distribución mensual multianual y Total Anual Estación El Recuerdo	54
Figura 3-30 Disitribución de precipitaciones medias e Isoyetas Enero a Junio.....	56
Figura 3-31 Disitribución de precipitaciones medias e Isoyetas Julio a Diciembre	57
Figura 3-32 Disitribución de la precipitación promedio multianual.....	58
Figura 3-33 Distribución de Temperaturas.....	60
Figura 3-34 Poligonos de Thiessen.....	65
Figura 3-35 División Regional de Colombia.....	66
Figura 3-36 Curvas IDF Estación El Recuerdo	67
Figura 3-37 Esquematzación de la curva de duración de caudales y los volúmenes para el cálculo del IRH.....	78
Figura 3-38 Índice de Regulación Hidrica (IRH) para el área de influencia de la ECG Palestina	80
Figura 3-39 Mapa de amenaza por inundación para el área de influencia de la ECG Palestina	81
Figura 3-40 Ubicación geográfica del punto de vertimiento identificado	83

LISTADO DE TABLAS

Tabla 3-1 Clasificación hidrografica con base a IDEAM	2
Tabla 3-2 Rangos IDEAM para tamaños de cuencas.....	4
Tabla 3-3 Clasificación de Cuencas del área de influencia.	5
Tabla 3-4 Perímetro Cuencas del área de influencia.....	5
Tabla 3-5 Longitud de la corriente principal Cuencas del área de influencia.	6
Tabla 3-6 Longitud Axial de las Cuencas del área de influencia.	6
Tabla 3-7 Ancho máximo de las cuencas del área de influencia.....	7
Tabla 3-8 Valores de Factor de Forma.	8
Tabla 3-9 Valores de Factor de Forma de las Cuencas del área de influencia del estudio.	9
Tabla 3-10 Clases de compacidad de acuerdo con el Kc.....	10
Tabla 3-11 Clases de compacidad de acuerdo con el Kc para las Cuencas del área de influencia	10
Tabla 3-12 Índice de Alargamiento	11
Tabla 3-13 Índice de Alargamiento de las cuencas del área de influencia.....	11
Tabla 3-14 Clasificación según la densidad de drenaje	14
Tabla 3-15 Clasificación de las Cuencas del área de influencia según la densidad de drenaje	15
Tabla 3-16 Índice de Sinuosidad.....	16

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	III
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-----

Tabla 3-17 Índice de Sinuosidad para las cuencas del área de influencia	16
Tabla 3-18 Clasificación índice asimétrico	17
Tabla 3-19 Índice de asimetría para las cuencas del área de influencia	17
Tabla 3-20 Clasificación de la pendiente media de una cuenca.....	23
Tabla 3-21 Clasificación de las pendientes de una cuenca	24
Tabla 3-22 Clasificación de las pendientes de las corrientes principales de cada cuenca	25
Tabla 3-23 Parámetros morfométricos de las Cuencas del área de influencia	26
Tabla 3-24 Tiempos de Concentración	32
Tabla 3-25 Inventario de cuerpos de agua lóticos del área de influencia.....	34
Tabla 3-26 Cuerpos de agua léticos en el área de influencia	37
Tabla 3-27 Estaciones Meteorológicas	41
Tabla 3-28 Coeficientes regresión múltiple estimados variables precipitación	51
Tabla 3-29 Registros de Precipitaciones	52
Tabla 3-30 Coeficientes de escorrentía	62
Tabla 3-31 Coeficientes de escorrentía Quebrada Palmichal	63
Tabla 3-32 Coeficientes de escorrentía Directos río Campo Alegre - NN	63
Tabla 3-33 Coeficientes de escorrentía Quebrada Comeguadua	64
Tabla 3-34 Constantes acordes a cada región	66
Tabla 3-35 Intensidades de Lluvia para cada cuenca	68
Tabla 3-36 Caudales máximos Quebrada Palmichal.....	68
Tabla 3-37 Caudales máximos Directos río Campo Alegre - NN	68
Tabla 3-38 Caudales máximos Quebrada Comeguadua.....	69
Tabla 3-39 Radiación solar extraterrestre en mm/día.....	71
Tabla 3-40 Cálculo de ETP y ETr.....	72
Tabla 3-41 Balance hídrico	74
Tabla 3-42 Caudal mínimo Quebrada Palmichal	75
Tabla 3-43 Caudal mínimo Directos río Campo Alegre - NN.....	75
Tabla 3-44 Caudal mínimo Quebrada Comeguadua	76
Tabla 3-45 Categorías del índice de aridez	77
Tabla 3-46 Categorías del índice de regulación hídrica	78
Tabla 3-47 Punto de agua superficial asociado a un vertimiento	82

LISTADO DE ANEXOS

Anexo I. HIDROLOGÍA Y CLIMA

1. Hidrología

1.1 Temperaturas

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	IV
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

- 1.2 Precipitaciones
- 1.3 ETP y ETR
- 1.4 Caudales
- 1.5 Morfometría
- 1.6 Inventario Lóticos

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	V
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	---

3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA

3.2 Medio Abiótico

3.2.4 Hidrología

Entendiendo la hidrología como la ciencia que estudia las aguas terrestres, su origen, movimiento y distribución en nuestro planeta, propiedades físicas y químicas, interacción en el medio ambiente físico y biológico e influencia en las actividades humanas, la hidrología superficial es la rama que se encarga de estudiar los fenómenos y procesos hidrológicos que ocurren en la superficie terrestre.

El presente apartado tiene como objetivo la caracterización hidrológica del Área de Influencia del proyecto en el marco del Estudio de Impacto Ambiental para la Modificación de Licencia Ambiental para la construcción de la estación de compresión de Gas Palestina (ECG) y es desarrollado bajo los lineamientos de los términos de referencia HI-TER-1-05 (MAVDT, 2006) y de la metodología general para la elaboración y presentación de estudios ambientales (MADS & ANLA, 2018)

3.2.4.1 Localización hidrográfica

De acuerdo con el artículo 3° del Decreto 1640 de 2012, una cuenca u hoya hidrográfica se define como el área de aguas superficiales o subterráneas que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar.

La divisoria de aguas o “parte aguas” es el límite establecido entre dos cuencas que permiten separar las aguas de una cuenca de otra, se traza sobre el plano topográfico (o con un modelo tridimensional en lo posible), por medio de modelos de elevación digital y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), o por las curvas de nivel de máximas alturas que bordean la cuenca, dividiendo las aguas lluvias hacia un lado y otro lado, siguiendo los criterios de delimitación de cuencas.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	1
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	---

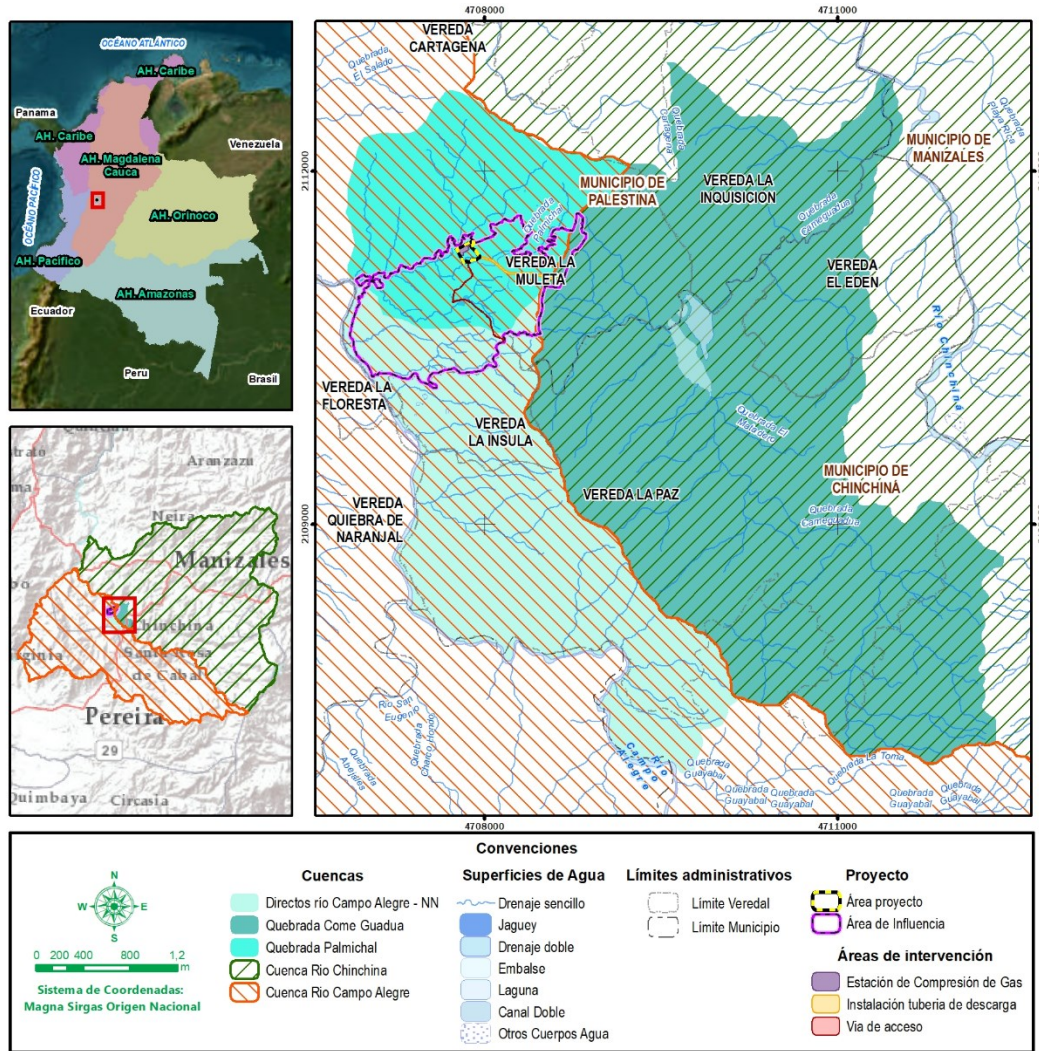
El área de influencia del proyecto se encuentra ubicada geográficamente en la zona rural del municipio de Palestina en el Departamento de Caldas, hacia el sur-occidente de la cabecera municipal, en la vereda La Mulata; dentro del Área Hidrográfica Magdalena-Cauca (2), en la Zona Hidrográfica del Cauca (26) que a su vez se encuentra en las Subzonas Hidrográficas del Río Otún y otros directos al Cauca - 2613, (CORPOCALDAS, 2023) y contiene las unidades de orden III Quebrada Palmichal y Directos río Campo Alegre - NN, y del Río Chinchiná – 2615 (CORPOCALDAS, 2016) el cual contiene la unidad de orden III Quebrada Comeguadua, ver Tabla 3-1 y Figura 3-1. Por propósitos de escritura la unidad hidrográfica Directos río Campo Alegre – NN, a partir de ahora será mencionada en el texto como “Campo alegre - NN”.

Tabla 3-1 Clasificación hidrográfica con base a IDEAM

Área Hidrográfica	Zona Hidrográfica	Subzona Hidrográfica	Nivel I (NI)	Nivel II (NII)	Nivel III (NIII)
Magdalena-Cauca (2)	Cauca (26)	Río Otún y otros directos al Cauca (2613)	Subcuenca Río Campoalegre (2613-02)	Directos río Campo alegre (2613-02-01)	Quebrada Palmichal (2613020101)
				Directos río Campo alegre (2613-02-01)	Directos río Campo Alegre - NN (2613020102)
		Río Chinchiná (2615)	Subcuenca Río Chinchiná (2615-02)	Directos, río Chinchiná	Quebrada Comeguadua (2615020035)

Fuente: CONSGA BIC S.A.S, 2024

Figura 3-1 Localización general cuencas área de Influencia ECG Palestina



Fuente: Corporación Autónoma Regional de Caldas (2016, 2023), adaptado por CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.4.2 Morfometría

Las características físicas (geología, clima, topografía, suelo, cobertura vegetal) de la red de drenaje de una cuenca hidrográfica representan un condicionante para la ocurrencia del flujo de agua en los drenajes naturales que se localizan en ella, respondiendo de una forma dinámica a estos, determinando así su régimen fluvial.

El análisis morfométrico permite interpretar y predecir los comportamientos hidrológicos y de torrencialidad de una cuenca hidrográfica, este análisis es realizado mediante la

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	3
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	---

obtención de índices morfométricos a partir de la forma de la cuenca, red de drenaje y relieve; estos índices se desarrollan a continuación para las unidades hidrográficas identificadas en el área de influencia del estudio que pertenecen a la Cuenca Hidrográfica del Río Campoalegre (Quebrada Palmichal y Directos río Campo Alegre - NN) y a la Cuenca Hidrográfica del Río Chinchiná (Quebrada Comeguadua).

3.2.4.2.1 Características Generales de la Cuenca.

Las características generales de la cuenca son calculadas debido a que presentan la información base para el cálculo de los indicadores morfométricos. A continuación, se realiza la descripción de cada una de sus variables:

3.2.4.2.1.1 Área

El área de la cuenca es probablemente la característica física y geomorfológica más importante en el análisis hidrológico de la misma. Está definida como la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigida directa o indirectamente a un mismo cauce natural (Global Water Partnership, 2011). Se obtiene automáticamente a partir de la digitalización y vectorización de las cuencas por medio de software de información geográfica, con base a la línea divisoria (se refiere línea divisoria, a la delimitación de la cuenca hidrográfica). Las cuencas hidrográficas pueden ser clasificadas usando su área como parámetro de acuerdo con la clasificación dada por Singh (1992) tal como se observa en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2 Rangos IDEAM para tamaños de cuencas

ÁREA (Km ²)	CLASIFICACIÓN DE LA CUENCA
> 500	Grande
100 – 500	Mediana
10 – 100	Pequeña
<10	Microcuenca

Fuente: Singh, 1992.

Por medio de software GIS y el modelo de elevación digital ALOS PALSAR con una resolución 12,5 m x 12,5 m, se obtuvo la delimitación de las áreas hidrográficas en las que se encuentra el área de influencia del proyecto Estación de Compresión de Gas de Palestina, las cuales se presentan en la Tabla 3-3.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	4
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	---

Tabla 3-3 Clasificación de Cuencas del área de influencia.

NOMBRE	ÁREA (Km ²)	CLASIFICACIÓN
Quebrada Palmichal	3,13	Microcuenca
Directos río Campo Alegre - NN	5,33	Microcuenca
Quebrada Comeguadua	13,49	Pequeña

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.4.2.1.2 Perímetro

El perímetro de la cuenca o la longitud de la línea divisoria de la cuenca es un parámetro importante, pues en conexión con el área de la cuenca pueden inferirse diferentes generalidades acerca de la misma con su forma, longitud superficial o diferentes índices que pueden llegar a ser necesarios para su clasificación (Global Water Partnership, 2011). El valor del perímetro es obtenido automáticamente a partir de la digitalización y vectorización de las cuencas en el software SIG.

Si bien el perímetro es una medida o parámetro que no indica nada por sí solo, se convierte en un insumo fundamental para el cálculo de los parámetros de forma de la cuenca, partiendo del enunciado que dice: “De todas las figuras planas con igual perímetro, el círculo es la de mayor área”, y conociendo que dicha forma de cuenca tiende a ser las más torrencial y por ende la menos conveniente. En la Tabla 3-4, se presentan los perímetros medidos para cada cuenca.

Tabla 3-4 Perímetro Cuencas del área de influencia.

NOMBRE	PERÍMETRO (Km)
Quebrada Palmichal	7,30
Directos río Campo Alegre - NN	14,29
Quebrada Comeguadua	20,03

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.4.2.1.3 Longitud de la corriente principal

La longitud de la corriente principal es la distancia total desde el inicio del cuerpo de agua, hasta el punto de concentración de la cuenca (Global Water Partnership, 2011). Esta longitud se mide a partir de software de Sistemas de Información Geográfica, el cual permite trazar la red de drenajes de las cuencas y determinar la corriente principal.

En la Tabla 3-5 se presentan las longitudes de las corrientes principales de cada cuenca.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	5
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	---

Tabla 3-5 Longitud de la corriente principal Cuencas del área de influencia.

NOMBRE	LONGITUD CORRIENTE PRINCIPAL (Km)
Quebrada Palmichal	2,72
Directos río Campo Alegre - NN	*6,85
Quebrada Comeguadua	9,97

Esta cuenca no tiene drenaje principal por tanto se consideró la longitud del segmento del río Campo Alegre que delimita esta cuenca, dado que es la distancia máxima que demora la escorrentía en llegar hasta el punto más bajo

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.4.2.1.4 Longitud Axial de la cuenca

La longitud axial de una cuenca es entendida como la distancia desde el punto de concentración hasta el punto más lejano y elevado dentro de la misma, este deber ser medido sobre el eje de la corriente principal y en línea recta (Horton, 1932). Esta longitud se obtiene a partir del software GIS con el cual se mide este parámetro sobre el eje de la corriente principal. En la Tabla 3-6 se presenta la longitud axial de cada una de las cuencas identificadas en el área de influencia del estudio.

Tabla 3-6 Longitud Axial de las Cuencas del área de influencia.

NOMBRE	LONGITUD AXIAL (Km)
Quebrada Palmichal	2,53
Directos río Campo Alegre - NN	5,02
Quebrada Comeguadua	5,84

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

La longitud axial de la cuenca junto con la longitud de la corriente principal, dan una idea del comportamiento hidráulico de la cuenca, entre más corta sea esta longitud, la tendencia a generar avenidas torrenciales es más alta, puesto que los tiempos de desplazamiento son más cortos, por lo tanto, no habrá tiempo de atenuar las crecidas.

No existe una relación de distancia de longitud axial que determine qué tan larga o corta puede llegar a ser una cuenca, pero este criterio hace parte de un análisis multiparamétrico que permite conocer el comportamiento hidráulico e hidrológico de la misma. Se debe tener en cuenta los resultados de cada uno de los parámetros que se analizan durante toda la caracterización morfométrica, al final esta relación permitirá conocer que tan torrencial puede llegar a ser la cuenca objeto de estudio.

3.2.4.2.1.5 Ancho máximo de la cuenca

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	6
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	---

Este es un parámetro de suma importancia, ya que permite tener una idea de la forma de la cuenca, es decir, su morfometría. El ancho de la cuenca se mide directamente en el software empleado para la delimitación de áreas, y se determina el ancho máximo aproximado de cada una de las cuencas objeto de estudio, acogiéndonos a la definición dada por la *Guía Básica Para La Caracterización Morfométrica de Cuencas Hidrográficas* (Reyes Trujillo et al., 2010), la cual sostiene que el ancho máximo de la cuenca se define como la distancia medida perpendicularmente a la longitud axial que posea la mayor magnitud de la cuenca. En la Tabla 3-7 se presentan los anchos máximos de las cuencas del área de influencia.

Tabla 3-7 Ancho máximo de las cuencas del área de influencia.

NOMBRE	ANCHO MÁXIMO (Km)
Quebrada Palmichal	1,86
Directos río Campo Alegre - NN	1,63
Quebrada Comeguadua	3,10

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.4.2.2 Índices morfométricos relacionados con la forma de la cuenca

Los factores geológicos, principalmente, son los encargados de moldear la fisiografía de una región y particularmente la forma que tienen las cuencas hidrográficas.

Para explicar cuantitativamente la forma de la cuenca, se compara con figuras geométricas conocidas como lo son: el círculo, el óvalo, el cuadrado y el rectángulo, principalmente.

Los índices morfométricos se relacionan directamente con el tiempo de concentración, ya que, dependiendo de la forma de la cuenca, el tiempo que tarda una gota de agua en recorrer el inicio de la cuenca hasta su desembocadura puede tener variaciones generando o no eventos de torrencialidad. Por ejemplo, una cuenca más redondeada genera eventos torrenciales y tiempos de concentración muy cortos, una cuenca alargada hace que en eventos de precipitación significativos la corriente principal tenga el tiempo suficiente de atenuarse sin generar eventos de torrencialidad (Reyes Trujillo et al., 2010).

3.2.4.2.2.1 Factor de forma (Kf)

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	7
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	---

Este factor es uno de los más utilizados para medir la forma de la cuenca, fue desarrollado por Horton (1932) y es expresado mediante la ecuación:

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

Donde:

A = Área de la cuenca (Km²)

L = Longitud axial de la corriente (Km)

Es un parámetro adimensional y la longitud de la cuenca puede considerarse según tres criterios diferentes: la longitud del cauce principal considerando su sinuosidad, la longitud del cauce principal considerando el eje de este, o la distancia en línea recta entre el punto de control de la cuenca y el punto más alejado de este.

Si la forma de la cuenca es aproximadamente circular, entonces del valor de Factor de Forma (Kf) será cercano a uno (1). Mientras que, las cuencas más alargadas tendrán un Factor de Forma (Kf) menor. En las cuencas alargadas, las descargas son de menor volumen debido a que el cauce de agua principal es más largo que los cauces secundarios y los tiempos de concentración para eventos de precipitación son distintos. Los valores interpretativos del factor de forma de Horton (1945), se presentan en la Tabla 3-8.

Tabla 3-8 Valores de Factor de Forma.

VALORES APROXIMADOS	FORMA DE LA CUENCA
<0,22	Muy Alargada
0,22 – 0,30	Alargada
0,30 – 0,37	Ligeramente Alargada
0,37 – 0,45	Ni alargada ni ensanchada
0,45 – 0,60	Ligeramente ensanchada
0,60 – 0,80	Ensanchada
0,80 – 1,20	Muy Ensanchada
>1,20	Rodeando el desagüe

Fuente: Horton (1945), adaptado por CONSGA BIC S.A.S., 2024

En la Tabla 3-9 se presentan los valores de factor de forma obtenidos para cada una de las cuencas:

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	8
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	---

Tabla 3-9 Valores de Factor de Forma de las Cuencas del área de influencia del estudio.

NOMBRE	FACTOR DE FORMA (KF)	CLASIFICACIÓN
Quebrada Palmichal	0,49	Ligeramente ensanchada
Directos río Campo Alegre - NN	0,21	Alargada
Quebrada Comeguadua	0,40	Ni alargada ni ensanchada

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Según esta característica, el factor de forma de la Quebrada Palmichal es 0,49, lo que indica una forma intermedia entre alargada y ensanchada, y su respuesta hidrológica será moderada, con crecidas no demasiado rápidas. Por otro lado, Directos río Campo Alegre - NN tiene un KF de 0,21, lo que sugiere una cuenca alargada, caracterizada por una concentración de caudales más lenta, lo que reduce el riesgo de crecidas bruscas. Finalmente, la Quebrada Comeguadua, con un KF de 0,40, no es alargada ni ensanchada, lo que provoca una respuesta hidrológica moderada, haciendo que las crecidas sean suaves y distribuidas en el tiempo.

3.2.4.2.2.2 Índice de Gravelius o Coeficiente de Compacidad (Kc)

Este coeficiente es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo equivalente, es decir, con un área igual que el de la cuenca evaluada y es un indicador de la irregularidad de la cuenca, expresado mediante la siguiente ecuación:

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

P = Perímetro de la cuenca (Km)

A = Área de la cuenca (Km²)

En la Tabla 3-10 se presentan las categorías para el análisis de este parámetro y en la Tabla 3-11 se presentan los Coeficientes de Compacidad para las cuencas del área de estudio.

Tabla 3-10 Clases de compacidad de acuerdo con el Kc.

RANGOS DE KC	CLASES DE COMPACIDAD
<1,25	Redonda a oval Redonda
1,25 – 1,50	De oval redonda a oval oblonga
1,50 – 1,75	De oval oblonga a rectangular oblonga

Fuente: Llamas (1993), adaptado por CONSGA BIC S.A.S., 2024

Tabla 3-11 Clases de compacidad de acuerdo con el Kc para las Cuencas del área de influencia

NOMBRE	COEFICIENTE DE COMPACIDAD (Kc)	CLASIFICACIÓN
Quebrada Palmichal	1,16	Redonda a oval Redonda
Directos río Campo Alegre - NN	1,73	De oval oblonga a rectangular oblonga
Quebrada Comeguadua	1,53	De oval oblonga a rectangular oblonga

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024

Este parámetro está relacionado con el factor de forma, y permite interpretar el comportamiento hidráulico de las cuencas. El coeficiente de compacidad de la Quebrada Palmichal es 1,16, lo que indica que su forma varía entre oval redonda, lo que sugiere una cuenca relativamente compacta con un comportamiento hidrológico más concentrado. Directos río Campo Alegre - NN presenta un coeficiente de 1,73, lo cual significa que su forma es alargada, por tanto, también lo es su respuesta hidrológica. Por último, la Quebrada Comeguadua, con un coeficiente de 1,53, tiene una forma más elongada, variando entre oval oblonga y rectangular oblonga, lo que implica una menor compacidad y, por tanto, una respuesta hidrológica más dispersa y lenta.

3.2.4.2.2.3 Índice de Alargamiento

Relaciona la longitud del cauce de la cuenca, medida en el sentido principal, y el ancho máximo de ella. Éste índice define si la cuenca es alargada, cuando su valor es mucho mayor a la unidad, o si es muy achatada, cuando son valores menores a la unidad.

$$I_a = \frac{\text{Long. Axial}}{\text{Ancho Máximo de la cuenca}}$$

En la Tabla 3-12 se presenta la clasificación del índice de alargamiento de la cuenca de acuerdo con los rangos de valor y en la Tabla 3-13 se observa el índice de alargamiento de las cuencas identificadas en el área de influencia del estudio.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	10
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

Tabla 3-12 Índice de Alargamiento

RANGOS	CLASIFICACIÓN DE ALARGAMIENTO DE LA CUENCA
<1,4	Poco alargada
1,5 – 2,8	Moderadamente alargada
2,9 – 4,2	Alargada
>4,2	Muy alargada

Fuente: Reyes Trujillo et al. (2010), adaptado por CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Tabla 3-13 Índice de Alargamiento de las cuencas del área de influencia

NOMBRE	ÍNDICE DE ALARGAMIENTO (Ia)	CLASIFICACIÓN
Quebrada Palmichal	1,36	Poco alargada
Directos río Campo Alegre - NN	3,08	Alargada
Quebrada Comeguadua	1,88	Moderadamente alargada

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

El índice de alargamiento de las cuencas asociadas al área de influencia de la ECG, el índice de alargamiento de la Quebrada Palmichal es 1,36, lo que indica que es poco alargada, sugiriendo una cuenca más circular, lo que facilita una respuesta hidrológica rápida. La Directos río Campo Alegre - NN tiene un índice de 3,08 lo que la clasifica como alargada, lo que sugiere una respuesta muy lenta en comparación con cuencas menos alargadas. Finalmente, la Quebrada Comeguadua, con un índice de 1,88, también es moderadamente alargada, pero menor a Directos río Campo Alegre, lo que implica una respuesta hidrológica más dispersa y gradual.

En ANEXOS VI. *HIDROLOGÍA Y CLIMA* \1. *Hidrología* \1.5 *Morfometría* se encuentran las memorias de cálculo de los parámetros morfométricos en donde pueden ser verificados los resultados presentados.

3.2.4.2.3 Sistema de Drenaje

Está constituido por el río principal y sus tributarios; a continuación, se definen sus características.

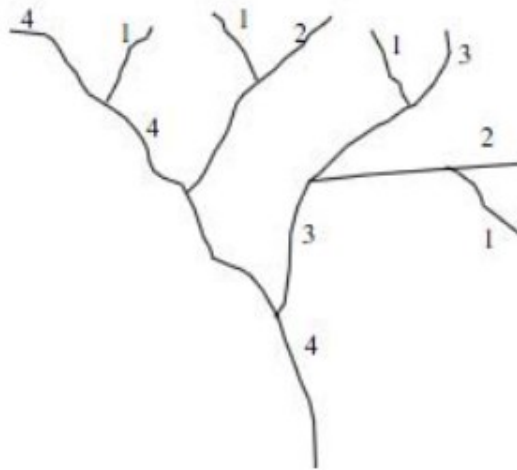
3.2.4.2.3.1 Orden de las Corrientes

Refleja el grado de ramificación o bifurcación dentro de una cuenca hidrográfica. Horton (1945) dio origen al estudio cuantitativo de redes de ríos. Desarrolló un sistema para

ordenar las redes de ríos y derivó algunas leyes al relacionar el número y la longitud de los ríos de diferente orden. El sistema de ordenamiento de ríos de Horton, es como sigue:

- Los cauces de primer orden (1) son aquellos que no poseen tributarios.
- Los cauces de segundo orden (2) tienen afluentes de primer orden.
- Los cauces de tercer orden (3) reciben influencia de cauces de segundo orden, pudiendo recibir directamente cauces de primer orden.
- Un canal de orden n puede recibir tributarios de orden $n-1$ hasta 1.
- El orden de la cuenca de drenaje es el mismo del río a su salida I , el mayor orden en la cuenca (Chow, 1994).

Figura 3-2 Órdenes de corrientes

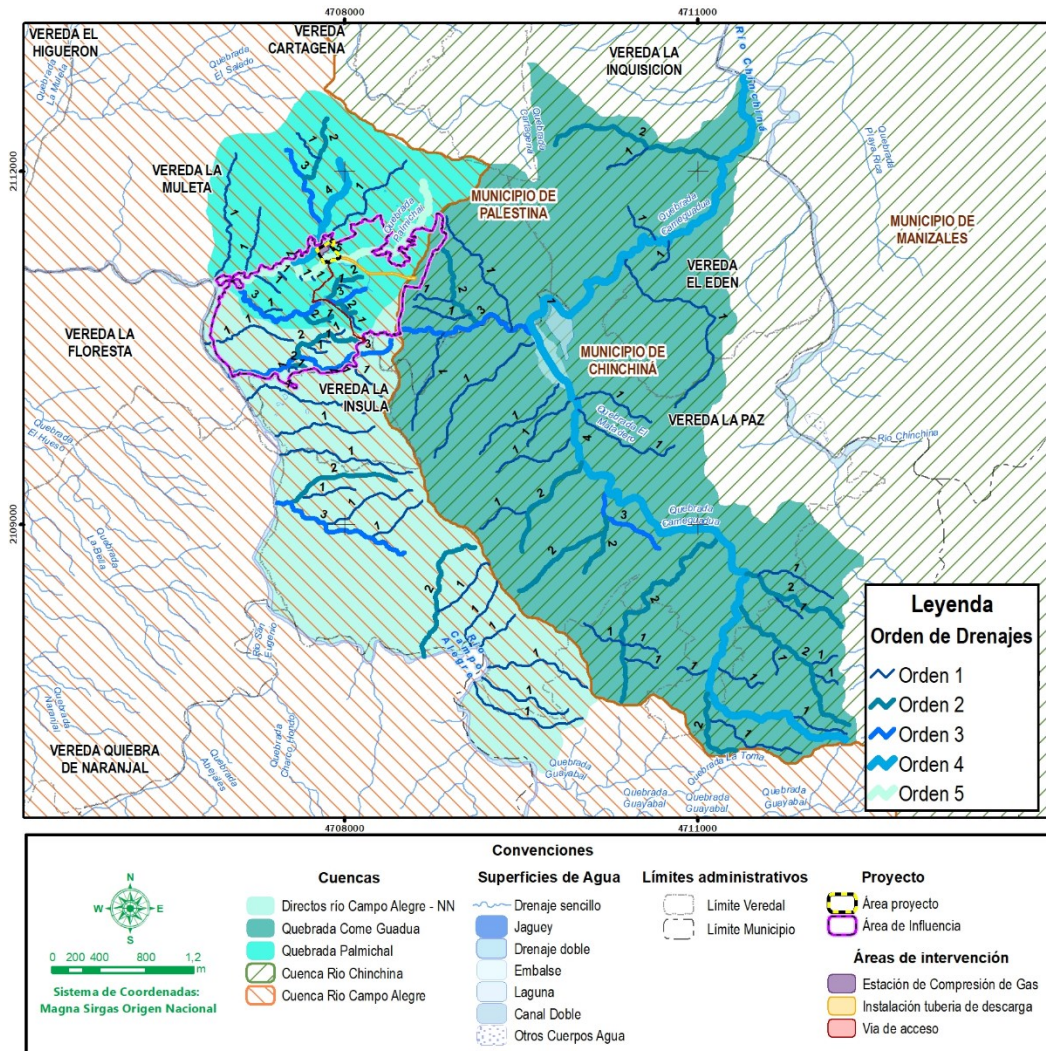


Fuente: Horton 1945.

En la Figura 3-3 se presentan los órdenes de corrientes para las cuencas identificadas en el área de influencia de la ECG Palestina.

Figura 3-3 Ordenes de corrientes cuencas ECG Palestina

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	12
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----



Fuente: CONSGA BIC S.A.S.,2024

Las cuencas del área de influencia son de orden: Quebrada Palmichal orden 5, Directos río Campo Alegre - NN orden 3 y Quebrada Comeguadua de orden 4.

*Se aclara que el orden de drenaje del río campo alegre es mayor, pero al considerar solo el sistema de drenaje conformado por la unidad hidrográfica Directos río Campo Alegre – NN este es de orden 3, según la metodología anteriormente descrita.

3.2.4.2.3.2 Densidad de drenaje

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	13
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

La sumatoria de la totalidad de los drenajes de la cuenca hidrográfica, es decir, la sumatoria del cauce principal junto con sus afluentes, corresponde a la longitud total de cauces de la cuenca, este valor es determinado por medio de herramientas de sistemas de información geográfica. La densidad de drenaje es entonces, la relación entre la longitud total de cauces de la cuenca y el área de esta.

$$D_d = \frac{L_t}{A}$$

Donde:

Dd = Densidad de drenaje (Km/Km²)

Lt = Longitud total de las corrientes de todos los órdenes (Km)

Ac = Área total de la cuenca (Km²)

La densidad de drenaje (Dd) usualmente toma valores entre 0,5 km/km² para cuencas con drenaje pobre y hasta 3,5 km/km² para cuencas excepcionalmente bien drenadas, como se presenta en la Tabla 3-14.

Tabla 3-14 Clasificación según la densidad de drenaje

RANGOS DENSIDAD DE DRENAJE	INTERPRETACIÓN
0,5 - 1,09	Drenaje pobre
1,1 - 1,69	Mal drenado
1,7 - 2,29	Medianamente drenado
2,3 - 2,89	Bien drenado
2,9 - 3,49	Muy bien drenado
>3,5	Excepcionalmente bien drenado

Fuente: Llamas (1993), adaptado por CONSGA BIC S.A.S., 2024

La densidad de drenajes de las cuencas asociadas al área de influencia del estudio se presenta en la Tabla 3-15.

Tabla 3-15 Clasificación de las Cuencas del área de influencia según la densidad de drenaje

NOMBRE	ÁREA (Km)	LONGITUD TOTAL DE DRENAJES (Km)	DENSIDAD DE DRENAJES	CLASIFICACIÓN
Quebrada Palmichal	3,13	12,37	3,95	Excepcionalmente bien drenado
Directos río Campo Alegre - NN	5,33	18,18	3,41	Muy bien drenado
Quebrada Comeguadua	13,49	40,55	3,01	Muy bien drenado

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

De acuerdo con los resultados, La Quebrada Palmichal tiene una densidad de drenajes de 3,95, lo que indica que está “excepcionalmente bien drenada”, con una alta cantidad de cauces por unidad de área, lo que sugiere una respuesta rápida del flujo superficial y un buen desagüe de la cuenca. La cuenca Directos río Campo Alegre - NN presenta una densidad de drenajes menor (3,41), clasificada como muy bien drenado, esta clasificación se debe en parte a la presencia de drenajes de orden 1 y 2 que drenan localmente sobre el río Campo Alegre. Por otro lado, la Quebrada Comeguadua, aunque tiene una superficie mucho mayor (13,49 km²) y una longitud de drenajes total de 40,55 km, muestra una densidad de drenajes de 3,01, lo que la clasifica como muy bien drenada, por tanto, pese a su tamaño tiene una buena capacidad de drenaje.

3.2.4.2.3.3 Índice de sinuosidad

El cálculo de sinuosidad es propuesto por Schumm (1963) quien la define de la siguiente forma: “*El desarrollo de meandros existentes en el cauce principal de un río, y su cálculo se obtiene poniendo en relación la longitud de dicho cauce con la longitud máxima del valle que forma*” es calculado a partir de la fórmula que se presenta a continuación.

$$I_s = \frac{L_c}{L}$$

Donde: I_s Índice de sinuosidad, L_c longitud cause principal y L longitud axial

El índice de sinuosidad es determinado a partir del cauce principal de una red de drenaje, el cual permite evaluar posibles zonas de divagación que ha ocupado el cauce a través del

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	15
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

tiempo. La mayor sinuosidad suele ser frecuente en cauces de poca pendiente, frente a una baja sinuosidad y representativa de un cauce de mayor pendiente y, por ello, con mayor fuerza erosiva. Adicional las pendientes, en algunas ocasiones la sinuosidad de los drenajes tiene su origen en causas estructurales, ya que se origina una alta sinuosidad cuando existe una red de fallas que modifica el trazado del cauce (Senciales, 1998).

Así mismo, Senciales (1998) afirma que solo son áreas donde el valle se abre y permite el desarrollo de grandes meandros en la llanura de inundación, aparecen tras la diferencia entre la longitud del valle y la longitud del cauce, esto ocurre preferentemente en los cursos bajos de los ríos, que es donde las llanuras aluviales adquieren mayor amplitud. Por su parte Schumm (1963), establece la clasificación presentada en la Tabla 3-16 para determinar las características del cauce a partir de la sinuosidad.

Tabla 3-16 Índice de Sinuosidad

RANGOS	TIPO DE CANAL
1,00< – 1,25	Rectilíneo
1,25 – 1,50	Transicional
1,50 – 1,70	Regular
1,70 – 2,10	Irregular
>2,10	Tortuoso

Fuente: Schumm (1963).

El índice de sinuosidad se resume como la relación entre la longitud del cauce y la longitud máxima o axial de la cuenca, para el caso de las cuencas objeto de estudio se presentan sus resultados en la Tabla 3-17.

Tabla 3-17 Índice de Sinuosidad para las cuencas del área de influencia

NOMBRE	LONGITUD DEL CAUCE (Km)	LONGITUD AXIAL (Km)	ÍNDICE DE SINUOSIDAD	CLASIFICACIÓN
Quebrada Palmichal	2,72	2,53	1,08	Rectilíneo
Directos río Campo Alegre - NN	6,85	5,02	1,37	Transicional
Quebrada Comeguadua	9,97	5,84	1,71	Irregular

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

De acuerdo con los resultados, la Quebrada Palmichal tiene un índice de sinuosidad de 1,08, lo que indica un cauce rectilíneo con pocas curvas, permitiendo que el agua fluya de manera más directa. Directos río Campo Alegre - NN, un índice de 1,37, ligeramente más

sinuoso. Por último, la Quebrada Comeguadua tiene un índice de sinuosidad de 1,71, irregular, muestra una mayor tendencia a la sinuosidad en comparación con las otras dos cuencas. Las cuencas con sinuosidad rectilíneo indican una mayor fuerza erosiva, debido a las condiciones topográficas y geológicas del terreno, mientras que las cuencas con sinuosidad tortuosa presentan disposición a la sedimentación.

3.2.4.2.3.4 Índice de asimetría

Es la relación del área de las vertientes, mayor A_M y menor A_m , las cuales son separadas por el cauce principal. Este índice evalúa la homogeneidad en la distribución de la red de drenaje, pues si se tiene un índice mucho mayor a 1 se observará sobre la cuenca que el río principal estará recargado a una de las vertientes, lo cual implica una heterogeneidad en la distribución de la red de drenaje, aumentando la descarga hídrica de la cuenca a esta vertiente, lo que incrementa en cierto grado los niveles erodabilidad a causa de los altos eventos de escorrentía superficial obtenidos.

$$I_{AS} = \frac{A_M}{A_m}$$

Donde:

I_{AS} : Índice asimétrico, A_M Vértice mayor (km²) y A_m Vértice menor (km²)

Tabla 3-18 Clasificación índice asimétrico

RANGO	CARACTERISTICA
$I_{AS} > 1$	Cauce principal bastante recargado a una de las vertientes
$I_{AS} = 1$	Distribución uniforme del cauce

Fuente MADS, MINHACIENDA (2017)

Tabla 3-19 Índice de asimetría para las cuencas del área de influencia

NOMBRE	VÉRTICE MAYOR (Km ²)	VÉRTICE MENOR (Km ²)	ÍNDICE DE ASIMETRÍA	CLASIFICACIÓN
Quebrada Palmichal	2,08	0,99	2,10	Asimétrico hacia la derecha
Directos río Campo Alegre - NN	4,90	0,43	11,40	Asimétrico hacia la derecha
Quebrada Comeguadua	8,70	4,79	1,82	Asimétrico hacia la izquierda

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

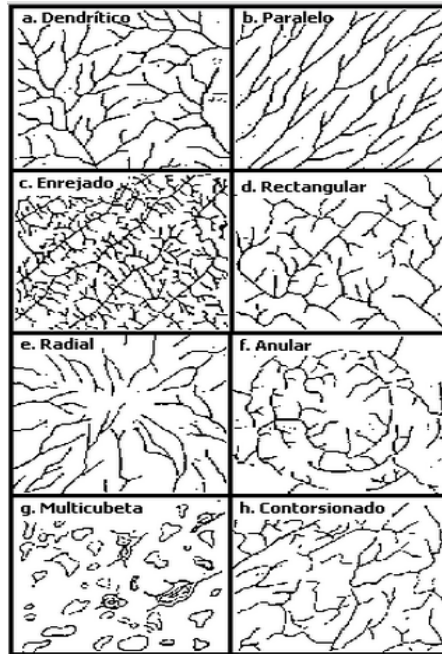
El índice de asimetría de la Quebrada Palmichal es 2,10, lo que indica que está asimétrica hacia la derecha, con una diferencia moderada entre su vértice mayor (2,08 km²) y el vértice menor (0,99 km²). Esto sugiere que el flujo puede concentrarse más hacia el lado derecho de la cuenca, lo que puede influir en el comportamiento del drenaje. La Directos río Campo Alegre - NN presenta un índice de asimetría mucho mayor, de 11,40, también asimétrica hacia la derecha, lo que refleja una marcada diferencia entre el vértice mayor (lo cual obedece a que la unidad hidrográfica solo incluye margen derecho en dirección del flujo del río Campo Alegre). Por otro lado, la Quebrada Comeguadua tiene un índice de asimetría de 1,82, asimétrica hacia la izquierda, con una diferencia menos pronunciada entre el vértice mayor (8,70 km²) y el menor (4,79 km²). Esto indica una cuenca algo más equilibrada que las anteriores, pero con una ligera tendencia a concentrar el flujo hacia el lado izquierdo.

3.2.4.2.3.5 Patrones de drenaje

Cuando la escorrentía se concentra, la superficie terrestre se erosiona creando un canal; los canales de drenaje forman una red que recoge las aguas de toda la cuenca y las vierte a un único río que se halla en la desembocadura de la cuenca. El clima y el relieve del suelo influyen en el patrón de la red, pero la estructura geológica subyacente suele ser el factor relevante. Los patrones hidrográficos están tan íntimamente relacionados con la geología que son utilizados en geofísica para identificar fallas e interpretar estructuras. La clasificación de los principales patrones incluye las siguientes redes: dendríticas (en forma de árbol o ramificaciones), enrejadas, paralelas, rectangulares y anulares (Figura 3-4), para la zona de estudio las microcuencas identificadas tienen patrón de drenaje dendrítico (Figura 3-5 a Figura 3-7), lo cual implica que la red de drenaje está consolidada (estable) y facilita el drenado de la escorrentía.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	18
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

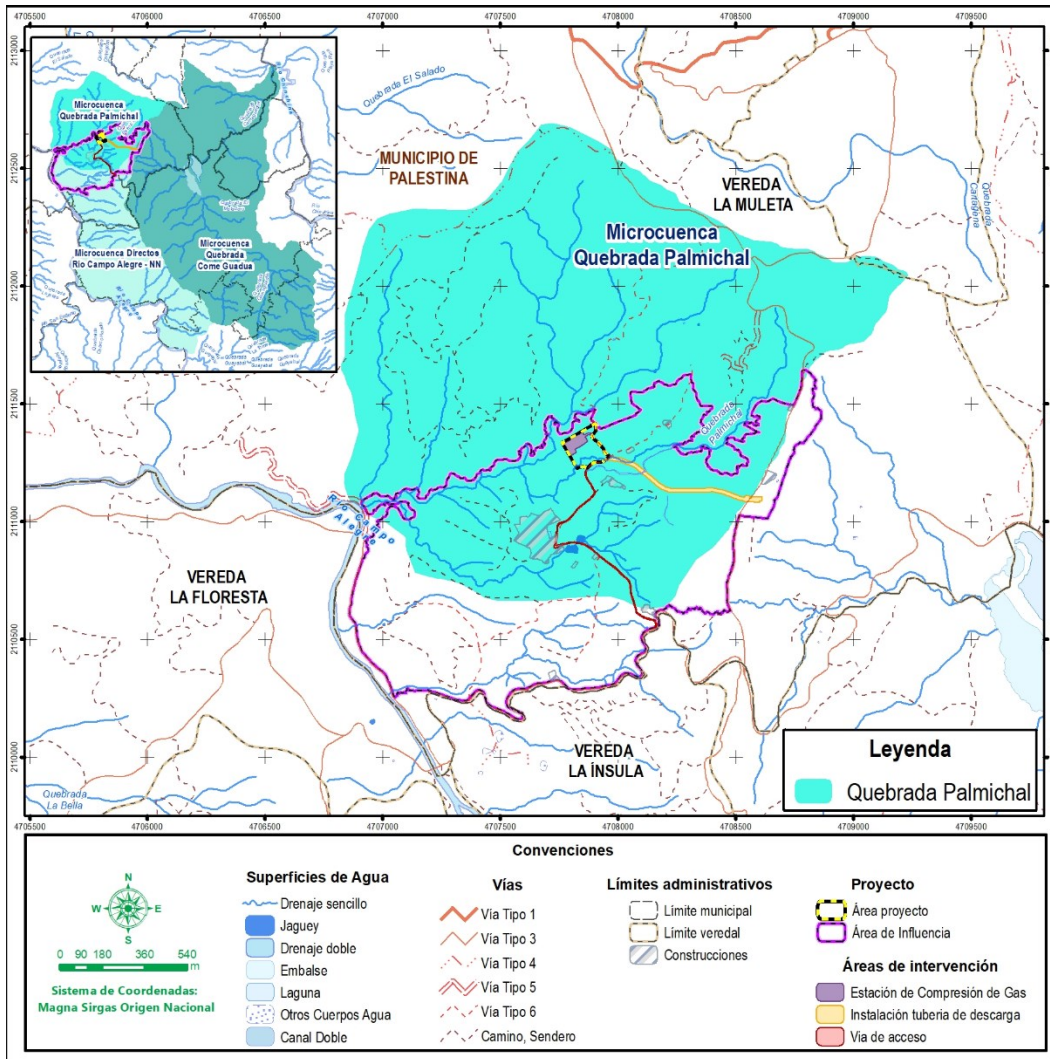
Figura 3-4 Patrones de drenaje



Fuente: Howard (1967)

Debido a las características geológicas y topográficas de las cuencas, estas presentan un patrón de drenaje dendrítico, el cuál es característico de montañas con pendientes altas a moderadas.

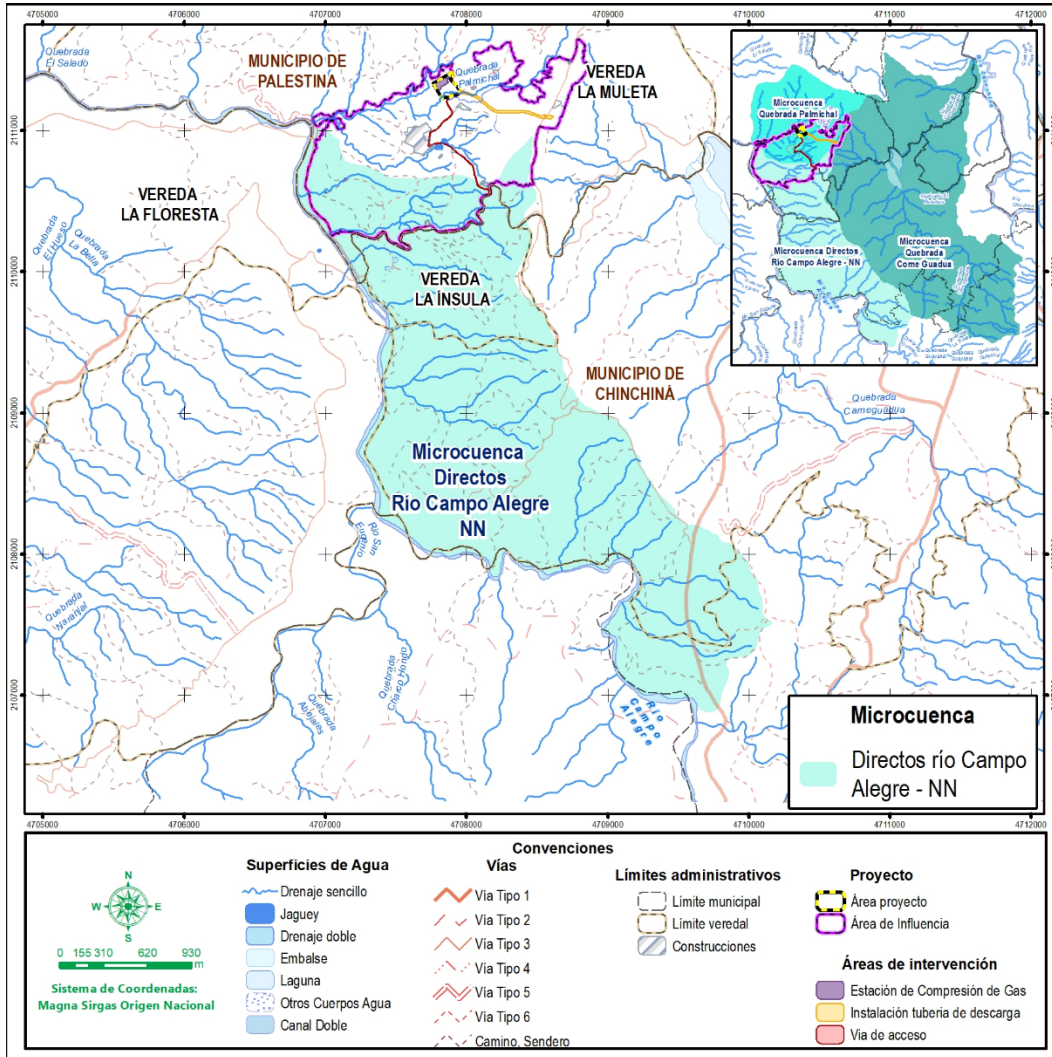
Figura 3-5 Patrón de drenaje Quebrada Palmichal



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	20
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

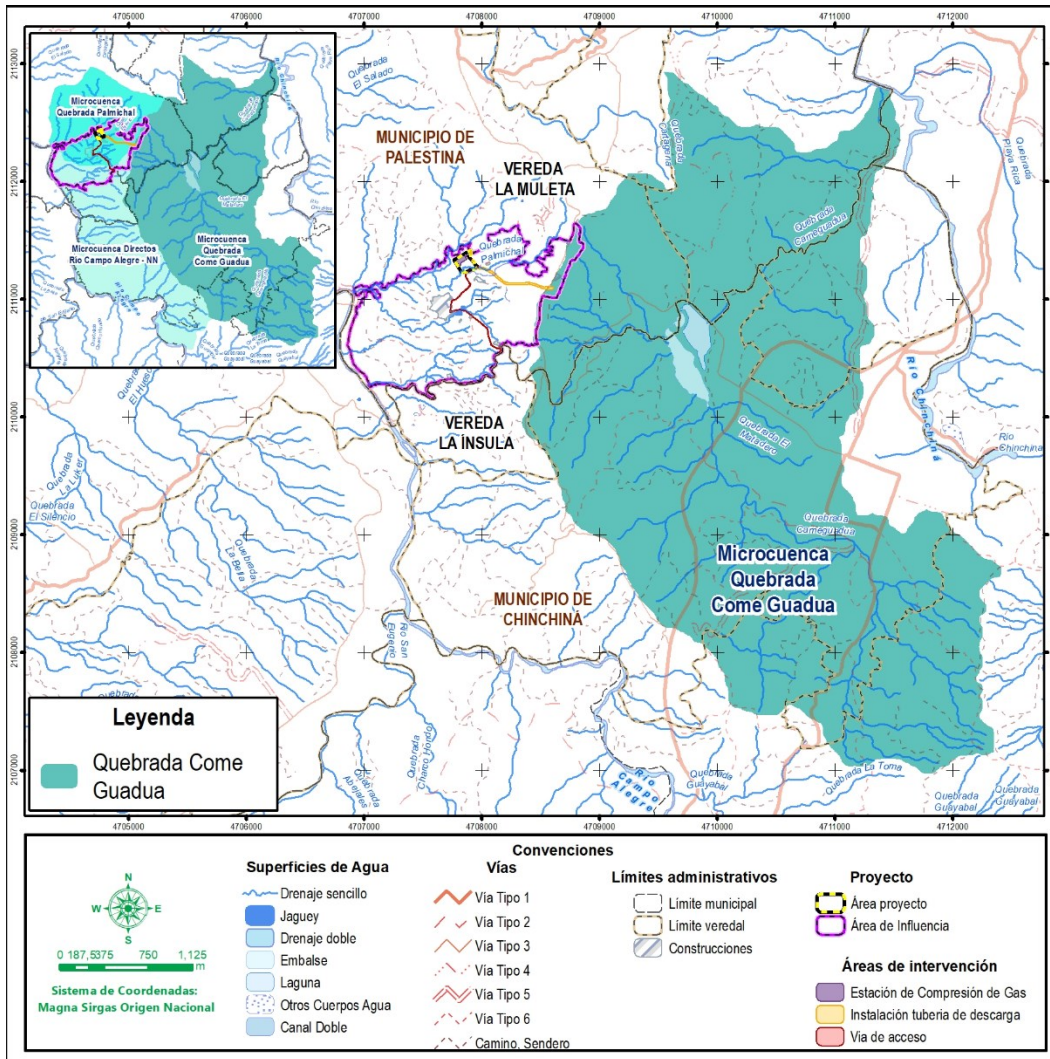
Figura 3-6 Patrón de drenaje Directos río Campo Alegre - NN



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	21
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

Figura 3-7 Patrón de drenaje Quebrada Comeguadua



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.4.2.4 Características del relieve

3.2.4.2.4.1 Altura media

La altura media de la cuenca es el valor promedio de la elevación del terreno dentro de una cuenca hidrográfica (Monsalve Sáenz, 1999). Se utiliza para caracterizar su relieve y analizar cómo influye en el clima, el régimen hidrológico y la distribución de la precipitación dentro de la cuenca.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	22
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

$$Hm = \frac{\sum A C}{\sum A}$$

Donde:

Hm Altura mínima

C: Atura media entre dos cotas

A: Área ocupada por la separación de las cotas

Figura 3-8 Altura media para las cuencas del área de influencia

NOMBRE	ALTURA MEDIA (msnm)
Quebrada Palmichal	1.394,13
Directos río Campo Alegre - NN	1.379,56
Quebrada Comeguadua	1.410,14

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.4.2.4.2 Pendiente media de la cuenca

La pendiente de la cuenca tiene gran influencia en la respuesta de esta ante un evento de precipitación y es el principal indicador del relieve de una cuenca. Esta determina la velocidad de escurrimiento, una pendiente mayor corresponde a una velocidad mayor en los cauces, y consecuentemente un tiempo de concentración menor.

La pendiente media es definida como la relación entre la altura total de la cuenca (Cota máxima y Cota mínima) y la longitud total de la misma. Cabe resaltar que las pendientes de una cuenca hidrográfica son clasificadas con base a lo establecido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2014), Tabla 3-20.

Tabla 3-20 Clasificación de la pendiente media de una cuenca

RANGOS DE PENDIENTE	CLASIFICACIÓN
> 75	Fuertemente escarpado
50 - 75	Moderadamente escarpado
25 - 50	Ligeramente escarpado
12 - 25	Fuertemente inclinado
7 - 12	Moderadamente inclinado
3 - 7	Ligeramente inclinada
0 - 3	Plano

Fuente: Minambiente 2014.

En la Tabla 3-21 se presentan los resultados y la clasificación de las pendientes medias de las cuencas identificadas para el área de influencia del proyecto.

Tabla 3-21 Clasificación de las pendientes de una cuenca

NOMBRE	PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA (%)	CLASIFICACIÓN
Quebrada Palmichal	26,37	Ligeramente escarpado
Directos río Campo Alegre - NN	27,57	Ligeramente escarpado
Quebrada Comeguadua	24,16	Fuertemente inclinado

Fuente: CONSGA BIC S.A.S. 2024.

La Quebrada Palmichal tiene una pendiente media del 26,37%, lo que la clasifica como ligeramente escarpada. Esto sugiere que el agua escurre rápidamente, aumentando la velocidad del flujo superficial y el potencial de erosión. De manera similar, la Directos río Campo Alegre - NN presenta una pendiente media de 27,57%, lo que también la clasifica como ligeramente escarpada, con características de drenaje y escurrimiento similares, aunque marginalmente más pronunciadas. En contraste, la Quebrada Comeguadua, con una pendiente media del 24,16%, es clasificada como fuertemente inclinada. Aunque su pendiente es menor que la de las microcuencas anteriores, sigue siendo considerablemente inclinada, lo que permite un escurrimiento eficiente, aunque con una menor velocidad de flujo y erosión en comparación con las microcuencas más escarpadas.

3.2.4.2.4.3 Pendiente media de la corriente principal

Por otro lado, la pendiente del cauce principal también tiene gran influencia en la velocidad con la que el agua sale de la cuenca, en cuanto mayor valor tome la pendiente, mayor será la velocidad de flujo y, por lo tanto, se convierte en un factor característico del tiempo de respuesta de la cuenca ante determinada precipitación.

La pendiente media del cauce principal es la diferencia total de elevación del cauce principal (Cota máxima – Cota mínima) dividida por su longitud total (Lc):

$$Sm = \frac{H_{m\acute{a}x} - H_{m\grave{i}n}}{Lc} * 100$$

Donde:

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	24
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

S_m = Pendiente media del cauce.

H_{max} = Cota superior.

H_{min} = Cota mínima.

L_c = Longitud de la corriente principal.

En la Tabla 3-22 se presentan los resultados y la clasificación de las pendientes medias de las corrientes principales de las cuencas identificadas para el área de influencia del proyecto.

Tabla 3-22 Clasificación de las pendientes de las corrientes principales de cada cuenca

NOMBRE	PENDIENTE MEDIA DE LA CORRIENTE PRINCIPAL (%)
Quebrada Palmichal	10,51
Directos río Campo Alegre - NN	3,64
Quebrada Comeguadua	6,32

Fuente: CONSGA BIC S.A.S,2024

La Quebrada Palmichal tiene una pendiente media del 10,51% en su corriente principal, lo que indica un cauce relativamente inclinado. Esto sugiere que el agua fluye rápidamente por el cauce principal, facilitando el desagüe, pero también aumentando el potencial de erosión en las riberas. Directos río Campo Alegre - NN, con una pendiente media del 3,64%, presenta una pendiente mucho menor, lo que implica una velocidad de flujo baja. En contraste, la Quebrada Comeguadua tiene una pendiente media mucho menor, del 6,32%, lo que indica un cauce menos suave y de pendiente más pronunciada. En este caso, el flujo de agua es más rápido, lo que aumenta el riesgo de erosión rápida, pero podría generar acumulaciones temporales o estancamientos en áreas de baja pendiente.

De acuerdo con lo presentado anteriormente, mediante software GIS, se obtuvieron los parámetros como área, perímetro, ancho medio de la cuenca, longitud axial de la cuenca, longitud total de cauces, longitud del cauce principal y pendientes; con esta base se desarrollan las ecuaciones de los parámetros de forma de las cuencas, obteniendo como resultado los valores y clasificaciones presentadas en la Tabla 3-23.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	25
------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

Tabla 3-23 Parámetros morfométricos de las Cuencas del área de influencia

PARÁMETRO	QUEBRADA PALMICHAL	CLASIFICACIÓN	DIRECTOS RÍO CAMPO ALEGRE - NN	CLASIFICACIÓN	QUEBRADA COMEGUADUA	CLASIFICACIÓN
Área de la cuenca (Km ²)	3,13	Microcuenca	5,33	Microcuenca	13,49	Pequeña
Perímetro de la cuenca (Km)	7,30	-	14,29	-	20,02	-
Longitud axial de la cuenca (Km)	2,53	-	5,02	-	5,84	-
Ancho medio cuenca (Km/Km ²)	1,24	-	1,06	-	1,70	-
Ancho máximo de la cuenca (Km)	1,86	-	1,63	-	3,10	-
Longitud de la corriente principal (Km)	2,72	-	6,85	-	9,97	-
Longitud total de cauces (Km)	12,37	-	18,18	-	40,55	-
Coefficiente de compacidad (Kc)	1,16	Redonda a oval Redonda	1,73	De oblonga a rectangular oblonga	1,53	De oval oblonga a rectangular Oblonga
Factor de Forma (Kf)	0,49	Ligeramente ensanchada	0,21	Alargada	0,40	Ni alargada, ni ensanchada
Índice de alargamiento (Ia)	1,36	Poco alargada	3,08	Alargada	1,88	Moderadamente alargada
Relación de elongación	0,79	-	0,52	-	0,71	-
Índice de Sinuosidad	1,08	Rectilíneo	1,37	Transicional	1,71	Irregular
Densidad de Corriente (Dc)	0,87	-	1,29	-	0,74	-
Densidad de drenajes (Dd)	3,95	Excepcionalmente bien drenado	3,41	Muy bien drenada	3,01	Muy bien drenada
Pendiente media de la cuenca (%)	26,37	Ligeramente escarpada (montañosa)	27,57	Ligeramente escarpada (montañosa)	24,16	Fuertemente inclinada
Pendiente media del cauce (%)	10,51	-	3,64	-	6,32	-

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.4.2.5 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración y de rezago son variables utilizadas extensivamente en el diseño hidrológico para determinar la capacidad hidráulica máxima de diferentes estructuras, se trata de variables que son propias para cada sitio y que dependen de las características geomorfológicas de la cuenca y de la lluvia. El tiempo de concentración también es conocido como el tiempo de respuesta o de equilibrio.

Llamas (1993) define el tiempo de concentración como el tiempo requerido para que, durante un aguacero uniforme, se alcance el estado estacionario, es decir, el tiempo necesario para que todo el sistema contribuya eficazmente a la generación de flujo en el sitio de desagüe. Lo cual no siempre corresponde con el fenómeno real, pues pueden existir lugares en la cuenca en los que el agua caída tarde más en llegar al punto de desagüe más alejado. Además, debe tenerse claro que el tiempo de concentración de una cuenca no es constante ya que depende ligeramente de las características de la lluvia (Vélez Upegui & Gutiérrez Botero, 2010).

El hidrograma producido por una tormenta conocida se conoce como evento, en donde el tiempo base (T_b), es el tiempo transcurrido entre el momento en que empieza a llegar las componentes de la escorrentía generadas por el aguacero y el momento en que éstas ya dejan de actuar. El tiempo de concentración (T_c) ha sido definido de diferentes maneras en la literatura, la más común lo designa como el tiempo en el cual la escorrentía superficial del punto más alejado de la cuenca alcanza el punto de desagüe o salida, es decir, el tiempo en el cual toda la cuenca contribuye al flujo. Dicho de otra forma, es el tiempo de viaje de una gota de agua de lluvia que escurre superficialmente desde el lugar más lejano de la cuenca hasta el punto de salida, cuando se tiene una lluvia uniforme que cubre toda la cuenca.

Para su cálculo se pueden emplear diferentes fórmulas que se relacionan con otros parámetros propios de la cuenca. Para la estimación del tiempo de concentración usualmente se recomienda emplear el valor medio obtenido de varias ecuaciones empíricas disponibles en la literatura científica, se considera apropiado incluir al menos cinco estimaciones diferentes (Vélez Upegui & Gutiérrez Botero, 2010).

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	27
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

Desde el punto de vista empírico, en la literatura se encuentran numerosas expresiones para determinar el tiempo de concentración de las cuencas hidrográficas, desarrolladas por diferentes autores para diferentes regiones del mundo. Se identifican dos grupos de ecuaciones, las que se emplean en diseño hidrológico y las de evento, estas últimas incluyen variables relacionadas con la lluvia, que para el caso de eventos máximos se emplean lluvias de diseño, convirtiéndose en ecuaciones que requieren de procesos iterativos para su solución. (Vélez Upegui & Gutiérrez Botero, 2010).

En consecuencia, se establecen diferentes metodologías para el cálculo de este parámetro, de las cuales en el presente estudio se incluyeron las establecidas a continuación:

3.2.4.2.5.1 Kirpich

$$T_c = 0,06628 * \frac{L^{0,77}}{i^{0,385}}$$

Donde:

L: longitud del cauce más largo en Km.

i: pendiente media de la cuenca.

Tc: tiempo de concentración expresado en horas.

3.2.4.2.5.2 Temez

$$T_c = 0,3 * \left(\frac{L}{i^{0,25}} \right)^{0,76}$$

Donde:

L: longitud del cauce más largo en Km.

i: pendiente media de la cuenca.

Tc: Tiempo de concentración en horas.

3.2.4.2.5.3 Bransby-Williams

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	28
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

$$T_c = 14,6 * L * A^{-0,1} * S^{-0,2}$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración en horas

A: área de la cuenca en mill²

L: longitud del cauce principal en mill

S: Pendiente media del cauce (%)

3.2.4.2.5.4 California Culverts-Practice (1942)

$$T_c = 60 * \left(\frac{0,87075 * L^3}{H} \right)^{0,385}$$

Tc: Tiempo de concentración en horas

L: longitud del cauce principal en metros

H: diferencia de cotas (m)

3.2.4.2.5.5 Clark:

$$T_c = 0,335 \left(\frac{A}{S^{0,5}} \right)^{0,593}$$

Tc: Tiempo de concentración en horas

A: Área de la cuenca (km²)

S: Pendiente media de la corriente principal

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	29
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

3.2.4.2.5.6 Giandotti

$$tc = \frac{4 * \sqrt{A} + 1,5 * L}{25,3 * \sqrt{S * L}}$$

tc: Tiempo de concentración en minutos

A: Área de la cuenca (km²)

S: Pendiente media de la cuenca

3.2.4.2.5.7 Jhonstone Cross

$$Tc = 5 * \left(\frac{Lm}{\sqrt{s}} \right)^{0,5}$$

Tc: Tiempo de concentración en horas

Lm: Longitud del cauce principal (mill)

s: Pendiente promedio de la cuenca

3.2.4.2.5.8 Passini

$$Tc = \frac{[0,108 * (A * L)^{0,5}]}{S^{0,5}}$$

Tc: Tiempo de concentración en horas

A: Área de la cuenca (km²)

L: Longitud del cauce principal (km)

S: Pendiente media de la cuenca

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	30
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

3.2.4.2.5.9 Pérez

$$Tc = \frac{L}{72 * \left(\frac{H}{L}\right)^{0,6}}$$

Tc: Tiempo de concentración en horas

H: Diferencia de cotas de la cuenca (m)

L: Longitud del cauce principal (km)

Pilgrim

$$Tc = 0,76 * A^{0,38}$$

Tc: Tiempo de Concentración en horas

A: Área de la cuenca (km²)

3.2.4.2.5.10 Valencia y Zuluaga

$$Tc = 1,7694 * A^{0,325} * L^{-0,096} * S_o^{-0,290}$$

Tc = Tiempo de concentración en horas

A = Área de la cuenca (km²)

L= Longitud del cauce principal (km)

So= Pendiente media de la cuenca

Para la estimación del tiempo de concentración de cada cuenca identificada en el área de estudio, se emplean todas las ecuaciones expuestas anteriormente, se eliminan los valores extremos y se promedian los demás resultados, esto con el fin de minimizar el error entre los diferentes métodos empíricos. En la Tabla 3-24 se presentan los resultados de los tiempos de concentración obtenidos de cada uno de los métodos mencionados, los valores

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	31
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

subrayados son los valores extremos descartados en el cálculo del promedio del Tiempo de Concentración. Ver ANEXOS\I. HIDROLOGÍA Y CLIMA\1. Hidrología\1.5 Morfometría.

Tabla 3-24 Tiempos de Concentración

TIEMPO DE CONCENTRACIÓN QUEBRADA PALMICHAL			TIEMPO DE CONCENTRACIÓN DIRECTOS CAMPO ALEGRE NN1			TIEMPO DE CONCENTRACIÓN CUENCA COME GUADUA		
NÚMERO	MÉTODO	MIN	NÚMERO	MÉTODO	MIN	NÚMERO	MÉTODO	MIN
1	Bransby-Williams (min)	19,84	1	Bransby-Williams (min)	36,29	1	Bransby-Williams (min)	18,96
2	California Culverts-Practice (min)	20,34	2	California Culverts-Practice (min)	62,38	2	California Culverts-Practice (min)	69,23
3	Clark (hr)	14,27	3	Clark (hr)	27,95	3	Clark (hr)	32,63
4	Giandotti (hr)	1,55	4	Giandotti (hr)	91,99	4	Giandotti (hr)	91,15
5	Johnstone Cross(hr)	75,69	5	Johnstone Cross(hr)	150,21	5	Johnstone Cross(hr)	175,28
6	Kirpich (min)	12,86	6	Kirpich (min)	39,42	6	Kirpich (min)	43,76
7	Passini (hr)	57,81	7	Passini (hr)	203,74	7	Passini (hr)	307,62
8	Pérez (hr)	0,14	8	Pérez (hr)	0,65	8	Pérez (hr)	0,71
9	Pilgrim (hr)	70,35	9	Pilgrim (hr)	86,12	9	Pilgrim (hr)	122,57
10	Temez (hr)	23,09	10	Temez (hr)	46,21	10	Temez (hr)	62,95
11	Valencia y Zuluaga (hr)	70,31	11	Valencia y Zuluaga (hr)	104,11	11	Valencia y Zuluaga (hr)	118,12
Tc promedio		24,70	Tc promedio		60,40	Tc promedio		77,04

■ Valores extremos descartados en el cálculo del promedio

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.4.3 Clasificación de los cursos de agua

Con base en la constancia de la escorrentía, los cursos de agua se pueden dividir en:

- Perenes:
 - Corrientes con agua todo el tiempo.
 - El nivel de agua subterráneo mantiene una alimentación continua y no desciende nunca debajo del lecho del río.

- Intermitentes:
 - Corrientes que escurren en estaciones de lluvia y se secan durante el verano.
 - El nivel de agua subterráneo se conserva por encima del nivel del lecho del río sólo en la estación lluviosa. En verano el escurrimiento cesa, u ocurre solamente durante o inmediatamente después de las tormentas.

- Efímeros:
 - Existen apenas durante o inmediatamente después de los periodos de precipitación, y solo transportan escurrimiento superficial.
 - El nivel de agua subterráneo se encuentra siempre debajo del nivel inferior del lecho de la corriente; no hay, por lo tanto, posibilidad de escurrimiento subterráneo (Monsalve Sáenz, 1999).

En el área de influencia se identifican cuerpos de agua Perennes e Intermitentes, estos se relacionan en la Tabla 3-25.

3.2.4.4 Identificación de sistemas lénticos y lóticos

3.2.4.4.1 Sistemas lóticos

Los sistemas lóticos se caracterizan por presentar un movimiento en la componente horizontal de sus aguas, por tanto, presentan un caudal respecto a una sección transversal estos corresponden a ríos, quebradas, caños y arroyos.

Estos cuerpos de agua son de gran importancia para los ecosistemas acuáticos, ya que se diferencian por el continuo y rápido flujo de sus aguas; creando condiciones especiales para la vida y para la organización de estructuras y procesos ecológicos básicos, flujos de energía, materia, información, mantenimiento de los equilibrios ecológicos y generación de biodiversidad. Un rasgo importante es la estructura longitudinal y altitudinal de los sistemas lóticos, que determina diferencias entre las partes altas y bajas de un mismo cuerpo de agua, el cual puede verse como un continuo que varía a medida que desciende; más complejo y maduro en las partes bajas que en las altas. Otro rasgo de interés son los intercambios con los ecosistemas terrestres adyacentes, a lo largo de su recorrido; por ejemplo, hojarasca que cae de los bosques ribereños e insectos acuáticos que pasan al bosque (Manrique et al., 2011).




Durante la visita realizada en campo entre el 10 al 14 de abril de 2024, se realizaron recorridos en toda el área de influencia para identificar los cuerpos de agua. Como resultado se encontraron algunos con características intermitentes en los que se evidencio la huella

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	33
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

del paso de agua sobre las vías, pero en el momento de la verificación de estos, no se observó presencia de agua. En la Figura 3-9 se muestran los puntos de control tomados en campo y en la Tabla 3-25, la evidencia fotográfica de los mismos.

Tabla 3-25 Inventario de cuerpos de agua lóticos del área de influencia

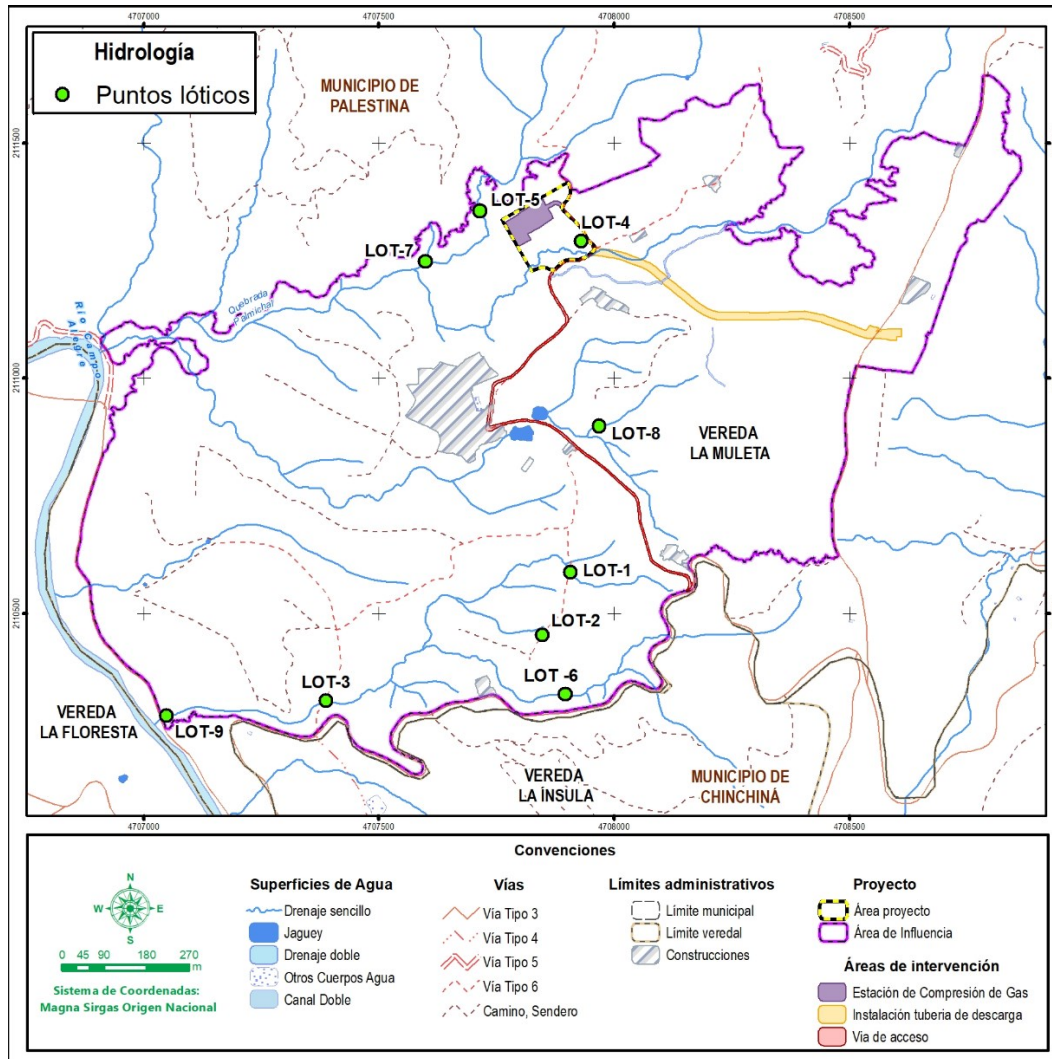
ID	COORDENADA ESTE	COORDENADA NORTE	NOMBRE FUENTE HÍDRICA	TIPO DRENAJE	FOTOGRAFÍA
LOT-1	4.707.906,51	2.110.588,42	NA	Perenne	
LOT-2	4.707.837,67	2.110.467,61	NA	Intermitente	
LOT-3	4.707.387,92	2.110.311,81	NA	Perenne	
LOT-4	4.707.925,76	2.111.270,06	Quebrada Palmichal	Perenne	

ID	COORDENADA ESTE	COORDENADA NORTE	NOMBRE FUENTE HÍDRICA	TIPO DRENAJE	FOTOGRAFÍA
LOT-5	4.707.713,21	2.111.356,77	Tributario a quebrada Palmichal	Perenne	
LOT-6	4.707.895,34	2.110.329,48	NA	Perenne	
LOT-7	4.707.598,56	2.111.248,43	Tributario a quebrada Palmichal	Perenne	
LOT-8	4.707.967,51	2.110.898,80	NA	Intermitente	

NA: Sin nombre, estas fuentes hídricas no tienen nombres asociados en la cartografía base del IGAC.

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Figura 3-9 Cuerpos de agua lóticos



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.





3.2.4.4.2 Sistemas lénticos


Son cuerpos de agua que se caracterizan, desde el punto de vista hidráulico, por ser aguas continentales con baja tasa de renovación, es decir, aguas en movimiento lento o imperceptible que por lo general presentan flujo unidireccional (MADS, 2018).

Durante la visita de campo se identificaron cinco cuerpos de agua lénticos, en la Figura 3-10 se presenta su localización espacial y en la Tabla 3-26 sus coordenadas y evidencia fotográfica.

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	36
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

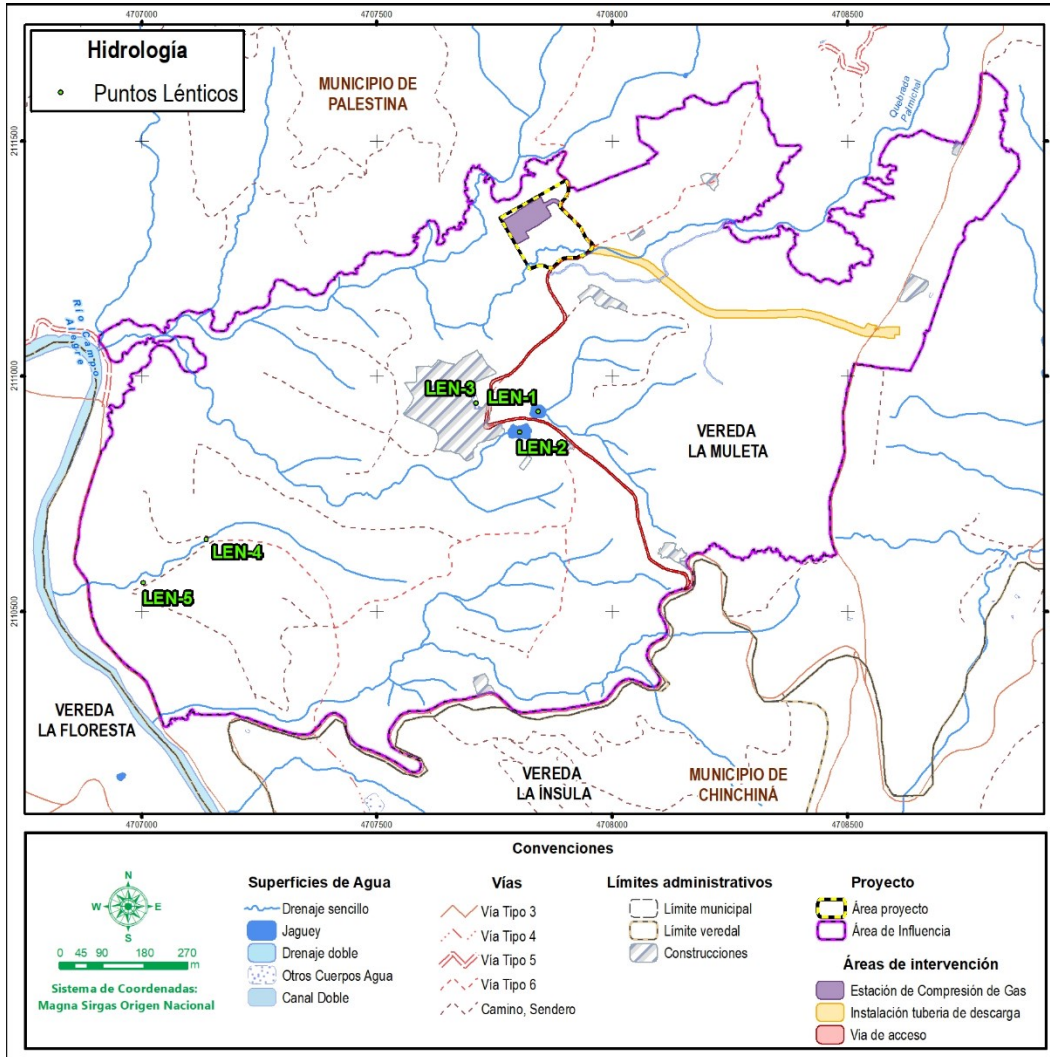
Tabla 3-26 Cuerpos de agua lénticos en el área de influencia

ID	COORDENADA ESTE	COORDENADA NORTE	CLASIFICACIÓN CUERPO DE AGUA	FOTOGRAFÍA
LEN-1	4.707.841,42	2.110.925,21	Jaguey	
LEN-2	4.707.802,26	2.110.881,43	Jaguey	
LEN-3	4.707.709,62	2.110.943,65	Cuerpo de agua artificial	
LEN-4	4.707.137,75	2.110.653,93	Jaguey	

ID	COORDENADA ESTE	COORDENADA NORTE	CLASIFICACIÓN CUERPO DE AGUA	FOTOGRAFÍA
LEN-5	4.707.003,32	2.110.561,85	Jaguey	

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Figura 3-10 Cuerpos de Agua Lénticos



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

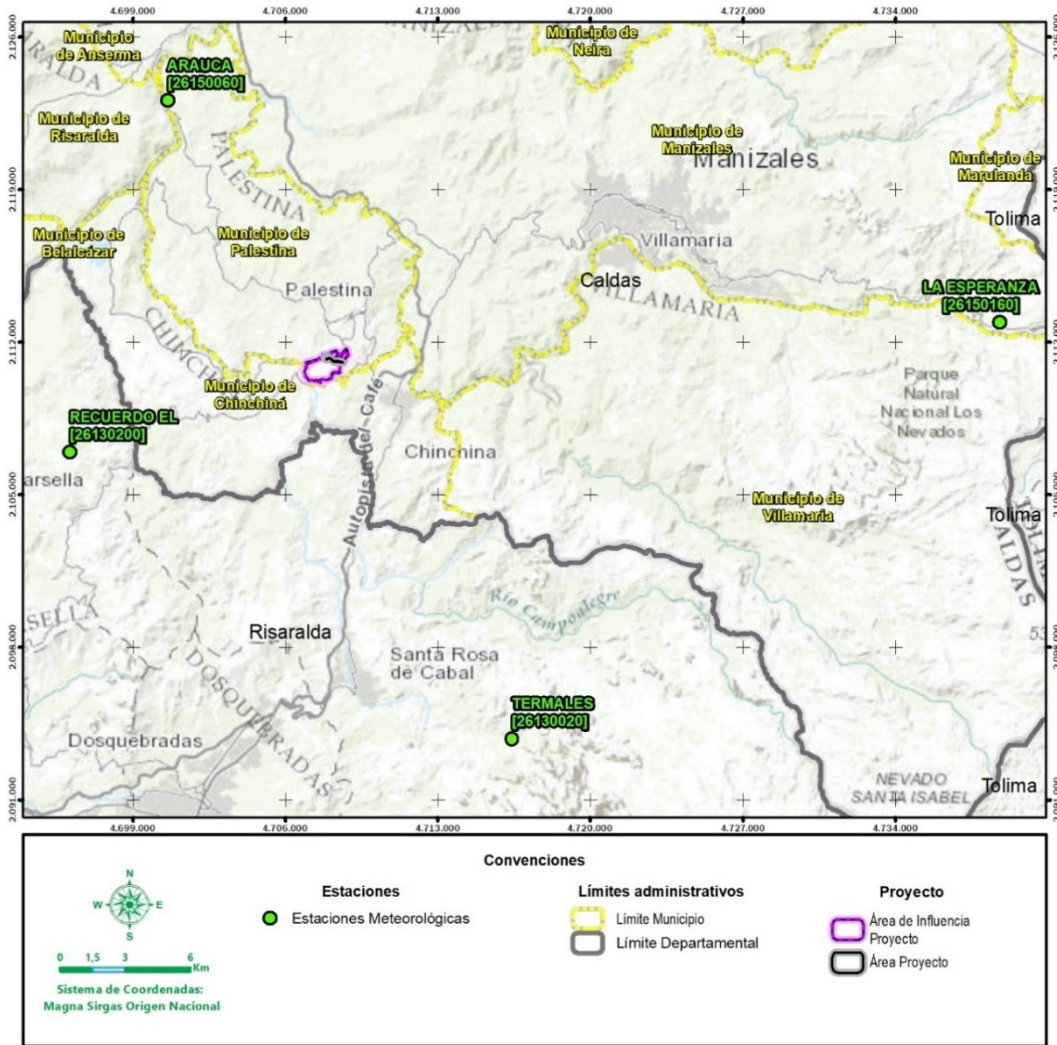
3.2.4.5 Análisis de Estaciones

3.2.4.5.1 Precipitación

En meteorología, la precipitación es cualquier forma de hidrometeoro que cae a la atmósfera y llega a la superficie terrestre. Este fenómeno incluye lluvia, tormenta, llovizna, nieve, aguanieve y granizo. La cantidad de precipitación sobre un punto de la superficie terrestre es llamada pluviosidad, o monto pluviométrico.

Para el presente estudio se consultó la base de datos del IDEAM para una temporalidad de 23 años (2000 – 2023) en las precipitaciones medias mensuales, las estaciones consultadas corresponden a las presentadas en la Tabla 3-27 y Figura 3-11. Se debe tener claro que la información proporcionada por estas bases datos contiene ausencia de información generando incertidumbre en los análisis meteorológicos del área de estudio.

Figura 3-11 Estaciones Hidrometeorológicas



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	40
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

Tabla 3-27 Estaciones Meteorológicas

CÓDIGO ESTACIÓN	NOMBRE	CATEGORÍA	MAGNA ORIGEN ÚNICO - CTM12		ALTITUD (m.s.n.m.)
			ESTE	NORTE	
26150060	ARAUCA	Pluviométrica	4.700.568,21	2.123.113,34	917
26150160	LA ESPERANZA	Climática Principal	4.738.804,17	2.112.933,17	3.341
26130020	TERMALES	Pluviométrica	4.716.382,42	2.093.808,95	2.001
26130200	EL RECUERDO	Pluviométrica	4.696.063,65	2.106.969,33	1.587

Fuente: IDEAM, 2024, adaptado por CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.4.5.1.1 Análisis de consistencia y homogeneidad

Para detectar y corregir las no homogeneidades de las series de datos se utilizó la función FindU del paquete RhtestsV4, este método consiste en la detección estadística de puntos de cambio (changepoints) en series temporales climáticas, particularmente útiles en el análisis de la homogeneidad de series de precipitación o temperatura. Este procedimiento implementa un modelo de regresión por fases múltiples (multiple-phase regression model), el cual identifica cambios estructurales en la media de la serie a lo largo del tiempo. El modelo general se expresa como:

$$Y_t = \mu_j + \beta_j t + \epsilon_t \text{ para } t \in \text{segmento } j$$

donde:

Y_t es el valor observado en el tiempo t

μ_j es la media del segmento j ,

β_j es la pendiente (tendencia) del segmento j ,

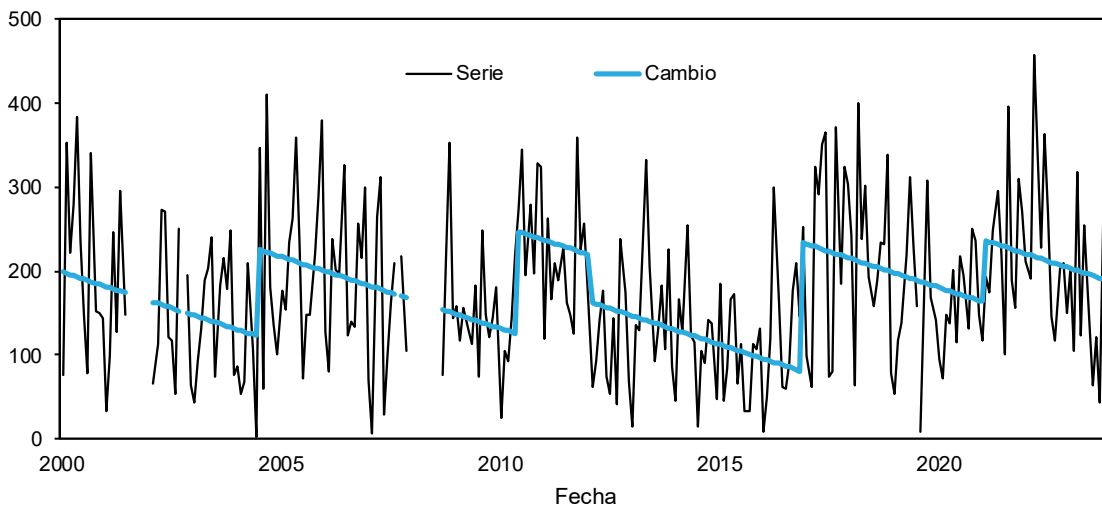
ϵ_t es el término de error aleatorio, usualmente considerado como ruido blanco o con autocorrelación de primer orden AR(1)

La función FindU detecta puntos de ruptura tipo 1 (cambios en la media o tendencia) a través de la maximización del estadístico PFmax, evaluando todos los posibles puntos de división en la serie. Este análisis se realiza a un nivel de significancia preestablecido $\alpha = 1 - p_{lev}$ (para este estudio se usó el valor por defecto, $p_{lev} = 0.95$), y los cambios detectados son validados mediante intervalos de confianza y comparación con distribuciones empíricas. Una vez detectado un cambio, es posible

ajustar la serie a un segmento base seleccionado, utilizando métodos como la corrección por media o el mapeo por cuantiles (QM), asegurando que la serie final sea homogénea y adecuada para análisis climáticos y estadísticos posteriores.

Para la estación Arauca se encontraron 5 puntos de quiebre correspondientes a: 2004-06, 2010-05, 2012-01, 2016-11 y 2021-01, de estos puntos tal como se ve en la Figura 3-12, 2012-01 y 2021-01 no tiene suficiente evidencia estadística, pero el cambio es visible y los saltos podrían deberse a la variabilidad natural.

Figura 3-12 Serie anomalías detectadas regresión multifase estación Arauca

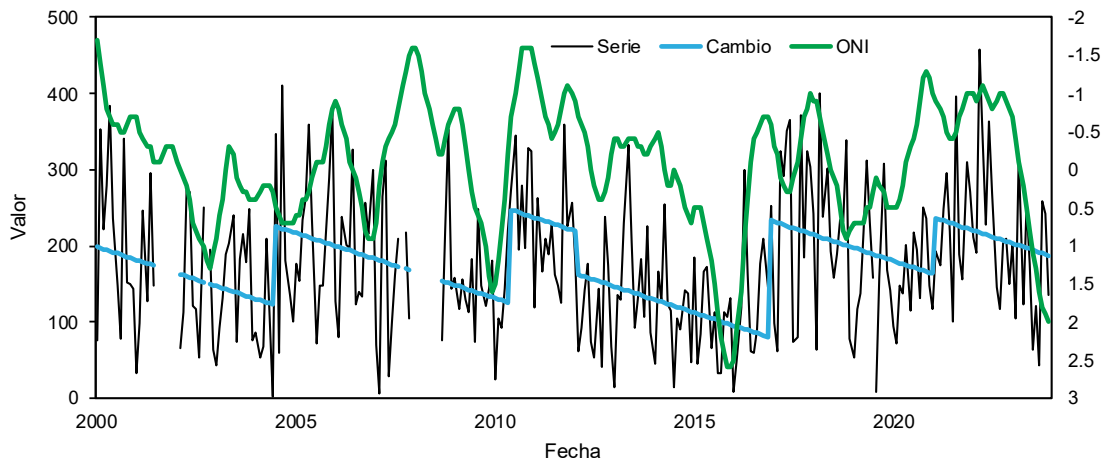


Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Con la finalidad de correlacional la correspondencia de estos saltos con fenómenos naturales se realizó una comparación visual con el Oceanic Niño Index -ONI (ver Figura 3-13), dejando ver que hay una correlación significativa del ONI con los aumentos y disminución de la precipitación, siendo explicables físicamente los saltos detectados por la prueba de homogeneidad.

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	42
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

Figura 3-13 Relación entre los saltos de la estación Arauca y el ONI



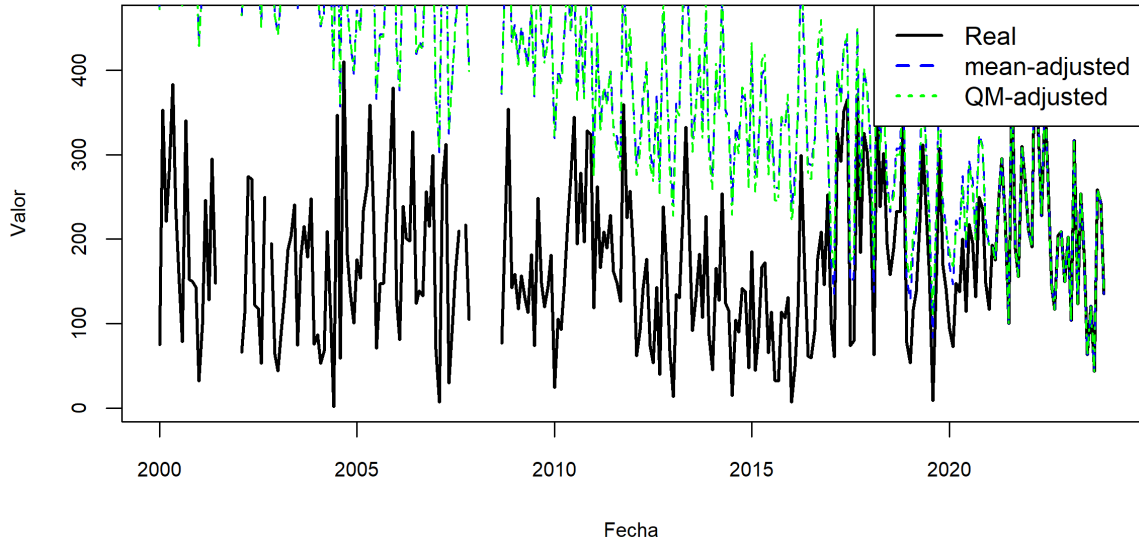
Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Teniendo en cuenta que se presentaron no homogeneidades se realizó la corrección automática por la media y por mapeo de cuantiles, sin embargo, estas correcciones sobreestimaron los valores (ver Figura 3-14), por ello la corrección para esta estación se realizó de manera manual mediante factores de corrección para cada segmento, estos factores corresponden a la diferencia absoluta de la mediana global y la mediana de cada segmento.

Tras aplicar esta corrección la serie homogeneizada se muestra en la Figura 3-15, se corrigieron particularmente los valores en los intervalos 2010 a 2016 en donde los máximos se redujeron y los mínimos del periodo niño 2015 aumentaron.

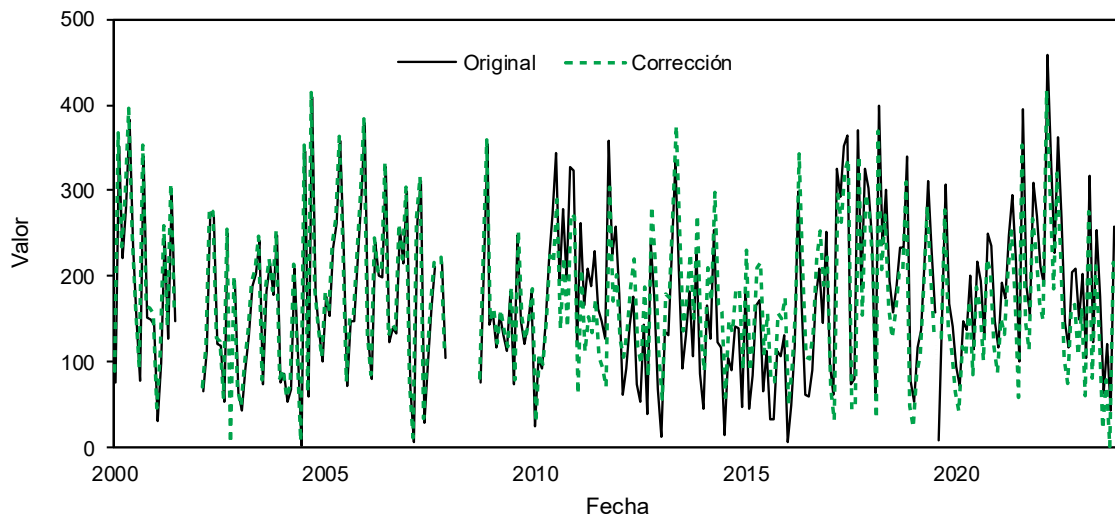
Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	43
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

Figura 3-14 Corrección automática homogeneidad estación Arauca



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Figura 3-15 Corrección de la homogeneidad estación Arauca

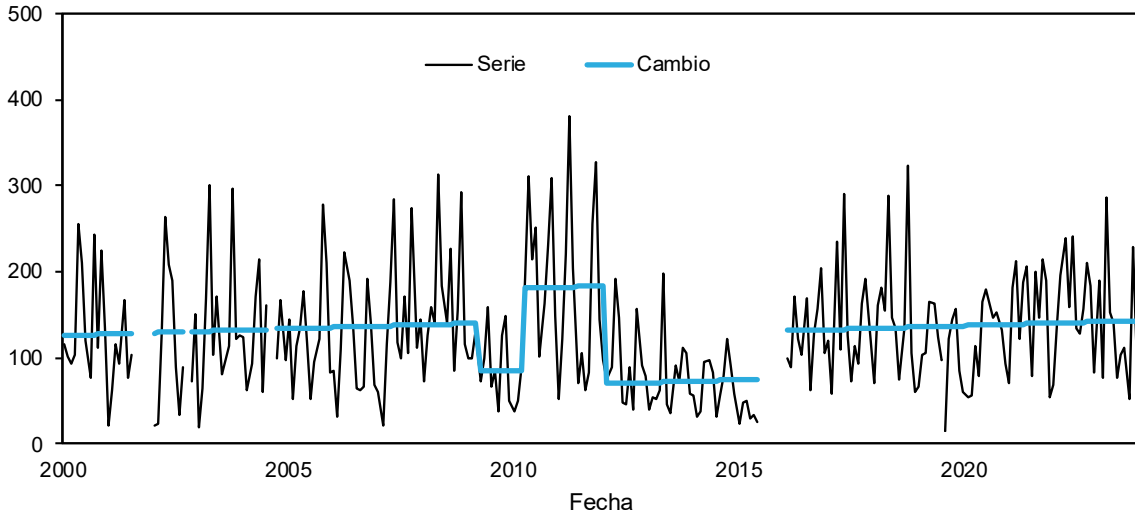


Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

En la estación la Esperanza se encontraron 4 saltos en los siguientes puntos: 2009-03, 2010-03, 2012-01 y 2015-06, de los cual el primero no es lo suficientemente significativo (ver Figura 3-16) y puede deber a la variabilidad natural de la precipitación.

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	44
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

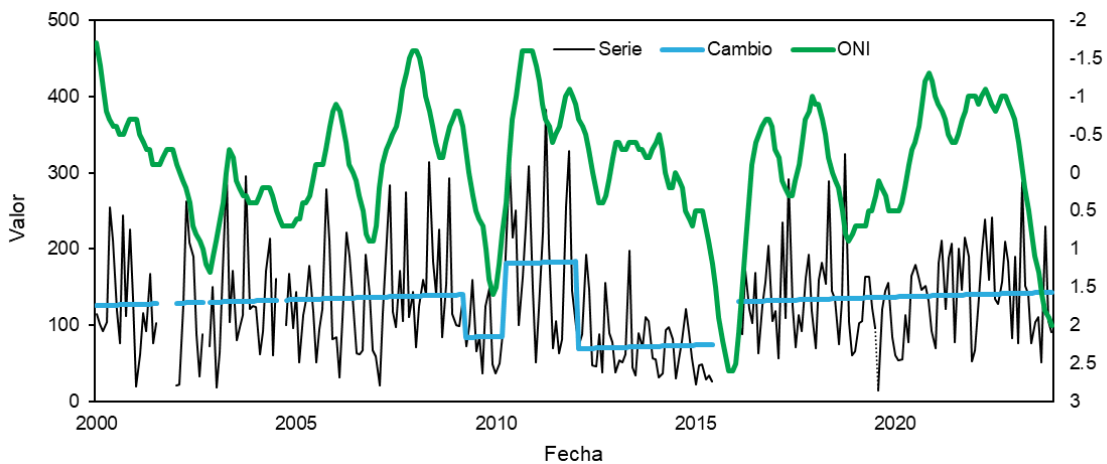
Figura 3-16 Serie anomalías detectadas regresión multifase estación La Esperanza



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

La Figura 3-17 muestra la relación entre los cambios de tendencia de la serie de precipitación y el ONI, mediante el análisis visual de esta relación se concluye que los saltos observados se pueden relacionar con los cambios expresados por este fenómeno climático, esto es particularmente evidente en los dos valles correspondientes a 2010 y 2015, donde la precipitación es superior antes y después de este evento.

Figura 3-17 Relación entre los saltos de la estación La Esperanza y el ONI

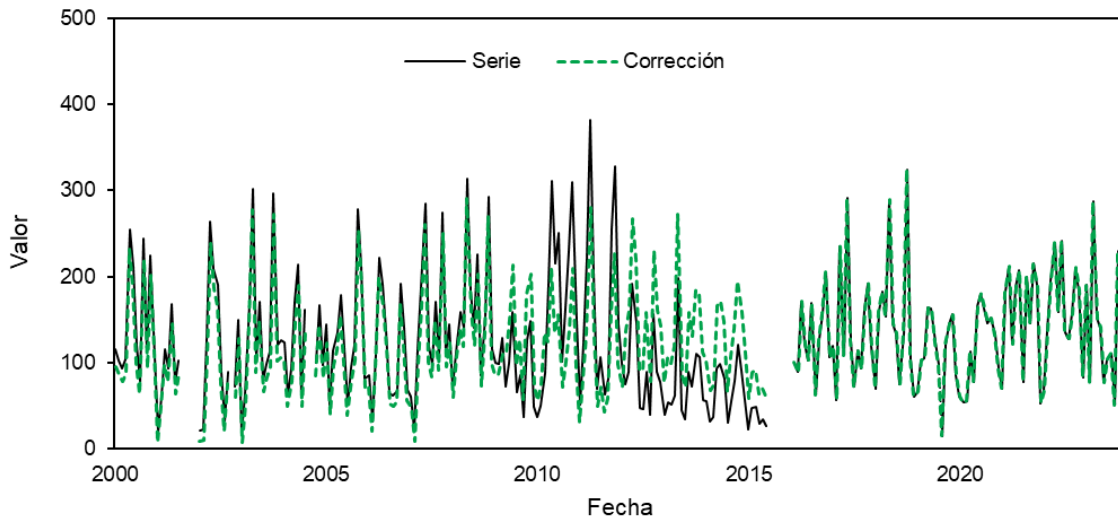


Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	45
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

Con base en estos resultados la serie fue ajustada automáticamente mediante mapeo de cuantiles, tal como se muestra en la Figura 3-18 los valores anteriores a 2015-06 se ajustaron para mantener la tendencia general de la serie.

Figura 3-18 Corrección de la homogeneidad estación La Esperanza

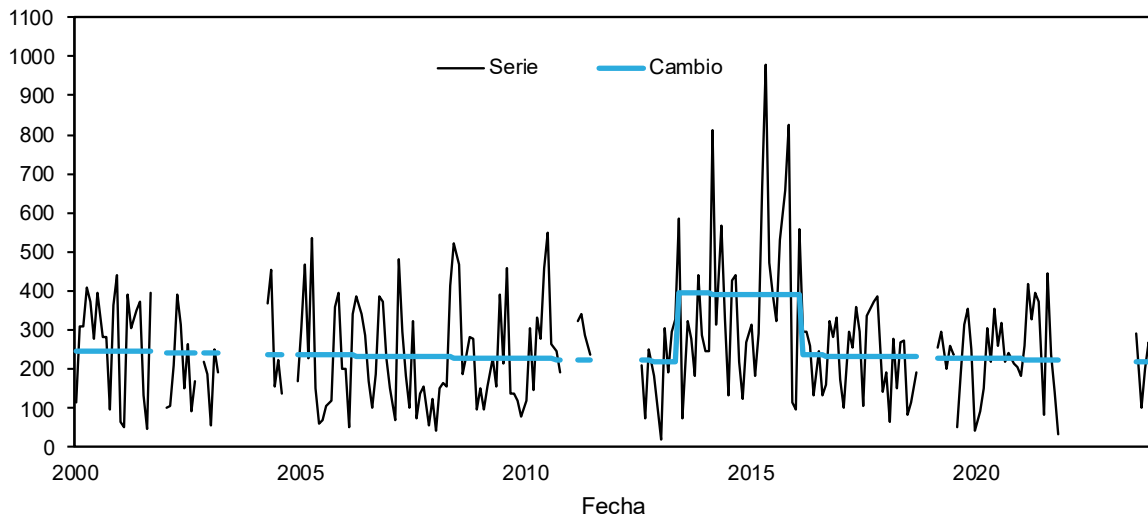


Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Para la estación el recuerdo se encontró dos puntos de cambio correspondientes a el 2013-05 y 2016-02, ambos puntos significativamente estadísticos, los cuales como se puede observar en la Figura 3-19 corresponden al inicio y fin de un periodo con precipitaciones significativamente mayores a las registradas en la serie.

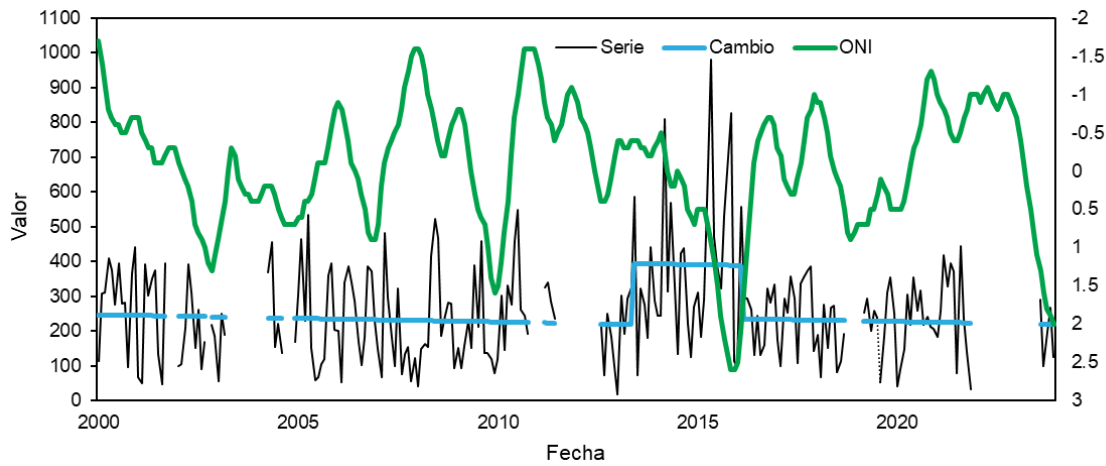
Con respecto a este periodo la Figura 3-20 muestra que no existe correspondencia significativa entre el comportamiento de la serie con el ONI. Para el periodo comprendido por los puntos de cambio se evidencia que la precipitación aumenta y como en las dos estaciones analizadas se esperaría una disminución a cauca de los efectos del fenómeno del niño.

Figura 3-19 Serie anomalías detectadas regresión multifase estación Recuerdo



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Figura 3-20 Relación entre los saltos de la estación Recuerdo y el ONI

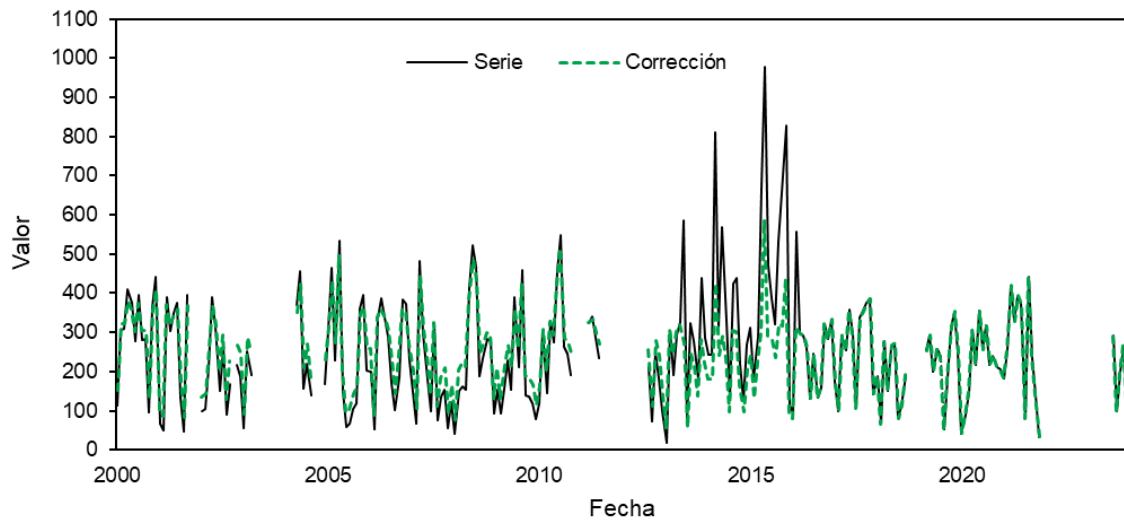


Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Dado que estos puntos identificados no pueden ser explicados por fenómenos macro climáticos y no existe información climática local o metadatos asociados a los valores, este periodo se penaliza como un fenómeno no natural, y conforme a lo mostrado en la Figura 3-21 los valores para este periodo fueron subestimados.

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	47
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

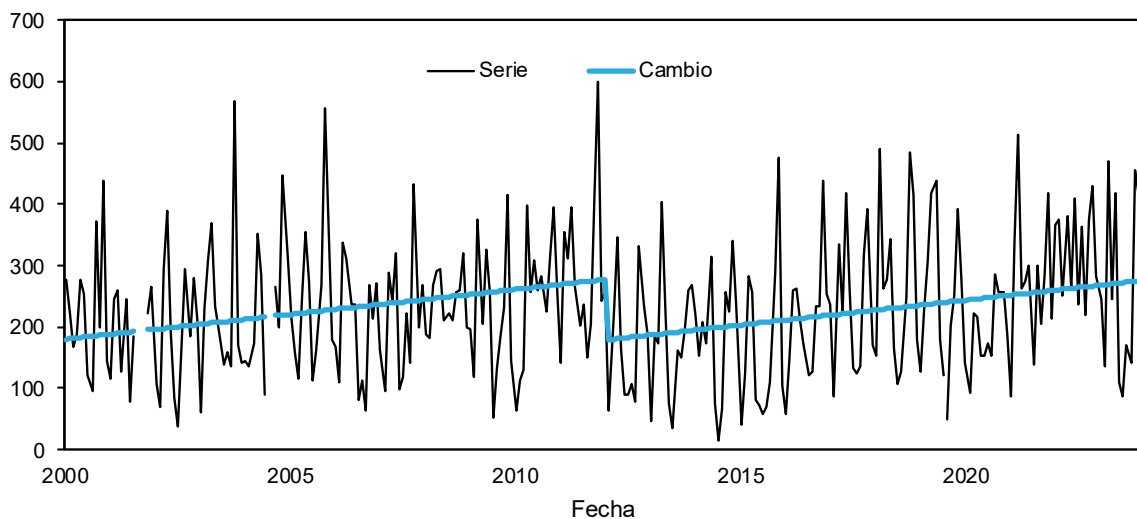
Figura 3-21 Corrección de la homogeneidad estación El Recuerdo



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Finalmente, para la estación Termales se encontró un punto de cambio correspondiente a 2012-01, el cual es significativamente estadístico, conformando un punto de ruptura de la tendencia tal como se muestra en la Figura 3-22.

Figura 3-22 Serie anomalías detectadas regresión multifase estación Termales



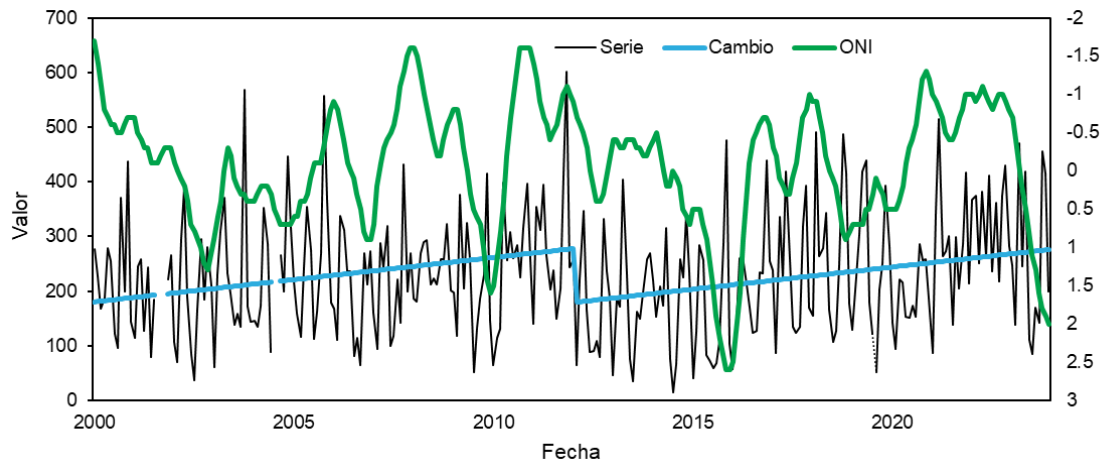
Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Tal como se realizó en las demás estaciones la Figura 3-23 muestra la relación entre la serie de datos de precipitación y el valor del ONI. Al igual que la estación El

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	48
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

Recuerdo la relación se poco significativa, siguiendo tendencias distintas. En el punto de ruptura se evidencia un pico que coincide aproximadamente en comportamiento (diminución – aumento – disminución), pero antes y después de la ruptura no se evidencia la correspondencia es menor, existiendo puntos donde los picos y valles no corresponden.

Figura 3-23 Relación entre los saltos de la estación Termales y el ONI

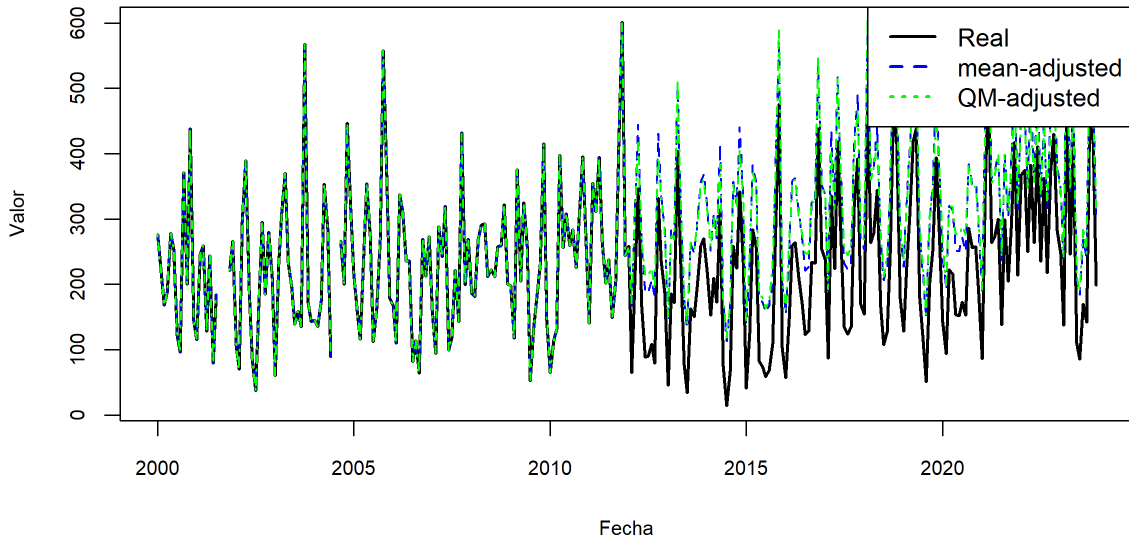


Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

A partir de este punto de cambio se realizó la corrección automáticamente mediante la media y mapeo de cuantiles (ver Figura 3-24 y Figura 3-25), no obstante, estos ajustes no fueron satisfactorios, sobreestimando o subestimando los valores de precipitación antes o después del punto de ruptura, razón por la cual la variabilidad era mayor que la original. Dado estas circunstancias y teniendo en cuenta que el comportamiento antes y después de la ruptura es similar en los extremos no realizo ajuste y se consideró como homogénea la serie.

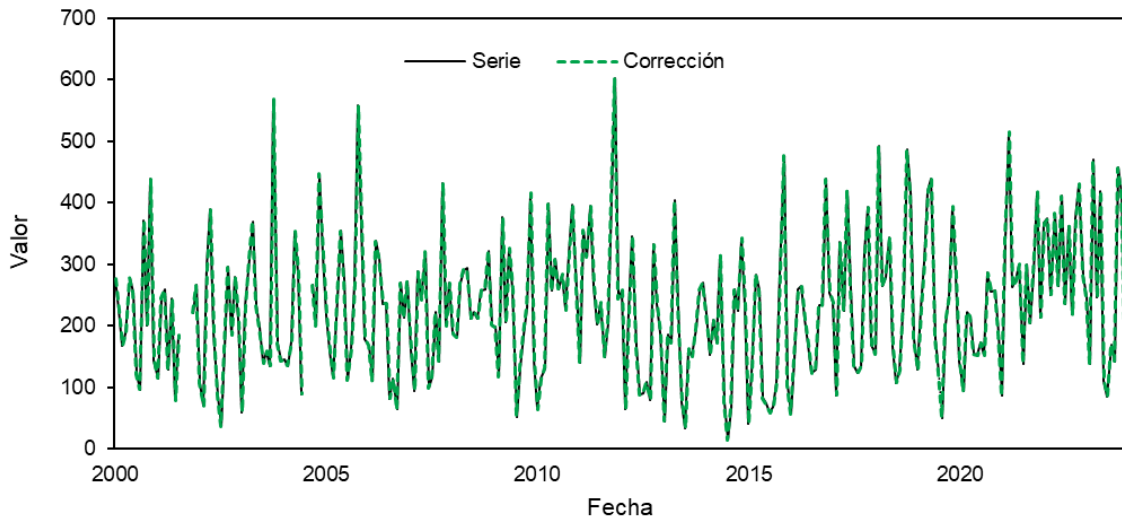
Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	49
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

Figura 3-24 Ajuste por medias y mapeo de cuantiles estación Termales



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Figura 3-25 Corrección de la homogeneidad estación Termales



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.4.5.1.2 Llenado de datos

Los datos ausentes fueron imputados mediante un modelo de regresión múltiple, aprovechando las correlaciones entre estaciones cercanas. El método de correlación múltiple es una técnica estadística utilizada para estimar datos faltantes en una serie temporal, basándose en las relaciones lineales entre la variable dependiente y una o

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	50
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

más variables independientes (Montgomery, 2014). En este caso, se construye un modelo de regresión múltiple que permite predecir el valor de la variable ausente en una estación específica utilizando datos de estaciones cercanas. El modelo se expresa matemáticamente como:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_nx_n + \epsilon$$

Donde (y) es el valor estimado de la variable dependiente (precipitación o temperatura), (x_1, x_2, \dots, x_n) son las variables independientes provenientes de otras estaciones, (β_0) es el intercepto, ($\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$) son los coeficientes de regresión que representan la influencia de cada variable independiente, y (ϵ) es el término de error asociado. El ajuste del modelo se realiza minimizando el error cuadrático medio, asegurando la mejor aproximación a los valores observados. Los resultados de la regresión múltiple para las estaciones analizadas se muestran en la Tabla 3-28, los cuales se usaron para estimar los valores faltantes siempre y cuando existieran datos para las demás estaciones, en los casos que no se cumplió este requisito no se imputaron los datos. Para consultar a detalle el resultado de la imputación de datos en *Anexos\I. HIDROLOGÍA Y CLIMA\1. Hidrología\1.2 Precipitaciones\1.2.1 Precipitaciones.xlsx* se presentan los datos crudos y completados.

Tabla 3-28 Coeficientes regresión múltiple estimados variables precipitación

Estación	β_0	β_1	β_2	β_3
Arauca	31,95	0,077	0,303	0,411
Esperanza	15,05	0,299	0,045	0,154
Recuerdo	133,23	0,050	0,472	0,187
Termales	65,41	0,101	1,052	0,042

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.4.5.1.3 Valores mensuales de la precipitación

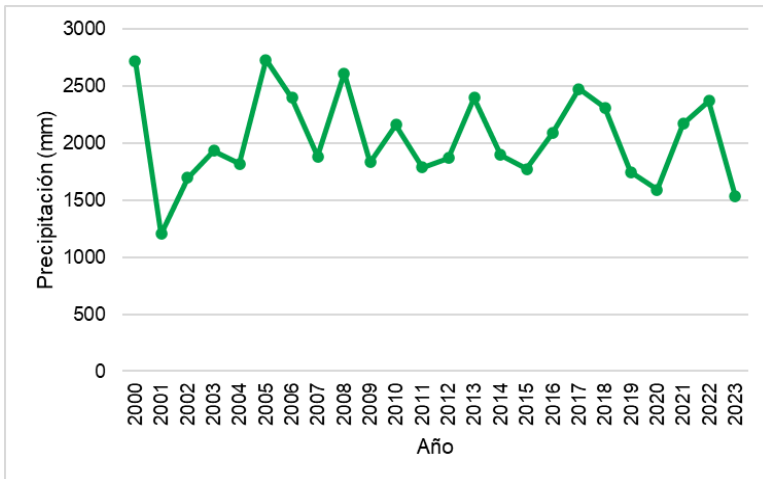
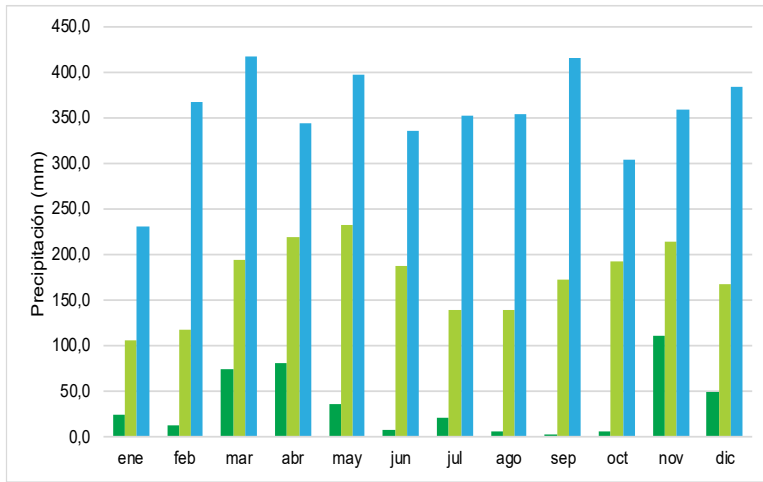
Una vez ajustados los datos faltantes a través de la comparación con otra estación cercana que no tuviera o tuviera poca ausencia de información, se calculan los promedios mensuales y anuales, también las precipitaciones mínimas y máximas. Los resultados se muestran en la ver Tabla 3-29 y Figura 3-26 a Figura 3-29.

Tabla 3-29 Registros de Precipitaciones

ARAUCA [26150060]	PPT/MES	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
	PPT MÍNIMA MENSUAL	24,3	12,2	73,2	80,9	34,9	7,2	21,1	5,2	1,0	5,2	110,2	48,3
	PPT MEDIA MENSUAL	104,9	117,3	194,0	218,3	231,6	186,7	139,2	138,2	172,0	192,2	214,4	166,2
	PPT MAXIMA MENSUAL	229,5	366,8	416,3	343,0	396,8	335,8	352,2	353,2	415,2	304,1	358,9	384,2
LA ESPERANZA [26150160]	PPT/MES	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
	PPT MÍNIMA MENSUAL	7,1	9,1	56,0	64,4	70,2	49,0	39,1	15,0	51,0	48,2	60,5	53,0
	PPT MEDIA MENSUAL	70,9	80,7	129,2	157,5	181,9	127,5	98,8	102,1	105,8	178,7	162,6	95,1
	PPT MAXIMA MENSUAL	190,0	182,0	287,0	280,5	291,0	242,0	180,0	202,1	220,1	324,0	269,0	142,2
TERMALES [26130020]	PPT/MES	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
	PPT MÍNIMA MENSUAL	40,9	64,5	116,0	128,0	82,3	73,5	14,3	50,6	64,0	185,0	171,0	103,0
	PPT MEDIA MENSUAL	159,2	186,1	272,6	291,0	274,8	181,3	130,5	159,8	203,6	318,7	356,0	216,8
	PPT MAXIMA MENSUAL	366,9	491,1	514,6	419,0	438,4	410,9	259,2	362,2	371,0	568,0	601,3	315,0
EL RECUERDO [26130200]	PPT/MES	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
	PPT MÍNIMA MENSUAL	42,0	66,0	148,0	151,0	201,0	95,0	56,9	52,0	98,0	133,1	33,0	91,8
	PPT MEDIA MENSUAL	175,5	205,6	292,4	307,6	311,2	280,2	229,5	229,1	231,8	266,1	282,2	221,0
	PPT MAXIMA MENSUAL	314,2	431,2	446,7	499,0	587,9	486,1	514,5	443,0	368,5	374,0	436,4	408,4

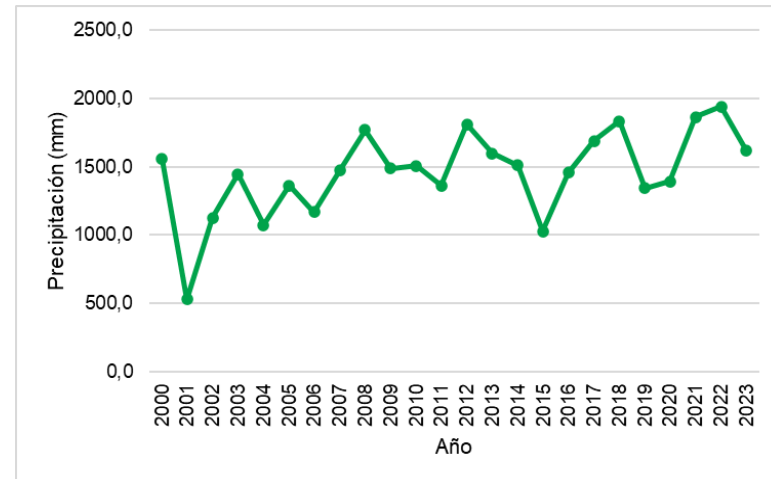
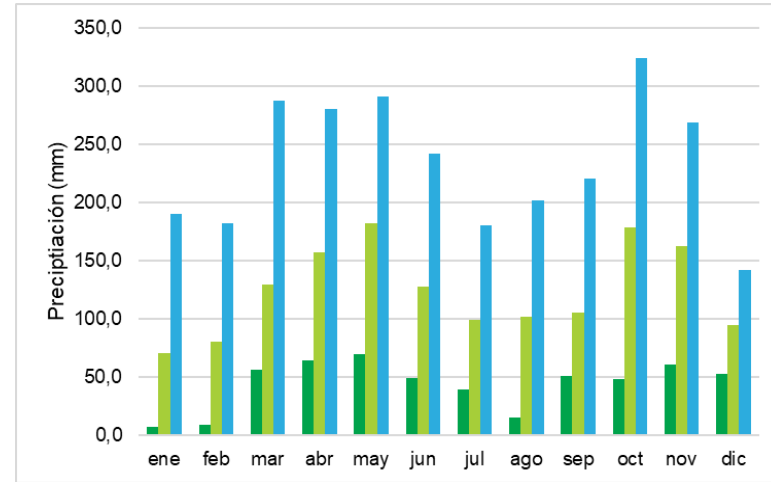
Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2025.

Figura 3-26 Distribución mensual multianual y Total Anual Estación Arauca



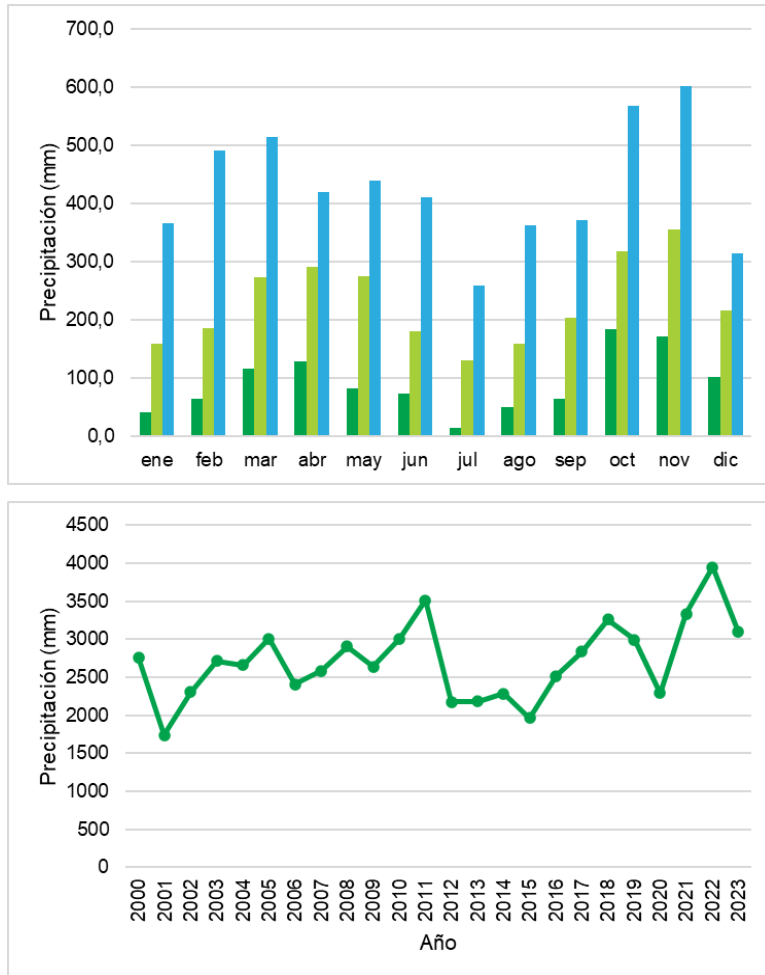
Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2025.

Figura 3-27 Distribución mensual multianual y Total Anual Estación La Esperanza



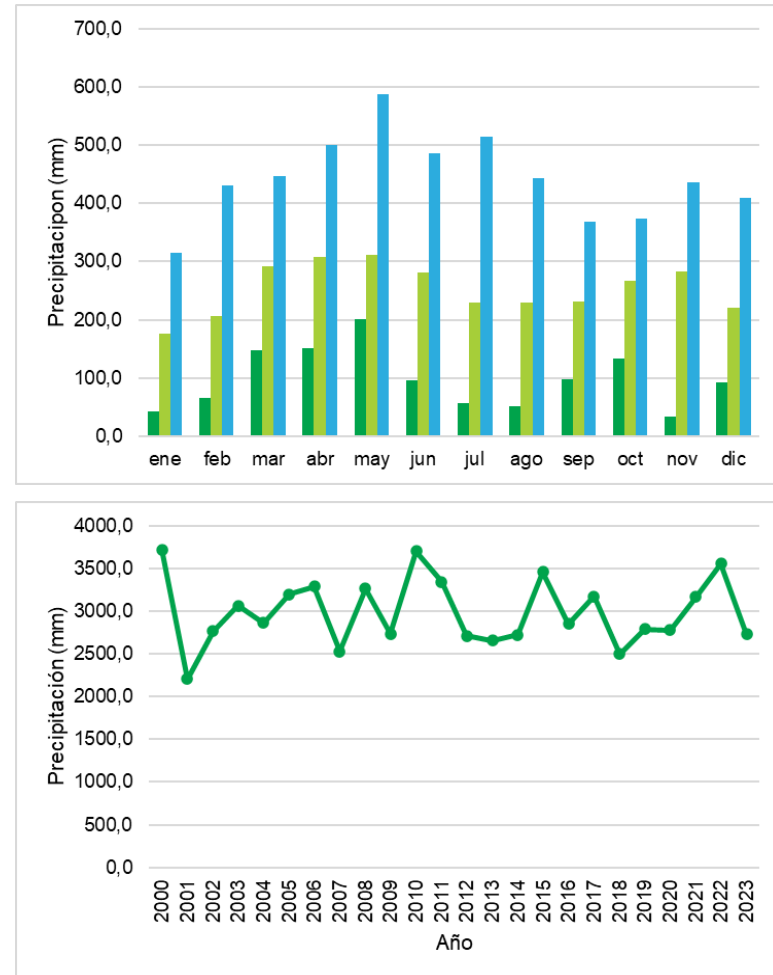
Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2025.

Figura 3-28 Distribución mensual multianual y Total Anual Estación Termales



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2025.

Figura 3-29 Distribución mensual multianual y Total Anual Estación El Recuerdo



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2025.

Se puede observar que la distribución de lluvias es bimodal, y que de manera general los meses entre marzo y abril obedecen a la primera temporada de lluvias en el año, con una temporada seca entre los meses de junio y agosto, y que la segunda temporada de lluvias se da entre los meses de octubre y diciembre, para darle paso a una segunda temporada seca entre los meses de enero a marzo. Por otro lado, de acuerdo con las figuras presentadas anteriormente, los registros de precipitación total anual presentan un comportamiento muy variable, y se destaca la estación El Recuerdo la cual durante el año 2015 presenta valores más altos respecto a las demás estaciones.

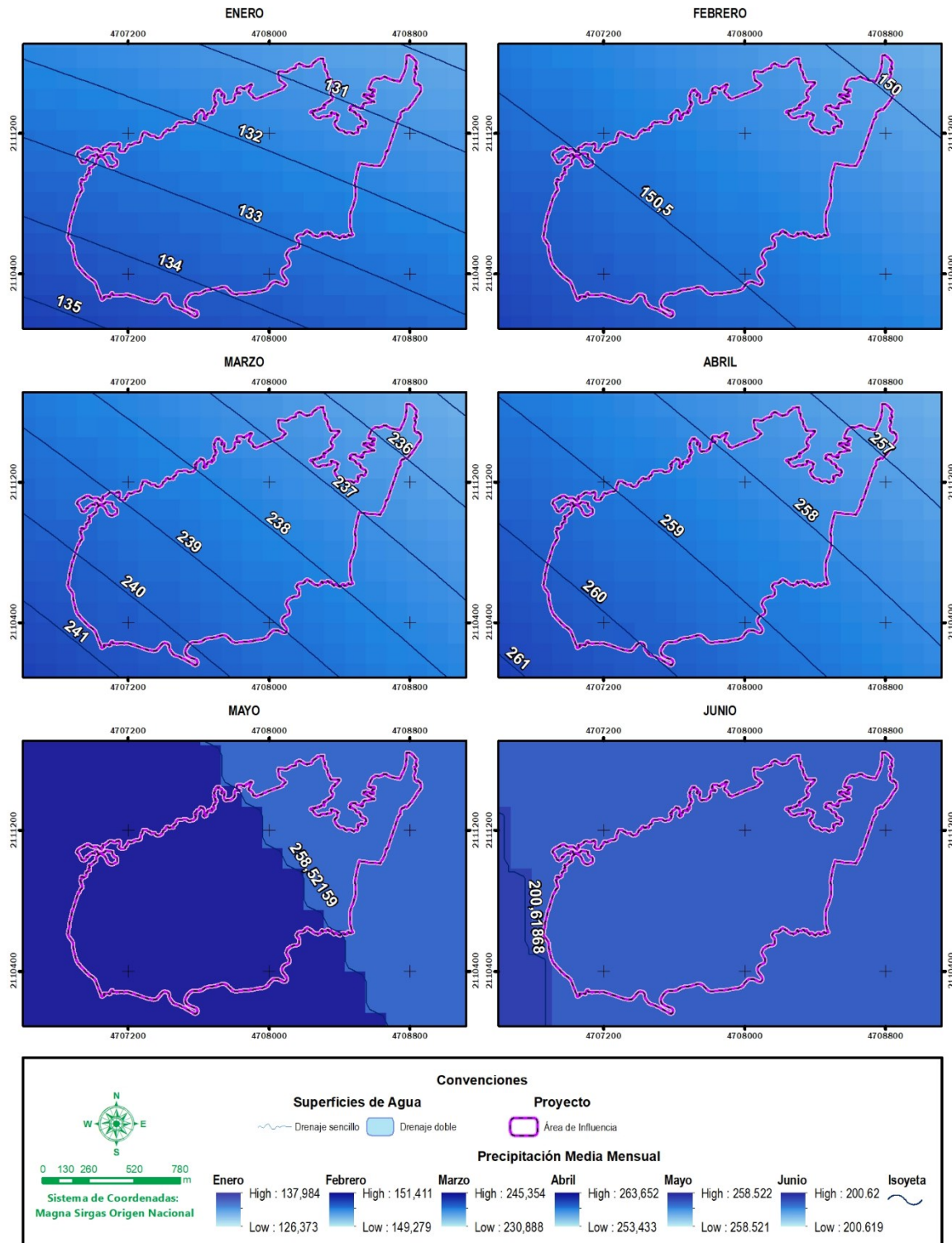
3.2.4.5.1.4 Distribución espacial de la precipitación

Mediante software GIS, con los valores puntuales de las estaciones analizadas se realizó una interpolación IDW entre las estaciones, esta herramienta permite predecir valores aproximados de lluvias a lo largo del área de estudio, lo que permite obtener la distribución de estas en el área de estudio y sus isoyetas.

En cuanto a la distribución espacial de la precipitación (isoyetas) con frecuencia multianual de las precipitaciones medias mensuales, se muestra en las Figura 3-30 a Figura 3-32, en las cuales se puede observar que la distribución de precipitación promedio durante los diferentes meses del año en el área de influencia se encuentra entre los 130 mm en el mes de enero y 290 mm en el mes de octubre, la distribución promedio mensual multianual se encuentra entre los 204 y 209 mm. Ver *ANEXOS\I. HIDROLOGÍA Y CLIMA\1. Hidrología\1.2 Precipitaciones*.

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	55
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

Figura 3-30 Distribución de precipitaciones medias e Isoyetas Enero a Junio

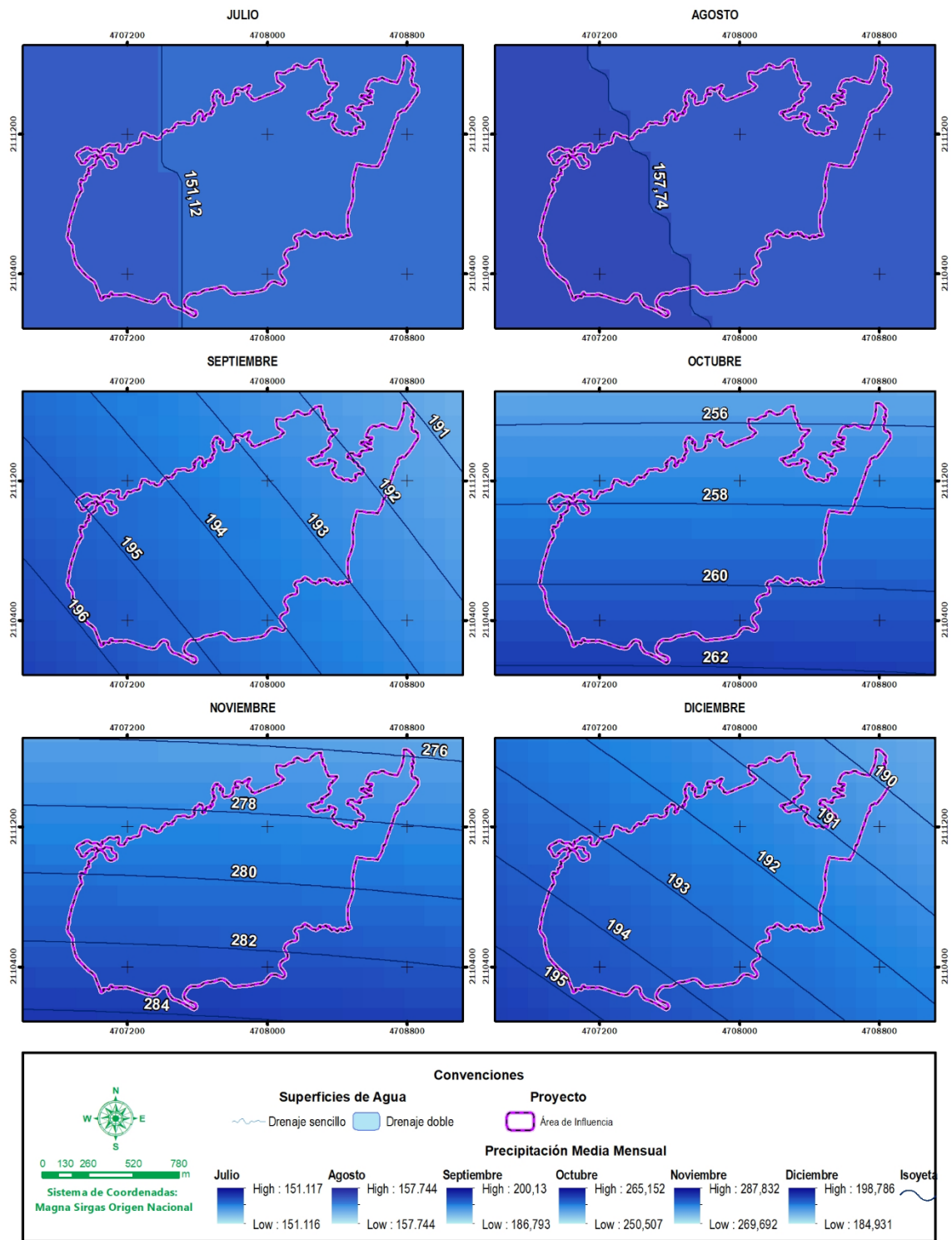


b

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	56
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

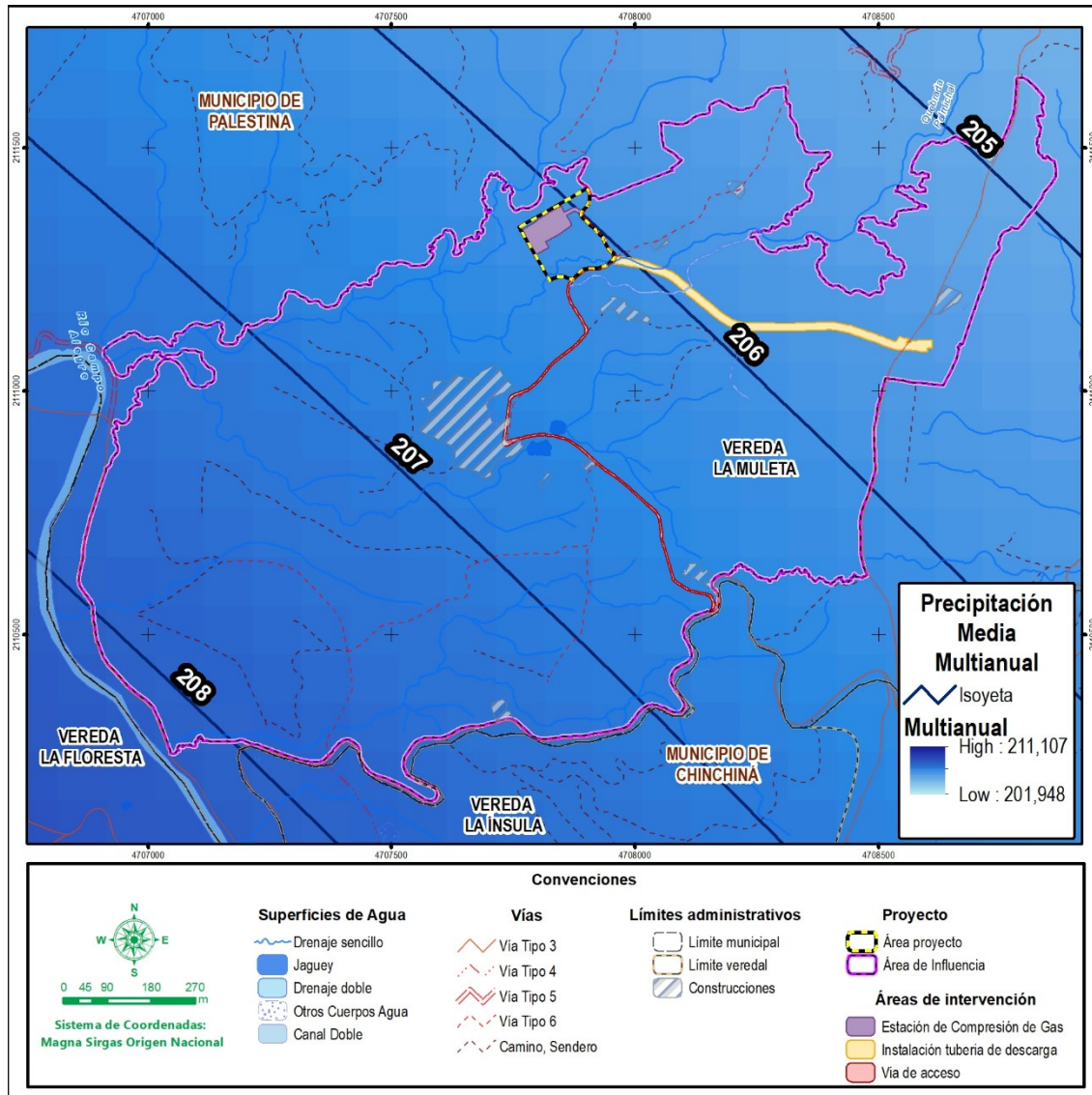
Figura 3-31 Disistribución de precipitaciones medias e Isoyetas Julio a Diciembre



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	57
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

Figura 3-32 Distribución de la precipitación promedio multianual



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.4.5.2 Temperatura

La temperatura es una magnitud física que indica la energía interna de un cuerpo, de un objeto o del medio ambiente general, medida por un termómetro.

La temperatura atmosférica es el nivel de calor existente en el aire en un punto geográfico determinado y es la principal variable por considerar para definir los tipos climáticos. En

particular, el término temperatura del aire hace referencia a la medida del estado térmico del aire con respecto a su habilidad de ceder calor a su alrededor. El promedio de las temperaturas observadas en el curso de un intervalo de tiempo determinado (hora, día, mes, año, década, etc.), se denomina temperatura media, en tanto que los valores más altos (máximos) y más bajos (mínimos) presentados en el transcurso de tal intervalo, se conocen como temperaturas extremas.

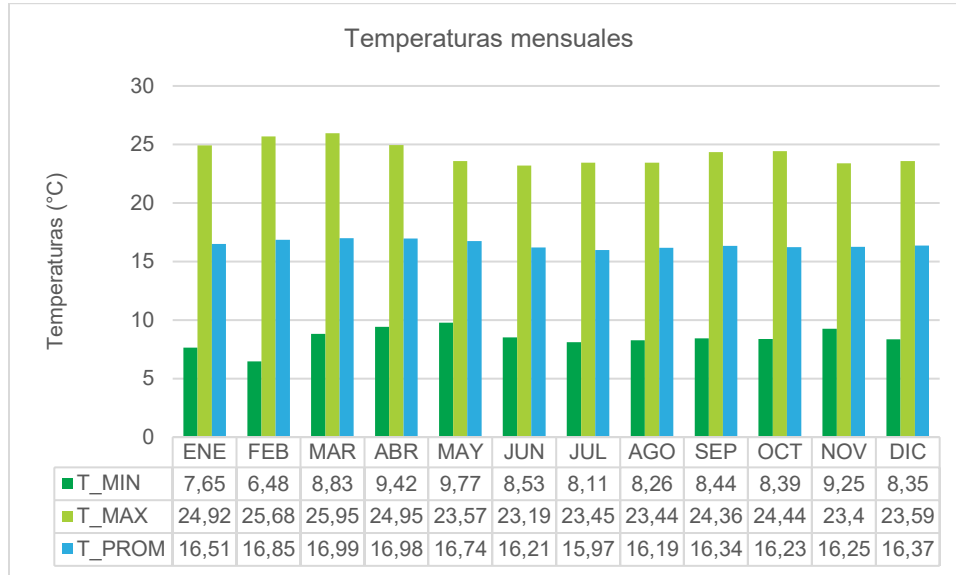
En consecuencia, la temperatura es uno de los factores más importantes en el análisis climático, pues este parámetro incide indirectamente en los procesos de evapotranspiración y condicionan la existencia de determinadas especies vegetales.

Debido a la ausencia de datos relacionados con este parámetro en las estaciones del IDEAM, se empleó la información de la base de datos de la NASA POWER. La metodología de datos POWER a través de su programa de investigación de Ciencias de la Tierra proporciona datos importantes para el estudio del clima y los procesos climáticos, estos datos incluyen estimaciones climatológicamente promediadas a largo plazo. Además, los valores diarios de los datos meteorológicos se basan en modelos que son lo suficientemente precisos para proporcionar datos confiables en regiones donde las mediciones de superficie son escasos o inexistentes.

Se consulta y descarga información de 43 años (1981-2024) en la que se obtienen temperaturas máximas y mínimas mensuales y con estos valores se estiman los valores medios. En la Figura 3-33 se presentan los valores de temperatura para el área de estudio.

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	59
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

Figura 3-33 Distribución de Temperaturas



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

El gráfico de temperaturas mensuales muestra un clima templado con variaciones estacionales moderadas. Las temperaturas mínimas oscilan entre 6,48°C en febrero y 9,77°C en mayo, mientras que las máximas van de 23,19°C en julio a 25,95°C en marzo. La temperatura promedio se mantiene estable entre 15,97°C y 16,99°C durante todo el año, lo que refleja una relativa estabilidad climática. Se observa un periodo más frío entre junio y agosto, con las temperaturas más bajas, mientras que los meses más cálidos se registran entre enero y marzo. El rango térmico entre las temperaturas máximas y mínimas es constante, con diferencias de 15-18°C, lo que sugiere un clima moderado, sin fluctuaciones bruscas de temperatura diurna y nocturna.

3.2.4.6 Régimen hidrológico

El régimen hidrológico hace referencia a la cantidad de agua que circula en cada momento y su variación a lo largo del año, es una variable clave para el ecosistema íntimamente relacionada con los procesos ecológicos que se dan en los ríos. Para ello se determinan los caudales mínimos, caudales medios y máximos, y de esta manera entender el comportamiento en las fuentes hídricas del área de estudio. Así mismo, los resultados de estos caudales permiten el cálculo de los indicadores hídricos y la oferta hídrica de las cuencas analizadas.

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	60
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

3.2.4.6.1 Cálculo de caudales

Para el cálculo de caudales se empleó el método racional ($CxIxA$), el cuál es una metodología que empezó a utilizarse alrededor de la mitad del siglo XIX, y es probablemente el método más ampliamente utilizado (Linsley, 1986). La idea detrás del método racional es que, si una lluvia con intensidad i empieza en forma instantánea y continúa en forma indefinida, la tasa de escorrentía continuará hasta que se llegue al tiempo de concentración T_c , en el cual toda la cuenca está contribuyendo al flujo en la salida. El producto de la intensidad de la lluvia i y el área de la cuenca A es el caudal de entrada al sistema, iA , y la relación entre este caudal y el caudal pico Q (que ocurre en el tiempo T_c) se conoce como el *coeficiente de escorrentía* C ($0 \leq C \leq 1$). (Chow, 1994).

El caudal máximo es un parámetro crucial que representa el flujo máximo de agua u otro fluido dentro de un intervalo específico de tiempo. Se calcula mediante la fórmula racional:

$$Q = \frac{C * i * A}{360}$$

Donde:

C: Coeficiente de Escorrentía

i: Intensidad (mm/h)

A: Área de la cuenca (Ha)

Esta medida es esencial para comprender y gestionar el comportamiento del flujo en diversas aplicaciones, desde el diseño de sistemas de drenaje hasta la evaluación de riesgos e inundaciones. Con una comprensión sólida del caudal máximo, es posible tomar decisiones informadas para garantizar la eficiencia y la seguridad en una variedad de contextos hidráulicos.

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	61
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

3.2.4.6.2 Caudales máximos

3.2.4.6.2.1 Coefficiente de Escorrentía (C):

El coeficiente de escorrentía C es la variable menos precisa del método racional. Su uso en la fórmula implica una relación fija entre la tasa de escorrentía pico y la tasa de lluvia para la cuenca de drenaje. La proporción de la lluvia total que alcanzarán los drenajes de tormenta depende del porcentaje de permeabilidad, de la pendiente y de las características de encharcamiento de la superficie. En la Tabla 3-30 se presentan algunos coeficientes de escorrentía que pueden ser utilizados en el método racional.

Tabla 3-30 Coeficientes de escorrentía

Coefficientes de escorrentía para ser usados en el método racional

Característica de la superficie	Periodo de retorno (años)						
	2	5	10	25	50	100	500
Áreas desarrolladas							
Asfáltico	0.73	0.77	0.81	0.86	0.90	0.95	1.00
Concreto/techo	0.75	0.80	0.83	0.88	0.92	0.97	1.00
<i>Zonas verdes (jardines, parques, etc.)</i>							
<i>Condición pobre (cubierta de pasto menor del 50% del área)</i>							
Plano, 0-2%	0.32	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.58
Promedio, 2-7%	0.37	0.40	0.43	0.46	0.49	0.53	0.61
Pendiente, superior a 7%	0.40	0.43	0.45	0.49	0.52	0.55	0.62
<i>Condición promedio (cubierta de pasto del 50 al 75% del área)</i>							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
<i>Condición buena (cubierta de pasto mayor del 75% del área)</i>							
Plano, 0-2%	0.21	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.49
Promedio, 2-7%	0.29	0.32	0.35	0.39	0.42	0.46	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.34	0.37	0.40	0.44	0.47	0.51	0.58
Áreas no desarrolladas							
<i>Área de cultivos</i>							
Plano, 0-2%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.57
Promedio, 2-7%	0.35	0.38	0.41	0.44	0.48	0.51	0.60
Pendiente, superior a 7%	0.39	0.42	0.44	0.48	0.51	0.54	0.61
<i>Pastizales</i>							
Plano, 0-2%	0.25	0.28	0.30	0.34	0.37	0.41	0.53
Promedio, 2-7%	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45	0.49	0.58
Pendiente, superior a 7%	0.37	0.40	0.42	0.46	0.49	0.53	0.60
<i>Bosques</i>							
Plano, 0-2%	0.22	0.25	0.28	0.31	0.35	0.39	0.48
Promedio, 2-7%	0.31	0.34	0.36	0.40	0.43	0.47	0.56
Pendiente, superior a 7%	0.35	0.39	0.41	0.45	0.48	0.52	0.58

Nota: Los valores de la tabla son los estándares utilizados en la ciudad de Austin, Texas. Utilizada con autorización.

Fuente: Chow, 1994

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	62
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

Para el presente estudio, se parte de la capa de coberturas de la tierra según la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000, y se asignan los valores de coeficiente de escorrentía conforme la metodología propuesta por (Chow, 1994) para cada una de las cuencas objeto de estudio, para posteriormente obtener un valor promedio de coeficiente de escorrentía por cada una, asociada a cada periodo de retorno. En las Tabla 3-31, Tabla 3-32 y Tabla 3-33, se presentan los valores asignados para cada cuenca y los valores promedio de coeficiente de escorrentía para la cuenca.

Tabla 3-31 Coeficientes de escorrentía Quebrada Palmichal

QUEBRADA PALMICHAL							
Coberturas CLC 2018	Área (Km ²)	Coef_C2	Coef_C5	Coef_C10	Coef_C25	Coef_C50	Coef_C100
3.1.4. Bosque de galería y ripario	0,19	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	0,46	0,39	0,42	0,44	0,48	0,51	0,54
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	0,29	0,4	0,43	0,45	0,49	0,52	0,55
5.1.1. Ríos	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2.3.1. Pastos limpios	0,01	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0,02	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	1,90	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,51
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	0,26	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41
PROMEDIO PONDERADO		C2	C5	C10	C25	C50	C100
		0,34	0,37	0,40	0,43	0,47	0,50

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Tabla 3-32 Coeficientes de escorrentía Directos río Campo Alegre - NN

DIRECTOS RÍO CAMPO ALEGRE - NN							
Coberturas CLC 2018	Área_Km2	Coef_C2	Coef_C5	Coef_C10	Coef_C25	Coef_C50	Coef_C100
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	1,61	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,51
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	2,16	0,39	0,42	0,44	0,48	0,51	0,54
3.1.4. Bosque de galería y ripario	0,45	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39
5.1.1. Ríos	0,04	1	1	1	1	1	1
2.3.1. Pastos limpios	0,00	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	0,31	0,25	0,28	0,3	0,34	0,37	0,41
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0,75	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
PROMEDIO PONDERADO		C2	C5	C10	C25	C50	C100
		0,30	0,33	0,35	0,38	0,41	0,44

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Tabla 3-33 Coeficientes de escorrentía Quebrada Comeguadua

QUEBRADA COMEGUADUA							
COBERTURAS CLC 2018	Área_Km2	Coef_C2	Coef_C5	Coef_C10	Coef_C25	Coef_C50	Coef_C100
1.3.1. Zonas de extracción minera	0,13	0,75	0,8	0,83	0,88	0,92	0,97
1.1.1. Tejido urbano continuo	1,57	0,73	0,77	0,81	0,86	0,9	0,95
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	0,65	0,25	0,28	0,3	0,34	0,37	0,41
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	4,44	0,39	0,42	0,44	0,48	0,51	0,54
5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	0,29	1	1	1	1	1	1
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	0,43	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,51
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	2,50	0,25	0,28	0,3	0,34	0,37	0,41
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	0,08	0,4	0,43	0,45	0,49	0,52	0,55
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	0,46	0,75	0,8	0,83	0,88	0,92	0,97
5.1.1. Ríos	0,0033	1	1	1	1	1	1
2.3.1. Pastos limpios	0,68	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	2,26	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,51
PROMEDIO PONDERADO		C2	C5	C10	C25	C50	C100
		0,42	0,45	0,47	0,51	0,54	0,58

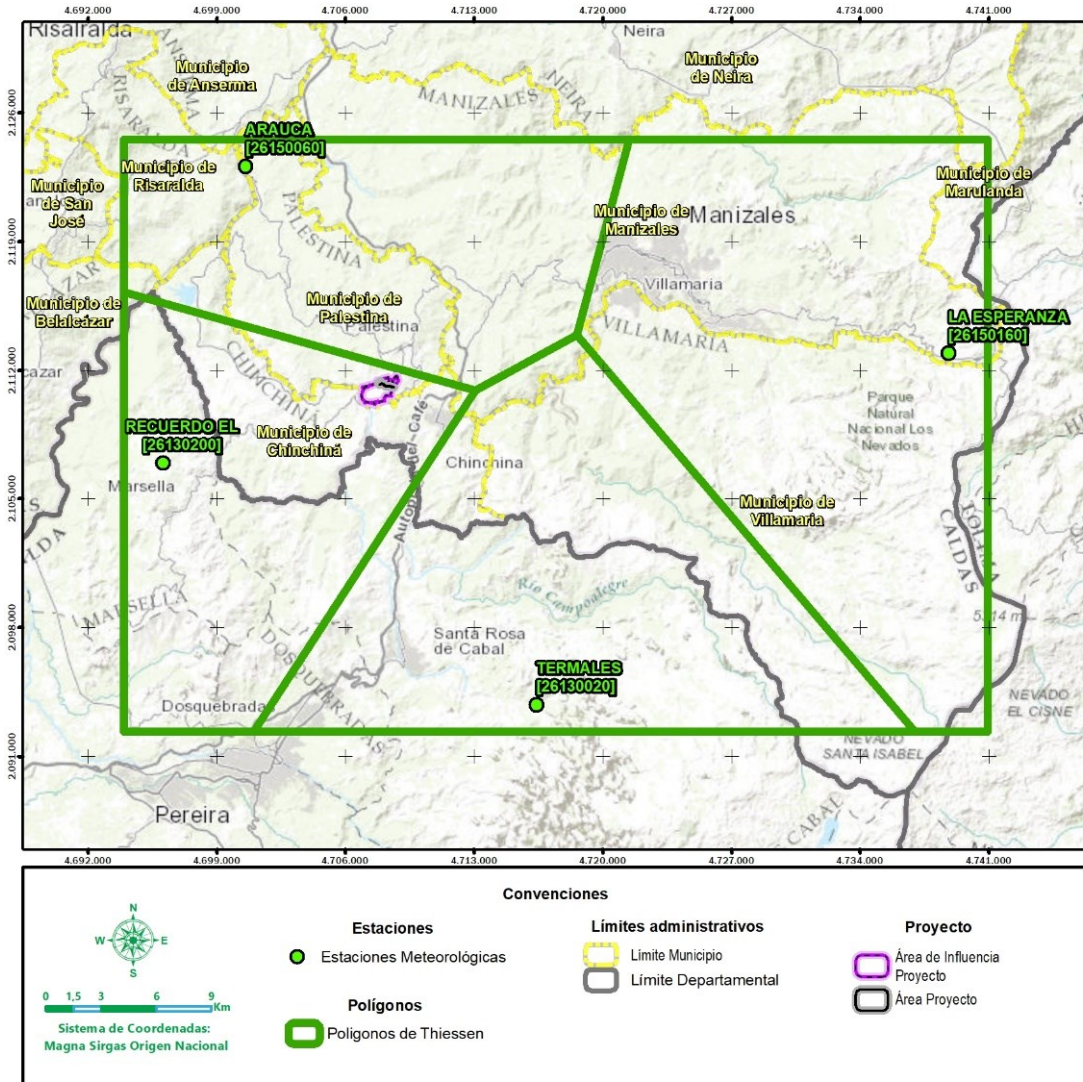
Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.4.6.2.2 Cálculo de intensidades

Para el cálculo de intensidades se tiene en cuenta la incidencia de las estaciones con el área del proyecto, para esto, mediante software GIS se trazan los polígonos de Thiessen, los cuáles unen las estaciones formando triángulos y por mediatrices se calcula el área de influencia de cada estación sobre el área del proyecto formando polígonos.

Para el caso del área de influencia de Palestina, la Estación El Recuerdo (26130200), tiene una influencia del 100% por tal motivo solo se tendrá en cuenta los datos de dicha estación para el cálculo de intensidades de lluvia.

Figura 3-34 Polígonos de Thiessen

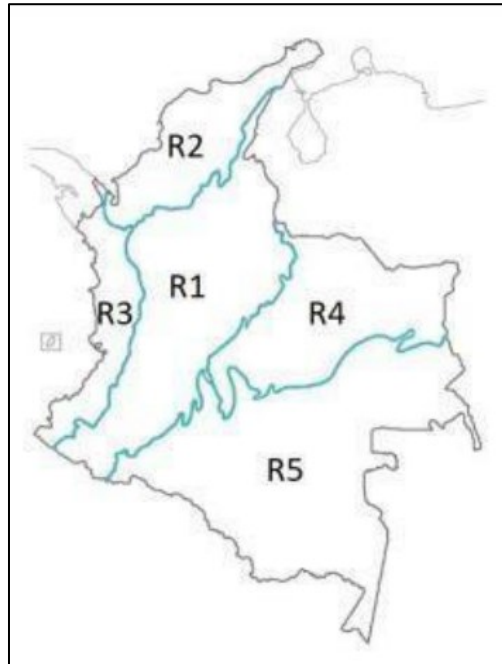


Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

La metodología empleada para el cálculo de intensidades es la de las Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para Colombia planteada por Vargas y Díaz-Granados (1998), quienes utilizan la ecuación de Kathyari y Garde para estimar sus parámetros en función de la información pluviográfica de 165 estaciones distribuidas por todo el territorio nacional. Para minimizar la incertidumbre, los autores dividen a Colombia en 5 regiones (Caribe, Andina, Pacífica, Orinoquía y Amazonía) con el fin de estimar los parámetros de forma más específica, tal como se presenta en la Figura 3-35.

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	65
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

Figura 3-35 División Regional de Colombia



Fuente: Vargas & Diaz-Granados, 1998.

De acuerdo con lo anterior, la ecuación de intensidad generalizada viene dada por:

$$I = \frac{a * T^b * M^d}{\left(\frac{t}{60}\right)^c}$$

Donde:

T: Periodo de retorno (años)

t: Duración de la lluvia (minutos)

M: Promedio máximo anual de precipitación diaria en la zona de estudio

a,b,c y d: Constantes que dependen de cada región

Tabla 3-34 Constantes acordes a cada región

REGIÓN	a	b	c	d
Andina	0,94	0,18	0,66	0,83
Caribe	24,85	0,22	0,5	0,1
Pacífico	13,92	0,19	0,58	0,2
Orinoquía	5,53	0,17	0,63	0,42
Amazonía	-	-	-	-

Fuente: Vargas & Diaz-Granados, 1998, adaptado por CONSGA BIC S.A.S., 2024.

De acuerdo con la ecuación presentada y la tabla de regionalización, se calculan las curvas IDF para el área de estudio que se encuentra localizada en la Región Andina, por lo que se emplean los valores de dicha región en la ecuación y se obtiene como resultado las curvas presentadas en la Figura 3-36. Para los datos de precipitación se utilizaron los valores medios mensuales de la estación El Recuerdo convertidos a valores diarios mediante la siguiente ecuación:

$$P_d = F * P_m$$

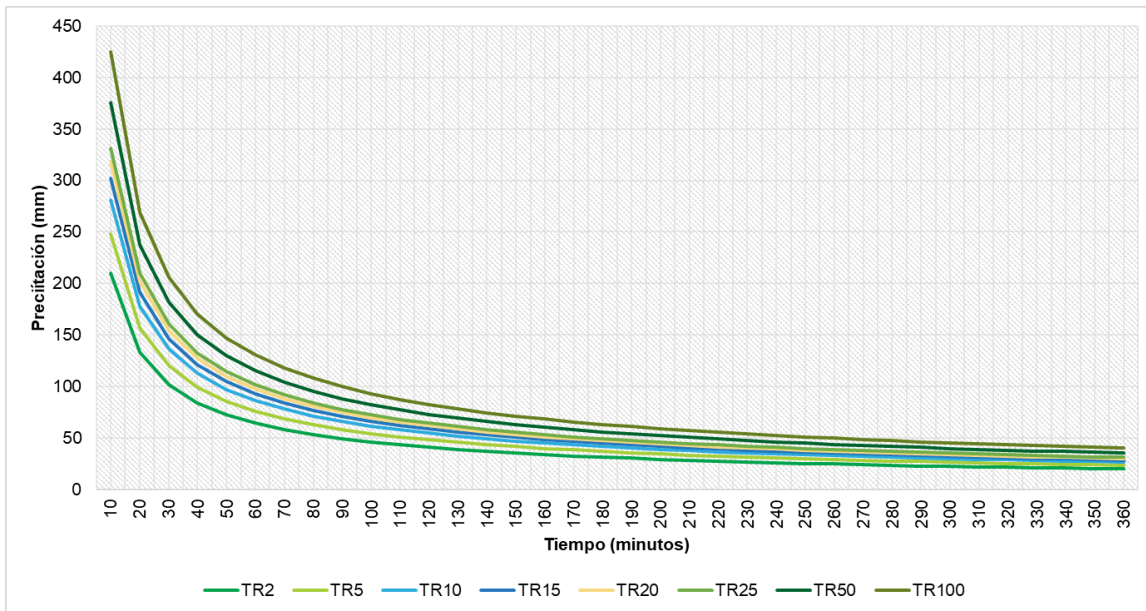
Donde:

P_d : Precipitación máxima diaria (mm)

F : Factor de corrección, valor entre 0,3 y 0,6 (Chow, 1994).

P_m : Precipitación media mensual (mm)

Figura 3-36 Curvas IDF Estación El Recuerdo



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

A partir de las curvas IDF y el tiempo de concentración obtenido para cada cuenca, se calcula la intensidad de lluvia para diferentes periodos de retorno los cuales se presentan en la Tabla 3-35.

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	67
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

Tabla 3-35 Intensidades de Lluvia para cada cuenca

QUEBRADA PALMICHAL		DIRECTOS RÍO CAMPO ALEGRE - NN		QUEBRADA COMEGUADUA	
Tc min	24,7	Tc min	60,4	Tc min	77,04
Tr (años)	INTENSIDAD (mm/h)	Tr (años)	INTENSIDAD (mm/h)	Tr (años)	INTENSIDAD (mm/h)
2	115,81	2	64,19	2	54,67
5	136,58	5	75,70	5	64,47
10	154,73	10	85,76	10	73,03
15	166,45	15	92,25	15	78,56
20	175,29	20	97,15	20	82,74
25	182,48	25	101,14	25	86,13
50	206,73	50	114,57	50	97,58
100	234,20	100	129,80	100	110,54

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.4.6.2.3 Resultados caudales máximos

Una vez se obtienen los parámetros como la intensidad de lluvias, el coeficiente escorrentía de cada cuenca y sus áreas, se aplica entonces el método racional para el cálculo de caudales máximos en diferentes periodos de retorno, donde se obtienen los resultados que se presentan en las Tabla 3-36, Tabla 3-37, Tabla 3-38.

Tabla 3-36 Caudales máximos Quebrada Palmichal

CAUDALES MÁXIMOS				
Quebrada Palmichal				
Área (Ha)	Periodo de Retorno	Coefficiente de Escorrentía	Intensidad (mm/h)	Caudal máximo (m³/s)
313,29	Tr2	0,34	115,8	34,28
	Tr5	0,37	136,6	43,96
	Tr10	0,40	154,7	53,38
	Tr25	0,43	182,5	68,18
	Tr50	0,47	206,7	83,81
	Tr100	0,50	234,2	101,32

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Tabla 3-37 Caudales máximos Directos río Campo Alegre - NN

CAUDALES MÁXIMOS				
Directos río Campo Alegre - NN				
Área (Ha)	Periodo de Retorno	Coefficiente de Escorrentía	Intensidad (mm/h)	Caudal máximo (m³/s)
532,80	Tr2	0,30	64,2	28,26
	Tr5	0,33	75,7	36,67
	Tr10	0,35	85,8	44,06
	Tr25	0,38	101,1	56,41
	Tr50	0,41	114,6	68,95

CAUDALES MÁXIMOS				
Directos río Campo Alegre - NN				
	Tr100	0,44	129,8	83,83

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Tabla 3-38 Caudales máximos Quebrada Comeguadua

CAUDALES MÁXIMOS				
Quebrada Comeguadua				
Área (Ha)	Periodo de Retorno	Coefficiente de Escorrentía	Intensidad (mm/h)	Caudal máximo (m³/s)
1349	Tr2	0,42	54,7	84,71
	Tr5	0,45	64,5	107,68
	Tr10	0,47	73,0	128,30
	Tr25	0,51	86,1	163,70
	Tr50	0,54	97,6	197,41
	Tr100	0,58	110,5	238,18

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.4.6.3 Caudales medios

Se denomina balance hídrico al principio de conservación de las masas, definiendo la entrada y salida de agua de una cuenca o lugar determinado. Por tanto, el balance hídrico establece el déficit, almacenamiento o exceso de agua que se puede presentar en un área determinada para definir la clasificación climática, definir la hidrología o hidráulica.

Para calcular el balance hídrico, se utilizó la metodología planteada por Thornthwaite (1995), la cual se basa en el análisis del ciclo del agua, considerando las entradas y salidas de agua en función de la precipitación, la evapotranspiración potencial (ETP) y la capacidad de retención de agua en el suelo. La metodología divide el año en meses, y se evalúa la disponibilidad de agua, considerando si la precipitación excede o es inferior a la evapotranspiración. Cuando la precipitación es mayor que la ETP, se calcula el excedente de agua, que se traduce en recarga del suelo o escorrentía. En los meses en que la ETP es mayor que la precipitación, se cuantifica el déficit hídrico y se analiza el agotamiento de las reservas de agua en el suelo.

La metodología de Thornthwaite define los siguientes elementos para el cálculo del balance hídrico

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	69
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

Almacenamiento (Al): Agua almacenada por el suelo en el mes n

$$Al = Al_{i-1} - PAL$$

Al_{i-1} : Almacenamiento anterior

PAL : Pérdida por almacenamiento.

Pérdida por almacenamiento (PAL): Agua almacenada que es retirada del suelo por evapotranspiración.

$$PAL = (ETP - P) \left(\frac{Al_{i-1}}{AIT} \right)$$

ETP : Evapotranspiración potencial media (mm).

P : Precipitación media (mm).

AIT : Capacidad de almacenamiento máxima del suelo (mm).

Evapotranspiración real (ET): Cantidad de agua disponible en el suelo para ser evapotranspirada.

$$ET = P + PAL$$

Déficit (Df): Cantidad de agua faltante para suplir el almacenamiento del suelo.

$$Df = ETP - ET$$

Exceso (Ex): Cantidad de agua que no es almacenada por el suelo.

$$Ex = Al_{i-1} + P - ETP - AIT$$

3.2.4.6.3.1 Evapotranspiración potencial (ETP)

Es la cantidad máxima de agua capaz de ser perdida por evaporación desde el suelo y por transpiración de las plantas cuando el suelo se encuentra con un contenido óptimo de humedad (capacidad de campo), cubierto por completo con un manto herbáceo de poca altura (5 cm), en activo crecimiento y cuyo albedo sea aproximadamente de un 25%. A partir de datos diarios de temperatura, se aplicó la ecuación de Hargreaves (1994), utilizada por IDEAM (2017).

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	70
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

$$ETP = 0,0023 (T_{med} + 17,78)R_o(T_{max} - T_{min})^{0,50}$$

Donde:

ETP: Evapotranspiración potencial (mm)

Tmin-media-max: Temperatura mínima, media y máxima (°C)

Ro: Radiación extraterrestre expresada en evaporación equivalente (mm/día)

- Radiación solar extraterrestre: es la radiación solar diaria que se recibe sobre un superficial horizontal situada en límite superior de la atmósfera. El valor se define a partir del valor de la constante solar.

Para asignar el valor correspondiente a la radiación solar extraterrestre se utiliza la tabla de radiación solar extraterrestre de Allen et al. (1998) la cual muestra la distribución de radiación para cada mes del año y dependiendo de la latitud, para el presente proyecto se usaron los datos para la latitud 5 cuyos valores se muestran en la Tabla 3-39.

Tabla 3-39 Radiación solar extraterrestre en mm/día.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Ro (mm/día)	14,1	14,9	15,3	15,3	14,7	14,3	14,4	14,9	15,2	14,9	14,2	13,8

Fuente: Allen et al. (1998)

3.2.4.6.3.2 Evapotranspiración real (ETr)

La ETR es definida por el IDEAM (2017) como la cantidad de agua perdida por el complejo planta suelo en las condiciones meteorológicas, edafológicas y biológicas existentes. Esta evapotranspiración es estimada con la ecuación de Budyko, la cual transforma los valores potenciales a reales a partir de un balance hídrico anual y se define mediante la siguiente expresión (IDEAM, 2022):

$$ETR = \sqrt{\left(ETP * P * \tanh \frac{P}{ETP}\right) * \left(1 - \cosh \frac{ETP}{P} + \sinh \frac{ETP}{P}\right)}$$

Donde:

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	71
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

ETR: evapotranspiración real (mm/año)

ETP: evapotranspiración potencial (mm/año)

P: precipitación (mm/año)

En la Tabla 3-40 se presentan los parámetros calculados para el área de influencia del estudio.

Tabla 3-40 Cálculo de ETP y ETr

PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
*Tmax	24,9	25,7	26	25	23,6	23,2	23,5	23,4	24,4	24,4	23,4	23,6	26
*Tmed	16,5	16,9	17	17	16,8	16,2	16	16,2	16,3	16,2	16,3	16,4	16,5
*Tmin	7,7	6,5	8,8	9,4	9,8	8,5	8,1	8,3	8,4	8,4	9,3	8,4	6,5
Ro	14,1	14,9	15,3	15,3	14,7	14,3	14,4	14,9	15,2	14,9	14,2	13,8	14,7
**ETP	143,3	150,9	157,0	144,7	134,5	128,5	135,8	140,7	142,9	144,8	125,5	131,2	1.679,9
**PPT	175,5	205,6	292,4	307,6	311,2	280,2	229,5	229,1	231,8	266,1	282,2	221,0	3.032,2
**Etr	122,3	128,7	133,9	123,4	114,7	109,6	115,8	120,0	121,8	123,5	107,0	111,9	1432,7

*°C, ** mm/mes

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2025.

Dadas las condiciones de precipitación y temperatura que se presentan en la zona, la Evapotranspiración Potencial y Evapotranspiración Real corresponden a un valor anual de **1679,9 y 1442,7** mm/año respectivamente, siendo correlacionable con lo evidenciado en campo en cuanto a las condiciones de humedad, la vegetación y el tipo de suelo que se encuentra en el área. (ANEXOS\I. HIDROLOGÍA Y CLIMA\1. Hidrología\1.3 ETP y ETR).

En la Tabla 3-41 se presentan los valores obtenidos, con base en el balance hídrico realizado para el área de estudio. Las temperaturas se mantienen moderadas durante todo el año, con variaciones en el índice de calor que reflejan la influencia estacional. La evapotranspiración potencial (ETP) se mantiene uniforme a lo largo del año con valores entre el rango de **125,5 mm en noviembre y 157,0 en marzo**, mientras que las precipitaciones alcanzan su pico entre abril y junio, con un **máximo de 311,2 mm en mayo**. Esto genera un excedente de agua considerable, con importantes escorrentías y desagües que podrían resultar en riesgos de inundaciones durante esta temporada.

La precipitación es mayor a la evapotranspiración en todos los meses del año, haciendo no que exista déficit hídrico, por tanto, desde el punto de vista del balance hídrico anual, siempre hay disponibilidad de agua.

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	73
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

Tabla 3-41 Balance hídrico

VARIABLE	BALANCE HÍDRICO MENSUAL												ANUAL
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	SUMA /MEDIA
T (Temperatura)	16,51	16,85	16,99	16,98	16,75	16,22	15,97	16,19	16,34	16,23	16,25	16,37	16,47
ETP (Evapotranspiración Potencial)	143,35	150,90	157,04	144,70	134,50	128,50	135,80	140,67	142,85	144,82	125,49	131,24	1679,85
P (Precipitación)	175,50	205,60	292,40	307,60	311,20	280,20	229,50	229,10	231,80	266,10	282,20	221,00	3032,20
P-ETP (Precipitación efectiva)	32,15	54,70	135,36	162,90	176,70	151,70	93,70	88,43	88,95	121,28	156,71	89,76	
R (Reserva del suelo)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
VR (Variación de la reserva)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
ETR (Evapotranspiración Real)	143,35	150,90	157,04	144,70	134,50	128,50	135,80	140,67	142,85	144,82	125,49	131,24	1679,85
Fi (Falta de agua)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
EX Exceso de Agua (Escorrentía) (Q)	32,15	54,70	135,36	162,90	176,70	151,70	93,70	88,43	88,95	121,28	156,71	89,76	1352,35
D Desagüe (50%)	71,52	63,11	99,23	131,07	88,35	120,02	106,86	97,65	93,30	107,29	132,00	110,88	1221,28
CAUDAL MEDIO MENSUAL (l/s)													
Campo Alegre	147,06	129,77	204,06	269,52	181,67	246,81	219,75	200,79	191,85	220,62	271,44	228,01	206,41
Comeguadua	372,21	328,44	516,46	682,14	459,81	624,65	556,17	508,20	485,57	558,39	687,00	577,08	522,42
Palmichal	86,36	76,21	119,83	158,27	106,69	144,93	129,04	117,91	112,66	129,56	159,40	133,90	121,21

Fuente: CONSGA BIC S.A.S,2024

3.2.4.6.4 Caudales mínimos

De acuerdo con el estudio realizado por Sandoval (2014), en la determinación de caudales en cuencas con poca información hidrológica, como es el caso de las cuencas del área de influencia de la ECG, las que no cuentan con estaciones limnigráficas que permitan la medición de caudales in-situ, afirman que:

El caudal mínimo de una cuenca se utiliza generalmente como referencia para determinar el caudal ecológico, por lo que se recomienda considerarlo igual a:

$$Q_{min} = \frac{PA}{10^6} = Q_{eco}$$

Donde:

Q_{min} : Caudal mínimo de la cuenca (m³/s)

P: Promedio precipitación anual (mm)

A: Área de la cuenca (km²)

Si se asume que en cada cuenca la vida animal y vegetal tiene que estar adaptada a las condiciones naturales del sitio, y que esa adaptación se relaciona directamente con el volumen de agua disponible, incluyendo las variaciones extremas, se observa que la anterior ecuación propuesta corresponde a las condiciones mínimas de equilibrio (Ortiz, 2014). Para las cuencas de Palestina se implementa dicha ecuación obteniendo los caudales mínimos presentados en las Tabla 3-42, Tabla 3-43 y Tabla 3-44.

Tabla 3-42 Caudal mínimo Quebrada Palmichal

CAUDAL MÍNIMO QUEBRADA PALMICHAL	
Área (km ²)	3,13
PPT MED (mm)	252,7
Qmin (l/s)	0,79

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Tabla 3-43 Caudal mínimo Directos río Campo Alegre - NN

CAUDAL MÍNIMO DIRECTOS RÍO CAMPO ALEGRE - NN	
Área (km ²)	5,33
PPT MED (mm)	252,7
Qmin (l/s)	1,35

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	75
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

Tabla 3-44 Caudal mínimo Quebrada Comeguadua

CAUDAL MÍNIMO QUEBRADA COMEGUADUA	
Área (km ²)	13,49
PPT MED (mm)	252,7
Qmin (m ³ /s)	3,41

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.4.7 Indicadores hídricos

3.2.4.7.1 Índice de Aridez

La aridez es un fenómeno climático que describe la escasez del agua sobre un territorio determinado, entendiendo el suministro como la precipitación promedio (P), la evapotranspiración potencial (ETP) como el agua requerida por el sistema y la evapotranspiración real (ETr) como el resultado del balance que efectivamente tiene la región. De esta manera, el índice de aridez (IA) es un indicador simple pero efectivo que caracteriza los déficits hídricos naturales a largo plazo, el cual es entendido como la relación entre la ETP y la ETr, como indica la siguiente expresión (IDEAM, 2022):

$$IA = \frac{ETP - ETR}{ETP}$$

Donde:

IA: Índice de aridez (-)

ETP: Evapotranspiración potencial (mm/año)

ETR: Evapotranspiración real (mm/año)

Esta relación clasifica el clima regional de acuerdo con la disponibilidad de agua para el sostenimiento de los ecosistemas, es evaluada de forma cuantitativa, y clasifica las regiones en siete categorías: desde altamente deficitario hasta altos excedente de agua, como se indica en la Tabla 3-45.

Tabla 3-45 Categorías del índice de aridez

CATEGORÍA	RANGO
Altamente deficitario de agua	>0,60
Deficitario de agua	0,50 - 0,59
Moderado a deficitario de agua	0,40 – 0,49
Moderado	0,30 – 0,39
Moderado a excedentes de agua	0,20 – 0,29
Excedentes de agua	0,15 – 0,19
Altos excedentes de agua	<0,15

Fuente: (IDEAM, 2022)

Para el cálculo del Índice de Aridez se emplea la ecuación anterior y se obtiene el siguiente resultado:

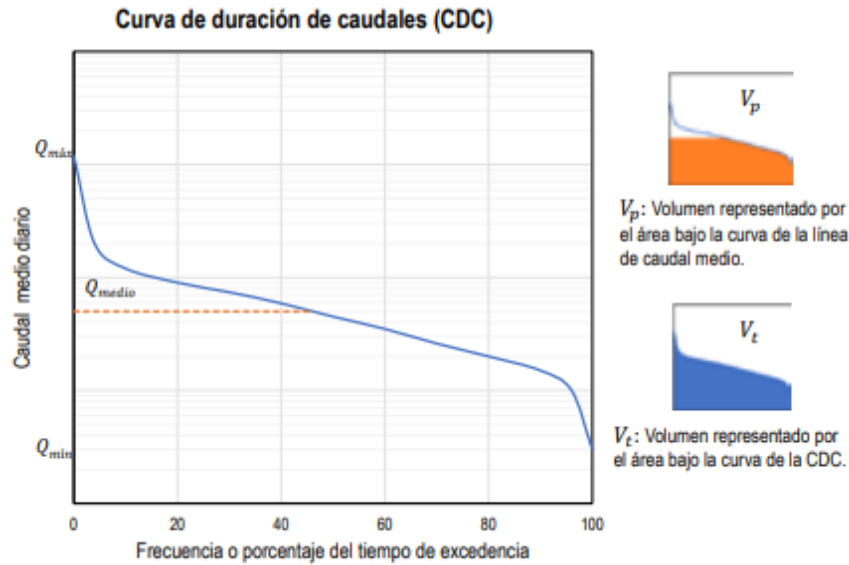
$$IA = \frac{1679,9 - 1441,3}{1679,9} = 0,14$$

De acuerdo con este resultado, el área de estudio se encuentra dentro de la categoría “Excedentes de agua”.

3.2.4.7.2 Índice de Regulación Hídrica

El índice de regulación hídrica (IRH) evalúa la capacidad de la cuenca para mantener y regular un régimen de caudales, la cual está limitada por la interacción del sistema suelo-vegetación (características físicas y morfométricas de la cuenca). Su definición se hace con respecto a la curva de duración de caudales medios diarios (CDC), que presenta una relación del porcentaje de tiempo durante el cual los caudales igualan o exceden un valor dado la forma y pendiente de la CDC indica los tiempos de duración de un caudal en un cauce, y la relación de áreas bajo la curva define su regulación acorde con la siguiente ecuación y su representación gráfica en la Figura 3-37.

Figura 3-37 Esquematación de la curva de duración de caudales y los volúmenes para el cálculo del IRH



Según el Estudio Nacional del Agua - ENA - 2018 (IDEAM, 2018), se delimitaron 16 regiones homogéneas para el país, como áreas que comparten características climatológicas, fisiográficas o hidrológicas similares (Razavi & Coulibaly, 2013). Sobre estas regiones se aplicó la metodología descrita por Gottschalk et al (2013) en la que a partir de las series históricas de caudal en la región homogénea se hace un promedio de todas las CDC estándar adimensionales (afectadas por el caudal medio) de las estaciones disponibles, para obtener una única curva para región, la cual es asignada en las subzonas que no tiene una estación de referencia (IDEAM, 2022).

Los valores de cada IRH para cada subzona hidrológica son clasificados de forma cualitativa de acuerdo con la escala presentada en la Tabla 3-46.

Tabla 3-46 Categorías del índice de regulación hídrica

CATEGORÍA	RANGO
Muy alta	>0,85
Alta	0,75 – 0,85
Moderada	0,65 - 0,75
Baja	0,50 – 0,65
Muy Baja	≤ 0,50

Fuente: (IDEAM, 2022)

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	78
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

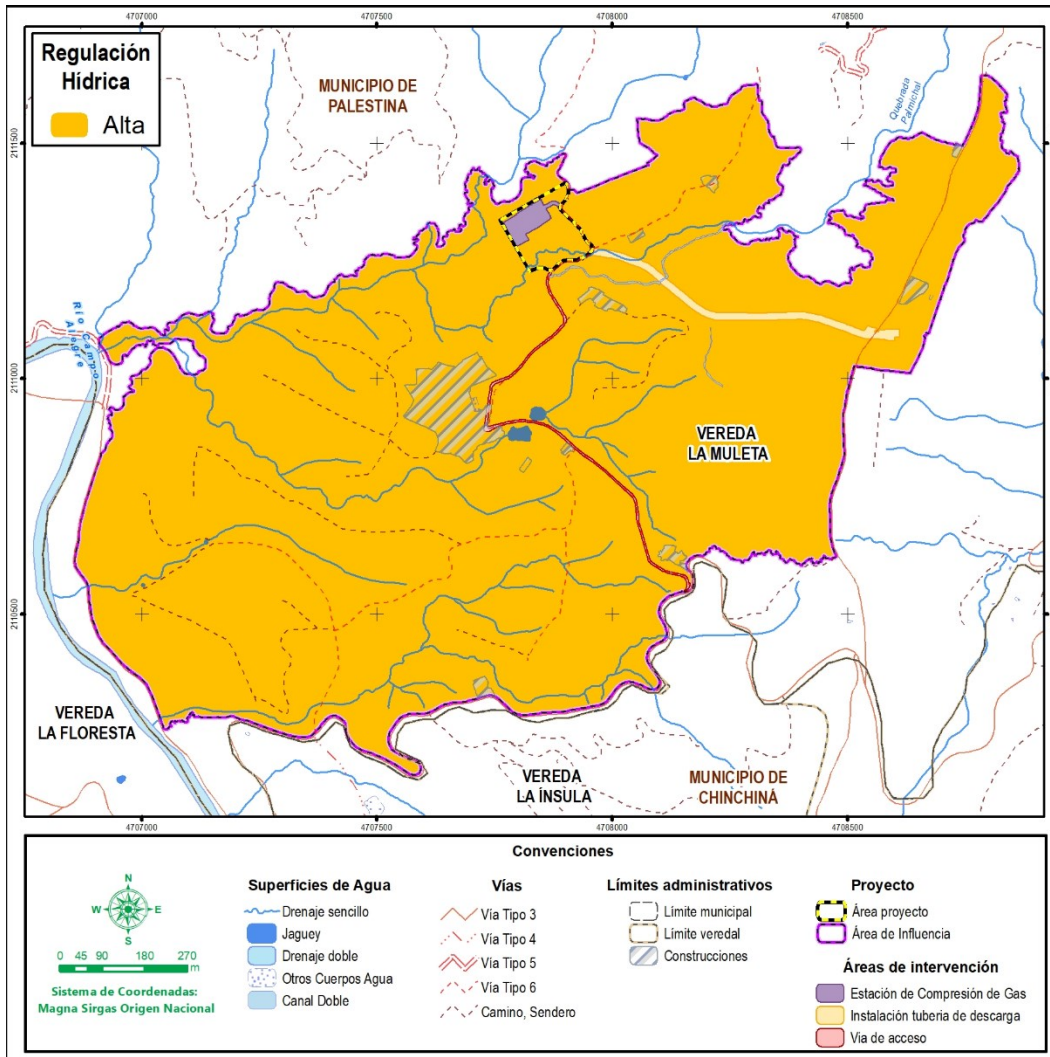
El cálculo de IRH está limitado a la cantidad de estaciones hidrológicas con un buen registro de caudales diarios y una curva de gasto actualizada con aforos sistemáticos anuales. De acuerdo con lo anterior, y dado que no hay disponibilidad de caudales de estaciones hidrológicas, se tomó como referencia los resultados del IRH del POMCA Río Campoalegre (CORPOCALDAS, 2023) y el POMCA Río Chinchiná (CORPOCALDAS, 2016).

Con base en la cartografía oficial de los POMCA mencionados anteriormente, para el área de influencia, el IRH varía entre Alto y Muy Alto, es decir en el rango de, 0,75 y mayor a 0,85, siendo 0,89 el valor más alto calculado por el POMCA del Río Campoalegre. Este valor es más optimista que la estimación realizada por el ENA (2018) y ENA (2022), donde se estima un IRH en categoría moderada.

Con base en lo anterior, para el área de influencia del EIA Palestina el IRH es Alto (Figura 3-38), valor obtenido mediante la ponderación de los resultados de la capa *IndiceRetencionRegHidrica*, del POMCA Río Campoalegre (2023).

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	79
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

**Figura 3-38 índice de Regulación Hídrica (IRH) para el área de influencia de la ECG
Palestina**



Fuente: IDEAM, 2022. adaptado por CONSGA BIC S.A.S,2024

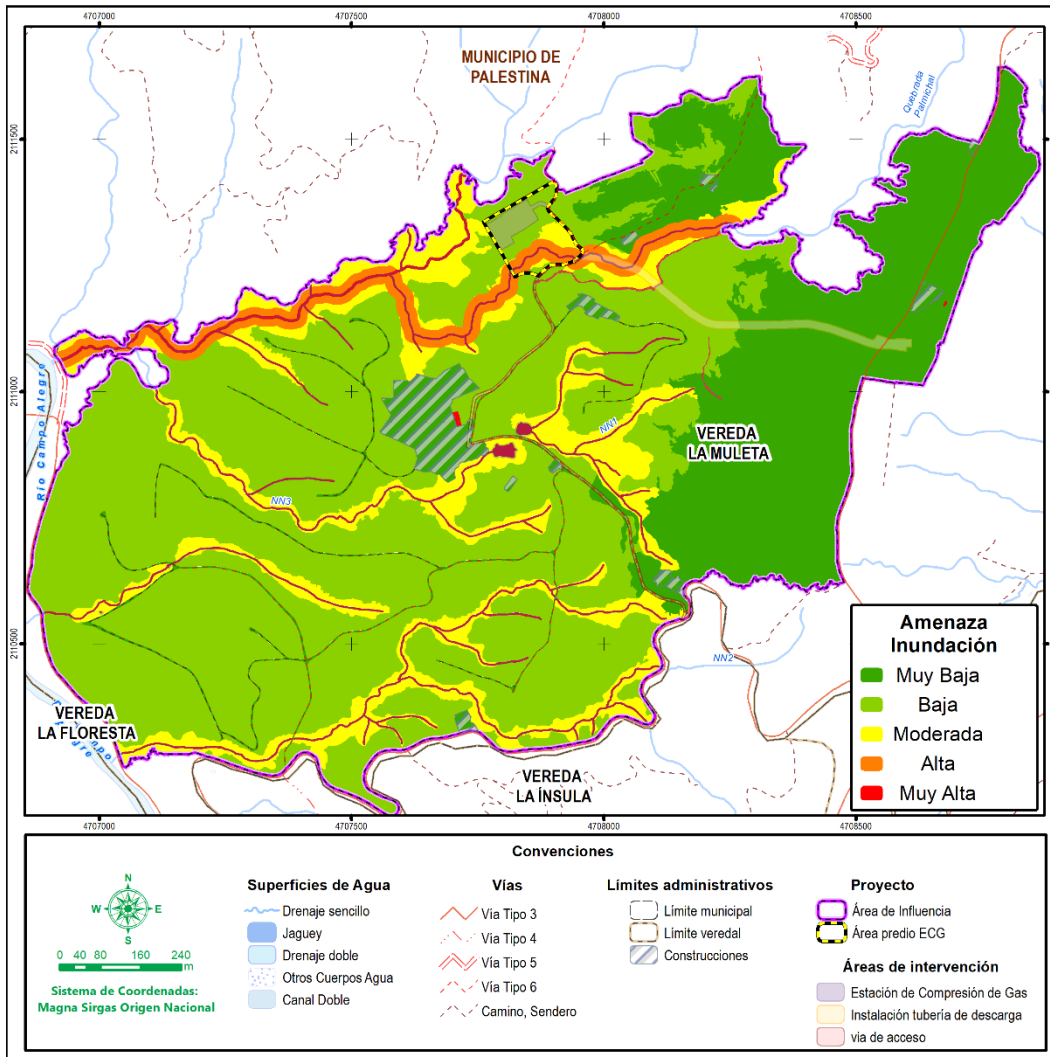
3.2.4.8 Amenaza por inundación

Teniendo en cuenta el análisis de amenaza por inundación desarrollado en el numeral 3.2.2.2 del Capítulo 03.2.1ABIOT(GEOL) del presente Estudio de Impacto Ambiental y considerando que en este se tienen en cuenta las manchas de inundación modeladas hidráulicamente para los períodos hidrológicos más críticos, se determina que a pesar de los considerables excedentes de agua que se generan durante las temporadas de altas precipitaciones el área asociada a la Estación de Compresión de Gas se encuentra

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	80
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

localizada en una zona con amenaza de inundación baja tal como se observa en la Figura 3-39.

**Figura 3-39 Mapa de amenaza por inundación para el área de influencia de la ECG
Palestina**



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.4.9 Inventario de fuentes contaminantes





Durante el trabajo de campo se identificó un punto en la zona sur del área de influencia del proyecto que presentaba malos olores, tras una inspección más detallada se determinó que dichos olores provenían de un vertimiento de aguas residuales generado por una

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	81
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

beneficiadora de café. Este vertimiento, de tipo puntual y con generación continua, se origina en el proceso de lavado de la pasilla del café, las aguas residuales resultantes de esta actividad son vertidas directamente en la quebrada lo que provoca los malos olores mencionados.

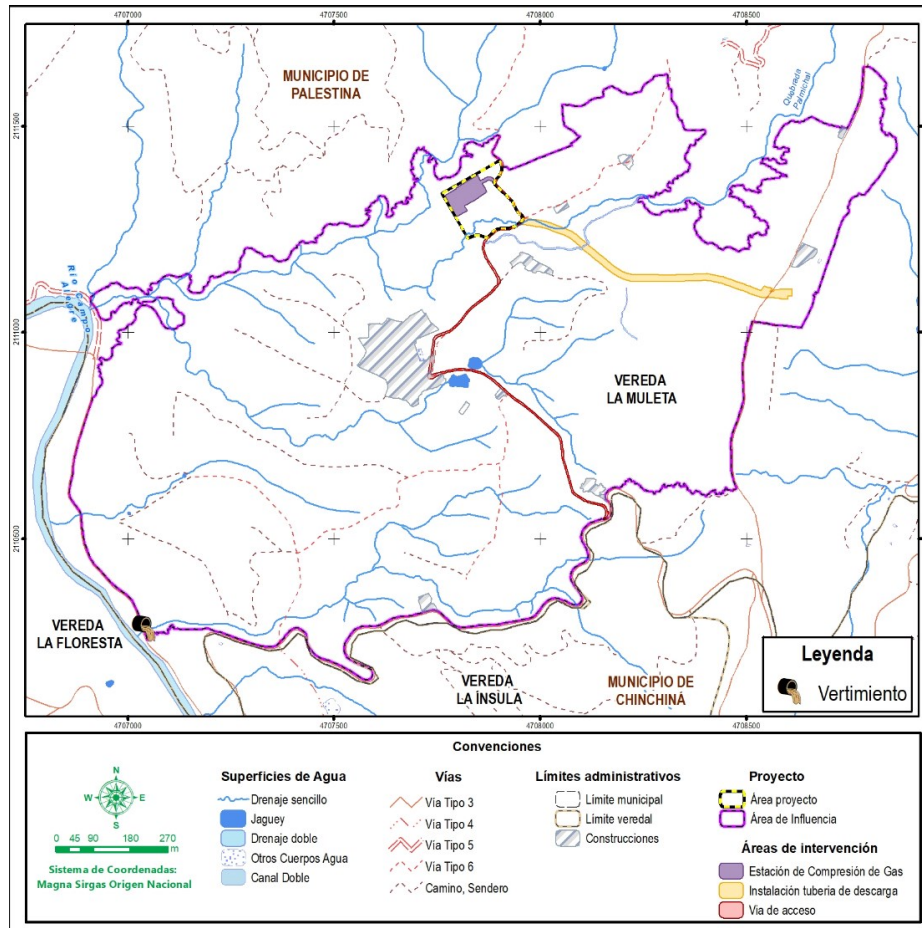
Entre los principales impactos generados por este vertimiento se destaca la proliferación de perifiton (organismos que crecen en la superficie de objetos sumergidos en agua) y los malos olores persistentes. Estos factores deterioran la calidad de la fuente hídrica afectando tanto el ecosistema acuático como las comunidades cercanas que podrían depender de esta quebrada. En la Tabla 3-47 y Figura 3-40 se muestra la evidencia fotografía y ubicación del vertimiento.

Tabla 3-47 Punto de agua superficial asociado a un vertimiento

ID	COORDENAD A ESTE	COORDENAD A NORTE	FOTOGRAFÍA	
LOT -9	4.707.048,17	2.110.283,41		
				

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Figura 3-40 Ubicación geográfica del punto de vertimiento identificado



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Martin, S. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. Roma: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Bodhinayake, N. D. (2004). *Influence of hydrological, geomorphological and climatological characteristics of natural catchments on lag parameters*. [Ph.D. Thesis]. Australia: University of Wollongong.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*.
- CORPOCALDAS. (2016). *Resolución 411, por medio de la cual se adopta el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río Chinchina y se dictan otras disposiciones*. Corpocaldas. Corporación Autónoma Regional de Caldas.
- CORPOCALDAS. (2023). *Resolución 2023-0021, por medio de la cual se aprueba el Plan de Ordenación y Manejo - POMCA- de la Cuenca Hidrográfica del Río Campoalegre y otros directos al Cauca (Código 2613-02)*. Corpocaldas. Corporación Autónoma Regional de Caldas.
- Global Water Partnership. (2011). *Global Water Partnership Work Plan 2011 implementing the GWP Strategy*.
- Gottschalk, L., Krasovskaia, I., Yu, K.-x., Leblois, E., & Xiong, L. (2013). Joint mapping of statistical streamflow descriptors. *Journal of Hydrology*.
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 350-361.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological society of America bulletin*, 56(3), 275-370.
- Howard, A. (1967). Drainage Analysis in geologic interpretation: A summation. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 2246-2259.
- IDEAM. (2017). *Validación de las fórmulas de evapotranspiración de referencia (ET_o) para Colombia*. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2018). *Estudio Nacional del Agua (ENA)*. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2021). *Zonificación y Codificación de Unidades Hidrográficas e Hidrogeológicas de Colombia*. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.

- IDEAM. (2022). *Estudio Nacional del Agua (ENA)*. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales.
- IGAC. (2021). *Zonificación climática para levantamientos de suelos*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Li, J., Changming, L., Zhonggen, W., & Liang, K. (2015). Two universal runoff yield models: SCS vs. LCM. *ournal of Geographical Sciences*, 25, 311-318.
- Linsley, R. (1986). Flood estimates. How good are they? *Water Resources Research*, 159S-164S.
- Llamas, J. (1993). *Hidrología general: Principios y Aplicaciones*. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. p635.
- Londoño Arango, C. H. (2001). *Cuencas Hidrográficas. Bases Conceptuales - Caracterización - Planificación - Adminsitración*. Ibagué.
- MADS & ANLA. (2018). *Metodología general para la elaboración y presentación de estudios ambientales*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Agencia Nacional de Licencias Amvientales.
- MADS & MINHACIENDA. (2017). *Caracterización de la cuenca del río la Vieja - Morfometria*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible & Ministerio de Hacienda.
- MADS. (2014). Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo. En E. Olaya Ospina, y O. D. Tosse Luna, *Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo* (p. 195). Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- MADS. (2014). *Guia técnica para la formulación de los planes de ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas Pomcas*. Bogota: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- MADS. (2018). *Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Manrique, B., Echeverry, J., & Pelaez, M. (2011). Aportes desde la hidroinformatica a a la gestion de ecosistemas acuáticos amazónicos. *Ingeniería e Investigación*.
- MAVDT. (2006). *Terminos de referencia conduccion de fluidos por ductos en el sector de hidrocarburos*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Monsalve Sáenz, G. (1999). *Hidrología en la ingeniería* (Segunda ed.). Escuela Colombiana de Ingeniería.

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	85
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----

- Montgomery, D. (2014). *Estadística y probabilidad para ingenieros* (Sexta ed.). Wiley.
- Ortiz, I. R. (2014). *Determinación de Caudales en cuencas con poca Información Hidrológica*.
- Razavi, T., y Coulibaly, P. (2013). Streamflow Prediction in Ungauged Basins: Review of Regionalization Methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(8), 958-975. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000690](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000690)
- Reyes Trujillo, A., Barroso, F. U., y Yesid, C. E. (2010). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas*. Universidad del Valle.
- Román, F. J. (2022). *Hidrología Superficial y Subterránea*.
- Sandoval, W. &. (2014). Determinación de caudales en cuencas con poca información hidrológica. *Ciencia UNEMI*.
- Schumm, S. A. (1963). Sinuosity of alluvial rivers on the Great Plains. *Geological Society of America Bulletin*, 74(9), 1089-1100.
- Senciales, J. (1998). *El análisis morfológico de las cuencas fluviales aplicado al estudio hidrográfico*. Málaga: Departamento de Geografía. Universidad de Málaga.
- Singh, V. P. (1992). *Elementary hydrology*. Pearson.
- Strahler, A. N. (1964). *Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks*. McGraw-Hill.
- Thomthwaite, C., y Mather, J. (1995). The water balance Publications in climatology. *Drexel Institute of Technology*.
- Vargas M., R., y Diaz-Granados, M. (1998). Curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia. *Universidad de los Andes*.
- Vélez Upegui, J. J., & Gutiérrez Botero, A. (2010). *Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la Quebrada San Luis, Manizales*. Manizales.

Elaboró: CONSGA S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.4. Hidrología Ver: 01	86
--------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	----