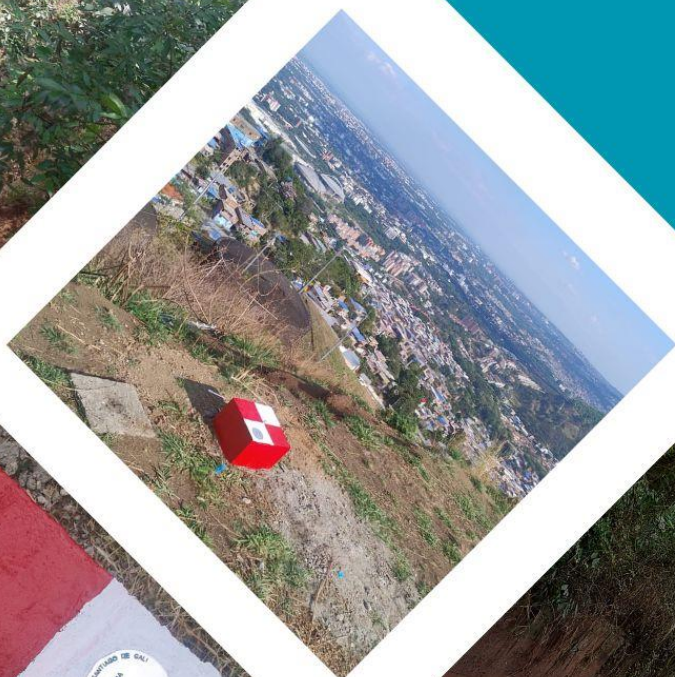


# INFORME FINAL

"Realizar la actualización del acotamiento de las rondas hídricas de las quebradas y sus tributarios priorizados de la Comuna 20"

**Contrato de consultoría  
No. 4133.010.26.1.1471 - 2025**



**ESTUDIO PARA EL ACOTAMIENTO DE LA RONDA HÍDRICA EN LAS  
QUEBRADAS PRIORIZADAS DE LAS COMUNAS 18 Y 20**

**CONTRATO No. 4133.010.26.1.1471-2025**

**INFORME: ACOTAMIENTO DE LA RONDA HÍDRICA EN LAS QUEBRADAS  
PRIORIZADAS DE LA COMUNA 20**

**DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE GESTIÓN DEL MEDIO AMBIENTE  
DAGMA**

**FUNDACIÓN AGUA VIVA - FUNAGUA**

**2025**

**DOCUMENTO ELABORADO POR:**

DOCUMENTO	REFERENCIA	NOMBRE
	<b>Contratante</b>	FUNDACION AGUA VIVA “FUNAGUA”
	<b>Elaboró</b>	<p><b>Coordinador</b> Ing. Topográfico Jesús Andrés Jordán Ramírez TP 76335267709VLL <b>Msc. Gestión integral en recurso Hídrico</b></p> <p><b>Profesional SIG</b> Ing. Topográfico Andrés Augusto Arroyo Pérez TP. 76335228036VLL <b>Esp. Sistemas de información Geográfica</b></p> <p><b>Profesional Hidrología</b> Ing. Sanitario Mauricio Javier Victoria Niño. TP. 7623765483VLL <b>Esp. en Evaluación Ambiental de Proyectos.</b></p> <p><b>Profesional Geomorfología</b> Geólogo H. Alfonso Perafán Torres TP. 1614 CPG <b>Esp. en Gerencia de Proyectos Ambientales.</b></p> <p><b>Profesional Ecosistémico</b> Biólogo Vladimir Rojas Diaz TP. 16.776.155 <b>Doctor en Ciencias.</b></p>
	<b>Revisó</b>	<p><b>Representante legal: FUNAGUA</b> Ing. Agrícola Jairo Rosero Narváz TP. 21.839 <b>Esp. Gestión ambiental</b> <b>Msc en Ciencias ambientales.</b></p>
	<b>Aprobó</b>	

Nota cartográfica: en el cuerpo de este documento se utilizan algunas versiones de productos cartográficos con propósitos ilustrativos, sin embargo, los productos finales se encuentran el en anexo cartográfico.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	11
2.	MARCO CONCEPTUAL .....	13
2.1	Definición del límite funcional de la ronda hídrica .....	13
2.2	Delimitación del cauce permanente .....	15
2.3	Fuente de información .....	15
2.4	Definición del componente geomorfológico .....	16
2.5	Definición del componente hidrológico.....	16
2.6	Definición del componente ecosistémico .....	17
3.	MÉTODOS.....	18
3.1	Área de estudio .....	18
3.2	Delimitación del cauce permanente.....	18
3.3	Delimitación del componente geo-morfológico .....	19
3.4	Delimitación del componente hidrológico.....	21
3.5	Delimitación del componente ecosistémico.....	24
4.	RESULTADOS .....	26
4.1	Adquisición de información topográfica .....	26
4.1.1	Desarrollo y captura de información .....	26
4.1.2	Planificación y ejecución del vuelo .....	27
4.1.3	Puntos de control .....	28
4.1.4	Control de calidad altimétrico .....	31
4.1.5	Control de Calidad planimétrica.....	32
4.2	Definición del componente ecosistémico .....	33
4.2.1	Cálculo de la altura media del dosel de una comunidad vegetal – H.....	35
4.2.2	Fase de campo – análisis .....	36
4.2.3	Composición florística por micro-cuenca.....	39
4.2.4	Sector Quebrada Guarrús.....	40
4.2.5	Sector Isabel Pérez.....	45
4.2.6	Análisis de disimilitud de Bray-Curtis .....	52

4.2.7	Cálculo de la altura - H.....	54
4.2.8	Cálculo de Densidad de drenaje (Dd) por Unidad Geomorfológica (UG).....	55
4.2.9	Cálculo de áreas acumuladas (Aa).....	55
4.2.10	Cálculo de N (relación entre la densidad de drenaje-Dd y el área acumulada (Aa) para cada unidad geomorfológica).....	56
4.2.11	Estimación del ancho del componente ecosistémico (N*H).....	56
4.3	Definición del componente geomorfológico .....	60
4.3.1	Características geológicas generales .....	60
4.3.2	Geomorfología.....	62
4.3.3	Clasificación de unidades geomorfológicas .....	65
4.3.4	Información Geomorfológica .....	67
4.3.5	Criterios para determinar el componente geomorfológico de las rondas hídricas,74	
4.4	Definición del componente Hidrológico.....	77
4.4.1	Información hidrometeorológica .....	77
4.4.1	Análisis exploratorio de datos-AED.....	79
4.4.2	Exploración gráfica de datos-EGD.....	82
4.4.3	Procesamiento series de precipitación, estimación de datos faltantes, detección de cambios y homogenización.....	89
4.4.4	Modelo ARIMA imputación de datos faltantes (univariado).....	98
4.4.5	Lluvias máximas en 24 horas – Análisis de estacionariedad.....	100
4.4.6	Regionalización hidrológica de la precipitación .....	105
4.4.7	Mapas de textura de suelos.....	111
4.4.8	Numero de curva CN.....	114
4.4.9	Análisis de caudales.....	114
4.4.10	Hoyas hidrográficas y tiempos de concentración .....	114
4.4.11	Proceso de transformación lluvia – escorrentía para caudales máximos instantáneos .....	116
4.4.12	Calibración de caudales máximos.....	123

4.4.13	Criterios para determinar el componente hidrológico de las rondas hídricas, 125	
4.5	Definición del cauce permanente.....	127
4.6	Delimitación del límite funcional de la Ronda Hídrica .....	130
5.	CONCLUSIONES.....	136
6.	RECOMENDACIONES .....	136
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	137
8.	ANEXO CARTOGRÁFICO .....	139

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Leyenda Geomorfológica - IGAC.....	21
Tabla 2. Características Orion H300 .....	26
Tabla 3. Características iXU RS1000.....	27
Tabla 4. Área Biomas .....	33
Tabla 5, Área Ecosistemas.....	33
Tabla 6, Área Zonas de Vida.....	34
Tabla 7, Coordenadas transectos implementados – Quebrada Guarrús, .....	41
Tabla 8, Cálculo IVI para la vegetación leñosa presente en la Quebrada Guarrús. ....	41
Tabla 9, Índices dominancia y diversidad vegetación de la Quebrada Guarrús.....	43
Tabla 10, Coordenadas transectos implementados en sector Isabel Pérez. ....	46
Tabla 11, Cálculo IVI para la vegetación leñosa presente en el sector Isabel Pérez.....	47
Tabla 12, Índices dominancia y diversidad vegetación sector Isabel Pérez.....	49
Tabla 13, Valores de disimilitud de Bray-Curtis.....	52
Tabla 14, Comparativo de los índices de diversidad por micro-cuenca.....	52
Tabla 15, Cálculo de altura media (H) de los árboles dominantes .....	54
Tabla 16. Densidad de drenaje .....	55
Tabla 17. Valores de área acumulada y densidad de drenaje para cada uno de las microcuencas .....	55
Tabla 18. Valor de N .....	56
Tabla 19, Estimación del Componente Ecosistémico, .....	57
Tabla 20, Cálculo de área de protección por el componente ecosistémico, .....	57
Tabla 21, Geología Comuna 20 – Municipio de Cali,.....	60
Tabla 22, Patrones de drenaje comuna 20, .....	62
Tabla 23, Parámetro morfométricos Q. Isabel Pérez.....	67
Tabla 24, Procesos erosivos Q. Isabel Pérez. ....	68
Tabla 25, Movimientos masa Q. Isabel Pérez. ....	69
Tabla 26, Morfometría de la Quebrada La Cristalina.....	69

Tabla 27, Procesos erosivos Q La Cristalina,.....	70
Tabla 28, Movimientos de masa Q La Cristalina. ....	70
Tabla 29, Morfometría de la Quebrada Guarrús,.....	71
Tabla 30, Procesos erosivos Q Guarrús.....	72
Tabla 31, Movimientos de masa Q Guarrús, .....	73
Tabla 32, Cálculo de área de protección por el componente geomorfológico, .....	75
Tabla 33, Estaciones climatológicas, pluviométricas e hidrométricas .....	78
Tabla 34, Resultados exploración de datos, .....	88
Tabla 35, Índice oceánico del niño (oni) período 1987-2024.....	96
Tabla 36, Índices de eficiencia de NASH-SUTCLIFFE, .....	107
Tabla 37, Lluvia Máxima para Diferentes Duraciones,.....	108
Tabla 38, Intensidades Máximas para Diferentes Duraciones, .....	108
Tabla 39, Distribución del tipo de coberturas y uso del suelo.....	111
Tabla 40, Números de curva para usos de suelo.....	111
Tabla 41, Grupos hidrológicos del suelo.....	113
Tabla 42, Numero de curva. ....	114
Tabla 43. Puntos de cierre hidrológico, áreas de drenaje y tiempos de concentración, .....	115
Tabla 44. Cálculos previos HEC-HMS .....	122
Tabla 45. Estimación de QMAX modelo HEC-HMS.....	122
Tabla 46, Calibración de QMAX modelo HEC-HMS, .....	124
Tabla 47, Cálculo de área de protección por el componente hidrológico, .....	125
Tabla 48. Cálculo de área de protección por el cauce permanente.....	127
Tabla 49, Cálculo de Área para el límite Funcional, .....	131

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Definición de la ronda hídrica de acuerdo con el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011 diferenciando sistemas: lóticos (A) y lénticos (B). .....	13
Figura 2. Componentes físico-bióticos para fijar el límite funcional de la ronda hídrica en sistemas lóticos (A) y lénticos (B).....	14
Figura 3. Localización de las áreas de estudio .....	18
Figura 4. Insumos, actividades y productos para definir el componente hidrológico. ....	19
Figura 5. Insumos, actividades y productos para definir el componente geomorfológico. ...	20
Figura 6. Insumos, actividades y productos para definir el componente hidrológico. ....	23
Figura 7. Insumos, actividades y productos para definir el componente ecosistémico. ....	25
Figura 8. Captura de los datos Lidar .....	27
Figura 9. Franjas de vuelo .....	28
Figura 10. Coordenadas geográficas puntos de control terrestre.....	29
Figura 11. Distribución de puntos de control .....	29
Figura 12. Ejemplo ficha de punto de control .....	30
Figura 13. Control de calidad altimétrica. ....	31
Figura 14. Control de calidad planimétrica .....	32
Figura 15, Mapa de Ecosistema.....	34
Figura 16, Mapa de Zona de Vida, .....	35
Figura 17, Registro fotográfico, Quebrada la Guarrus, .....	39
Figura 18, Aspecto metodología en campo, Isabel Pérez, .....	40
Figura 19, Aspecto distribución transectos Gentry, Quebrada Guarrús .....	40
Figura 20, Número de individuos por categoría forestal presentes en la vegetación asociada a la Quebrada Guarrús. ....	44
Figura 21, Número de individuos por clase altimétrica presentes en la vegetación asociada a la Quebrada Guarrús. ....	44
Figura 22, Aspecto distribución transectos Gentry en sector Isabel Pérez.....	46
Figura 23, Número de individuos por categoría forestal presentes en la vegetación asociada al sector Isabel Pérez .....	50
Figura 24, Número de individuos por clase altimétrica presentes en la vegetación asociada al sector Isabel Pérez .....	51

Figura 25, Dendrograma con base en disimilitud de Bray-Curtis .....	53
Figura 26, Mapas Componente Ecosistémico por microcuena,.....	59
Figura 27, Patrones de drenaje - Comuna 20.....	62
Figura 28, Procesos erosivos, erosión laminar, surcos, barrancos y cárcavas.....	64
Figura 29, Tipos de movimiento en masa .....	65
Figura 30. Vía en construcción – 427 ms (cota 1398).....	68
Figura 31. Procesos erosivos vía Cristo Rey. ....	70
Figura 32. Condición de la cuenca y vía Cristo Rey. ....	71
Figura 33. Proceso erosivo talud superior vía Cristo Rey. ....	72
Figura 34, Mapa de Susceptibilidad de movimiento en masa .....	74
Figura 35, Mapas componente Geomorfológico .....	77
Figura 36, localización estaciones hidrológicas y meteorológicas,.....	79
Figura 37, Coeficiente de correlación de la precipitación máxima diaria en las diferentes estaciones,.....	80
Figura 38, Coeficiente de correlación de la precipitación máxima diaria en las diferentes estaciones (Ajustada),.....	81
Figura 39, Extensión de los registros de la precipitación máxima diaria en las diferentes estaciones,.....	82
Figura 40, Análisis exploratorio de datos – estación colegio San Juan Bosco,.....	84
Figura 41, Análisis exploratorio de datos – estación Alto Iglesias, .....	84
Figura 42, Análisis exploratorio de dato – Estación Cañaveralejo, .....	85
Figura 43, Análisis exploratorio de datos – Estación Edificio CVC,.....	85
Figura 44, Análisis exploratorio de datos – Estación La Fonda,.....	86
Figura 45, Análisis exploratorio de datos – Estación Lili San Sebastián,.....	86
Figura 46, Análisis exploratorio de datos – Estación Los Cristales, .....	87
Figura 47, Análisis exploratorio de datos – Estación Panamericano, .....	87
Figura 48, Imputación de datos resultantes con missforest variable precipitación máxima diaria en las diferentes estaciones,.....	90
Figura 49, Prueba de worsley series de tiempo de precipitación máxima de valores estimados- estación alto iglesias, cali (valle del cauca),.....	92

Figura 50, Prueba de worsley series de tiempo de precipitación máxima de valores estimados-estación Cañaveralejo, cali (valle del cauca),.....	92
Figura 51, Prueba de worsley series de tiempo de precipitación máxima de valores estimados-estación col, san juan Bosco, cali (valle del cauca),.....	93
Figura 52, Prueba de worsley series de tiempo de precipitación máxima de valores estimados-estación edificio cvc, Cali (valle del cauca), .....	93
Figura 53, Prueba de worsley series de tiempo de precipitación máxima de valores estimados-estación la fonda, Cali (valle del cauca), .....	94
Figura 54, Prueba de worsley series de tiempo de precipitación máxima de valores estimados-estación Lili-san Sebastián, Cali (valle del cauca), .....	94
Figura 55, Prueba de worsley series de tiempo de precipitación máxima de valores estimados-estación los cristales, Cali (valle del cauca), .....	95
Figura 56, Prueba de worsley series de tiempo de precipitación máxima de valores estimados-estación planta río cali, cali (valle del cauca),.....	95
Figura 57, índice oceánico del niño (oni) 1990-2024,.....	98
Figura 58, Valores críticos de la prueba de desviaciones acumuladas, .....	100
Figura 59, Resultados rna, entrenamiento y simulación-regionalización de la pmax 24h,	106
Figura 60, Gráfica Resultados RNA 4-8-1 Entrenamiento – Simulación PMAX24H,.....	107
Figura 61, Gráfica Resultados RNA 4-8-1 Entrenamiento – Simulación PMAX24H,.....	107
Figura 62, Curva IDF – Estación Virtual Comuna 18 (CRITERIO GROBE), .....	108
Figura 63, Clasificación Coberturas y Uso del Suelo-Comuna 20.....	110
Figura 64, Clasificación Textural de los Suelos. ....	113
Figura 65. Localización hoyas hidrográficas,.....	116
Figura 66, distribución temporal de lluvias promedio para el valle del cauca, .....	119
Figura 67. Hietograma de diseño comuna 20 TR=2,33 años .....	120
Figura 68. Hietograma de diseño comuna 20TR=15 AÑOS,.....	120
Figura 69. Hietograma de diseño comuna 20 TR=100 AÑOS,.....	121
Figura 70, Mapas del Componente Hidrológico .....	127
Figura 71. Mapas Cauces Permanente.....	129
Figura 72, Mapa Envolvente, .....	133
Figura 73, Mapas Limite Funcional por Ronda Hídrica,.....	135

## 1. INTRODUCCIÓN

La definición de ronda hídrica se comprende a nivel internacional como la zona ribereña, región de transición y de interacciones entre los medios terrestre y acuático, es decir son las franjas contiguas a los cuerpos de agua continentales, sean naturales o artificiales, estén en movimiento (ríos, quebradas, arroyos) o relativamente estancados (lagos, lagunas, pantanos, esteros), sean efímeros (intermitentes) o continuos (perennes) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

El artículo 206 (rondas hídricas) de la Ley 1450 del 16 de junio de 2011-Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 “Prosperidad para Todos”, estableció que “corresponde a las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible, los grandes centros urbanos y los establecimientos públicos ambientales efectuar, en el área de su jurisdicción y en el marco de sus competencias, el acotamiento de la faja paralela a los cuerpos de agua que se refiere el literal d) del artículo 83 del Decreto-Ley 2811 de 1974 y el área de protección o conservación aferente, para lo cual se debe realizar los estudios correspondientes, conforme a los criterios que defina el Gobierno Nacional”. El mencionado artículo del Decreto-Ley 2811 de 1974 estableció que “Salvo derechos adquiridos por particulares, son bienes inalienables e imprescriptibles del Estado: d) una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho (...)”.

El Decreto 2245 del 29 de diciembre de 2017 “Por el cual se reglamenta el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011 y se adiciona una sección al Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el acotamiento de rondas hídricas” tiene por objeto “establecer los criterios técnicos con base en los cuales las Autoridades Ambientales competentes realizarán los estudios para el acotamiento de las rondas hídricas en el área de jurisdicción” (Sección 3ª, Art. 2.2.3.2.3A.1.), además establece que la ronda hídrica se constituye como una norma de superior jerarquía y determinante ambiental en el ordenamiento territorial.

Asimismo, el decreto anterior estableció que la ronda hídrica se acotará desde el punto de vista funcional y su límite de traza a partir de la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, considerando criterios técnicos, como los criterios para la delimitación física de la ronda hídrica. Este límite físico/funcional será el resultado de la envolvente que genera la superposición de mínimo los criterios geomorfológicos, hidrológicos y ecosistémicos. El desarrollo de los criterios técnicos mencionados se establece en la “Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia” (Sección 3ª, Art. 2.2.3.2.3A.3.).

La Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia (2017) dispuso el alcance del “acotamiento” de las rondas hídricas, su importancia dentro de la dinámica geomorfológica, hidrológica y ecosistémica, así como sus características sociales. El enfoque tiene como principio rector la funcionalidad de las rondas hídricas, en la

medida que estas son áreas en que dan intercambios de agua, sedimentos y nutrientes que dan sustento a la interacción de diferentes procesos físicos, químicos y biológicos a lo largo de las cuencas hidrográficas, así como el espacio mínimo que debe tener un manejo ambiental que permita orientar aprovechamientos sostenibles de los recursos naturales y evitar la generación de condiciones de riesgo al ser áreas frecuentemente inundables.

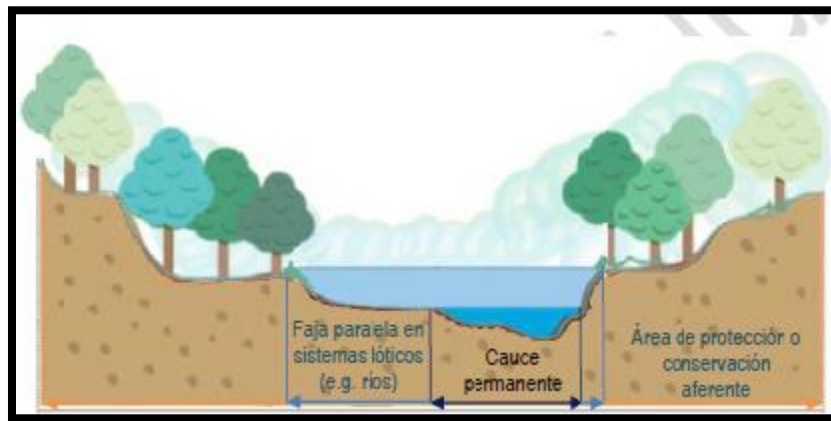
A continuación, se delimitará el límite funcional de la ronda hídrica para las quebradas priorizadas en las comunas 18 y 20 en Santiago de Cali. Dicho límite se conforma por tres componentes: geomorfológico, hidrológico y ecosistémico, los cuales son descritos de acuerdo con la Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia (2017).

## 2. MARCO CONCEPTUAL

### 2.1 Definición del límite funcional de la ronda hídrica

El acotamiento de las rondas hídricas, por parte de las autoridades ambientales competentes, se orienta desde la perspectiva de su funcionalidad. Misma que da el soporte para el establecimiento de medidas de manejo ambiental, considerando los principales procesos biofísicos y la alteración antrópica de sus funciones, siendo de especial relevancia los procesos geomorfológicos y pluviales para efectos de lo dispuesto en el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011. En la figura 1, se esquematizan dichos elementos de las rondas hídricas para sistemas lóticos y lénticos.

A)



B)

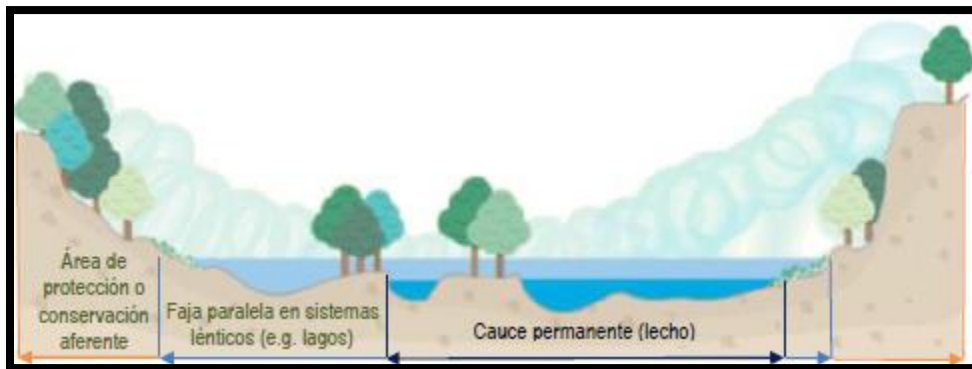


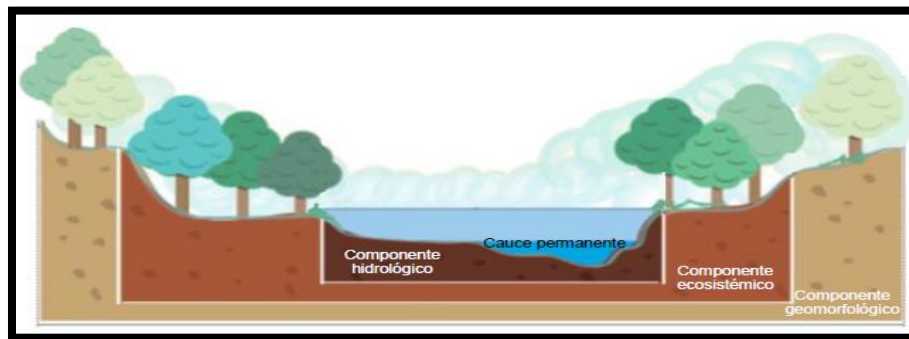
Figura 1. Definición de la ronda hídrica de acuerdo con el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011 diferenciando sistemas: lóticos (A) y lénticos (B).

Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017

El funcionamiento del sistema fluvial requiere de continuidad longitudinal y conectividad lateral entre el cauce y la ribera. Además, que ésta sea bañada por agua, con sedimentos y

nutrientes durante los eventos de inundación. En tal sentido, la ronda hídrica se convierte en el espacio necesario para el desarrollo de la dinámica natural del sistema fluvial, donde pueden darse sin restricciones sus funciones geomorfológicas (geoformas y procesos morfodinámicos asociados al flujo y almacenamiento temporal de agua y sedimentos, ajuste de la forma del cauce y sus patrones de alineamiento), hidrológico-hidráulica (servir de soporte físico para el almacenamiento y tránsito de agua, sedimentos y nutrientes en la llanura inundable a lo largo de la cuenca hidrográfica); y sus funciones ecosistémicas (papel de la vegetación de ribera en las condiciones microclimáticas y las condiciones de hábitat en los cuerpos de agua, corredor de agua, corredor biológico, filtro de contaminantes que por escorrentía podrían llegar al cuerpo de agua dulce, estabilidad de las orillas y taludes adyacentes al cuerpo de agua, entre otras)(figura 2) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

A.



B.

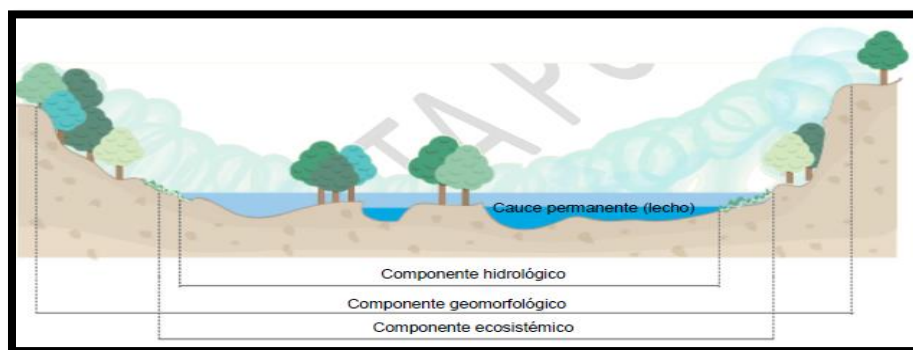


Figura 2. Componentes físico-bióticos para fijar el límite funcional de la ronda hídrica en sistemas lóticos (A) y lénticos (B).

Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017

Primero es necesario establecer el cauce permanente, para continuar con la caracterización y delimitación de los componentes (geomorfológico, hidrológico y ecosistémico) del límite

funcional de manera independiente, teniendo en cuenta sus relaciones intrínsecas. Este límite es el resultado de la envolvente que genera la superposición de los tres componentes físicos preponderantes de las características físico-bióticas de estos ecosistemas de transición (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

## **2.2 Delimitación del cauce permanente**

El cauce permanente constituye una cicatriz visible en el terreno, ya que ha sido moldeado naturalmente en el paisaje como resultado de la acción del flujo de agua, y el consecuente transporte de sedimentos durante eventos de crecida frecuentes relacionados con el ciclo hidrológico intra-anual principalmente. Dentro de este cauce, se transporta el régimen natural de flujo dentro de un año hidrológico promedio e incluso pueden tener cabida los caudales máximos anuales de algunos años influenciados por la variabilidad inter-anual.

Eventualmente, cuando los caudales son de gran magnitud, el cauce no tiene capacidad para transportarlos, éstos desbordan sobre el terreno e inundan las riberas. Dada la menor frecuencia de presentación de los eventos de mayor magnitud, sus huellas en el terreno son borradas con el paso del tiempo, estableciéndose allí vegetación como un primer rasgo diferenciador (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

## **2.3 Fuente de información**

Según parámetros válidos como captura de información descritos en la guía de criterios para el acotamiento de rondas hídricas (páginas 43 y 75), la fuente de información que influye en la definición de actividades son los levantamientos altiplinamétricos, levantamientos con GPS de alta precisión altimétrica, imágenes LIDAR (por sus siglas en inglés de "Light Detection and Ranging"), o de tecnologías similares, y sus correspondientes productos (Modelo Digital del Terreno y Modelo Digital de Superficie). Con esta herramienta se puede obviar el levantamiento altimétrico y se hace un mejor análisis geomorfológico ya que se hacen más visibles los elementos geomorfológicos presentes.

Basado en lo anterior, la guía hace una recomendación sobre la obtención de la topografía de detalle, sugiriendo el uso de tecnología LIDAR o similares, ya que las mismas son más económicas respecto de levantamiento topográficos de detalle tradicionales. En este contexto, dicha información será útil para otros fines como actualización de coberturas y usos de la tierra o insumos que la Autoridad Ambiental competente le puede brindar a las entidades territoriales para sus respectivos análisis en gestión del riesgo. Tal información de detalle topográfico puede incluir la batimetría para cuerpos de agua que en el momento del levantamiento tengan una profundidad no superior a 0.5 m (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

En este contexto, para este proyecto se estableció un polígono de vuelo que incluyera el área urbana y rural de los cauces priorizados en las comunas 18 y 20 de Santiago de Cali, en el cual se utilizó mediante una aeronave tripulada la captura de información LiDAR y de

fotogrametría, permitiendo obtener información detallada de curvas de nivel a 10 centímetros (cm) y ortofotomosaico a resolución espacial por tamaño de pixel de 10 cm.

#### **2.4 Definición del componente geomorfológico**

De acuerdo a la Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia (2017), el componente geomorfológico de la ronda hídrica define el área necesaria para garantizar los procesos morfodinámicos que soportan la función de transporte y almacenamiento de agua y sedimentos. Esta función tiene una alta variabilidad temporal ya que a distintas escalas de tiempo se presentan procesos morfodinámicos en los cuales el sistema ajusta la forma del cauce, su pendiente, y sus patrones de alineamiento. En términos geomorfológicos, la dinámica fluvial y su expresión pueden ser comprendidas como el resultado de la relación interdependiente de cuatro variables principales: caudal, longitud, carga y la capacidad de la corriente.

Los procesos morfodinámicos más comunes son:

- a) Socavación durante eventos de crecida
- b) Sedimentación en la recesión de los eventos
- c) Ajuste de la forma de la sección
- d) Ajuste de la pendiente
- e) Estructuras de alineamiento horizontal y vertical relacionadas con la disipación de energía
- f) Sinuosidad
- g) Migración y movimiento lateral

Las formas, que se definen por los diferentes procesos morfodinámicos, se pueden identificar en el terreno y son diferentes para cada tipo de río o tramo del mismo. Éstas conforman la faja de terreno o zona del componente geomorfológico, que tiene como fin garantizar que en el cauce y su ronda hídrica puedan ocurrir los procesos mencionados anteriormente.

#### **2.5 Definición del componente hidrológico**

De acuerdo a la Guía Técnica para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia (2017) el componente hidrológico de la ronda hídrica debe ser el área requerida para el transporte y almacenamiento temporal del agua y los sedimentos que produce la cuenca para las distintas escalas de tiempo (ciclo anual o semianual y la interanual asociada principalmente al fenómeno ENOS o los que se encuentren tienen influencia en la respuesta hidrológica).

Uno de los fenómenos con mayor afectación sobre el régimen hidrológico, es la fase fría del fenómeno ENOS o La Niña. De acuerdo con registros históricos de ocurrencia del fenómeno, las crecidas representativas de las condiciones máximas durante una temporada “normal” de La Niña se pueden asociar a una crecida con un periodo de retorno de 15 años (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Las funciones hidrológicas del sistema fluvial se realizan a través del cauce permanente y su ribera. La dinámica hidrológica determina en gran parte el tamaño y la forma del cauce y su entorno, donde su conformación hidrológica y morfológica depende fundamentalmente del régimen de caudales, es decir, del momento, la duración, la frecuencia y magnitud de los caudales circulantes, ordinarios y extraordinarios (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

## **2.6 Definición del componente ecosistémico**

El componente ecosistémico de la ronda hídrica está asociado a las funciones ecosistémicas del cuerpo de agua y los componentes bióticos y abiótico de la ribera siendo su vegetación un elemento fundamental para dicho funcionamiento. La vegetación de ribera varía de acuerdo al tipo de cuerpo de agua y se extiende en función de la disponibilidad de humedad y de la resistencia a los desbordamientos del mismo, por tanto, su presencia está asociada a niveles freáticos elevados y a una alta capacidad de los suelos para retener humedad (Döring y Tockner, 2008 citado por Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Este componente busca establecer, mantener o recuperar las coberturas vegetales propias de la región en los cuerpos de agua, de forma tal que se mantengan o restablezcan sus funciones ecosistémicas. La vegetación ribereña se considera la base de la cadena alimentaria de los cuerpos de agua, puesto que el material orgánico proveniente del mantillo (hojas y ramas caídas en descomposición) transportado hacia el cuerpo de agua, a partir de la vegetación, constituye un suministro energético importante para la producción autóctona en los ríos, así mismo, la vegetación raparúa ofrece recursos alimentarios abundantes y diversificados para la fauna terrestre (Granados, Hernández y López, 2005). Los bosques riparios son ecosistemas que se encuentran inmediatamente a ambos lados de quebradas y ríos, incluyendo los bancos aluviales, sistemas lénticos y terrazas de inundación, los cuales interactúan con el río en tiempos de crecidas o inundaciones (Olson et. al, 2000 citado por Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

### 3. MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudio

El proyecto se llevó a cabo en las quebradas priorizadas y sus tributarios de la comuna 20 de Santiago de Cali.

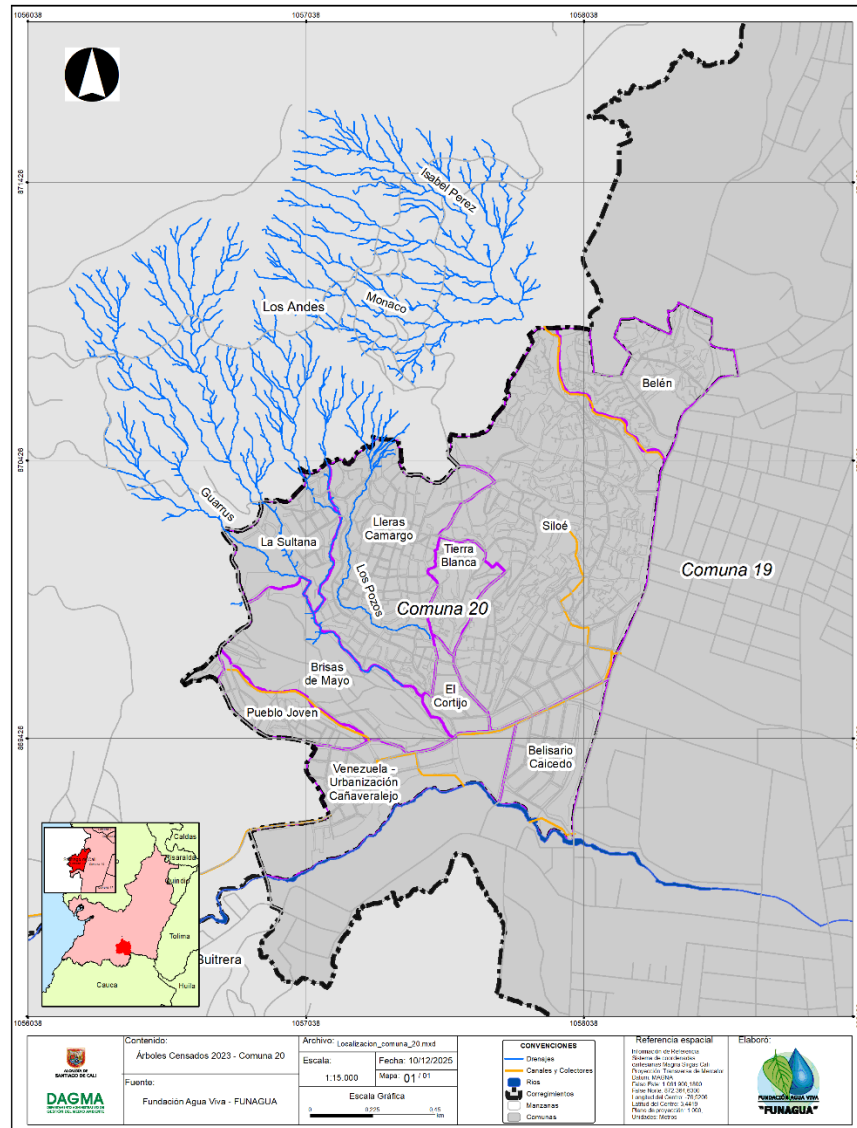


Figura 3. Localización de las áreas de estudio  
Fuente: Elaboración propia

#### 3.2 Delimitación del cauce permanente

El cauce permanente de los sistemas lénticos coincide con su lecho o geformas modelada por la acumulación y ocupación de las aguas de manera permanente o semi-permanente. Dicho criterio se puede complementar con los siguientes criterios en función de la

información disponible y el grado de confiabilidad de la misma (Tinner, 1991 citado por Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017):

- Hidrológico: que permita identificar la acumulación de flujos en la respectiva geoforma en condiciones de dinámica normal del ciclo hidrológico a escala intra-anual.
- Edafológico: que permita identificar los suelos hidromórficos, es decir, que se han formado y evolucionado bajo condiciones de suficiente saturación.
- Biológico: que permita identificar biota relacionada con la dinámica de estos sistemas y sea indicadora de su límite físico, para ello, la vegetación hidrofítica es un claro indicador ya que las mismas tienen su ciclo biológico adaptado a condiciones de saturación.

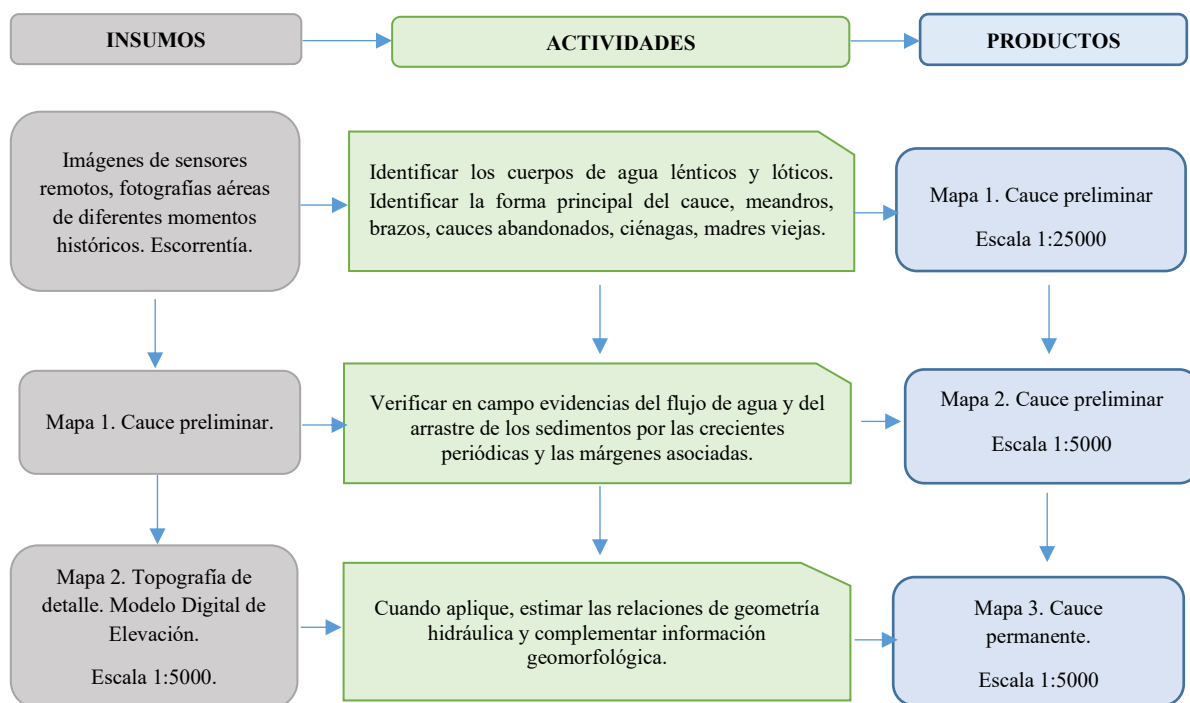


Figura 4. Insumos, actividades y productos para definir el componente hidrológico.

Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017

### 3.3 Delimitación del componente geo-morfológico

El componente geomorfológico de las rondas hídricas debe definirse teniendo en cuenta los procesos morfodinámicos recientes, los cuales se asocian principalmente a geoformas aluviales, en planicies y valles formando terrazas y llanuras de inundación. En el caso de los sistemas lénticos, se deberán analizar las geoformas típicas asociadas a la dinámica de estos.

La forma de los tipos de cuerpos de agua lénticos interiores como lagos y lagunas, depende principalmente de su geofoma y de las condiciones de agua máximas siendo determinante su origen y el relieve circundante. Algunos de estos cuerpos de agua pueden tener en sus alrededores acumulaciones de sedimentos lacustres fácilmente reconocibles, por su baja o nula inclinación y por su composición. En la figura siguiente se presenta un resumen de los insumos, actividades y productos para el análisis del componente geomorfológico (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

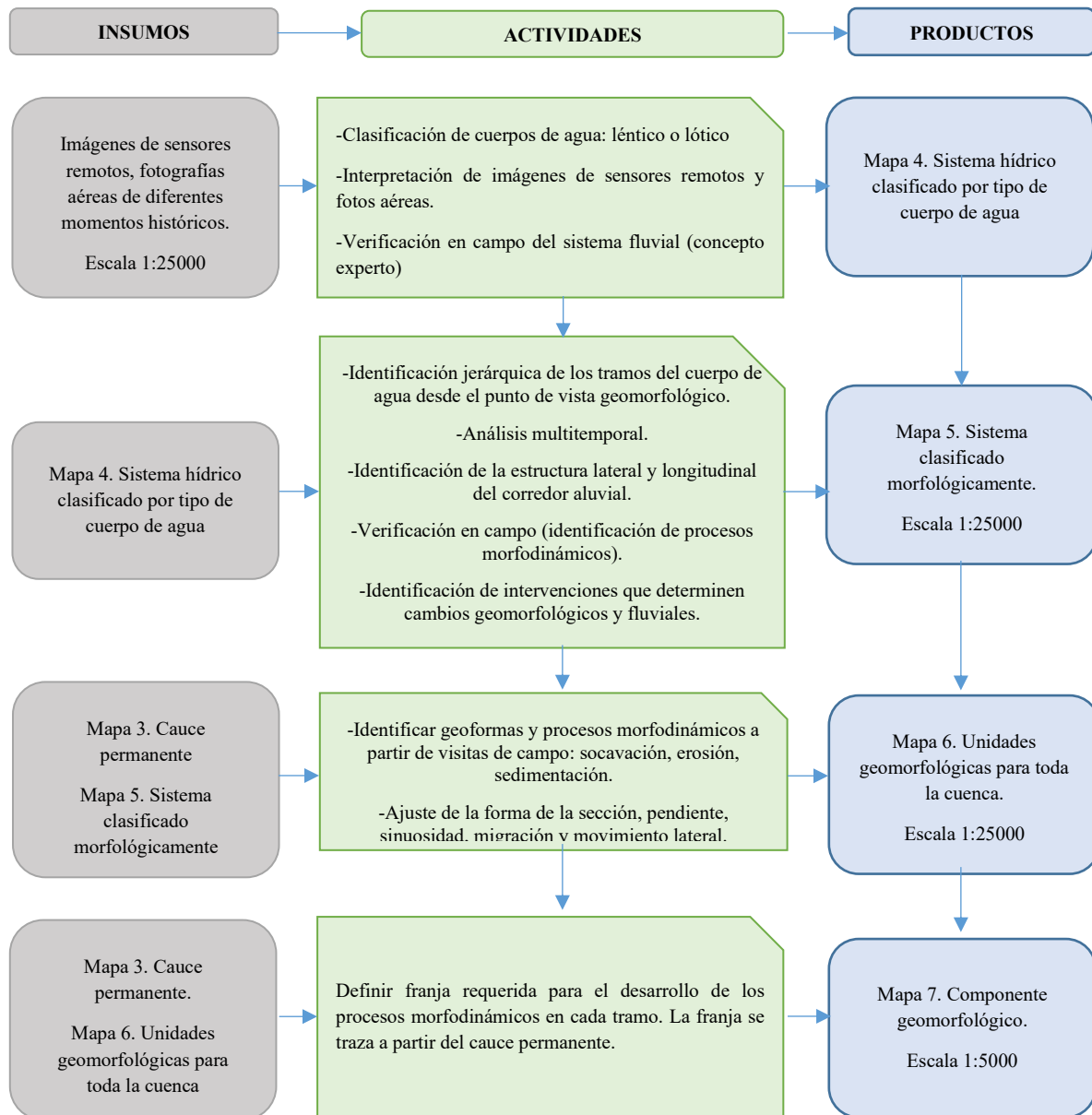


Figura 5. Insumos, actividades y productos para definir el componente geomorfológico.

Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017

La definición de la franja de terreno correspondiente al componente geomorfológico depende del sector de la cuenca de drenaje y del tipo particular de dinámica fluvial. Para los cuerpos lénticos debe entenderse su dinámica propia. Los lagos y lagunas tendrán rondas dependientes de los niveles máximos de inundación los cuales se determinarán con base en las condiciones geomorfológicas del cuerpo de agua y la hidrología de la cuenca tributaria.

La descripción y el sistema de clasificación de unidades geomorfológicas definido por el IGAC está basado en el sistema taxonómico jerarquizado propuesto por Alfred Zinck (1988), el cual fue adaptado a las características y condiciones geológicas y geomorfológicas del territorio nacional, y se sintetiza en una leyenda geomorfológica nacional en niveles categóricos que van de menor a mayor detalle. La estructura jerárquica de unidades geomorfológicas según metodología IGAC es la siguiente:

Tabla 1. Leyenda Geomorfológica - IGAC.

LEYENDA GEOMORFOLÓGICA			
Paisaje Geomorfológico	Tipo de Relieve	Material Geológico	Tipo de Relieve

### 3.4 Delimitación del componente hidrológico

El proceso metodológico se fundamenta en la representación espacial de las áreas inundables durante eventos de *La Niña* “normales” a los que se ha asociado una recurrencia promedio de 15 años. Lo anterior se logra superponiendo los niveles de inundación sobre la topografía del terreno, para lo cual es indispensable una resolución espacial a nivel de detalle la cual sea compatible con las escalas del ordenamiento territorial. En zonas urbanas, o en zonas con una alta presión antropogénica sobre el suelo, la resolución horizontal de la cartografía debe ser la de una escala de 1:2.000. La resolución vertical para los niveles de inundación y para la topografía del terreno debe ser: 10 cm o mayor, para zonas urbanas o de alta presión antropogénica en el uso del suelo.

En cuerpos de agua que no han tenido alteraciones morfológicas considerables donde es posible el almacenamiento temporal del agua y sedimentos en su llanura inundable, el componente hidrológico de la ronda hídrica se puede definir por la zona ocupada por el nivel de aguas máximas de un evento con un periodo de retorno de 15 años. Para ello, la estimación se puede basar en los datos de nivel y caudal para 15 años de período de retorno en los sitios de registro con la batimetría del cauce y la topografía de los terrenos adyacentes, con el análisis de las condiciones del flujo y con la ayuda de un modelo hidráulico o hidrodinámico.

En caso de que no se cuente con registros de caudales y niveles diarios, se pueden utilizar series de caudales generados por métodos indirectos, preferiblemente lluvia-escorrentía,

debidamente calibrados y validados, es decir, que se representen adecuadamente los procesos hidrológicos predominantes para el periodo de referencia que se tiene para evaluar el modelo hidrológico de la cuenca hidrográfica del cuerpo de agua en estudio. En tal sentido, se deberán fijar a priori los estándares de aceptabilidad del modelo considerando que éste debe representarse de manera eficiente, los hidrogramas de las crecientes máximas. Los insumos, actividades y productos para la delimitación del componente hidrológico.

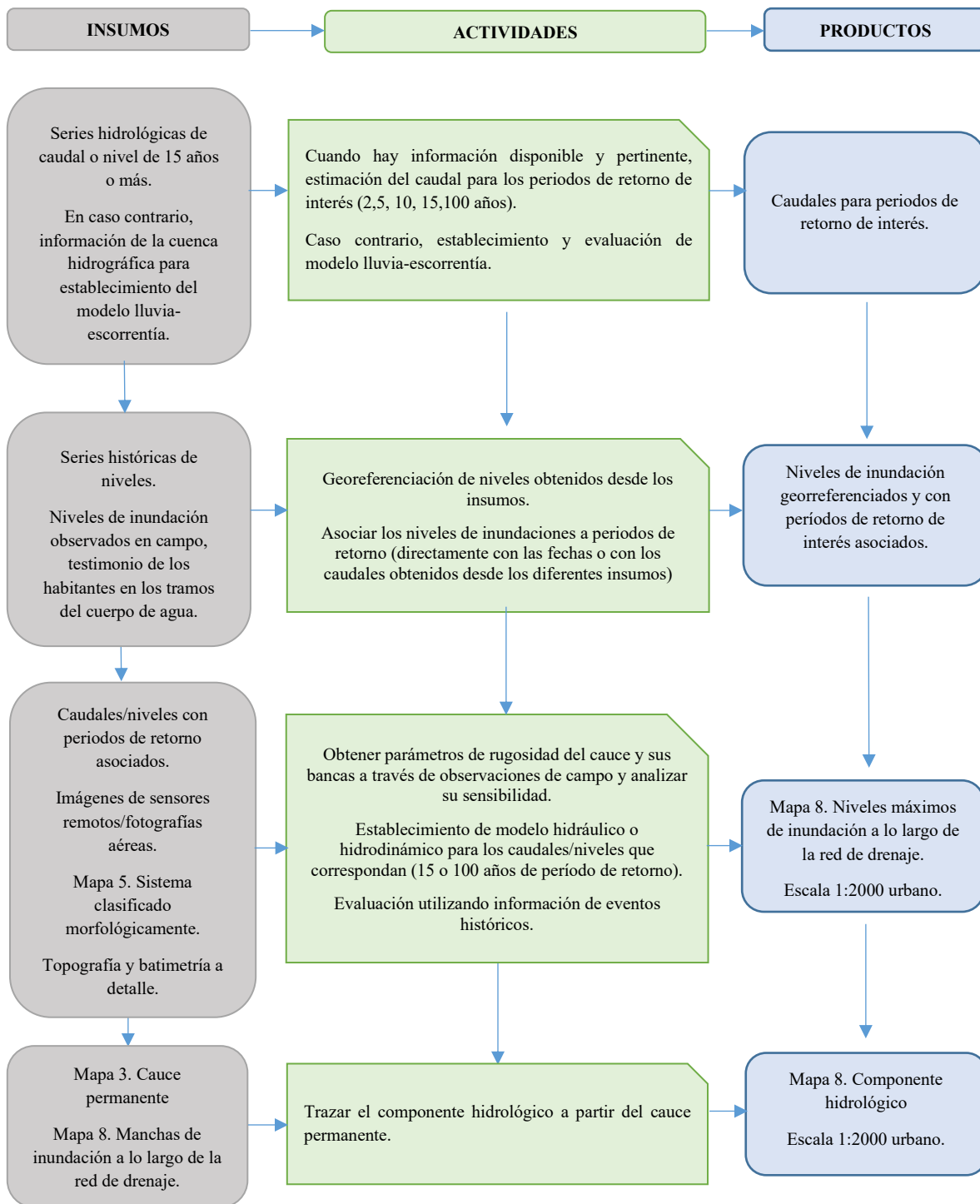
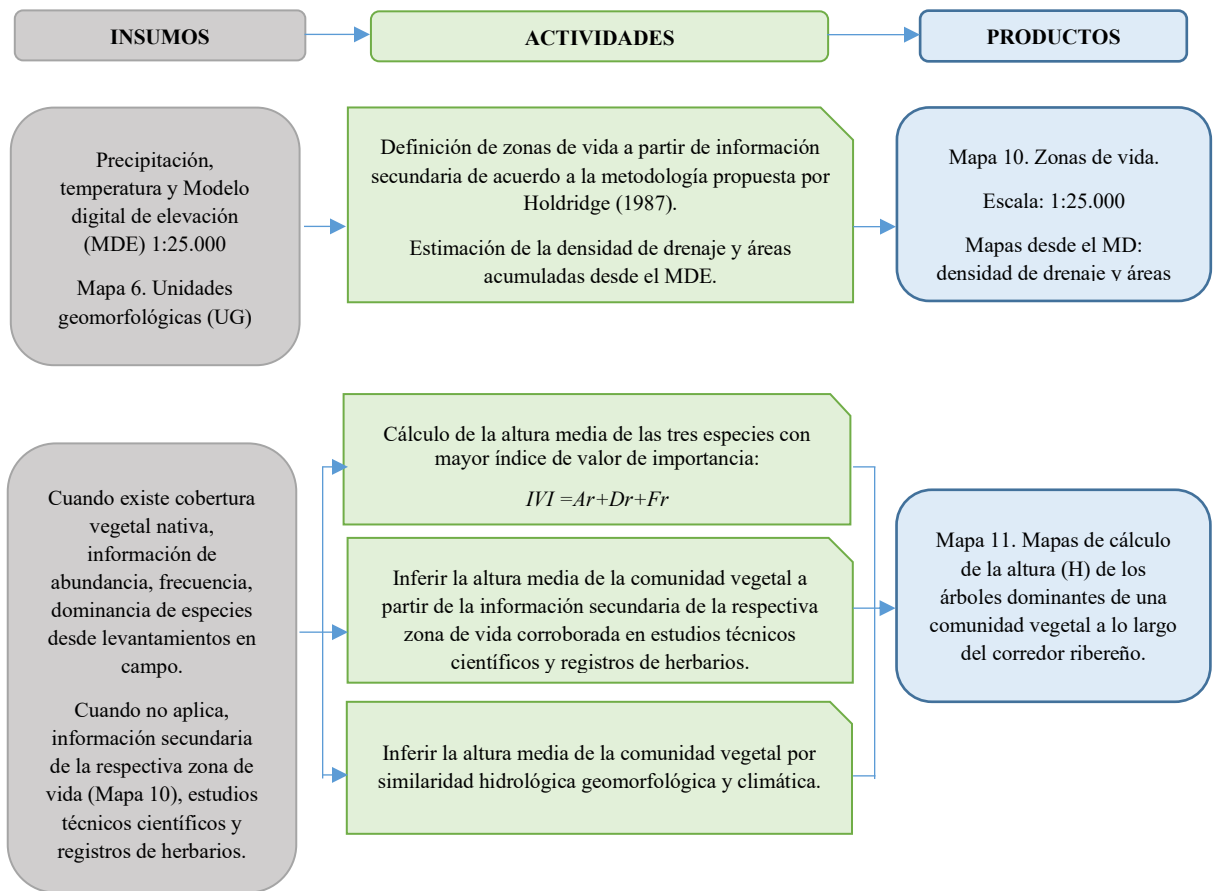


Figura 6. Insumos, actividades y productos para definir el componente hidrológico.

Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017

### 3.5 Delimitación del componente ecosistémico

De acuerdo con la Guía Técnica para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia (2017), para delimitar el componente ecosistémico, es necesario definir las zonas de vida de la cuenca y la altura media representativa (H) de las comunidades vegetales que las componen. Posteriormente se calcula la densidad de drenaje (Dd) por unidad geomorfológica (Ug) y el área acumulada (Aa) o aferente a cada punto de la red de drenaje objeto de estudio. Luego, se define la relación N entre la densidad de drenaje y el área aferente a partir del cual se establece el ancho de la franja según la relación  $N \cdot H$ . A partir del polígono de cauce permanente se genera la cartografía donde se define la franja correspondiente al componente ecosistémico. Los insumos, actividades y productos para el análisis de las funciones ecosistémicas del cuerpo de agua y los componentes bióticos y abióticos de la ribera.



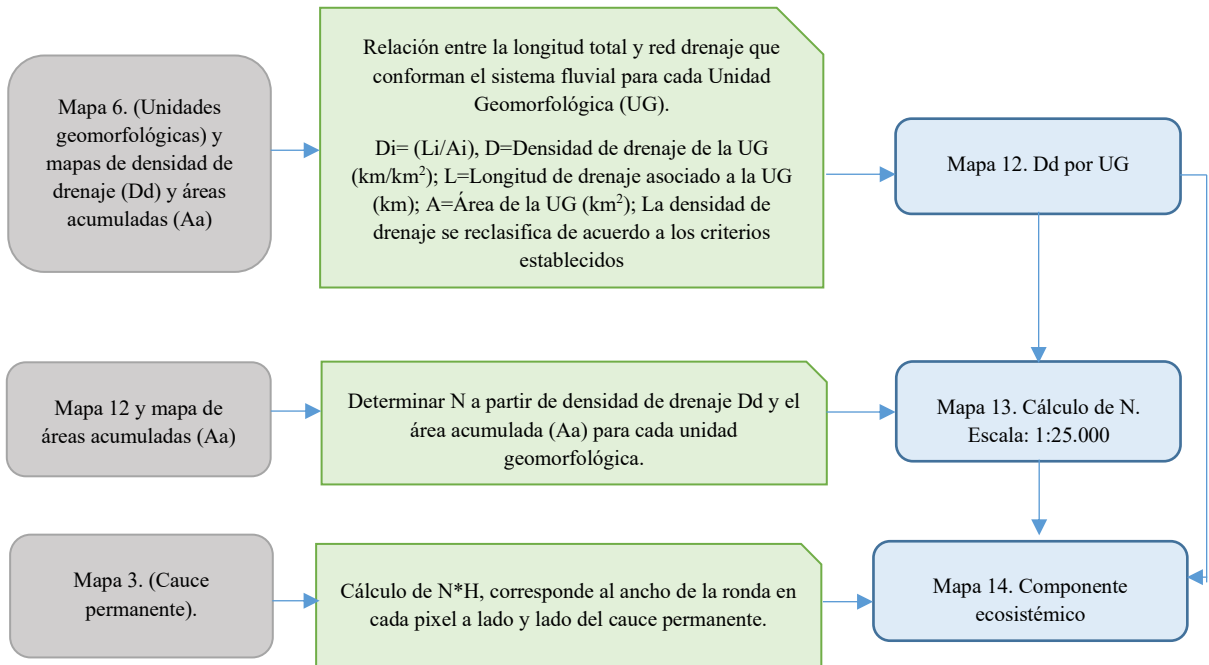


Figura 7. Insumos, actividades y productos para definir el componente ecosistémico.

Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

## 4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de la delimitación de la ronda hídrica en la comuna 18, primero la delimitación del cauce permanente de la cuenca y luego cada uno de los componentes de límite funcional: geomorfológico, hidrológico y ecosistémico.

### 4.1 Adquisición de información topográfica

Para la captura de información topográfica se empleó un levantamiento aéreo mediante avión tripulado, equipado con sensores de alta precisión. La metodología aplicada incluyó la generación de ortomosaicos, modelos digitales de superficie y nubes de puntos georreferenciadas, garantizando una cobertura completa y una precisión adecuada para el análisis técnico.

Los datos adquiridos fueron procesados y ajustados con puntos de control georreferenciados, asegurando su compatibilidad con el marco de referencia MAGNA Cali Valle del Cauca 2009.

El levantamiento se desarrolló en cumplimiento de la normativa técnica y regulatoria vigente en Colombia. En materia de calidad de los datos geográficos, se aplicó la NTC 5043 de 2011, que establece los conceptos básicos para garantizar la precisión y confiabilidad de la información espacial. Asimismo, se tuvo en cuenta la NTC 6271 de 2018, que define los estándares para la ejecución de estudios topográficos, asegurando uniformidad en los procesos de captura y análisis de datos.

#### 4.1.1 Desarrollo y captura de información

Para el desarrollo y captura de la información se llevó mediante el uso de un perfilado láser Scan Orion H300-Optech y cámara digital iXU – RS 1000, sus características principales se describen en las siguientes tablas.

Tabla 2. Características Orion H300

Parámetros	Especificaciones
Resolución en rango	1 cm
Ancho de la franja	1/5,500 x altitud
Resolución angular	0.01°
Frecuencia de oscilación	Variable, máximo 300 Hz
Ancho de onda del laser	1064 nm
Divergencia de la franja	0.25 mrad (1/e )
Potencia requerida	28V; 300W; 12A
Temperatura operativa	0 a 35°C
Humedad	0% a 95% sin condensación

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3. Características iXU RS1000

Parámetros	Especificaciones
Resolución en rango	100MP – 11608 x 8708
Tamaño del píxel	4.6 μm
Tamaño efectivo del sensor	53.4 x 40 mm
Sensibilidad a la luz (ISO)	50-6400
Tasa de captura	2 frames por segundo
Temperatura	-10°C a 40°C
Humedad	15 – 80 %

Fuente: Elaboración Propia

Considerando tales factores, la tecnología empleada ofreció una flexibilidad de personalización del trabajo con el fin de minimizar costos y maximizar los resultados.

#### 4.1.2 Planificación y ejecución del vuelo

El principio del perfilado láser consiste en la emisión de haces láser infrarrojos hacia la superficie terrestre y, después de tocarla, estos haces se reflejan y son captados por el receptor acoplado al equipo. Para cada haz emitido, se registra el tiempo de recorrido aeronave – objeto – aeronave, y a partir de este tiempo de recorrido del láser, es posible determinar la distancia del objeto mediante la siguiente fórmula:

$$\text{DISTANCIA} = (\text{VELOCIDAD DE LA LUZ} \times \text{TIEMPO DE RESPUESTA}) \div 2$$

La figura a continuación, ejemplifica el proceso de captura de los datos LiDAR.

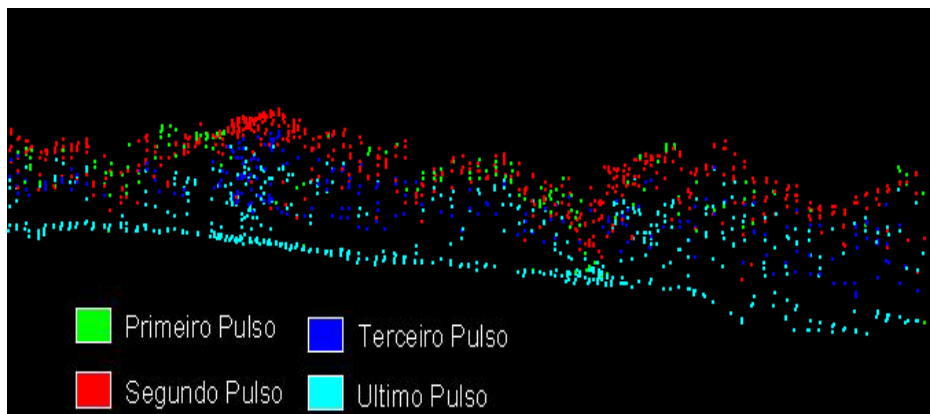


Figura 8. Captura de los datos Lidar

Fuente: Elaboración Propia

La definición del número de puntos por metro cuadrado, la altura del vuelo, la superposición longitudinal de las franjas y la velocidad de vuelo son parámetros definidos en el plan de vuelo.

A continuación, ejemplo con las franjas de vuelo realizadas para el levantamiento del área.

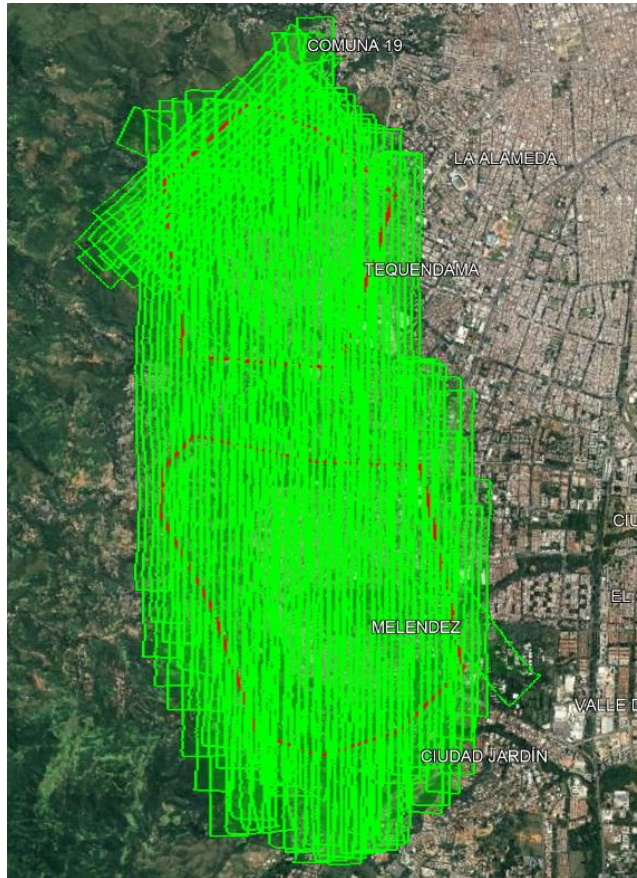


Figura 9. Franjas de vuelo  
Fuente: Elaboración Propia

Es de suma importancia que se tengan en cuenta la logística y la planificación de los posibles aeropuertos utilizados, considerando la estancia de la aeronave y el abastecimiento.

#### 4.1.3 Puntos de control

Los puntos de control utilizados en el ajuste de los datos aerolevantados. Fue un total, de 21 puntos distribuidos por toda el área. A continuación, un breve resumen con las respectivas coordenadas geográficas de cada punto.

PUNTO	LATITUD (GG°MM'SS")	LONGITUD (GG°MM'SS")	ALTURA ELIPSOIDAL(m)
1	3° 22' 19,647" N	76° 32' 49,290" W	996,741
2	3° 22' 6,546" N	76° 33' 43,888" W	1,082,595
3	3° 22' 27,638" N	76° 33' 16,983" W	1,049,519
4	3° 22' 48,810" N	76° 33' 41,411" W	1,140,197
5	3° 22' 43,506" N	76° 32' 47,724" W	985,567
6	3° 23' 13,993" N	76° 32' 50,805" W	974,496
7	3° 23' 12,554" N	76° 33' 21,226" W	983,283
8	3° 23' 27,041" N	76° 33' 47,615" W	1133,28
9	3° 23' 39,988" N	76° 33' 2,345" W	968,616
10	3° 23' 52,580" N	76° 34' 12,696" W	1193,83
11	3° 24' 37,765" N	76° 33' 52,499" W	986,884
12	3° 24' 49,642" N	76° 33' 28,416" W	978,354
13	3° 25' 5,902" N	76° 34' 1,230" W	1,099,003
14	3° 25' 17,747" N	76° 33' 39,159" W	1,108,784
14A	3° 25' 22,794" N	76° 33' 32,757" W	1,129,551
15	3° 25' 9,828" N	76° 33' 20,857" W	999,487
16	3° 25' 38,783" N	76° 33' 34,569" W	1,190,472
17	3° 25' 46,040" N	76° 33' 6,691" W	1,040,262
18	3° 26' 1,775" N	76° 33' 24,183" W	1,232,198
19	3° 25' 58,016" N	76° 34' 3,456" W	1,415,462
20	3° 25' 39,405" N	76° 34' 17,779" W	1336,86

Figura 10. Coordenadas geográficas puntos de control terrestre  
Fuente: Elaboración Propia

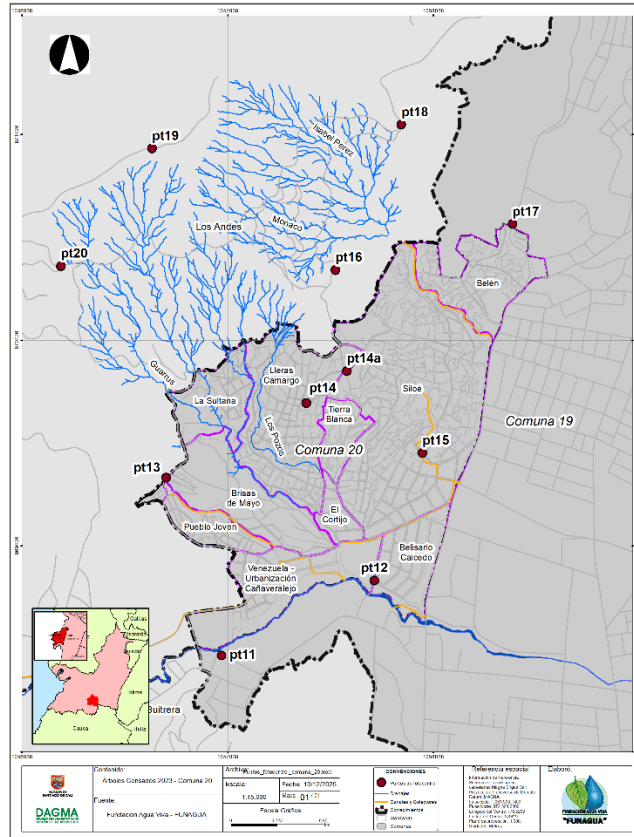


Figura 11. Distribución de puntos de control  
Fuente: Elaboración Propia





 <b>DAGMA</b> DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE GESTIÓN DEL MEDIO AMBIENTE	<b>FICHA REGISTRO DE PUNTOS DE FOTO CONTROL</b>  Fecha de Toma: 26/08/2025	 <b>FUNAGUA</b>
<b>Información General Proyecto</b>		
Proyecto: REALIZAR LA ACTUALIZACIÓN DEL ACOTAMIENTO DE LAS RONDAS HÍDRICAS DE LAS QUEBRADAS Y SUS TRIBUTARIOS PRIORIZADOS DE LAS COMUNAS 18 Y 20, ACORDE A LOS LINEAMIENTOS DE LA GUÍA TÉCNICA DE CRITERIOS PARA EL ACOTAMIENTO DE LAS RONDAS HÍDRICAS EN COLOMBIA ADOPTADA MEDIANTE LA RESOLUCIÓN 957 DEL 2018.	Nombre Punto de control: PC 6	
Departamento: Valle del Cauca	Municipio: Santiago de Cali	
Operador: Jesús Andrés Jordán R.	Auxiliar: Andrés Augusto Arroyo P.	
<b>Información de Equipos GPS</b>		
Técnica de Levantamiento: Estático		
Punto de Amarre Base: Universidad del Valle Ciudad Universitaria Meléndez	Tipo de Punto de control: Rover NTRIP	
	Altura del Bastón: 2 metros.	
Tipo de Receptor Base: TRIMBLE NETR9	Tipo de Receptor Rover: Alpha Geo L300	
Antena de Receptor Base: TRIMBLE NETR9	Antena de Receptor Rover: Alpha Geo L300	
Serial: 41903S001	Serial: T10R38116698755	
<b>Coordenadas Geográficas WGS84</b>		
Latitud (GG° MM' SS"): 3° 23' 13,993" N		
Longitud (GG° MM' SS"): 76° 32' 50,805" W		
Altura Elipsoidal (m): 974.50		
<b>Coordenadas Planas (MAGNA SIRGAS Origen Cali 2009)</b>		
Norte (m): 866,319.16		
Este (m): 1,058,912.26		
Altura Elipsoidal (m): 974.50		
<b>Registro Fotográfico</b>		
		
<b>Descripción</b>		
Ubicado en la carrera 78 con calle 3D		

Figura 12. Ejemplo ficha de punto de control  
Fuente: Elaboración Propia

#### 4.1.4 Control de calidad altimétrico

Con la nube de puntos extraída, fue posible llevar a cabo el control de calidad altimétrico, asegurando la precisión del modelo generado.

Para el análisis de la precisión altimétrica, se verificaron las discrepancias entre las coordenadas E, N y Z obtenidas en campo y las coordenadas extraídas de la nube de puntos. Inicialmente, esta verificación se realizó en el sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS.

Esta verificación se llevó a cabo en el software MicroStation con el paquete TerraScan, donde se realizó la lectura de los puntos directamente sobre la nube y se compararon con los valores medidos en campo. A partir de este análisis, se determinó la desviación estándar de los datos, permitiendo evaluar la exactitud y compararla con el error estándar altimétrico esperado.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el control altimétrico del producto, considerando todos los puntos recibidos.

Number	Easting	Northing	Known Z	Laser Z	Dz
5	1057984.58	869877.780	999.487	999.650	+0.163
7	1057617.21	870276.120	1129.551	1129.560	+0.009
8	1057561.29	870767.300	1190.472	1190.480	+0.008
3	1056738.17	869757.220	1099.003	1099.010	+0.007
1	1057007.68	868892.800	986.884	986.890	+0.006
2	1057751.19	869257.660	978.354	978.360	+0.006
6	1057419.57	870121.080	1108.784	1108.790	+0.006
10	1057881.98	871473.650	1232.198	1232.200	+0.002
12	1056227.35	870786.480	1336.860	1336.860	+0.000
15	1056384.08	867504.700	1193.830	1193.830	+0.000
19	1058958.98	864649.590	996.741	996.740	-0.001
11	1056669.54	871358.200	1415.462	1415.460	-0.002
13	1058421.97	870990.240	1040.262	1040.260	-0.002
24	1059130.25	866706.095	971.382	971.380	-0.002
21	1057973.07	866275.000	983.283	983.280	-0.003
25	1057273.32	864247.190	1082.595	1082.590	-0.005
22	1058912.26	866319.160	974.496	974.490	-0.006
23	1058556.01	867117.780	968.616	968.610	-0.006
17	1057349.87	865545.590	1140.197	1140.190	-0.007
Average dz					
+0.007					
Minimum dz					
-0.030					
Maximum dz					
+0.163					
Average magnitude					
0.013					
Root mean square					
0.036					
Std deviation					
0.037					

Figura 13. Control de calidad altimétrica.

Fuente: Elaboración Propia

Con base en los análisis realizados, se concluyó que las muestras presentan alta precisión y no muestran tendencia sistemática en los errores.

#### 4.1.5 Control de Calidad planimétrica

A partir de las ortofotos generadas, se llevó a cabo el control de calidad, abarcando tanto el análisis geométrico como el radiométrico de las imágenes. El análisis geométrico verificó la consistencia de las ortofotos, asegurando que estuvieran libres de distorsiones y discontinuidades geométricas en las uniones, y que los desplazamientos en las características, como carreteras y cuerpos de agua, fueran inferiores a un píxel. Por su parte, el control radiométrico evaluó la uniformidad del brillo, contraste y color entre las hojas y ortofotos adyacentes, así como dentro de cada imagen. Además de estos análisis, se realizó la verificación de los productos finales, incluyendo la adecuación de los recortes de las ortofotos y la continuidad radiométrica entre los distintos archivos generados.

A continuación, la comparación el control de calidad planimétrica.

COMPARACIÓN PUNTOS DE CONTROL X ORTOFOTOS									
N	Nombre	COORDENADAS FOTOINTERPRETADAS		COORDENADAS PLANIMÉTRICAS DE REFERENCIA		DIFERENCIAS		DIFERENCIAS <sup>2</sup>	
		E (m)	N (m)	E (m)	N (m)	DX (m)	DY (m)	(DX) <sup>2</sup>	(DY) <sup>2</sup>
1	PC11	1057007.600	868892.91	1057007.676	868892.799	0.111	-0.076	0.012	0.006
2	PC12	1057751.200	869257.71	1057751.194	869257.659	0.051	0.006	0.003	0.000
3	PC13	1056738.300	869757.18	1056738.168	869757.222	-0.042	0.132	0.002	0.017
4	PC15	1057984.500	869877.91	1057984.579	869877.775	0.135	-0.079	0.018	0.006
5	PC14	1057419.600	870121.11	1057419.588	870121.079	0.031	0.032	0.001	0.001
6	PC14a	1057617.200	870276.21	1057617.214	870276.116	0.094	-0.014	0.009	0.000
7	PC16	1057561.300	870767.31	1057561.294	870767.304	0.006	0.006	0.000	0.000
8	PC18	1057882.100	871473.71	1057881.979	871473.647	0.063	0.121	0.004	0.015
9	PC19	1056669.500	871358.16	1056669.541	871358.202	-0.042	-0.041	0.002	0.002
10	PC20	1056227.400	870786.61	1056227.345	870786.484	0.126	0.055	0.016	0.003
11	PC17	1058421.890	870990.22	1058421.973	870990.235	-0.015	-0.083	0.000	0.007
12	76001124	1059130.180	866706.11	1059130.250	866706.090	0.020	-0.070	0.000	0.005
13	PC10	1056384.080	867504.71	1056384.077	867504.696	0.014	0.003	0.000	0.000
14	PC8	1057158.380	866720.11	1057158.378	866720.093	0.017	0.002	0.000	0.000
15	PC4	1057349.880	865545.61	1057349.865	865545.594	0.016	0.015	0.000	0.000
16	PC3	1058104.080	864895.2	1058104.006	864895.120	0.080	0.074	0.006	0.005
17	PC1	1058958.990	864649.5	1058958.980	864649.592	-0.092	0.010	0.008	0.000
18	PC5	1059007.280	865382.71	1059007.357	865382.577	0.133	-0.077	0.018	0.006
19	PC7	1057973.180	866274.91	1057973.067	866274.996	-0.086	0.113	0.007	0.013
20	PC6	1058912.290	866319.2	1058912.256	866319.160	0.040	0.034	0.002	0.001
21	PC9	1058555.990	867117.81	1058555.013	867117.784	0.026	-0.023	0.001	0.001
22	PC2	1057273.380	864247.11	1057273.317	864247.185	-0.075	0.063	0.006	0.004
<b>X</b>									
Cantidad de elementos estudiados		22							
Suma de los Errores al Cuadrado		0.116							
Desviación Estándar		0.069							
Error Medio Cuadrado RMSE(x)		0.072							
<b>Y</b>									
Cantidad de elementos estudiados		22							
Suma de los Errores al Cuadrado		0.092							
Desviación Estándar		0.066							
Error Medio Cuadrado RMSE(y)		0.065							

Figura 14. Control de calidad planimétrica

Fuente: Elaboración Propia

De los procesos mencionados en la captura y toma de información se generaron los productos esperados como lo son el Modelo digital de superficie (MDS), Modelos digital de terreno (MDT), curvas de nivel y Ortofotomosaico.

Todos los productos fueron procesados en un tamaño de pixel a 10 cm, los cuales cumplen con las especificaciones requeridas para el desarrollo el acotamiento de rondas hídricas como lo son: cobertura vegetal, geoformas, y todo lo requerido respecto al componente hídrico.



#### 4.2 Definición del componente ecosistémico

El área de influencia de las cuencas priorizadas dentro de la comuna 20 y parte alta rural, se conforma de dos Biomas, el primero corresponde al Orobioma Bajo de los Andes. ubicado en áreas de montaña y lomerío localizadas aproximadamente entre los 500 y 2500 msnm, donde se presentan temperaturas entre los 18 y 24°C y precipitaciones de 1.000 a 3.000 mm por año. A este orobioma comúnmente se le asigna el nombre de piso subandino, dada su relación con la cordillera de los Andes.

Un segundo Bioma (azonal) correspondiente al Zonobioma Alternohigrico Tropical del Valle del Cauca. Este Zonobioma está ubicado en los 900 y 1200 msnm, principalmente en la zona plana del Valle geográfico del río Cauca, conformado por los depósitos aluviales del río Cauca y afluentes y las formaciones (conos coluvio-aluviales) de la llanura aluvial de piedemonte (CVC, 2015).


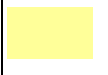
Bajo este contexto el área de estudio de la comuna 20 y su parte alta rural, el orobioma Bajo de los Andes acoge a los Arbustales y matorrales medio seco en montana fluvio-gravitacional (AMMSEMH) con un área en zona rural de 212,10 ha y urbana con 186,81 ha y el Zonobioma Alternohigrico Tropical del Valle del Cauca se compone del ecosistema correspondiente a Bosque cálido seco en piedemonte aluvial (BOCSEPA) con un área en zona urbana de 20,49 ha. Figuras y tablas siguientes.

Tabla 4. Área Biomas

ITEM	COLOR	ZONA	BIOMA	AREA (ha)
1		Rural	Orobioma Bajo de los Andes	212,10
2		Urbana	Orobioma Bajo de los Andes	186,81
3		Urbana	Zonobioma Alternohígrico Tropical del Valle del Cauca	20,49

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5, Área Ecosistemas

ITEM	COLOR	ZONA	ID ECOSISTEMA	ECOSISTEMA	AREA (ha)
1		Rural	AMMSEMH	Arbustales y matorrales medio seco en montana fluvio-gravitacional	212,10
2		Urbana	AMMSEMH	Arbustales y matorrales medio seco en montana fluvio-gravitacional	186,81
3		Urbana	BOCSEPA	Bosque cálido seco en piedemonte aluvial	20,49

Fuente: Elaboración Propia

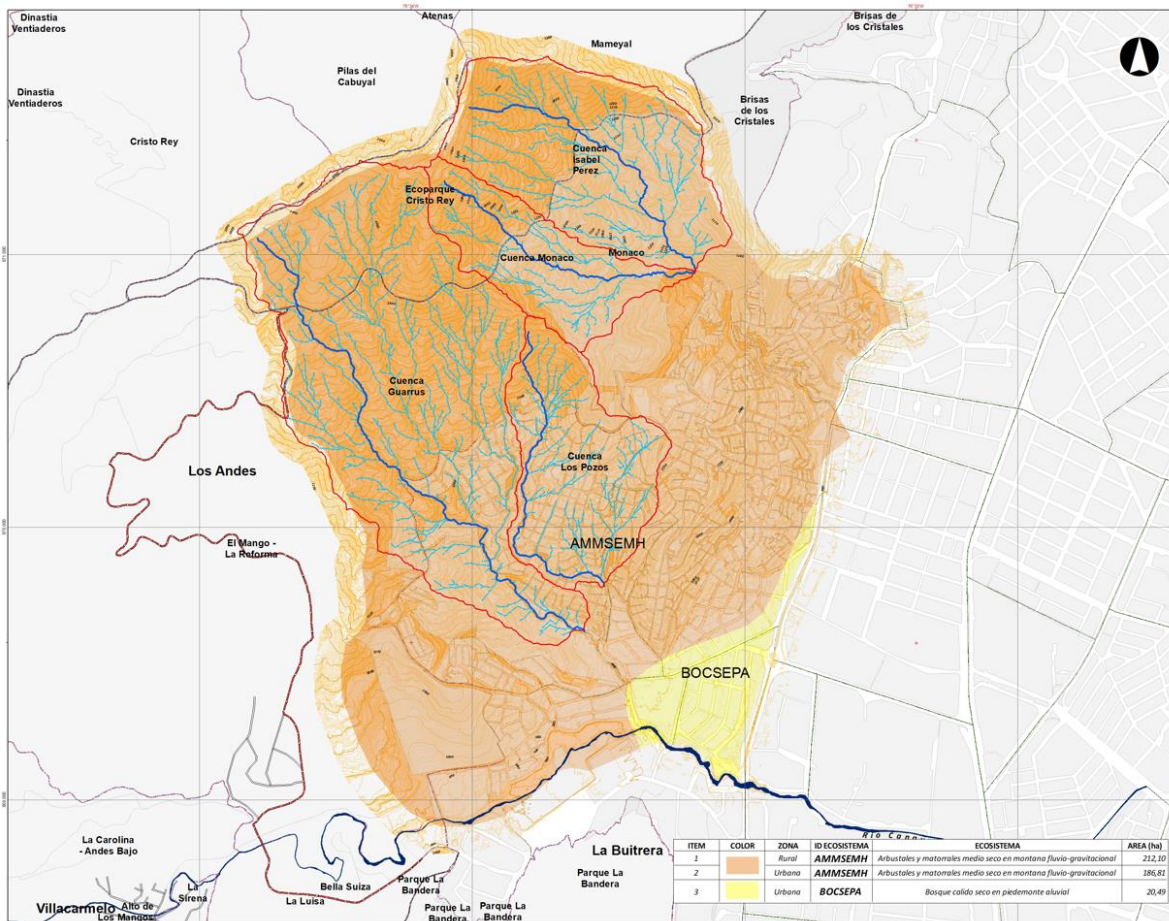


Figura 15, Mapa de Ecosistema  
Fuente: Elaboración Propia

Teniendo en cuenta los datos de temperatura media anual, precipitación media anual y la altitud de los ecosistemas AMMSEMH y BOCSEPA, el sistema de zonas de vida de Holdridge (1982), corresponde a Bosque Húmedo Premontano (bh-PM) en el 23, 57% (98,6 ha) de su área total, mientras que el 76,43% (320,54 ha) corresponde a Bosque Seco Premontano (bs-PM), con ocupación en una parte rural con 27,00% (113,24 ha) y zona urbana con 49,43% (207,30 ha), (figura y tabla siguiente).

Tabla 6, Área Zonas de Vida

ITEM	COLOR	ZONA	CODIGO ZONA DE VIDA IGAC	NOMBRE ZONA DE VIDA	AREA (ha)
1	Green	Rural	<b>bh-PM</b>	Bosque húmedo premontano	98,86
3	Light Green	Rural	<b>bs-PM</b>	Bosque seco premontano	113,24
4	Light Green	Urbana	<b>bs-PM</b>	Bosque seco premontano	207,30

Fuente: Elaboración Propia

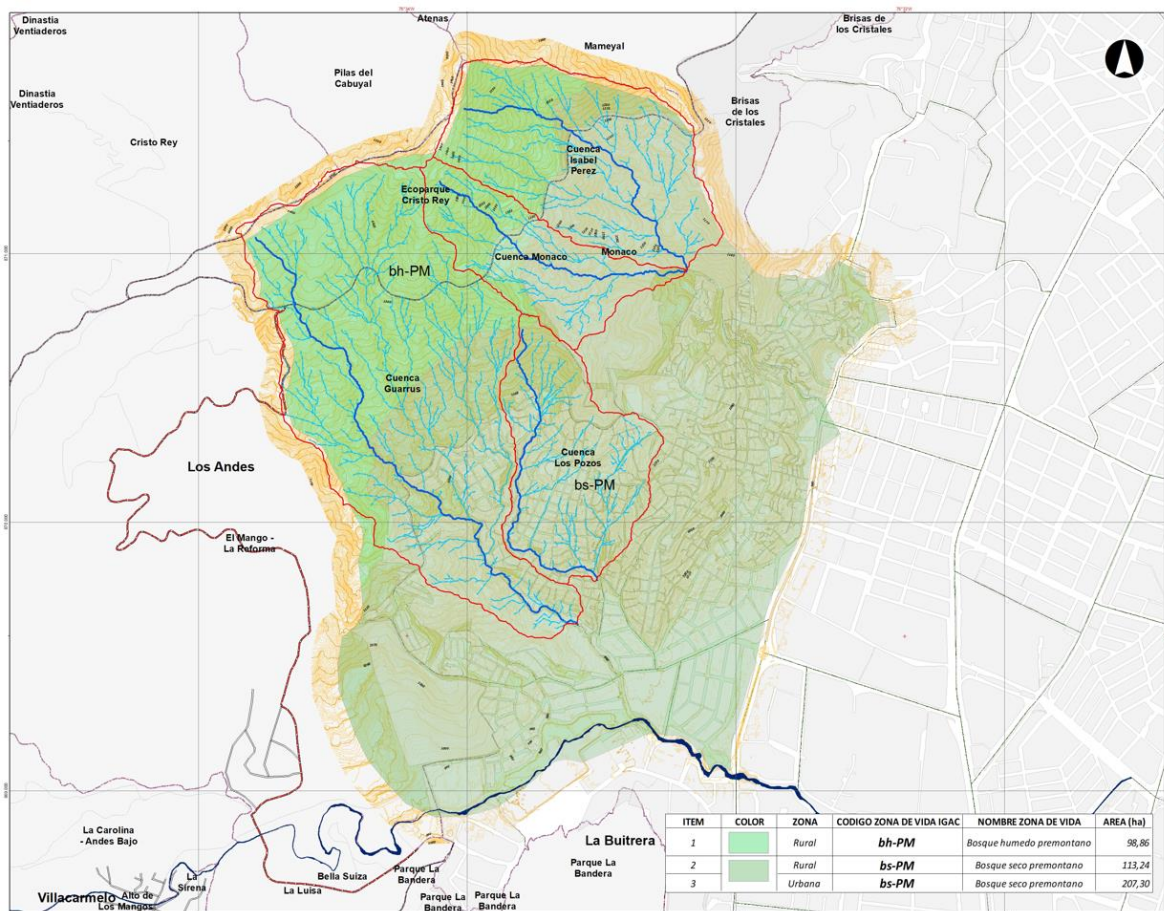


Figura 16, Mapa de Zona de Vida, Fuente: Elaboración Propia

#### 4.2.1 Cálculo de la altura media del dosel de una comunidad vegetal – H

El cálculo de la altura media del dosel de una comunidad vegetal (H) busca caracterizar la vegetación nativa que exista o haya existido en la cuenca, no la cobertura vegetal intervenida a nivel de plantaciones forestales, bosques intervenidos, cultivos, pastos o cualquier otra cobertura que no corresponda a las condiciones naturales (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017), La altura H, constituye una característica estructural de fácil medición que representa el dosel medio de una comunidad vegetal, la cual permite delimitar una faja que busca establecer, mantener o inducir las condiciones para el desarrollo de comunidades animales y vegetales de un ecosistema particular,

Para el cálculo de H, es necesaria la caracterización florística y estructural de esta cobertura vegetal, teniendo en cuenta la metodología definida en el manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad (Villareal et al., 2004),

La metodología implementada en la cobertura vegetal presente en las comunas 18, fue el método de transectos de Gentry (1982) (citado por Álvarez y Gross, 2021), el cual consta de un área de 50 m de largo por 2 m de ancho conformando una unidad de 100 m<sup>2</sup> de área, Se

censaron las especies leñosas con tronco mayor o igual a 2 cm, con los datos obtenidos se realizaron los cálculos correspondientes a índices de diversidad e índice de valor de importancia (IVI) (Anexo “Determinación de la Ronda Hídrica de Varias Microcuencas Ubicadas en las Comunas 18 y 20 En Santiago de Cali, noviembre de 2025),

El cálculo del índice de valor de importancia-IVI, es un indicador de la importancia fitosociológica de una especie dentro de un ecosistema forestal, El IVI es un valor en porcentaje que indica el grado de asociación de las especies y de las familias como base para la clasificación de la vegetación, Los IVI más altos indican las especies o familias más importantes o que predominan y su importancia ecológica dentro del ecosistema,

Para la evaluación del estado de conservación de la cobertura vegetal asociada a las comunas 18, se calculó el IVI de acuerdo al método de Mori y Boom (1987) (citado por Álvarez y Gross, 2021), la fórmula usada fue:

$$IVI= RDi + RFi + RCi$$

Donde:

*IVI*= Índice de valor de importancia

*RDi*=Densidad relativa

*RFi*= Frecuencia relativa

*RCi*= Cobertura relativa

A partir de los resultados del IVI, se identifican las tres especies con mayor IVI y se procede al cálculo del promedio de la altura media de estas especies, lo cual conforma el parámetro estructural H,

#### **4.2.2 Fase de campo – análisis**

Para cada una de las micro-cuencas, se evaluó la vegetación leñosa presente asociada de manera directa al cuerpo de agua y con base en la implementación de transectos tipo Gentry (parcelas de 50 X 2 m), Se censó toda la vegetación leñosa de 2,5 cm., de DAP (8 cm., de CAP, por aproximación), para definir la estructura y composición de la vegetación acompañante de dicho cuerpo de agua,

Para el análisis de la diversidad alfa se calculó el índice de valor de importancia (IVI, formulado por Curtis & Mc Intosh (1951)), se evalúa para cada especie a partir de la suma de la abundancia relativa, la frecuencia relativa y la dominancia relativa de la especie dentro del área muestreada, Permite comparar el "peso" ecológico de cada especie dentro de cada unidad de muestreo, Para calcular el IVI, se tomó directamente de campo los datos de especie, abundancia (número de individuos), DAP y altura, los cuales se tabularon en una hoja de cálculo y se realizaron los cálculos correspondientes,

Los parámetros tenidos en cuenta para la construcción del IVI fueron:

- **Especie:** Es el nombre de la especie encontrada en cada parcela, se designa en lo posible hasta el epíteto específico apoyándose en la experticia del equipo de botánicos que realizaron el inventario, El tratamiento taxonómico de las especies reportadas en este informe se da con base en la clasificación moderna propuesta por la APG IV (Angiosperm Phylogeny Group); corroborando los nombres científicos a través de las páginas WEB trópicos del Missouri Botanical Garden ([www,tropicos,org](http://www.tropicos.org)) y [https://www,catalogueoflife, org/](https://www.catalogueoflife.org/),
- **Número de individuos (# ind.):** Es el número de individuos encontrados en cada parcela por cada especie registrada,
- **Cobertura relativa (Cob, rel, sp.):** de especie “i” es la cobertura de una especie “i” dividida por la suma de las coberturas de todas las especies, para este caso, la cobertura se define por la totalidad de la suma de los DAP de todos los individuos de la especie “X”,
- **Densidad (Den, sp.):** de una especie “i” es el número de individuos de la especie “i” dividido por el área total,
- **Densidad relativa (Den, rel, sp.):** de especie “i” es el número de individuos de una especie “i” dividido por el número total de individuos de todas las especies,
- **Frecuencia (Frec, sp.):** de especie “i” es la probabilidad de encontrar una especie “i” en una muestra, o sea el número de cuadrados o parcelas que incluyen a la especie “i” dividido por el número total de cuadrados,
  
- **Frecuencia relativa (Frec, Rel, sp.):** de especie “i” es la frecuencia de especie “i” dividida por la suma de frecuencias de todas las especies, Está dado por la fórmula:  
$$Rfi = fi / \sum f$$
- **IVI = Índice de Valor de Importancia de especie “i”** es una estimación de la importancia de una especie “i” en el ensamblaje; es la densidad relativa más la frecuencia relativa más la cobertura relativa de cada una de las especies que se encontraron en el muestreo,  
Está dado por la fórmula:  $IVI = RDi + RFi + RCi$   
IVI tiene un valor máximo de 3,0; por lo que al sumar todos los IVI’s este valor indica que su cálculo fue correcto,
- **Porcentaje de importancia (% Imp.):** de especie “i” es la división por “3” (valor máximo de IVI), de cada valor de IVI resultado para cada una de las especies censadas durante el muestreo y luego multiplicado por 100; esto da como resultado los porcentajes de importancia de cada especie dentro del muestreo realizado, Al final la sumatoria de todos los porcentajes de importancia debe ser 100,

Complementando lo anterior, con los datos obtenidos en campo sintetizados en el cuadro ecológico de cada conjunto de transectos Gentry por micro-cuenca, se determinó su diversidad utilizando los siguientes índices:

### **- Índice de Shannon-Wiener**

La diversidad de especies fue determinada con el Índice de Shannon-Wiener, que es uno de los índices más utilizados para determinar la diversidad de especies vegetales en un hábitat determinado; además es más sensible al cambio en el número de especies (Feinsinger, 2003), Este índice considera que los individuos se muestrean al azar a partir de una población “infinitamente grande” y asume que todas las especies están representadas en la muestra (Magurran, 1989), Según Mendoza (2013), valores entre: 0 - 1,35 representan una diversidad baja; valores entre 1,36 -3,5 representan una diversidad media y valores mayores a 3,5 representan una diversidad alta,

### **- Índice de Simpson**

Este índice es una medida de Dominancia por lo que sobrevalora las especies más abundantes en detrimento de la riqueza total de especies, Manifiesta la probabilidad de que dos individuos tomados al azar de una muestra sean de la misma especie, Según Mendoza (2013), los valores obtenidos entre: 0 - 0,33 representan una diversidad baja; entre 0,34 - 0,66 representan una diversidad media y valores mayores a 0,67 representan una diversidad alta, El valor máximo es de 1,0,

### **- Índice de diversidad de Margalef (Dmg)**

El índice de Margalef expresa la riqueza específica de una muestra de forma sencilla, teniendo en cuenta simultáneamente el número de especies y el número de individuos, valores inferiores a 2,0 son relacionados con zonas de baja diversidad (en general resultado de efectos antropogénicos); valores comprendidos entre 2,0 – 5,0 se relacionan con una diversidad media y valores superiores a 5,0 son considerados como indicativos de alta biodiversidad (Paredes et al., 2011),

### **- Análisis de disimilitud de Bray-Curtis**

Para la realización de un análisis de diversidad beta y ver cuales quebradas presentan similitud en su composición de especies, entonces se utiliza el análisis de disimilitud de Bray-Curtis, el cual es utilizada para cuantificar la disimilitud en la composición de especies entre dos sitios diferentes, basándose en los conteos en cada uno (Bray & Curtis, 1957),

La disimilitud de Bray-Curtis está limitada entre 0 y 1, donde 0 significa que ambos sitios tienen la misma composición (es decir, comparten todas las especies) y 1 significa que no comparten ninguna (Bloom, 1981),

Está dado por la fórmula:  $BC_{ij} = 1 - 2C_{ij} / S_i + S_j$

Donde,

-  $BC_{ij}$  = es la disimilitud de Bray-Curtis entre los sitios

-  $C_{ij}$  = es la suma de las abundancias de las especies que se encuentran en *ambos* sitios,

- $S_i$  = es la suma de las abundancias de *todas* las especies en el sitio  $i$
- $S_j$  = es la suma de las abundancias de *todas* las especies en el sitio  $j$

#### - **Análisis de estructura horizontal**

Para el análisis de la estructura horizontal se hizo la distinción entre Latizales, Fustales y Fustales Grande; para los que el inventario forestal nacional (IDEAM, 2021), orientó los siguientes rangos en cada una de las categorías propuestas: LATIZALES = Leñosos con  $2,5 \text{ cm} \leq \text{DAP} < 10 \text{ cm}$  de DAP, FUSTALES = Leñosos con  $10 \text{ cm} \leq \text{DAP} < 30 \text{ cm}$  de DAP y FUSTALES GRANDES: leñosos con un  $\text{DAP} \geq 30 \text{ cm}$ , Para esta medición se tuvo en cuenta los leñosos observados en los transectos Gentry que se han censado y ocupen cada una de estas categorías, Para a la categoría BRINZALES, que son las plantas leñosas por debajo de 2,5 cm de DAP (plántulas), se censaron a través de parcelas de 1 X 1 m., tomadas cada 10 m del transecto de Gentry (total de 5 sub-parcelas de 1X1 m por parcela Gentry); de no existir reportes de plántulas de leñosos, se hará una descripción cualitativa general del sotobosque observado en esta área de censo,

#### **4.2.3 Composición florística por micro-cuenca**

Para cada una de las micro-cuencas se implementó un número determinado de transectos Gentry, los cuales fueron georreferenciados en su inicio y en su terminación, En la mayoría de los casos hubo acompañamiento de la comunidad y del supervisor del convenio, tal como se muestra, entre otras actividades, en el siguiente registro fotográfico,



Figura 17, Registro fotográfico, Quebrada la Guarrus,  
Fuente: Elaboración Propia



Figura 18, Aspecto metodología en campo, Isabel Pérez,  
Fuente: Elaboración Propia

A continuación, con base en la metodología planteada se muestra por cada sub-cuenca los resultados de la vegetación leñosa asociada al cuerpo de agua,

#### 4.2.4 Sector Quebrada Guarrús.

Para este sector, ubicado en el flanco derecho del cerro los Cristales – Cristo rey y que abarca las áreas del predio La Olga administrado por EMCALI y sector Los Tejares, se implementó un total de siete transectos tipo Gentry, los cuales se muestran en la siguiente gráfica y las coordenadas en la siguiente tabla.

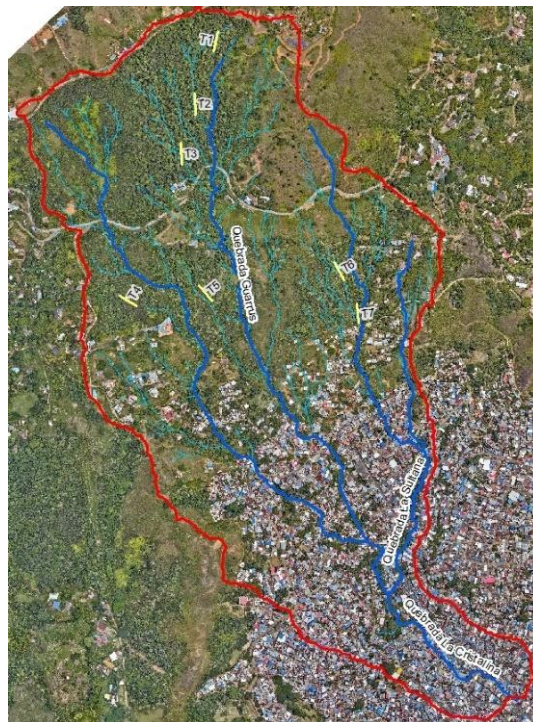


Figura 19, Aspecto distribución transectos Gentry, Quebrada Guarrús  
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 7, Coordenadas transectos implementados – Quebrada Guarrús,

Transecto	Inicio		Final		Altitud (msnm)
T1	3,432105	-76,567892	3,431647	-76,567991	1409
T2	3,430706	-76,568409	3,430239	-76,568388	1374
T3	3,429584	-76,568710	3,429115	-76,568692	1347
T4	3,426159	-76,570069	3,425892	-76,569695	1281
T5	3,426380	-76,568304	3,426034	-76,568011	1259
T6	3,426891	-76,565288	3,426487	-76,565046	1243
T7	3,425952	-76,564769	3,425523	-76,564716	1210

Fuente: Elaboración Propia

Con base en la revisión de literatura secundaria, se tiene halló que no hay estudios específicos para la zona, ; por lo que este trabajo se muestra torna como en un aporte importante para la contribución del estudio florístico de este lugar.

#### 4.2.4.1 Índice valor de importancia vegetación – Quebrada Guarrús.

Con base en los siete transectos tipo Gentry implementados en la fase de campo de este estudio, se tiene que (ver Anexo documento componente ecosistémico), se midió un total de 181 tallos leñosos, los cuales se encuentran distribuidos en 28 especies, las cuales representan 17 familias taxonómicas y 28 géneros taxonómicos.

Dentro de las familias, las más diversificadas fueron: Fabaceae, Lauraceae y Melastomataceae representadas con tres especies cada una, seguidas de las familias: Araliaceae, Malvaceae, Meliaceae, Moraceae y Sapindaceae con dos especies cada una; y el resto de las demás familias taxonómicas resultaron representadas con por una especie cada una. Dentro de los géneros, el más diversificado fue *Eugenia* con dos especies; los demás géneros resultaron representados con una especie. Con base en el censo y las abundancias obtenidas para cada especie, se elaboró el índice de valor de importancia, el cual se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 8, Cálculo IVI para la vegetación leñosa presente en la Quebrada Guarrús.

Familia	Especie	Abun.	Abun. Relativa	Frec. Relativa	Den. Relat	IVI (300)
Fabaceae	<i>Calliandra pittieri</i>	16	8,84	5,88	13,09	27,81
Myrtaceae	<i>Eugenia florida</i>	19	10,50	8,24	5,62	24,35
Lacistemataceae	<i>Lacistema aggregatum</i>	16	8,84	5,88	4,81	19,53
Meliaceae	<i>Guarea guidonia</i>	10	5,52	4,71	6,41	16,64
Lauraceae	<i>Persea caerulea</i>	9	4,97	5,88	5,04	15,89
Lauraceae	<i>Mespilodaphne aurantiodora</i>	8	4,42	4,71	4,81	13,93
Melastomataceae	<i>Miconia minutiflora</i>	12	6,63	3,53	3,67	13,83
Rutaceae	<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>	7	3,87	4,71	4,29	12,86
Moraceae	<i>Ficus insipida</i>	5	2,76	3,53	5,77	12,06

Familia	Especie	Abun.	Abun. Relativa	Frec. Relativa	Den. Relat	IVI (300)
Primulaceae	<i>Myrsine guianensis</i>	8	4,42	4,71	2,68	11,81
Clusiaceae	<i>Clusia minor</i>	7	3,87	2,35	5,18	11,40
Malvaceae	<i>Ochroma pyramidale</i>	3	1,66	3,53	6,19	11,38
Urticaceae	<i>Cecropia angustifolia</i>	5	2,76	4,71	3,43	10,90
Araliaceae	<i>Didymopanax morototoni</i>	4	2,21	3,53	4,95	10,68
Sapindaceae	<i>Cupania americana</i>	5	2,76	2,35	5,22	10,33
Sapindaceae	<i>Allophylus</i> sp.	6	3,31	4,71	2,06	10,08
Euphorbiaceae	<i>Croton gossypifolius</i>	6	3,31	3,53	2,19	9,04
Malvaceae	<i>Guazuma ulmifolia</i>	4	2,21	2,35	4,07	8,63
Lauraceae	<i>Aiouea montana</i>	6	3,31	3,53	1,73	8,57
Cannabaceae	<i>Trema micranthum</i>	4	2,21	4,71	0,80	7,72
Araliaceae	<i>Oreopanax cecropifolius</i>	4	2,21	2,35	2,07	6,64
Moraceae	<i>Olmedia aspera</i>	3	1,66	2,35	1,10	5,11
Melastomataceae	<i>Henriettella hispidula</i>	4	2,21	1,18	1,48	4,86
Piperaceae	<i>Piper aduncum</i>	3	1,66	2,35	0,57	4,58
Fabaceae	<i>Senna spectabilis</i>	2	1,10	1,18	0,84	3,12
Meliaceae	<i>Trichilia pallida</i>	2	1,10	1,18	0,83	3,11
Melastomataceae	<i>Miconia prasina</i>	2	1,10	1,18	0,73	3,01
Fabaceae	<i>Pithecellobium dulce</i>	1	0,55	1,18	0,39	2,12

Fuente: Elaboración Propia

La especie con valor IVI más alto resultó ser: *Calliandra pittieri* (IVI=27,81 – 9,27%), seguida de *Eugenia florida* (IVI=24,35 – 8,12%), *Lacistema aggregatum* (IVI=19,53 – 6,51%), *Guarea guidonia* (IVI=16,64 – 5,55%); las cuales son especies nativas de primeros estados de sucesión secundaria y usualmente presentes en áreas secas transición a zonas más húmedas. El resto de las especies que conforman el cuadro ecológico de IVI son nativas propias de estados sucesionales secundarios en una cobertura consolidada.

Aunque en campo se observó observaron especies introducidas como *Pinus kesiya* y *Pinus Oocarpa*, los cuales no fueron muestreadas a través de la metodología Gentry porque dentro de la distribución aleatoria, no quedaron dentro del área de influencia del transecto, pero se destaca su presencia dado que hacen parte de la cobertura y, se tiene conocimiento que antaño estas áreas fueron sembradas con estas especies para recuperar terrenos; la extracción no selectiva de madera de pino ha hecho que se forme este tipo de cobertura natural, la cual se observa secundaria con elementos de transición entre clima seco y húmedo; así mismo especies como: *Syzygium malaccense* y *Jacaranda caucana*, que son introducidas al ecosistema, se observan como procesos de adecuación antrópica. De todas maneras, la vegetación de la ronda hídrica presenta buena cobertura vegetal y los elementos que la constituyen, presentan función protectora y de control de erosión.

#### 4.2.4.2 Índices diversidad y dominancia vegetación de la Quebrada Guarrús.

Observando los índices de diversidad y dominancia mostrados en la tabla 9, se puede observar que en cuanto a la dominancia mostrada por el índice de Simpson se tiene un valor de 0,94, lo cual indica una alta dominancia, representada por unas cuantas especies; así mismo el valor del índice de diversidad de Shannon con un valor de 3,1, muestra que la vegetación muestreada en este cuenca presenta una diversidad media, al encontrarse dicho valor en el rango de 1,36 – 3,5; así mismo para el índice de Margalef con un valor de 5,1 muestra una diversidad tendiente a ser alta.

Tabla 9, Índices dominancia y diversidad vegetación de la Quebrada Guarrús.

Parámetro	Valor
Especies	28
Individuos	181
Dominance D	0,05272
Shannon H	3,121
Simpson 1-D	0,9473
Margalef	5,194

Fuente: Elaboración Propia

La vegetación presente en este sector, es una vegetación dominada en su mayoría por unas cuantas especies y mostrando una diversidad intermedia tendiente hacia una diversidad alta. Es una cobertura que presenta una sucesión ecológica tendiente a la fase secundaria en procesos de establecimiento.

#### 4.2.4.3 Análisis estructura horizontal vegetación de la Quebrada Guarrús.

En cuanto a la estructura relacionada con la distribución de los diámetros de DAP dentro de las tres categorías Latizales, Fustales y Fustales grandes, se tiene que (ver figura 17).

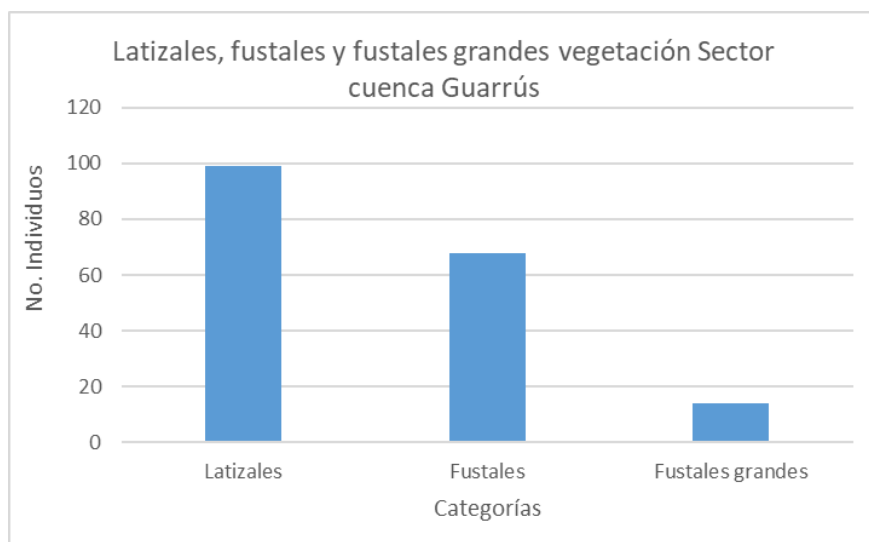


Figura 20, Número de individuos por categoría forestal presentes en la vegetación asociada a la Quebrada Guarrús.

Fuente: Elaboración Propia

La categoría dominante con un total de 99 leñosos es la de los Latizales y para este estudio dentro de esta cobertura comprende el rango de DAP entre 2,7 a 10,0 cm, representada principalmente por las especies: *Aiouea montana*, *Allophylus* sp., *Calliandra pittieri*, *Cecropia angustifolia*, *Croton gossypifolius*, *Eugenia florida*, *Guarea guidonia*, *Lacistema aggregatum*, *Miconia minutiflora*, *Myrsine guianensis*, *Oreopanax cecropifolius*, *Piper aduncum*, *Trema micranthum* y *Zanthoxylum rhoifolium*; muchas de las cuales hacen parte de los valores altos de IVI para esta cobertura.

La segunda categoría en abundancia de leñosos es la categoría fustales con un total de 68 individuos y comprende el rango entre 10,1 – 29,5 cm de DAP, y seguido en última instancia por la categoría fustales grandes con 14 individuos que comprende valores con DAP por encima de 30,2 cm., y que corresponde a las especies: *Cecropia angustifolia*, *Ochroma pyramidale*, *Calliandra pittieri*, *Didymopanax morototoni*, *Guarea guidonia*, *Cupania americana* y *Ficus insipida*; solo *Calliandra pittieri*, resultó estar dentro de los valores más altos de IVI. En cuanto a la distribución de las alturas a través de clases altimétricas, se observa en la figura 18, un total de ocho clases.

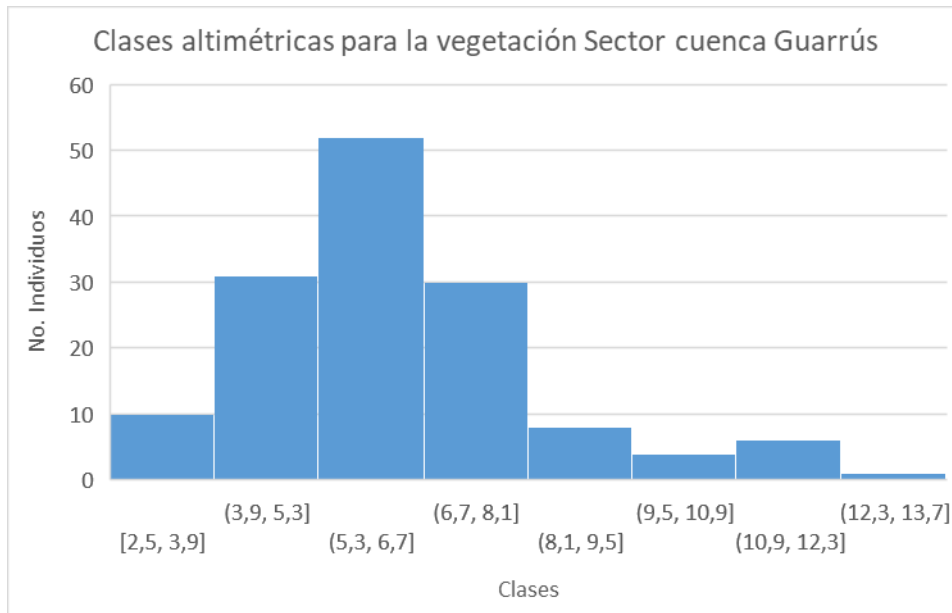


Figura 21, Número de individuos por clase altimétrica presentes en la vegetación asociada a la Quebrada Guarrús.

Fuente: Elaboración Propia

Dentro de las clases altimétricas, se observa que el mayor número de individuos (113 leñosos), se encuentran agrupados en las clases II, III y IV; relacionados individuos de alturas

comprendidas entre los 5,3 y los 8,1 m de alto, que es rango en el cual se encuentra la mayoría de las especies observadas en este muestreo.

Los individuos con mayor altura, se encuentran distribuidos en las últimas clases altimétricas: Clases VI - VIII, con un total de 11 individuos que comprenden alturas por encima de los 9,5 m y corresponde a las especies: *Cecropia angustifolia*, *Didymopanax morototoni*, *Ochroma pyramidale* y *Ficus insipida*; algunas de cuyas especies mostraron también los mayores DAP de los leñosos que conforman esta cobertura.

Para el caso de los Brinzales, se evidenció la constitución del suelo del sotobosque lleno de hojarasca, pocas herbáceas y en algunos lugares muy puntuales la presencia de acículas de pino; solo se observó algunas plantas de leñosos de las especies: *Eugenia biflora*, *Myrsine guianensis*, *Persea caerulea*, *Toxicodendron striatum*, *Zanthoxylum rhoifolium*, *Inga densiflora* y *Trichilia pallida*, las cuales se observaron no dentro de los cuadrantes establecidos con base en la metodología si no, por fuera de ellos incluso muy distantes de los transectos Gentry y por ende distantes del área de influencia del espejo de agua.

El sotobosque se encuentra cubierto por las copas de los árboles, estos proporcionan un ambiente de baja luminosidad y alta humedad para que se pueda desarrollar una serie de procesos que puedan fomentar la capacidad de reclutamiento de plántulas; sin embargo, este proceso se observa muy distante de la porción de tierra que se encuentra cerca del curso de agua o del área de escorrentía. En términos generales se puede observar una mayor complejidad en cuanto a la estructura horizontal y a la composición de las especies que conforman esta cobertura; esto con relación a las otras coberturas estudiadas en este informe; la ubicación y extensión de esta cobertura muestra mejores condiciones que permiten un buen desarrollo de las especies que la conforman.

#### **4.2.5 Sector Isabel Pérez.**

Para este sector, denominado micro-cuenca Isabel Pérez localizada en el flanco derecho del cerro de los Cristales – Cristo Rey se implementó un total de ocho transectos tipo Gentry, los cuales se muestran en la siguiente gráfica y las coordenadas en la siguiente tabla.



Figura 22, Aspecto distribución transectos Gentry en sector Isabel Pérez.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10, Coordenadas transectos implementados en sector Isabel Pérez.

Transecto	Inicio		Final		Altitud (msnm)
T1	3,435209	-76,564485	3,434941	-76,564176	1423
T2	3,434506	-76,563350	3,434418	-76,562912	1362
T3	3,434390	-76,562327	3,434230	-76,561885	1330
T4	3,434123	-76,561472	3,433739	-76,561176	1299
T5	3,433102	-76,560725	3,432898	-76,560320	1253
T6	3,433629	-76,560003	3,433232	-76,559783	1243
T7	3,432084	-76,559158	3,431723	-76,558934	1190
T8	3,430986	-76,558339	3,430797	-76,557939	1159

Fuente: Elaboración Propia

Con base en la revisión secundaria se tiene que el documento: Plan de manejo del Ecoparque Cristo Rey, de 2016: muestra la siguiente lista de especies como las más representativas del ecoparque: *Pinus kesiya*, *Leucaena leucocephala*, *Cecropia angustifolia*, *Psidium guajava*, *Mangifera indica*, *Persea americana*, *Ficus benjamina*, *Swinglea glutinosa*, *Cedrela odorata*, *Carica papaya*, *Eucalyptus grandis*, *Tecoma stans*, *Calliandra pittieri*, *Toxicodendron striatum*, *Clusia minor*, *Myrsine guianensis*, *Eugenia jambos*, *Clitoria fairchildiana*, *Aiouea montana* y *Citrus limon*. Según la recopilación de información secundaria, se observa que la gran mayoría de las especies mencionadas son introducidas,

con excepción de: *Cecropia angustifolia*, *Cedrela odorata*, *Tecoma stans*, *Calliandra pittieri*, *Toxicodendron striatum*, *Clusia minor*, *Myrsine guianensis* y *Aiouea montana*, que son nativas.

#### 4.2.5.1 Índice valor de importancia vegetación sector Isabel Pérez.

Con base en los ocho transectos tipo Gentry implementados en la fase de campo, se tiene que se midió un total de 170 tallos leñosos (ver anexo documento componente ecosistémico), los cuales se encuentran distribuidos en 38 especies, las cuales representan 22 familias taxonómicas y 34 géneros taxonómicos. Dentro de las familias, la más diversificada fue Fabaceae con siete especies, seguida de Myrtaceae con cuatro especies, Araliaceae con tres especies y Clusiaceae, Lauraceae, Melastomataceae, Moraceae y Sapindaceae con dos especies cada una. Las demás familias se encuentran representadas con una especie cada una. Dentro de los géneros, los más diversificados fueron *Clusia*, *Ficus*, *Eugenia* y *Miconia* con dos especies cada una; los demás géneros resultaron representados con una especie. Con base en el censo y las abundancias obtenidas para cada especie, se elaboró el índice de valor de importancia, el cual se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 11, Cálculo IVI para la vegetación leñosa presente en el sector Isabel Pérez.

Familia	Especie	Abun.	Abun. Relativa	Frec. Relativa	Den. Relat	IVI (300)
Lauraceae	<i>Persea caerulea</i>	16	9,41	5,32	12,24	26,97
Euphorbiaceae	<i>Croton gossypifolius</i>	20	11,76	7,45	6,23	25,44
Myrtaceae	<i>Eugenia biflora</i>	18	10,59	4,26	6,46	21,30
Myrtaceae	<i>Eugenia florida</i>	16	9,41	6,38	4,57	20,37
Lauraceae	<i>Mespilodaphne aurantiodora</i>	10	5,88	5,32	4,62	15,83
Urticaceae	<i>Cecropia angustifolia</i>	9	5,29	5,32	4,61	15,22
Sapindaceae	<i>Cupania americana</i>	6	3,53	5,32	5,92	14,76
Fabaceae	<i>Inga densiflora</i>	4	2,35	4,26	5,16	11,77
Araliaceae	<i>Didymopanax morototoni</i>	5	2,94	3,19	5,42	11,56
Melastomataceae	<i>Miconia minutiflora</i>	9	5,29	3,19	2,39	10,88
Primulaceae	<i>Myrsine guianensis</i>	6	3,53	4,26	2,98	10,76
Malvaceae	<i>Guazuma ulmifolia</i>	4	2,35	3,19	2,46	8,00
Clusiaceae	<i>Clusia minor</i>	3	1,76	3,19	1,96	6,92
Anacardiaceae	<i>Toxicodendron striatum</i>	4	2,35	3,19	1,35	6,90
Melastomataceae	<i>Miconia albicans</i>	3	1,76	3,19	1,52	6,48
Moraceae	<i>Ficus obtusifolia</i>	2	1,18	1,06	3,95	6,19
Araliaceae	<i>Dendropanax arboreus</i>	3	1,76	1,06	3,03	5,86
Myrtaceae	<i>Syzygium malaccense</i>	2	1,18	2,13	2,11	5,42
Rubiaceae	<i>Cosmibuena grandiflora</i>	2	1,18	2,13	1,94	5,24
Rutaceae	<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>	2	1,18	2,13	1,32	4,62
Fabaceae	<i>Calliandra pittieri</i>	2	1,18	2,13	1,29	4,59
Bignoniaceae	<i>Tecoma stans</i>	2	1,18	2,13	1,15	4,46

Familia	Especie	Abun.	Abun. Relativa	Frec. Relativa	Den. Relat	IVI (300)
Clusiaceae	<i>Clusia palmicida</i>	2	1,18	2,13	1,09	4,40
Fabaceae	<i>Leucaena leucocephala</i>	2	1,18	2,13	0,82	4,13
Moraceae	<i>Ficus insipida</i>	1	0,59	1,06	2,44	4,09
Arecaceae	<i>Aiphanes horrida</i>	2	1,18	2,13	0,62	3,92
Fabaceae	<i>Gliricidia sepium</i>	2	1,18	1,06	1,66	3,90
Fabaceae	<i>Senna spectabilis</i>	2	1,18	1,06	1,52	3,76
Fabaceae	<i>Pithecellobium dulce</i>	1	0,59	1,06	1,68	3,33
Fabaceae	<i>Hymenaea courbaril</i>	1	0,59	1,06	1,48	3,13
Sapindaceae	<i>Sapindus saponaria</i>	1	0,59	1,06	1,39	3,05
Meliaceae	<i>Guarea guidonea</i>	1	0,59	1,06	1,35	3,00
Acanthaceae	<i>Trichanthera gigantea</i>	1	0,59	1,06	1,24	2,89
Myrtaceae	<i>Psidium guajava</i>	2	1,18	1,06	0,51	2,75
Araliaceae	<i>Oreopanax cecropifolius</i>	1	0,59	1,06	0,78	2,43
Cannabaceae	<i>Trema micranthum</i>	1	0,59	1,06	0,38	2,03
Piperaceae	<i>Piper aduncum</i>	1	0,59	1,06	0,18	1,83
Siparunaceae	<i>Siparuna laurifolia</i>	1	0,59	1,06	0,17	1,82

Fuente: Elaboración Propia

La especie con valor IVI más alto fue: *Persea caerulea* (IVI=26,97 – 8,99%), seguida de *Croton gossypifolius* (IVI=25,44 – 8,48%), *Eugenia biflora* (IVI=21,30 – 7,10%) y *Eugenia florida* (IVI=20,37 – 6,79%); las cuales son especies nativas de primeros estados de sucesión secundaria. Otras especies intermedias dentro del cuadro ecológico están: *Mespilodaphne aurantiadora* (IVI=15,83 – 5,28%), seguida de *Cecropia angustifolia* (IVI=15,22 – 5,07%), *Cupania americana* (IVI=14,76 – 4,92%), *Inga densiflora* (IVI=11,77 – 3,92%) y *Didymopanax morototoni* (IVI=11,56 – 3,85%), estas especies son de sucesiones secundarias también, pero de procesos más avanzadas. El resto de las especies son nativas, algunas representantes de zonas más secas: *Gliricidia sepium*, *Guazuma ulmifolia*, *Tecoma stans*, *Pithecellobium dulce*, *Hymenaea courbaril*, *Sapindus saponaria* y *Cosmibuena grandiflora*. Algunas de ellas cultivadas dentro de la cobertura acompañante de la cuenca. Se observó también las especies introducidas: *Syzygium malaccense* y *Leucaena leucocephala*, como procesos de intervención antrópica.

En términos generales, la cobertura estudiada y que hace parte de la ronda hídrica está constituida por elementos nativos de la transición entre zonas de climas secos y de bosque húmedo, todas ellas de sucesiones secundarias entre la fase de establecimiento y la fase intermedia; elementos importantes como: *Inga densiflora*, *Piper aduncum*, *Siparuna laurifolia*, *Trema micranthum*, *Cecropia angustifolia* y *Ficus insipida*, actúan como protectores y reguladores del cauce del cuerpo de agua. Esta quebrada presenta una gran cobertura que protege los nacimientos y los cuerpos de agua que nacen en el flanco del cerro Cristo Rey.

#### 4.2.5.2 Índices diversidad y dominancia vegetación sector Isabel Pérez.

Observando los índices de diversidad y dominancia mostrados en la tabla 15, se puede observar que en cuanto a la dominancia mostrada por el índice de Simpson se tiene un valor de 0,94, lo cual indica una alta dominancia; así mismo el valor del índice de diversidad de Shannon con un valor de 3,1, muestra que la vegetación muestreada en este cuenca presenta una diversidad media, al encontrarse dicho valor en el rango de 1,36 – 3,5; sin embargo el índice de Margalef con un valor de 7,2 muestra una diversidad alta, lo cual se evidencia en campo y lo cual muy probablemente se deba a que fue el lugar con mayor presencia de transectos Gentry, por lo que se abarcó un área mayor, con relación a las otras cuencas muestreadas.

Tabla 12, Índices dominancia y diversidad vegetación sector Isabel Pérez.

Parámetro	Valor
Especies	38
Individuos	170
Dominance D	0,05979
Shannon H	3,16
Simpson 1-D	0,9402
Margalef	7,204

Fuente: Elaboración Propia

La vegetación presente en este sector, es una vegetación que se aprecia madura en ciertos aspectos, además la combinación de elementos tanto de bosque seco, como de zonas húmedas y elementos introducidos, hacen que esta cobertura exhiba una alta diversidad con relación a las demás de este estudio. Es una cobertura que presenta una sucesión ecológica tendiente a la fase secundaria en procesos de establecimiento.

#### 4.2.5.3 Análisis estructura horizontal vegetación sector Isabel Pérez.

En cuanto a la estructura relacionada con la distribución de los diámetros de DAP dentro de las tres categorías: Latizales, Fustales y Fustales grandes, se tiene que (ver figura 20).

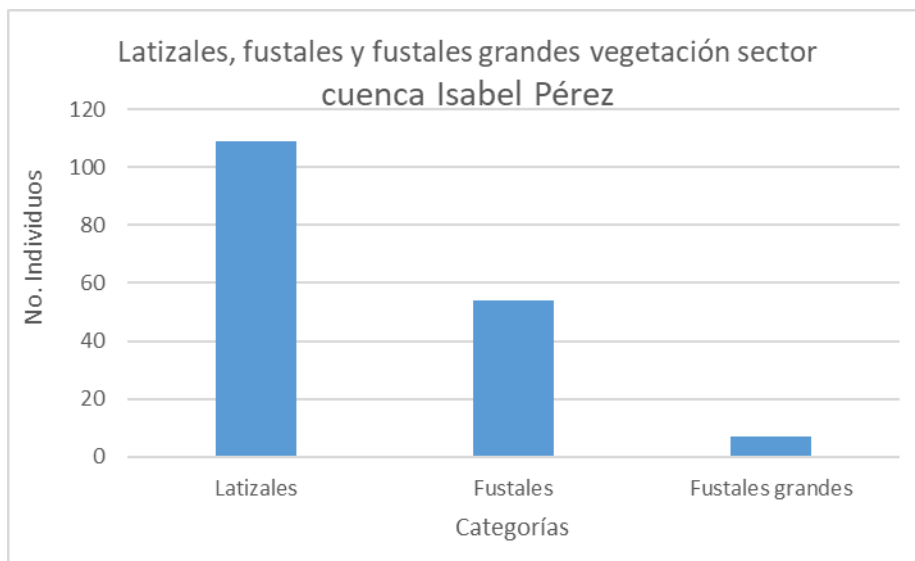


Figura 23, Número de individuos por categoría forestal presentes en la vegetación asociada al sector Isabel Pérez

Fuente: Elaboración Propia

La categoría Latizales resulto dominante con un total de 109 leñosos y para este estudio dentro de esta cobertura comprende el rango de DAP entre 2,9 a 9,9 cm, representada principalmente por las especies: *Cecropia angustifolia*, *Aiphanes horrida*, *Clusia minor*, *Clusia palmicida*, *Croton gossypifolius*, *Cupania americana*, *Eugenia biflora*, *Guazuma ulmifolia*, *Leucaena leucocephala*, *Mespilodaphne aurantiodora*, *Miconia minutiflora*, *Myrsine guianensis*, *Persea caerulea*, *Siparuna laurifolia*, *Toxicodendron striatum* y *Zanthoxylum rhoifolium*; muchas de ellas haciendo parte de valores altos dentro del IVI.

La segunda categoría en abundancia de leñosos es la categoría fustales con un total de 54 individuos y comprende el rango entre 10,4 – 29,3 cm de DAP, y seguido en última instancia por la categoría fustales grandes con siete individuos que comprende valores con DAP por encima de 30,2 cm., y que corresponde a las especies: *Inga densiflora*, *Ficus obtusifolia*, *Didymopanax morototoni*, *Cupania americana*, *Pithecellobium dulce* y *Ficus insipida*. En cuanto a la distribución de las alturas a través de clases altimétricas, se observa en la figura 21, un total de ocho clases altimétricas.

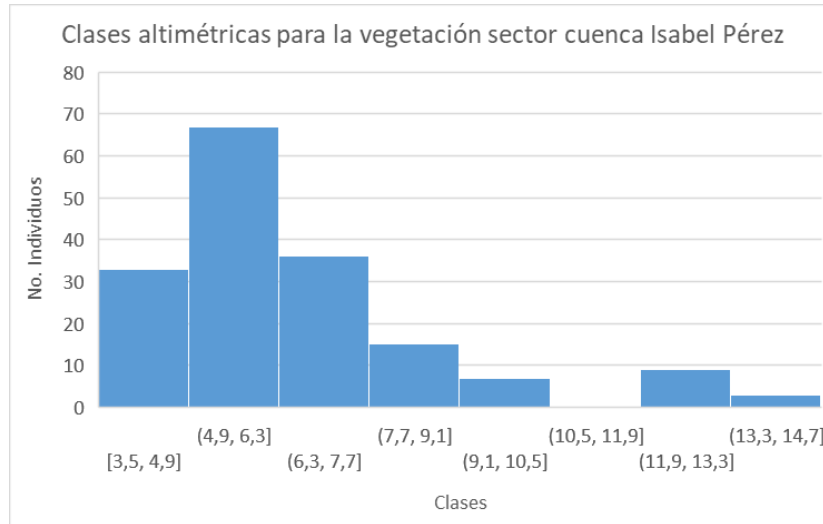


Figura 24, Número de individuos por clase altimétrica presentes en la vegetación asociada al sector Isabel Pérez

Fuente: Elaboración Propia

Dentro de las clases altimétricas, se observa que el mayor número de individuos (136 leñosos), se encuentran agrupados en las clases I, II y III; relacionados individuos de alturas comprendidas entre los 3,5 y los 7,7 m., de alto, concentrándose prioritariamente el mayor número de individuos en la clase II con un total de 67 individuos distribuidos en un rango comprendido entre los 4,9 y 6,3 m., de alto.

Los individuos con mayor altura, se encuentran distribuidos en las últimas clases altimétricas: Clases V - VIII, con un total de 19 individuos que comprenden alturas por encima de los 9,1 m. y corresponde a las especies: *Cupania americana*, *Didymopanax morototoni*, *Persea caerulea*, *Cecropia angustifolia*, *Guarea guidonea*, *Zanthoxylum rhoifolium* y *Mespilodaphne aurantiadora*; algunas de cuyas especies mostraron también los mayores DAP de los leñosos que conforman esta cobertura.

Para el caso de los Brinzales se tiene que las parcelas implementadas cada 10 m., de recorrido dentro del transecto Gentry, mostró ausencia de elementos leñosos asociados a la quebrada, aquí el suelo está constituido por tierra lodosa, algunas veces desnuda y en otros lugares con presencia de pasto y hojarasca; sin embargo a cierta distancia de los transectos y alejados de la orilla, se observó la presencia de plántulas de las especies: *Persea caerulea*, *Croton gossypifolius*, *Eugenia biflora*, *Eugenia florida*, *Mespilodaphne aurantiadora*, *Cecropia angustifolia*, *Cupania americana* e *Inga densiflora*; estas se observaron en bajas proporciones y con estatura de hasta un metro de alto; son las mismas especies reportadas como individuos adultos dentro del análisis de IVI para esta cobertura.

Esta cobertura se observó en un alto grado de desarrollo a nivel de su estructura vertical y horizontal, sin embargo, su sotobosque se observa poco poblado y con espacios desprovistos de regeneración natural y con plántulas pertenecientes a individuos adultos mostrados en el

cuadro de IVI. Esto indica que hay recambio de generaciones (estructura de edades), mas no de especies, sin embargo, como cobertura protectora cumple su papel conservando el recurso hídrico a través de la preservación micro climática del hábitat y la protección de orillas con individuos establecidos en la interface que cumplen con dicha función.

#### 4.2.6 Análisis de disimilitud de Bray-Curtis

Con base en las abundancias por individuos censados en cada una de las cuencas, se tiene el análisis de disimilitud mostrado en la siguiente tabla, y el dendrograma a continuación,

Tabla 13, Valores de disimilitud de Bray-Curtis

	St, Elena	Batallón	Guillermina
Sta, Elena	1	0,81	0,67
Batallón	0,81	1	0,7
Guillermina	0,68	0,71	1
Guarrús	0,71	0,64	0,61
Isabel Pérez	0,58	0,57	0,57

Fuente: Elaboración Propia

El dendrograma de disimilitud muestra la existencia de cuatro grupos jerárquicos, donde el valor más alto fue de 0,57, por parte de la quebrada Isabel Pérez, indicando un valor medio en cuanto a igual número de especies compartidas entre la vegetación de esta quebrada y las demás, sobre todo las quebradas: Sta, Elena, Batallón y Guillermina, El valor mostrado por el grupo compuesto por la vegetación de las quebradas Batallón y Santa Elena con un valor de disimilitud de 0,81, indica que es el par que presenta mayor número de especies distintas entre sí, Las quebradas Guillermina y Guarrús que son grupos mono-típicos, presentan un valor de disimilitud de 0,60, lo cual indica diferencia de especies compartidas, pero en un estado intermedio con relación a los demás grupos,

Tabla 14, Comparativo de los índices de diversidad por micro-cuenca

Parámetro	Santa Elena – El Morro	La Academia - Batallón	La Guillermina	Guarrús	Isabel Pérez
# Especies	31	28	28	28	38
# Individuos	270	139	142	181	170
Dominancia D	0,05317	0,05108	0,05406	0,05272	0,05979
Shannon_H	3,14	3,14	3,09	3,12	3,16
Simpson 1-D	0,9468	0,9489	0,9459	0,9473	0,9402
Margalef	5,359	5,472	5,448	5,194	7,204

Fuente: Elaboración Propia

Según las métricas comparadas en la tabla anterior, todos los índices lucen similares, La comparación directa permite inferir que el área muestreada efectivamente en cada zona de trabajo incide sobre el resultado, No obstante, las riquezas cercanas a los 30 taxones se

oponen a la dominancia que exhiben algunos individuos, pues sucede un caso en el que la abundancia, casi duplica los demás sitios de muestreo, Sumados los resultados al agrupamiento de la siguiente figura, se deduce que las quebradas de la comuna 18, se parecen más entre sí que con aquellas de la comuna 20, Hace sentido que por la proximidad entre ellas La Academia - Batallón y Santa Elena - El Morro se parezcan en más de 80%, aunque se diferencien de la Guillermina en más de 10%,

Respecto de la comuna 20, la Guarrús se agrupa cerca del 65%, mientras que Isabel Pérez lo hace casi al 58%, Sin embargo, difieren entre ellas casi 10%, Una dimensión comparable a las diferencias que ocurren entre los elementos de la comuna 18, Así, los análisis permiten ilustrar que los ensamblajes florísticos son "diversos" aunque limitados, Parámetros relevantes como la heterogeneidad vertical o aquella correspondiente al "sotobosque", permiten aseverar que se requiere intervención restaurativa para "mejorar" el ensamblaje en todas sus dimensiones,

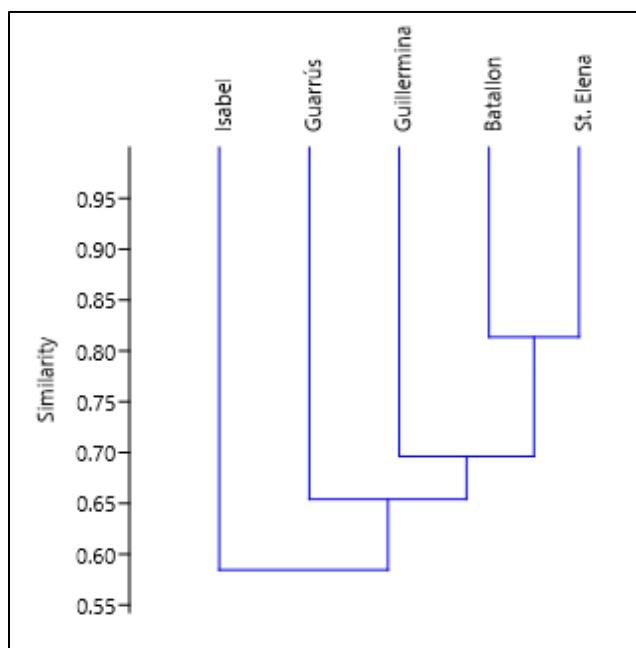


Figura 25, Dendrograma con base en disimilitud de Bray-Curtis

En cuanto a las especies compartidas en las cinco cuencas se encuentra: *Calliandra pittieri*, *Cecropia angustifolia*, *Clusia minor*, *Croton gossypifolius*, *Cupania americana*, *Didymopanax morototoni*, *Eugenia florida*, *Ficus insipida*, *Mespilodaphne aurantiadora*, *Miconia minutiflora*, *Myrsine guianensis* y *Persea caerulea*, Son especies que se encuentran formado sucesiones secundarias en sus primeros estados de consolidación y hacen parte en cierta manera del paisaje de las coberturas vegetales de las laderas de la cordillera del municipio,

Las especies: *Aiouea montana*, *Dendropanax arboreus*, *Guarea guidonia*, *Lacistema aggregatum*, *Miconia prasina*, *Syzygium malaccense* y *Trema micranthum* en cuanto a su

presencia en las cuencas estudiadas, se encuentran compartidas en cuatro cuencas y son elementos igualmente representantes de bosques secundarios en proceso de consolidación,

La cuenca que presenta mayores elementos propios o no compartidos es: Isabel Pérez con nueve especies no compartidas: *Clusia palmicida*, *Cosmibuena grandiflora*, *Ficus obtusifolia*, *Gliricidia sepium*, *Inga densiflora*, *Leucaena leucocephala*, *Miconia albicans*, *Sapindus saponaria* y *Tecoma stans*, Le sigue la cuenca Guarrús con tres especies no compartidas: *Allophylus* sp., *Henriettella hispidula* y *Olmedia aspera*, Las cuencas Guarrús y Santa Elena presentaron dos especies no compartidas cada una y la vegetación asociada al sector Batallón, una especie no compartida,

#### 4.2.7 Cálculo de la altura - H

Con base al análisis anterior, se presenta de manera detallada los resultados obtenidos de cada microcuenca,

##### 4.2.7.1 Cálculo de la altura – H, microcuencas Isabel Pérez.

De acuerdo con el estudio, las especies vegetales leñosas con mayor índice de valor de importancia IVI son *Persea caerulea* (Aguacatillo), *Croton gossypifolius* (Drago), *Eugenia biflora* (Arrayan hoja pequeña), *Eugenia florida* (Arrayan) y *Mespilodaphne aurantiodora* (Jigua).

El promedio de la altura media (altura H) de las cinco especies dominantes (IVI más significativo) fue 26,97 m para *Miconia minutiflora*, Por su parte, el promedio total de altura media (H) de las especies dominantes en la cobertura vegetal de la micro cuencas Isabel Pérez es de 5,91 m, (en el anexo del documento componente ecosistémico se encuentra el cálculo H para las otras microcuencas).

Tabla 15, Cálculo de altura media (H) de los árboles dominantes

Especie	Índice de Valor de Importancia (IVI)	Promedio de altura media (H)(m)
<i>Persea caerulea</i>	26,97	6,8
<i>Croton gossypifolius</i>	25,44	5,6
<i>Eugenia biflora</i>	21,3	4,91
<i>Eugenia florida</i>	20,37	5,25
<i>Mespilodaphne aurantiodora</i>	15,83	7
<b>Promedio total de altura media (H) de los árboles dominantes en la micro cuenca Isabel Pérez (m)</b>		<b>5,91</b>

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.2.8 Cálculo de Densidad de drenaje (Dd) por Unidad Geomorfológica (UG)

En el documento “Estudios hidrológicos e hidráulicos”, elaborado en el marco del presente convenio, se establece la densidad de drenaje para las unidades geomorfológicas por cada microcuenca, De acuerdo con la escala de valores para la clasificación de densidades de drenaje (Londoño, 2001), el valor de densidad de drenaje obtenido para las microcuencas se clasifica en “ALTA” (valores  $>3$  km/km<sup>2</sup>), es decir, que se esperan altos volúmenes de escurrimiento al igual que velocidades de desplazamiento, con tendencia a la escorrentía y a la erosión, y clasificación de “MEDIA” (valores 1,5-3,0 km/km<sup>2</sup>), refleja una cuenca disectada y bien drenada.

Tabla 16. Densidad de drenaje

Densidad de drenaje por microcuencas		Escala de valores para la clasificación de densidades de drenaje (Londoño 2001)
Guarrús	2,15	Media: 1,5-3,0 km/km <sup>2</sup>
Los Pozos	3,82	Alta: $>3$ km/km <sup>2</sup>
Mónaco	4,70	Alta: $>3$ km/km <sup>2</sup>
Isabel Pérez	2,62	Media: 1,5-3,0 km/km <sup>2</sup>

Fuente: elaboración propia

#### 4.2.9 Cálculo de áreas acumuladas (Aa)

El área aferente en cada punto de la red de drenaje se calcula, a partir del mapa de áreas acumuladas (Aa) en formato raster obtenido a partir del procesamiento del Modelo Digital de Elevación (MED),

En el documento “Estudios hidrológicos e hidráulicos”, se determina que las microcuencas por cada drenaje priorizado en la comuna, presentando áreas de acumulación, La microcuenca Guarrús, presenta la mayor área acumuladas, con densidades de drenaje en 1,15 km<sup>2</sup>, ver tabla siguiente,

Tabla 17. Valores de área acumulada y densidad de drenaje para cada uno de las microcuencas

Nombre	Long (Km)	Área (Km <sup>2</sup> )	Km/Km <sup>2</sup>
Guarrús	2,46	1,15	2,15
Los Pozos	1,45	0,38	3,82
Mónaco	1,27	0,27	4,70
Isabel Pérez	1,40	0,53	2,62

Fuente: elaboración propia

#### 4.2.10 Cálculo de N (relación entre la densidad de drenaje-Dd y el área acumulada (Aa) para cada unidad geomorfológica)

El valor de “N”, se determina a partir de la densidad de drenaje (Dd) y el área acumulada (Aa) para cada unidad geomorfológica, de esta manera se expresa la relación entre el patrón de drenaje y la morfología del territorio,

El valor de N se establece a partir de la tabla de doble entrada en la que se relacionan el área de la cuenca aferente en km<sup>2</sup> y la densidad de drenaje en km/km<sup>2</sup> (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y UNAL (2012) (Nota: la tabla con los valores de referencia se presenta en el aparte metodológico, “Definición de N”), Teniendo en cuenta que la densidad de drenaje por cada microcuenca, y su área aferente, se tiene que el valor de N es igual a 1,0 y 1,5 (ver tabla)

Tabla 18. Valor de N

Microcuenca	Área de cuenca aferente (km2)	Densidad de drenaje	Valor de N
Guarrús	0 < A <= 10	Media: 1,5-3,0 km/km2	2
Los Pozos	0 < A <= 1	Alta: >3 km/km2	1
Mónaco	0 < A <= 1	Alta: >3 km/km2	1
Isabel Pérez	0 < A <= 10	Media: 1,5-3,0 km/km2	1,5

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.11 Estimación del ancho del componente ecosistémico (N\*H)

El ancho del componente ecosistémico se estimó a partir de la relación de la altura promedio de las CINCO especies de los árboles representativos de cada cuenca analizada (H), la relación entre la densidad de drenaje de las corrientes y el área de la cuenca aferente (N). Se tiene que el promedio total de altura media (H) de las especies dominantes en la cobertura vegetal de cada microcuenca y valor de N. Por lo tanto, el ancho de la ronda hídrica desde el punto de vista ecosistémico, se calculó multiplicando H por N. En el mismo sentido, aquellos ensamblajes evaluados se consideran “tipos” de las micro-cuencas adyacentes toda vez que la flora más representativa fue aquella sujeto de evaluación. Las demás se extrapolaron habida cuenta que o bien resultaron inmersas en matrices de pastos o matorrales ralos y dispersos, o entre “parches” de vegetación monótona dominada por algún helecho o nigüito únicamente; atributos que no representan el ecosistema ni la flora del ensamblaje.:

$$\text{Ancho componente ecosistémico} = (H_i) (N_i)$$

Tabla 19, Estimación del Componente Ecosistémico,

Nombre	Long (Km)	Área (Km <sup>2</sup> )	Km/Km <sup>2</sup>	Valor N	Valor H	N*H
Guarrús	2,46	1,15	2,15	2	6,5	13
Los Pozos	1,45	0,38	3,82	1	6,5	6,5
Mónaco	1,27	0,27	4,70	1	5,9	5,9
Isabel Pérez	1,40	0,53	2,62	1,5	5,9	8,85

Fuente: Elaboración propia

A partir de lo anterior, se estima que el ancho de la ronda hídrica, del componente ecosistémico, para las microcuencas priorizadas en la comuna 20 de Cali varía entre los 6 metros a los 13 metros, a lado y lado del cauce permanente,

Para la estimación de la ronda hídrica, componente ecosistémico, presenta un valor relativamente “pequeño” o “bajo”, lo cual se encuentra asociado a áreas que presentan alta densidad de drenaje y áreas aferentes pequeñas sin embargo, se consideró que las microcuencas contiene un valor ecosistémico considerable de bosque ripario y/o realitos boscosos asociados al ecosistemas predominante, por lo que el valor de este componente es mayor al resultado obtenido al aplicar la metodología de la guía técnica,

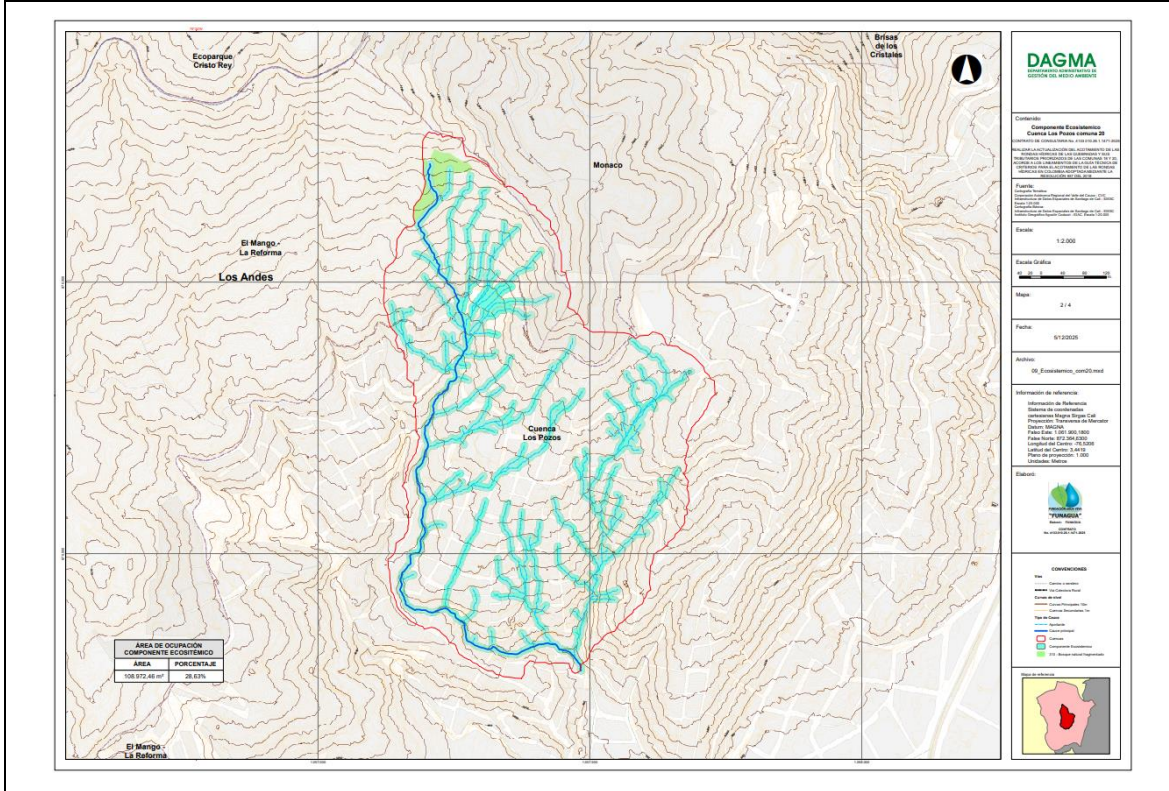
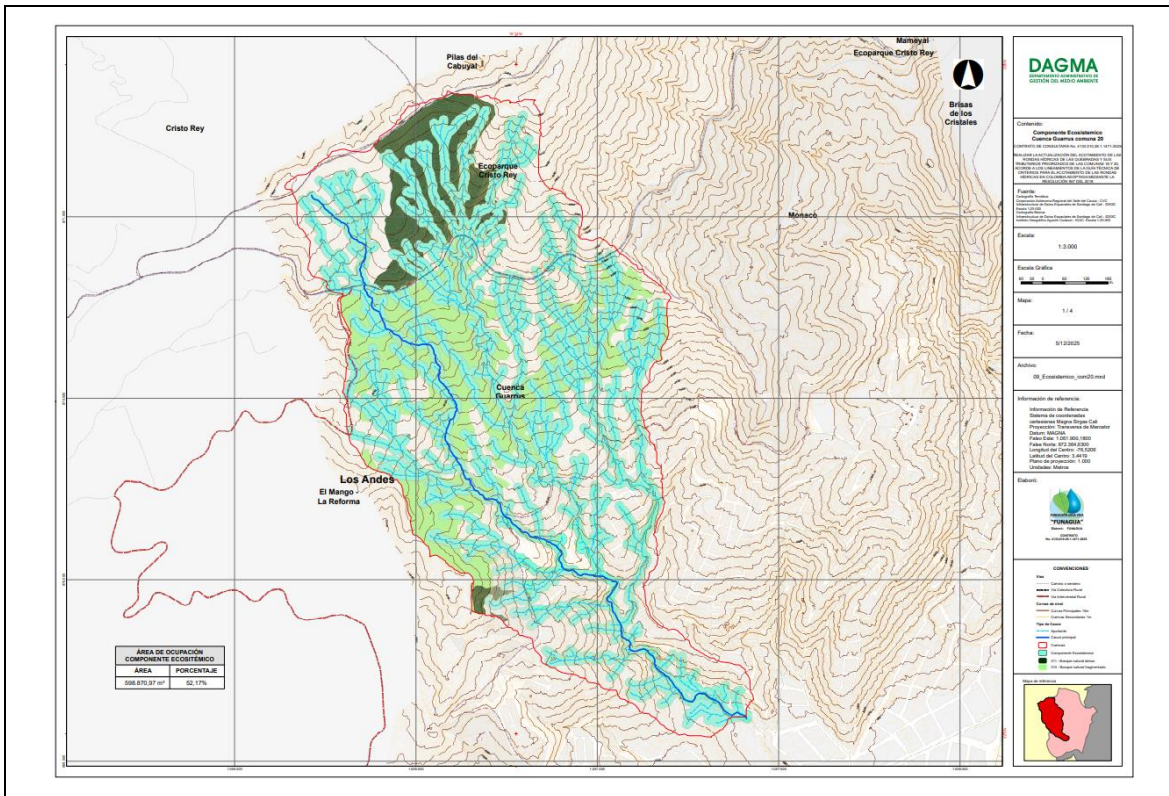
La determinación del componente fue apoyada con imágenes del vuelo realizada en el área de estudio, con tal fin de determinar las manchas boscosas, que intervienen por los cauces priorizados,

En la siguiente figura, se presenta la ronda hídrica para cada microcuenca, a partir del componente ecosistémico,

Tabla 20, Cálculo de área de protección por el componente ecosistémico,

Nombre Microcuenca	Área (m <sup>2</sup> )	%
Guarrús	598.870,97	52,17
Los Pozos	108.972,46	28,63
Mónaco	73.704,56	27,14
Isabel Pérez	202.115,34	37,80

Fuente: Elaboración propia





### 4.3 Definición del componente geomorfológico

#### 4.3.1 Características geológicas generales

En la Figura siguiente se muestra el mapa geológico correspondiente a la ciudad de Cali, donde se identifica la localización de las unidades geológicas de la comuna 20.

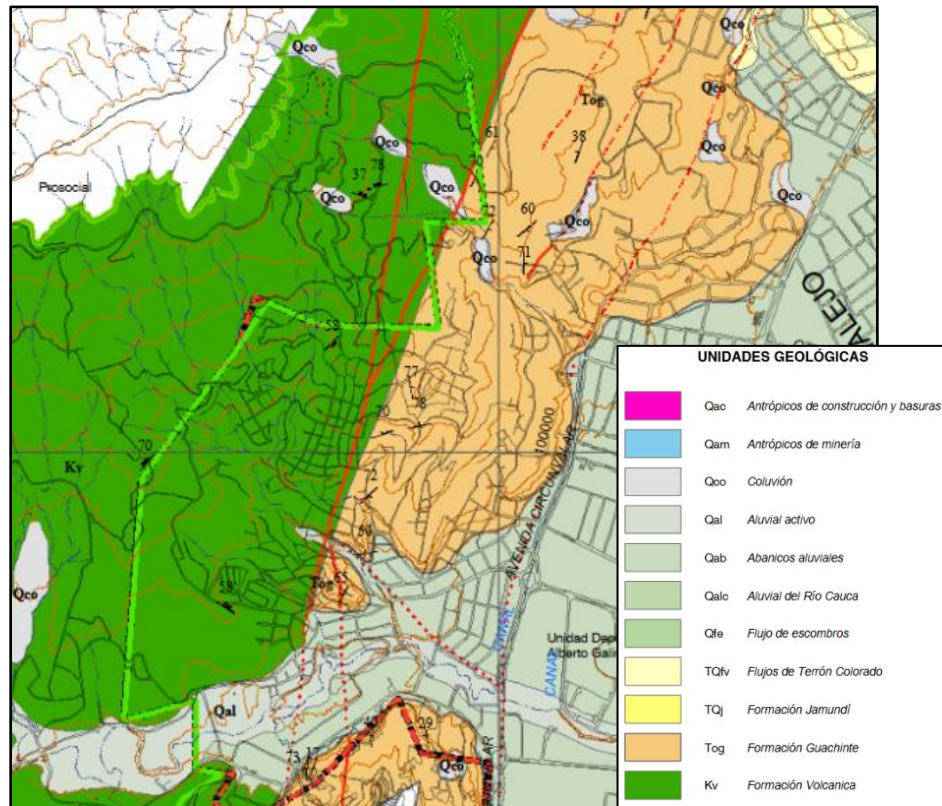


Ilustración 1 Geología comuna 20 – Municipio de Cali,  
Fuente: POT Cali,

En esta comuna se identifican las siguientes unidades geológicas:

Tabla 21, Geología Comuna 20 – Municipio de Cali,

EDAD	CONVENCIÓN	FORMACIÓN
Rocas cuaternarias	<b>Qc, Qal, Ql</b>	Depósitos recientes
Rocas terciarias	<b>Tog</b>	Fm Guachinte
Rocas cretácicas	<b>Kv</b>	Fm volcánico

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.1.1 Unidades Litológicas

- **Formación Volcánica (Kv)**

Consiste en gran parte en lavas basálticas en parte almohadilladas y diabasa, Aflora al noroccidente de la ciudad de Cali y está limitada hacia el este por las fallas del sistema de la

Falla del Cauca (*Mc Court et al., 1984*), Esta formación se encuentra bastante alterada y fracturada y genera suelos de textura franca arcillosa a arcillosa, los cuales son bien drenados y profundos a poco profundos,

- **Formación Guachinte (TOg)**

Se localiza en la parte noroeste del norte de la ciudad de Cali, la cual presenta contactos fallados y discordantes con las diabasas de la Formación Volcánica, Está constituida por rocas sedimentarias continentales principalmente areniscas, limolitas, lutitas y lentes de carbón, Esta formación presenta un grado moderado de alteración y está bastante fracturada por lo cual genera suelos de textura franca arcillosa a franca arenosa, los cuales están bien drenados y son profundos a moderadamente profundos,

- **Formación Jamundí (TQj)**

Depósitos de abanicos aluviales no consolidados, generalmente dispuestos en forma horizontales, pero en Meléndez, presentan un rumbo N22°E y buzan 57° SE, Esta formación consiste en depósitos de gravas y cantos no consolidados, pobremente seleccionados, compuesta por materiales de derivación local como basaltos, chert, gabros, limolitas, conglomerados y areniscas que varían en tamaño desde unos pocos centímetros hasta 3 metros, La matriz que envuelve estos clastos es de tipo predominantemente arcillosa y de colores rojizos, Hacia la parte superior de la formación se presentan horizontes arcillosos y arenosos bien estratificados, Se aprecian además niveles de arcillas grises, muy compactas, pero frágiles y con tendencia a la partición,

- **Depósitos cuaternarios (Q)**

Corresponden a los materiales no consolidados que están recubriendo las unidades de roca entre los cuales se encuentran flujos de escombros, depósito aluvial del río Cauca, abanicos aluviales, depósitos aluviales activos, depósitos coluviales, depósitos antrópicos de escombros de construcción y depósitos antrópicos de estériles de minería,

#### 4.3.1.2 Patrones de drenaje

Los patrones de drenaje identificados en la comuna 18, se describen a continuación,

**Radial**, Se identifica un drenaje radial centrífugo, donde los drenajes fluyen de una zona central hacia la periferia, lo cual es característico de los plegamientos en domo o de las laderas de la montaña, En vista de planta se observa forma circular, por la vía la reforma, se asocia con rocas sedimentarias, mantos de carbón,

**Paralelo**, En este tipo de patrón, los tributarios se desarrollan todos paralela o casi paralelamente entre sí, confluyendo con el canal principal formando casi el mismo ángulo, configurando un tipo de drenaje fuertemente controlado, con pendientes importantes, Esta forma de drenaje indica que una gran falla se extiende a través de una zona fuertemente plegada, formando un cierto ángulo con la dirección de los pliegues, Los tributarios siguen los estratos menos resistentes, mientras el curso principal sigue la falla, Se desarrolla sobre lutitas, areniscas o arcillas, Dependiendo de la cantidad de drenajes por área, se clasifican de alto, medio o bajo,

**Dendrítico**, No tiene una orientación definida, y las ramas que constituyen la red no guardan ninguna preferencia, abundando las curvas suaves, sin evidencia de control estructural,

desarrollándose en pendientes suaves, Es característico sobre materiales uniformes de granulometría fina, tales como los suelos residuales y areniscas, rocas sedimentarias de la formación TOg, Dependiendo de la cantidad de drenajes por área, se clasifican de alto, medio o bajo,

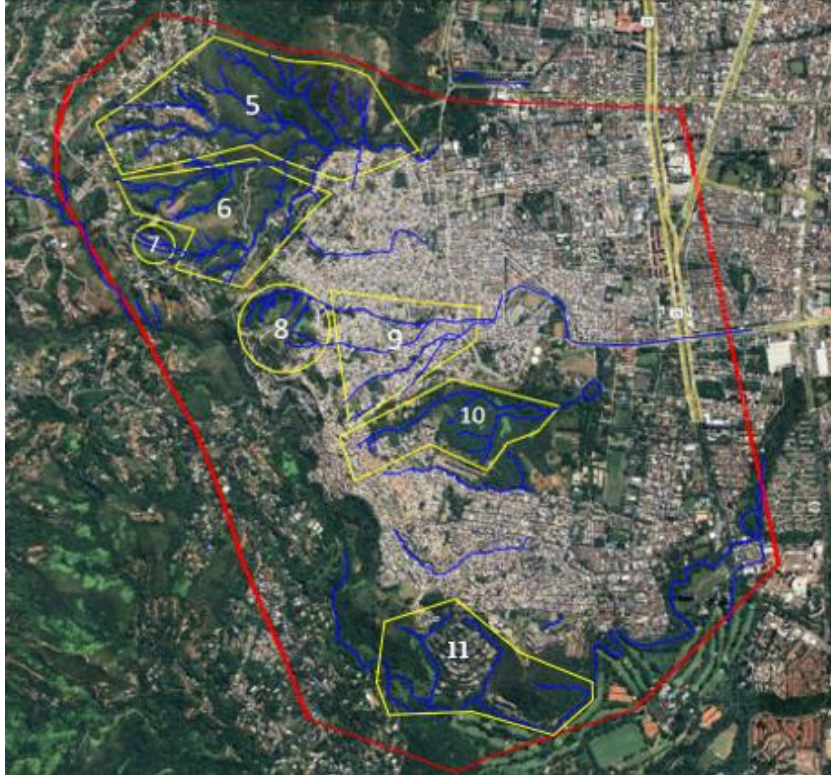


Figura 27, Patrones de drenaje - Comuna 20  
Fuente: Elaboración propia

Tabla 22, Patrones de drenaje comuna 20,

PATRÓN DE DRENAJE	CÓDIGO	ÁREA (Ha.)
Dendrítico medio	1	47,3
Dendrítico bajo	2	6,57
Dendrítico	3	131
Subparalelo bajo	4	86

Fuente: Elaboración propia

### 4.3.2 Geomorfología

La geomorfología es fundamental en la delimitación de rondas hídricas, porque ayuda a identificar las zonas que son afectadas por la dinámica del río, como las llanuras de inundación y los procesos de erosión, Para esto, se analizan las formas del terreno, la pendiente, el patrón de drenaje y la llanura aluvial para comprender la influencia del relieve en el comportamiento del agua y, de esta manera, establecer los anchos necesarios para garantizar la protección del cuerpo de agua y mitigar riesgos como inundaciones,

En este contexto se llevó a cabo una revisión de información bibliográfica disponible en el municipio, como lo son el estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali (2005), información temática como el mapa de geología para ingeniería, mapa de unidades geomorfológicas, referente para la delimitación de unidades geomorfológicas de la zona urbana, a escala 1:20,000, así como el mapa de unidades geológicas en escala 1:20,000, Así mismo se llevó a cabo la revisión del informe CG3-CAL-08 de 2010, concerniente a obras de mitigación de riesgo en las comunes 1-18 y 20, y finalmente una revisión de fotografías aéreas de los años: 1945, 1955, 2003, 2007 y el sobrevuelo realizado por FUNAGUA 2025 con precisión de 10 cm,

Para el levantamiento de información geológica, plancha geológica 299, Jamundí y el Mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa plancha 299, Jamundí, a escala 1:100,000 del 2015,

#### 4.3.2.1 Clasificación de unidades geomorfológicas

Según la información cartográfica del estudio de microzonificación sísmica de Santiago de Cali, extractado del informe No 2-1 investigaciones Geológicas y Geomorfológicas, en la comuna 18 se encuentran las siguientes unidades geomorfológicas, información que fue utilizada como insumo, para generar el mapa de susceptibilidad de Movimiento de Masa,

La valoración del relieve se hace a través de atributos cuantificables permitiendo así caracterizar un ambiente geomorfológico, Los parámetros principales evaluados en la estandarización de los elementos componentes del terreno propuestos en la metodología del *SGC (2012)* son:

- 1, **Morfología:** corresponde a los gradientes topográficos y las formas relativas,
- 2, **Morfometría:** Son los aspectos cuantitativos de la longitud, forma y pendientes y la relación geométrica entre las diferentes posiciones espaciales, Los componentes del terreno para su descripción son:
  - a) Contraste de relieve o relieve relativo: es la diferencia de la altitud de la geoforma entre la parte más alta y la más baja de ésta, No está relacionado con la altura respecto a nivel del mar,
  - b) Longitud de la ladera: Es un indicador de la homogeneidad del material que constituye la geoforma
  - c) Inclinación de la ladera: ángulo que forma una ladera o terreno respecto a un plano horizontal Rangos de pendientes para estudios geomorfológicos propuestos por *Carvajal, 2008 en SGC, 2012,*
  - d) Forma de la ladera: parámetro que refleja la homogeneidad de la resistencia de los materiales o control de estructuras geológicas y condiciona los tipos de movimientos en masa que puedan desarrollarse,
  - e) Patrón del drenaje: Es la distribución de todos los canales de drenaje superficiales en un área que esté ocupada o no por aguas permanentes

- f) Forma de crestas y valles: corresponde a la divergencia entre las formas características que presenta el relieve, es un parámetro de agrupamiento establecido en la apariencia superficial de la geoforma,
- g) Morfogénesis: Implica el origen de las formas del terreno, las causas y procesos que dieron la forma al paisaje, estas variables dependen de los procesos endogenéticos y la modificación de los agentes exogenéticos que actúan sobre la superficie terrestre,
- h) Morfoestructural y Litología: Indica el modelaje del relieve, según composición, disposición y dinámica interna de la tierra, Esta variable incide en el modelaje del paisaje Según su condición pasiva o activa,
- i) Morfodinámica: Trata los procesos geodinámicos externo (principalmente denudativos), tanto antiguos como recientes que han modelado y continúan modelando el relieve y son los responsables del estado actual de las geoformas, Para que se tenga transporte, arrastre y deposición de los productos originados por la meteorización y la sedimentación, se requiere agentes morfodinámicos, los más importantes son la escorrentía del agua lluvia, las olas, corrientes costeras y de marea, los glaciales, el viento y antrópicos,

TIPOS DE EROSION	ESPACIAMIENTO ENTRE CANALES (m)						GRAFICO Y/O DIAGRAMA
	< 5	5 a 15	15 a 50	50 a 150	150 a 500	>500	
Erosión Laminar	Severa	Moderada	Suave				
Surcos (< 50 cm. de Prof.)	Severa	Severa	Moderada	Suave			
Barrancos (50 - 147 cm. de Prof.)	Severa	Severa	Severa	Moderada	Suave		
Cárcavas (> 150 cm. de Prof.)	Severa	Severa	Severa	Severa	Moderada	Suave	

Figura 28, Procesos erosivos, erosión laminar, surcos, barrancos y cárcavas  
Fuente: PMA – GEMMA (2007)



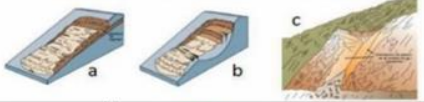
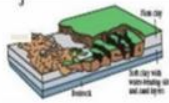
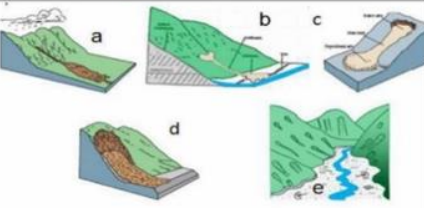

Tipo	Subtipo	Esquema
Caídas	Caída de rocas (detritos o suelo)	
Volcamiento	Volcamiento de roca (Bloque). Volcamiento Flexural de roca o del macizo rocoso	
Deslizamiento roca o suelo	Deslizamiento traslacional (a) Deslizamiento rotacional (b) Deslizamiento en cuña (c)	
Propagación lateral	Propagación lateral lenta Propagación lateral por licuación (rápida)	
Flujo	Flujo de detritos (a) Crecida de detritos Flujo de lodo (b) Flujo de tierra (c) Flujo de turba Avalancha de detritos (d) Avalancha de rocas (e) Deslizamiento por flujo o deslizamiento por licuación (arena, limo, detritos, roca fracturada)	
Reptación	Reptación de suelos (a) Solifluxión (b) Gelifluxión (en permafrost)	

Figura 29, Tipos de movimiento en masa  
Fuente: PMA – GEMMA (2007)

### 4.3.3 Clasificación de unidades geomorfológicas

Las unidades morfológicas de terreno, se clasifican según el método unificado del ITC de Holanda, basado en el origen y forma característica de cada unidad, Según lo anterior, se tienen unidades de origen Denudacional, Denudacional - Estructural, Fluvial y Antrópico; éstas se distinguen con letras, cada una de las cuales representa un comportamiento geomecánico diferente,

#### 4.3.3.1 Origen Denudacional

- *Pendientes Moderadas y Colinas (Dc),*

Morfología ondulada de colinas y laderas moderadamente inclinadas, Se encuentran medianamente disectadas por los drenajes y están ampliamente distribuidas por toda el área y conformadas en su mayoría por suelos residuales de la formación volcánica (Kv), En algunas zonas se observa que estas unidades son de origen estructural, pero por desarrollar formas de terreno redondeadas, se incluyen dentro de esta categoría, A esta unidad se asocian fenómenos de remoción en masa antiguos, por lo cual se considera esta unidad moderadamente inestable, además de encontrarse parcialmente afectada por erosión laminar difusa y en algunas partes por antiguas coronas de deslizamiento.

- ***Planos Subhorizontales y Colinas Suaves (Dp),***

Topografía plana a suavemente inclinada, ligeramente disectada, Se localizan en las cimas de algunas montañas donde se desarrollan delgados suelos y en algunos cambios de pendiente en las partes bajas de las laderas, Estas son áreas relativamente estables, distribuidas a todo lo largo del área y se caracterizan por presentar ausencia de procesos de remoción en masa y sólo se ven afectadas por erosión laminar difusa.

- ***Pendientes Moderadas en Relieve Montañoso (Dm)***

Colinas y montañas con laderas empinadas a quebradas, profundamente disectadas por los drenajes, Se distribuyen hacia la zona de Vertientes Montañosas Altas, donde las pendientes son alargadas y rectilíneas, se encuentran parcialmente cubiertas por depósitos de ladera muy inestables debido a las pendientes, En esta unidad es común encontrar procesos erosivos y de remoción en masa concentrados alrededor de un drenaje y sectores donde se concentran actividades antrópicas relacionadas con explotación de canteras, Su ocupación debe ser restringida ya que el uso inadecuado de estos terrenos, puede generar y activar deslizamientos.

#### **4.3.3.2 Origen denudacional Estructural**

- ***Cerros irregulares (Si)***

Son cerros de topografía ondulada, orientados predominantemente en la dirección de la estratificación y fallamiento, Las pendientes son moderadas a suavemente empinadas y son comunes hacia la parte media y baja del área montañosa de la Ciudad de Santiago de Cali, presentando una estabilidad media ya que están afectados por fallamiento.

#### **4.3.3.3 Origen fluvial**

- ***Terrazas Bajas (Fb)***

Morfología plana a ligeramente ondulada correspondiente a terrazas de baja altura, aledañas a los canales de inundación, Estos depósitos aluviales y fluviotorrenciales están sujetos a inundaciones o avenidas torrenciales interanuales ocasionales, Se localizan sobre las márgenes del río Cañaveralejo,

- ***Canales de Inundación (Fi)***

Morfología plana a ligeramente inclinada correspondiente a las vegas y barras torrenciales de las quebradas y ríos, Estas zonas podrían ser inundadas con las crecientes interanuales, El canal fluvial más importante del área es el río Cauca, con gran capacidad de transporte de sedimentos finos, también se incluyen pequeños valles de ríos intramontanos, Dentro de esta categoría se incluyen algunos canales ubicados sobre los abanicos aluviales y la llanura aluvial, los cuales se demarcaron con base en fotografías aéreas antiguas y que actualmente han sido desecados o canalizados debido al desarrollo urbanístico,

- ***Abanico Aluvial (Fa)***

Depósitos aluviales, con forma de abanicos de pendientes suaves, En general son flujos de escombros, interdigitados y limitados por la llanura aluvial del río Cauca, Estos cuerpos se presentan ligera a moderadamente disectados y cubiertos por suelos marrones con cantos de rocas moderada a ligeramente meteorizados, Se destacan el abanico de Meléndez,

#### 4.3.3.4 Antropogénico

- *Botaderos de estériles y Canteras (Ac)*

Corresponden a geoformas asociadas a zonas de bocaminas, donde se realiza y realizaron extracción de carbón, Formación Guachinte, Dentro de esta unidad también se incluyen áreas de botaderos de estériles provenientes de la construcción,

#### 4.3.4 Información Geomorfológica

A continuación, se hace la descripción geomorfológica de las cuencas de los drenajes, indicados en los términos de referencia, pertenecientes de la **comuna 20**,

##### 4.3.4.1 Quebrada Isabel Pérez.

- **Morfología y Morfoestructural:** Unidad de origen: Denudaciones. Se identifica unidad.
- **Dm:** conformada por pendientes moderadas en relieve Montañoso, Colinas y montañas con laderas empinadas a quebradas, profundamente disectadas por los drenajes. Se distribuyen hacia la zona de vertientes montañosas altas, donde las pendientes son alargadas y rectilíneas, se encuentran parcialmente cubiertas por depósitos de ladera muy inestables debido a las pendientes.
- **Morfometría:** Son los aspectos cuantitativos de la longitud, forma, pendientes y la relación geométrica entre las diferentes posiciones espaciales.

Tabla 23, Parámetro morfométricos Q. Isabel Pérez.

Parámetro	Valor	Descripción
Índice de relieve	1,4 km	
Longitud de ladera	300 m	Moderado Moderadamente blando y erosión alta
Inclinación ladera	15°	Muy Inclinada Moderadamente blanda y Moderada
Forma de la ladera		Recta - Alta resistencia y disposición estructural a favor de la pendiente, movimiento Traslacional
Patrón de drenaje		Dendrítico bajo y medio
Crestas y Valles		Plana – en U
Morfogénesis		Suelos lateríticos de basaltos (Kv)

Fuente: Elaboración propia

**Morfodinámica:** Procesos geodinámicos externo (principalmente denudativos), tanto antiguos como recientes que han modelado y continúan modelando el relieve y son los responsables del estado actual de las geoformas.

**Procesos erosivos:** En el área se encuentran suelos lateríticos, e identifican procesos de remoción de suelo y laminar por escorrentía, El horizonte superior A es de color amarillo por la pérdida de hierro, con textura arenosa- limosa, fácilmente lavado por procesos erosivos.

El horizonte B presenta colores rojizos y marrones, texturas arcillo-limosas, limo-arcillosas y limo areno-arcillosas, y estructura granular. Los procesos identificados son los siguientes.

Tabla 24, Procesos erosivos Q. Isabel Pérez.

PROCESO	COORDENADAS	
Erosión laminar moderada	3°26'11.98"N	76°33'43.15"O
	3°26'09.38"N	76°33'47.16"O
	3°25'58.21"N	76°33'42.86"O
	3°25'58.99"N	76°33'48.94"O

Fuente: Elaboración propia

A la fecha del levantamiento y sobrevuelo (10-2025), se está construyendo una vía, que sale desde 3°25'50.70"N y 76°33'57.10"O, hacia el Norte, sobre la cota 1.398 msnm, con una longitud de 427 m, que afecta directamente los nacimientos y las quebradas de esta cuenca, lo cual está generando un fuerte proceso erosivo.



Figura 30. Vía en construcción – 427 ms (cota 1398).

Fuente: Elaboración propia

**Movimientos de Masa:** Asociados a estas unidades del suelo, que cubren la mayor parte de la cuenca, en la que, debido a su gran heterogeneidad, se presentan algunos fenómenos de remoción en masa tales como deslizamientos y flujos de suelo, que en la actualidad se encuentran estables.

Tabla 25, Movimientos masa Q. Isabel Pérez.

PROCESO	COORDENADAS	
Flujo de ladera – Estable (antiguos)	3°25'46.55"N	76°33'42.60"O
	3°25'47.49"N	76°33'29.44"O
	3°25'52.63"N	76°33'34.73"O
	3°26'4.56"N	76°33'46.27"O

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.4.2 Quebrada la Cristalina

**Morfología y Morfoestructural:** Unidad de origen: Denudacional. Se identifica unidad **Dm**: conformada por pendientes moderadas en relieve Montañoso, Colinas y montañas con laderas empinadas a quebradas, profundamente disectadas por los drenajes. Se distribuyen hacia la zona de vertientes montañosas altas, donde las pendientes son alargadas y rectilíneas, se encuentran parcialmente cubiertas por depósitos de ladera muy inestables debido a las pendientes.

**Morfometría:** Son los aspectos cuantitativos de la longitud, forma, pendientes y la relación geométrica entre las diferentes posiciones espaciales.

Tabla 26, Morfometría de la Quebrada La Cristalina.

Parámetro	Valor	Descripción
Índice de relieve	280	Moderado Moderadamente blando y erosión alta
Longitud de ladera	1 Km	Larga
Inclinación ladera	16°	Abrupta - Moderadamente resistente y Moderada susceptibilidad a MM
Forma de la ladera		Recta - Alta resistencia y disposición estructural a favor de la pendiente, movimiento Traslacional
Patrón de drenaje		Dendrítico
Crestas y Valles		Plana – en U
Morfogénesis		Suelos lateríticos de basaltos (Kv)

Fuente: Elaboración propia

**Morfodinámica:** Procesos geodinámicos externo (principalmente denudativos), tanto antiguos como recientes que han modelado y continúan modelando el relieve y son los responsables del estado actual de las geformas

**Procesos erosivos:** La construcción de vías en la parte alta de la ladera y la intervención antrópica, haciendo banquetes y explanaciones, generan aguas superficiales de escorrentía, en suelos granulares y fuertes pendientes, factores que generan una fuerte erosión en el suelo.

Se destaca un proceso erosivo, mostrado en la figura siguiente, donde se observa una socavación del talud inferior de la vía a Cristo Rey, que además de afectar la vía, pendiente abajo se identifica generación de surcos debido a la escorrentía. Este es un proceso continuo y severa.

Tabla 27, Procesos erosivos Q La Cristalina,

PROCESO	COORDENADAS	
Surcos y barrancos	3°25'50.36"N	76°33'57.22"O
Surcos y barrancos	3°25'44.76"N	76°33'53.32"O
Socavación de talud inferior de vía y surcos	3°25'40.76"N	76°33'56.13"O

Fuente: Elaboración propia

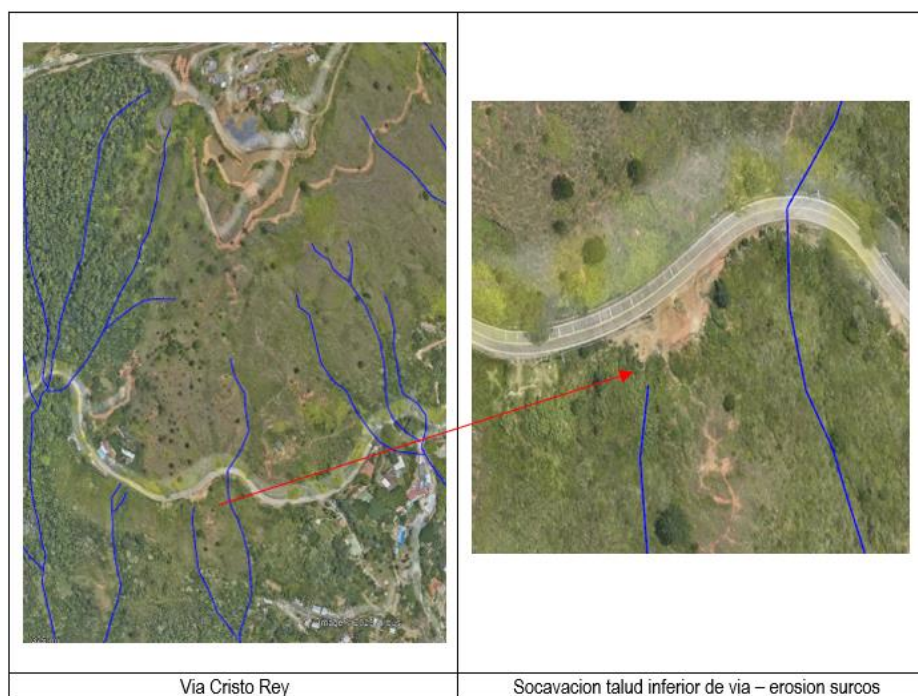


Figura 31. Procesos erosivos vía Cristo Rey.

Fuente: Elaboración propia

## Movimientos de Masa

De reptación en casi 2 Has, se refiere a un caso de Creep o reptación que afecta de manera intermitente la masa de suelo sometida a cambios estacionales de humedad y temperatura. La masa movilizada es delgada, afecta generalmente áreas extensas y lateralmente presentan una transición muy gradual a terreno estable.

Tabla 28, Movimientos de masa Q La Cristalina.

PROCESO	COORDENADAS	
Reptación	3°25'44.06"N	76°33'58.37"O

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.4.3 Quebrada Guarrús

**Morfología y Morfoestructural:** Unidad de origen: Denudacional. Se identifica unidad **Dm**: conformada por pendientes moderadas en relieve Montañoso, Colinas y montañas con laderas empinadas a quebradas, profundamente disectadas por los drenajes. Se distribuyen hacia la zona de vertientes montañosas altas, donde las pendientes son alargadas y rectilíneas, se encuentran parcialmente cubiertas por depósitos de ladera muy inestables debido a las pendientes.

La cuenca alta no se encuentra intervenida, se observa muy buena cobertura vegetal desde los 1.300 msnm, la cual está dividida por la vía a Cristo Rey. Esta cuenca marca un límite de cobertura, que se puede observar en la imagen Lidar (Funagua, 2025). La intervención antrópica de vías y viviendas está por debajo de esta cota.

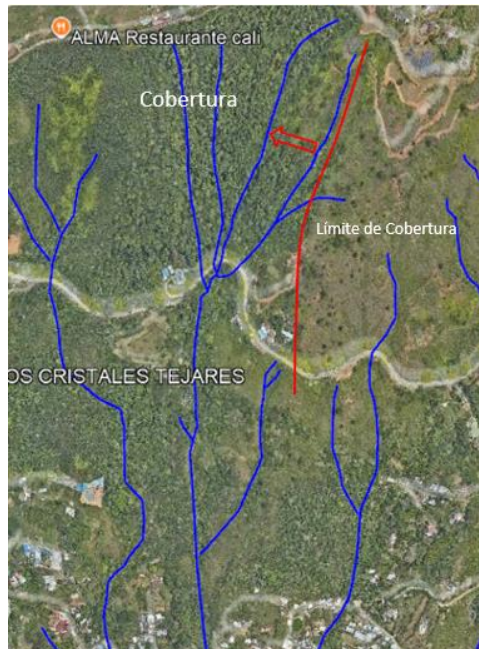


Figura 32. Condición de la cuenca y vía Cristo Rey.  
Fuente: Elaboración propia

Tabla 29, Morfometría de la Quebrada Guarrús,

Parámetro	Valor	Descripción
Índice de relieve		Moderado Moderadamente blando y erosión alta
Longitud de ladera	1.2 Km	Muy larga
Inclinación ladera	12°	Muy Inclineda Moderadamente blanda y Moderada susceptibilidad a MM
Forma de la ladera		Recta - Alta resistencia y disposición estructural a favor de la pendiente, movimiento Traslacional

Parámetro	Valor	Descripción
Patrón de drenaje		Dendrítico
Crestas y Valles		Plana – en U
Morfogénesis		Suelos lateríticos de basaltos (Kv)

Fuente: Elaboración propia

**Morfodinámica:** Procesos geodinámicos externo (principalmente denudativos), tanto antiguos como recientes que han modelado y continúan modelando el relieve y son los responsables del estado actual de las geformas.

### Procesos erosivos

En el talud superior de la vía a Cristo Rey, en el sector del Mirador, ladera occidental se encuentra una intervención antrópica que está generando transporte de sedimentos y surcos.

Tabla 30, Procesos erosivos Q Guarrús.

PROCESO	COORDENADAS	
Erosión laminar (vía)	3°25'43.97"N	76°34'1.45"O
Erosión laminar	3°25'40.96"N	76°34'16.08"O
Erosión laminar (vía)	3°25'53.54"N	76°34'1.07"O

Fuente: Elaboración propia



Figura 33. Proceso erosivo talud superior vía Cristo Rey.

Fuente: Elaboración propia

**Movimientos de Masa:** Se identifican deslizamientos de suelo, donde se ha perdido cobertura vegetal.

Tabla 31, Movimientos de masa Q Guarrús,

PROCESO	COORDENADAS	
Deslizamiento de suelo	3°25'35.33"N	76°34'4.71"O
Deslizamiento de suelo	3°25'35.51"N	76°34'2.80"O

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.4.4 Análisis de la susceptibilidad a movimientos en masa

Los resultados indican diferentes categorías de susceptibilidad Alta y Media en las cotas altas de la comuna 20, las cuales están determinadas por procesos erosivos de orden hídrico, pendientes hasta de un 22% y las vías existentes, así como las que se están construyendo, que son transversales a la cuenca, afectando los drenajes.

Asimismo, es evidente los procesos de antropización, reflejados en la construcción de viviendas, adecuación de terrenos y la intervención de cauces en las partes bajas de la comuna, donde dichos drenajes son entubados o entamborados o confinados en tuberías que, al no poder contener los caudales, generan remansos que desborda e inundan dichas zonas.

Así mismo, se evidencia que la cobertura vegetal en la cuenca afecta de forma evidente los valores de susceptibilidad, debido a la distribución aleatoria de la vegetación (pastos limpios, pastizales y vegetación con raíces pequeñas) que generalmente se relacionan con la disminución de la estabilidad del terreno por procesos erosivos identificados con componente hídrica, reptación, formación de surcos y cárcavas. Contrario a lo que sucede al oeste de la quebrada Guarrús, donde la alta cobertura vegetal, minimiza la propensión a movimientos de masa.

Se indica en este documento, que se identificaron en el mapa de unidades geomorfológicas D1, depósitos de ladera, que en la actualidad se encuentran estables, pero son susceptibles de generar movimientos de Masa, si se modifican las condiciones actuales del terreno.

Geológicamente, la comuna se encuentra sobre y rocas sedimentarias de la formación Guachinte (**TOg**) y la formación volcánica (**Kv**) con espesores métricos de suelos residuales granulares que generan deslizamientos rotacionales y traslacionales (**QI**), formaciones que están afectadas por fallamientos, principalmente en las rocas sedimentarias, en el contacto con la formación volcánica (**Kv**).

Geomorfológicamente la comuna se encuentra mayormente en unidades de origen denudacional estructural, con índice de relieve moderado a bajo, longitudes de laderas largas, inclinación mayor al 18 %, con formas de cóncavas y rectas, lo que hace una moderada y alta susceptibilidad a movimientos de Masa, de materiales blandos, en congruencia con los suelos residuales de la formación volcánica (**Kv**).

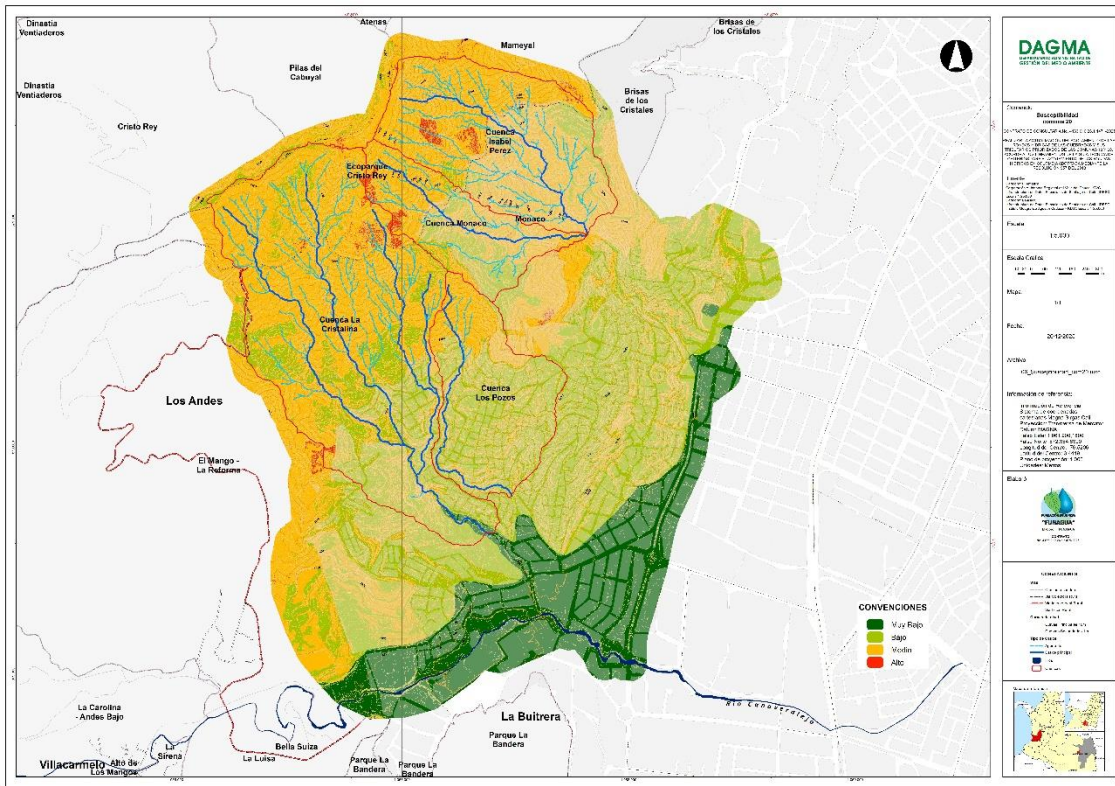


Figura 34, Mapa de Susceptibilidad de movimiento en masa

Fuente: Elaboración propia

### 4.3.5 Criterios para determinar el componente geomorfológico de las rondas hídricas,

Se realiza la delimitación de unidades geomorfológicas a lo largo del drenaje, asociadas a la ronda hídrica, en este caso, la zona de influencia del drenaje en el cauce permanente, delimitando procesos morfodinámicos (procesos erosivos), generación de secciones transversales cada 50 m., sobre el cauce permanente.

Con la información obtenida en las secciones transversales, zonas de cambios de pendiente lateral, depósitos aluviales identificados, la definición y localización del thalweg en las secciones, se elabora el plano con la definición en planta de la componente geomorfológica, Para determinar la calidad de la cobertura, se debe conocer el tipo geomorfológico de la zona de ribera.

En este contexto se genera plano de componente geomorfológico, indicando zonas anexas a banca llena (cauce permanente), para lo cual se generaron cortes topográficos perpendiculares a la dirección de la corriente, determinando los cambios abruptos de las pendientes en las orillas del drenaje, así como, la delimitación de depósitos aluviales o deslizamientos, movimientos de masa, depósitos de ladera, obras y actividades que tienen incidencia en la definición del criterio geomorfológico.

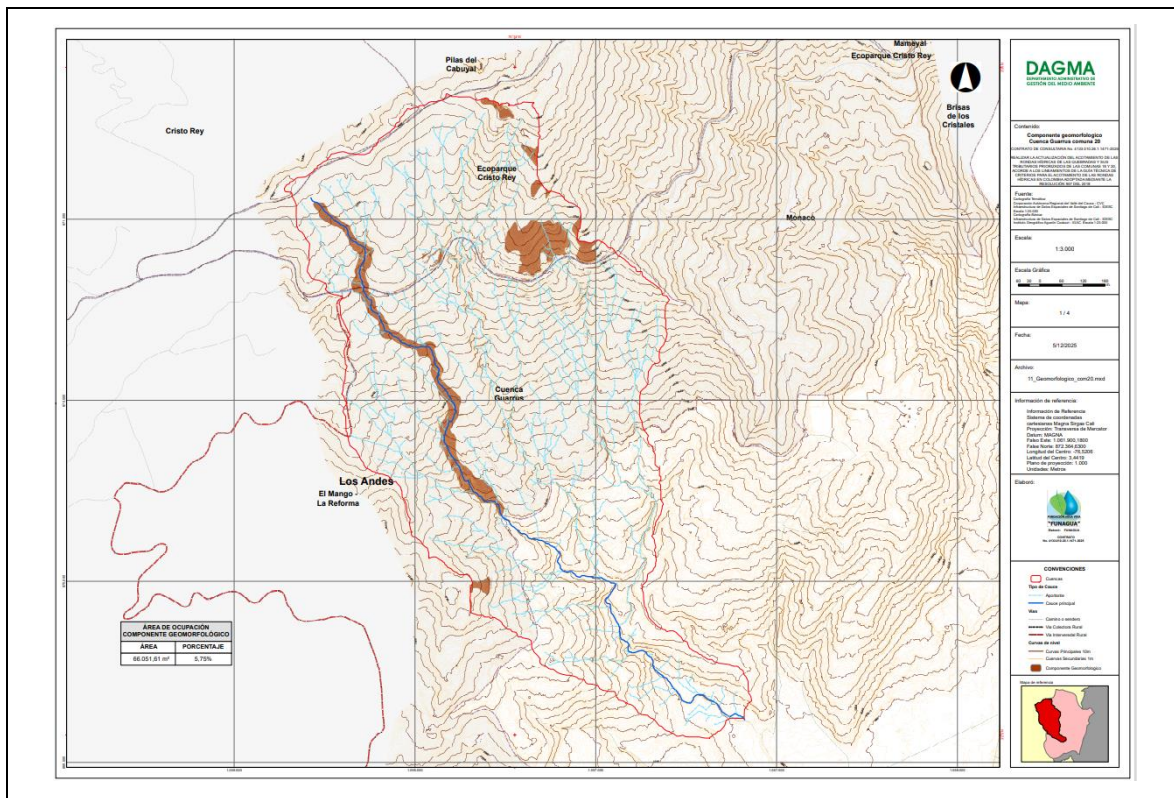
Se aclara que los eventos erosivos, que no tienen incidencia directa sobre la dinámica del cauce, no se incluyen en la ronda, Cuando se incluyen se hace la salvedad, de restricción geotécnica, que requiere información para aprobar un uso de esa área.

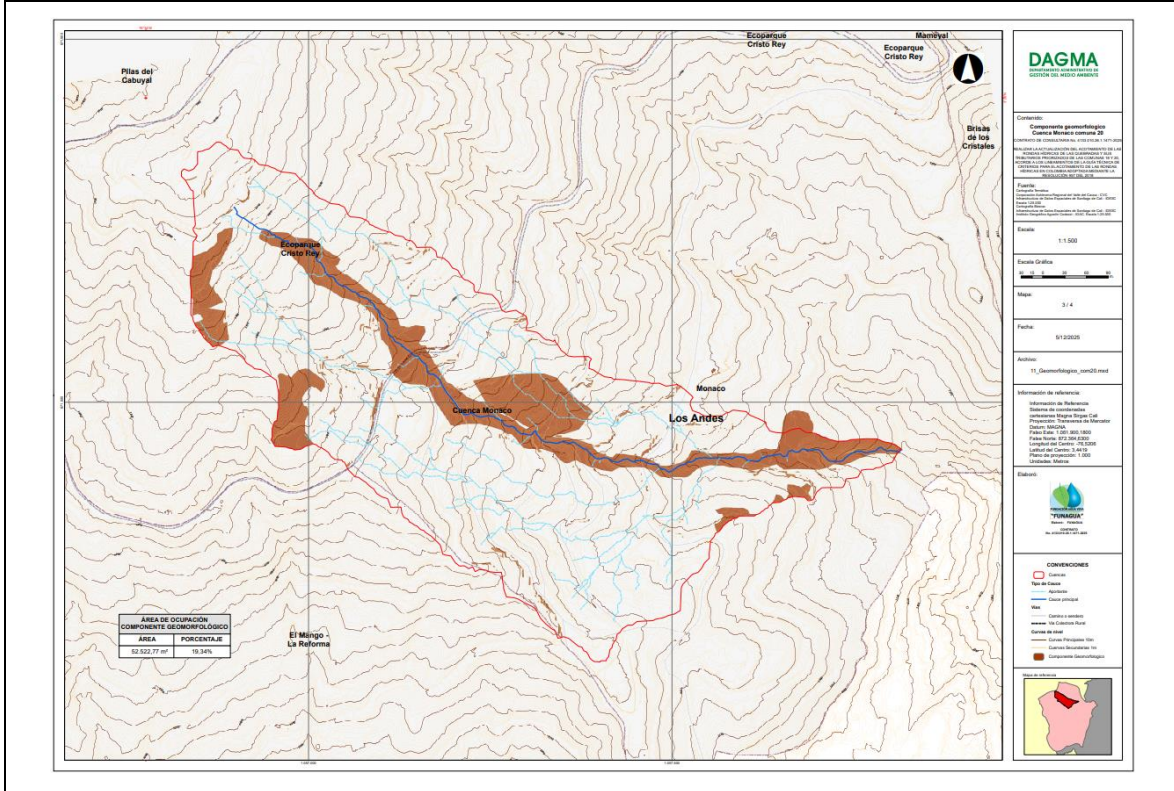
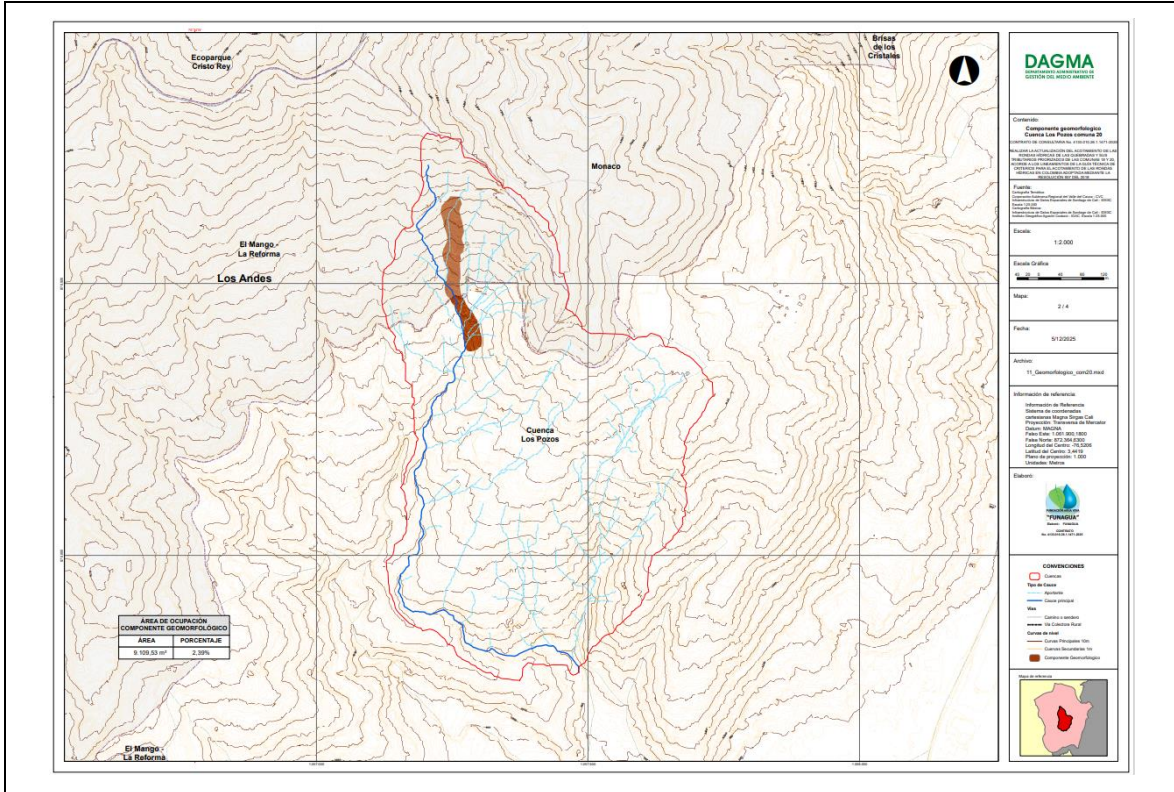
Este análisis de la geomorfología, permite delimitar un área en planta, la cual será, parte de la envolvente, para generar la ronda hídrica.

Tabla 32, Cálculo de área de protección por el componente geomorfológico,

Nombre microcuenca	Área (m <sup>2</sup> )	Área (%)
Guarrús	66.051,61	5,75
Los Pozos	9.109,53	2,39
Mónaco	52.522,77	19,34
Isabel Pérez	98.989,94	18,51

Fuente: Elaboración propia





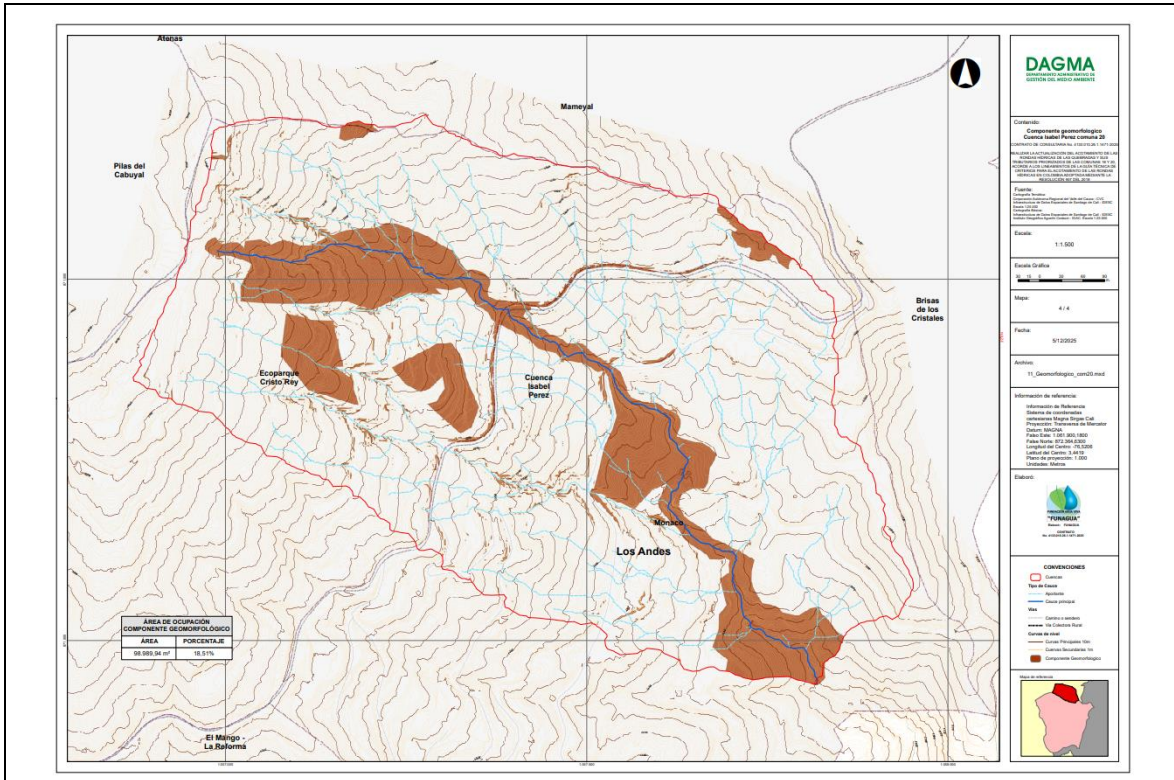


Figura 35, Mapas componente Geomorfológico  
Fuente: Elaboración propia

## 4.4 Definición del componente Hidrológico

### 4.4.1 Información hidrometeorológica

Las estaciones de observación y monitoreo de los fenómenos hidrológicos para ser analizadas en el desarrollo del presente estudio, reúnen la información obtenida en las estaciones que constituyen la red de monitoreo de datos hidrológicos y meteorológicos de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca-CVC (Dirección Técnica Ambiental-Grupo Recursos Hídricos-CVC, 2025), mediante la cual se analizan permanentemente las principales variables de caudal y precipitación disponibles en la zona del proyecto, Para determinar las condiciones de precipitación en la cuenca Lili-Meléndez-Cañaveralejo y específicamente el área del proyecto, se contemplaron los siguientes criterios para su selección y escogencia: 1, Registros mayores o iguales a 15 años, 2, Series continuas y homogéneas, 3, Cercanas y con influencia en el área de estudio, Las estaciones seleccionadas en cumplimiento de los criterios indicados a ser analizadas se relacionan en el Tabla y su ubicación se presenta en la figura 36.

Para hacer el análisis climatológico de la cuenca objeto de estudio, es necesario revisar la calidad de la información existente, Por esta razón se examinó que las series de datos fueran completas, continuas, suficientes y homogéneas, Dentro de los estudios de climatología, la precipitación se considera el parámetro determinante en la regulación, dinámica y generación

del recurso hídrico; tanto desde el punto de vista superficial como subterráneo, La precipitación opera como el componente más importante del ciclo hidrológico, garantizando la recarga de los acuíferos, la escorrentía superficial, la evaporación y permitiendo el desarrollo de los seres vivos sobre el planeta, Se origina en la atmósfera, a partir de las nubes, cargadas de humedad que alcanzan su punto de condensación, y se precipitan ayudadas por la fuerza de la gravedad, Cuando la velocidad del viento ascendente es alta, evita que las gotas de agua precipiten, y las eleva hasta que se forma el granizo; en este punto, si vence la fuerza de gravedad, se precipitan en forma sólida,

Tabla 33, Estaciones climatológicas, pluviométricas e hidrométricas

CÓDIGO	TIPO	NOMBRE	CUENCA	ENTIDAD
2622320103	PM	ALTO IGLESIAS	LILI-MELENDEZ- CAÑAVERALEJO	CVC
2622310201	PG	LILI-SAN SEBASTIÁN	LILI-MELENDEZ- CAÑAVERALEJO	CVC
2622320101	PG	LA FONDA	LILI-MELENDEZ- CAÑAVERALEJO	CVC
2622330108	PG	NÁPOLES	LILI-MELENDEZ- CAÑAVERALEJO	CVC
2622330102	PG	CAÑAVERALEJO	LILI-MELENDEZ- CAÑAVERALEJO	CVC
2622330107	CO	EDIFICIO CVC	LILI-MELENDEZ- CAÑAVERALEJO	CVC
2622330109	PG	PANAMERICANO	LILI-MELENDEZ- CAÑAVERALEJO	CVC
2622330105	PM	LOS CRISTALES	LILI-MELENDEZ- CAÑAVERALEJO	CVC
2622330101	PG	COLEGIO SAN JUAN BOSCO	LILI-MELENDEZ- CAÑAVERALEJO	CVC
2622400103	PG	PLANTA RÍO CALI	LILI-MELENDEZ- CAÑAVERALEJO	CVC

Fuente: CVC (Dirección Técnica Ambiental-Grupo Recursos Hídricos-CVC, 2025),

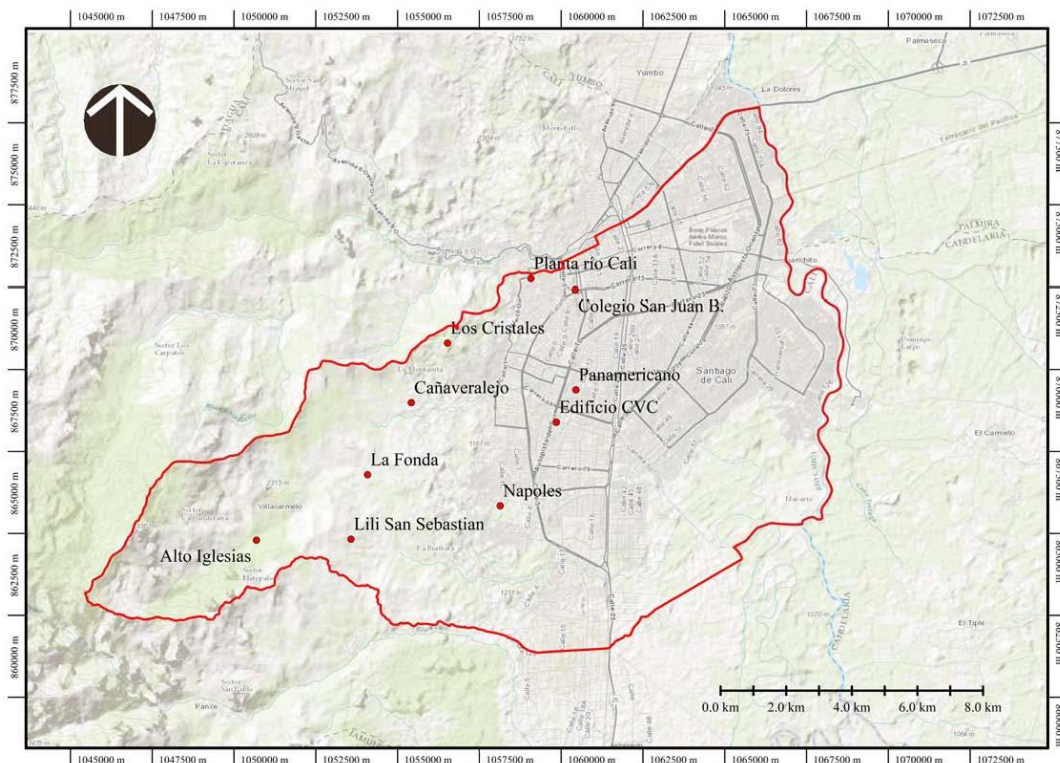


Figura 36, localización estaciones hidrológicas y meteorológicas,

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.1 Análisis exploratorio de datos-AED

##### 4.4.1.1 Análisis de correlación

Como se ha indicado, la evaluación de disponibilidad de datos es crucial para seleccionar las estaciones con mayor disponibilidad de datos y definir los periodos de análisis, A partir de la información de las precipitaciones máximas diarias de las zonas se evalúa la correlación entre estas, para ver las relaciones existentes y si es posible la imputación de datos faltantes, Teniendo en cuenta que las matrices de precipitación a utilizar ya tienen consolidado el comportamiento del clima, La eficiencia del modelo se evalúa utilizando el error cuadrático medio normalizado (Oba y otros, 2003) para las variables continuas, que se define por:

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\text{media}((X^{real} - X^{Imputados})^2)}{\text{var}(X^{real})}}$$

Donde  $X^{real}$  es la matriz de datos completa y  $X^{imputado}$  la matriz de datos imputada, Se utiliza *media* y *var* como notación abreviada para la media y la varianza empíricas calculadas únicamente sobre los valores faltantes continuos, Para las variables categóricas, se utiliza la

proporción de entradas falsamente clasificadas (*PFC*) sobre los valores faltantes categóricos,  $\Delta F$ . En ambos casos, un buen rendimiento resulta en un valor cercano a 0 y un mal rendimiento en un valor cercano a 1,

El análisis de correlación de Pearson figura 37 entre las diferentes estaciones reveló una fuerte asociación de la variable precipitación en estaciones geográficamente cercanas y con regímenes hidrológicos similares, La correlación de Pearson es una medida estadística de la fuerza y dirección de la relación lineal entre dos variables continuas, que se expresa con un coeficiente (*r*) entre -1 y +1, Un valor cercano a +1 indica una correlación positiva fuerte (ambas variables aumentan juntas), mientras que un valor cercano a -1 señala una correlación negativa fuerte (una variable aumenta cuando la otra disminuye), Un valor cercano a cero sugiere que no hay una relación lineal significativa entre las variables

Destacan los altos coeficientes de correlación entre las estaciones Colegio San Juan Bosco y Río Cali (0,83), Cañaveralejo y Edificio CVC (0,75), así como entre Lili-San Sebastián y Cañaveralejo (0,74), lo cual es esperable dada su proximidad geográfica y conexiones hidrológicas, En contraste, la estación Panamericano mostró una correlación negativa con las demás estaciones, sugiriendo una dinámica hidrológica independiente, De acuerdo a lo anterior, se suprime la estación Panamericano para la evaluación hidrológica objeto de estudio figura 38.

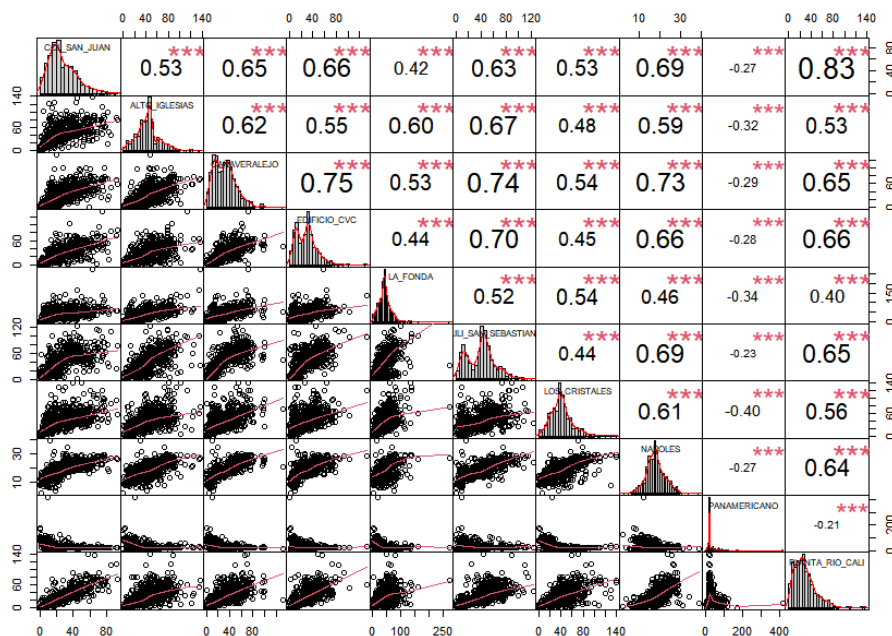


Figura 37, Coeficiente de correlación de la precipitación máxima diaria en las diferentes estaciones,

Fuente: Elaboración propia

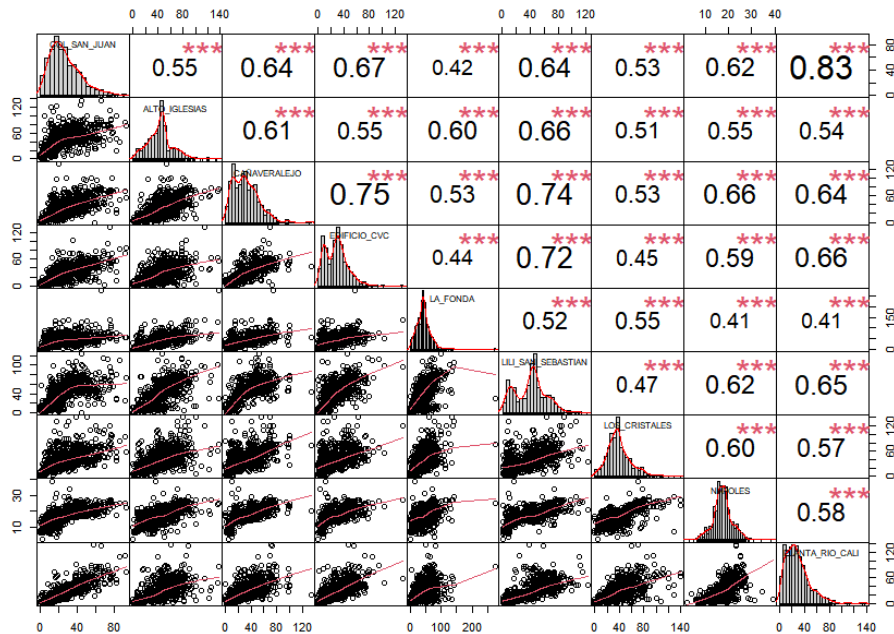


Figura 38, Coeficiente de correlación de la precipitación máxima diaria en las diferentes estaciones (Ajustada),

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.1.2 Extensión de registros mínimos

Uno de los criterios principales para la priorización de las estaciones, es tener disponible como mínimo 15 años de registro histórico, puesto que datos demasiado cortos pueden producir errores de estimación más grande del parámetro y cuartiles (Oliveira Cândido & Naghettini, 2008),

### Datos de las precipitaciones existentes en las estaciones meteorológicas

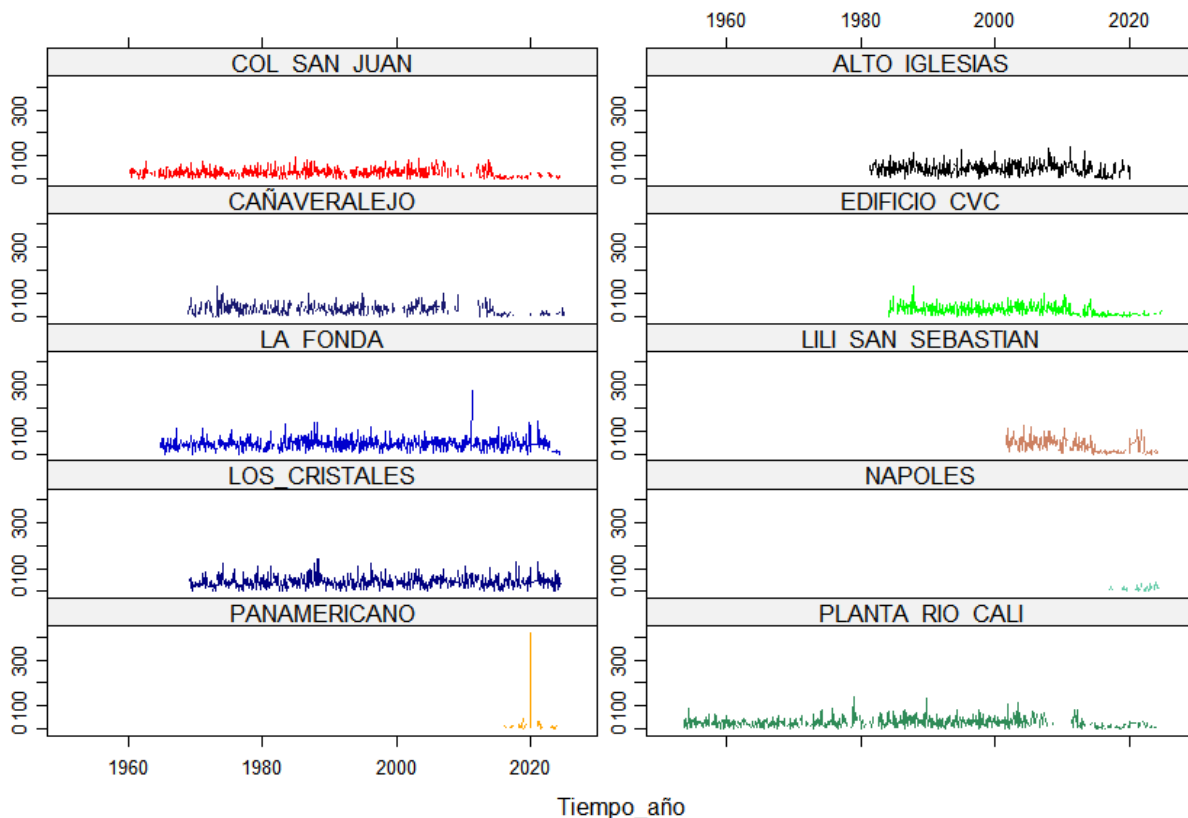


Figura 39, Extensión de los registros de la precipitación máxima diaria en las diferentes estaciones,

Fuente: Elaboración propia

Verificada la extensión de los registros para las diez (10) estaciones evaluadas, se concluye que las estaciones Nápoles y Panamericano poseen la menor cantidad de datos continuos de información mensual con 51 meses en total (2016-2024) correspondiente a nueve años de registros históricos; en virtud de lo cual, se suprimen ambas estaciones del estudio hidrológico,

#### 4.4.2 Exploración gráfica de datos-EGD

Para la exploración gráfica de datos-EGD, se ha utilizado el paquete *HydroTSM* (Zambrano B., 2024) bajo el entorno y lenguaje de programación *R* (R Core Team, 2025), Las series históricas de estudio cubren el período de 1954-2024, corresponden a los valores máximos diarios de la variable climatológica precipitación, dividiendo los registros para analizar la totalidad de los datos con las estaciones que tuvieran el mismo periodo registrado, realizando un análisis descriptivo de las series de tiempo para evaluar la disponibilidad de datos y

aspectos fundamentales de las series, como el número total de datos, media, mínimos y máximos,

La disponibilidad de datos se evaluó identificando las fechas más recientes y antiguas disponibles para cada estación, y cuantificando el porcentaje de valores faltantes, Esta información fue crucial para seleccionar las estaciones con mayor disponibilidad de datos y definir los periodos de análisis,

La exploración gráfica de datos consiste en técnicas gráficas y estadísticas para evaluar el conjunto de datos de lluvia, con el fin de identificar patrones, anomalías, valores atípicos y posibles relaciones que ayuden a tomar decisiones informadas, Este análisis es importante en la verificación de la exactitud de los datos, su homogeneidad, y para preparar los datos para modelos más complejos, La EGD, inicia con la exploración gráfica a través de series de tiempo, histogramas y gráficos de cajas (*Boxplot*), Teniendo en cuenta que los datos que están siendo analizados corresponden a escalas cuantitativas, las medidas de resumen son: el promedio o media, la cual suma todos los valores individuales y la divide entre el número total de datos; ésta medición representa el punto de equilibrio de la distribución de los datos; la mediana representa la cifra que divide la muestra en dos mitades, es decir, el valor donde el 50% está por encima o por debajo del mismo; los cuartiles dividen la muestra de datos en cuatro partes iguales, con ésta medida se puede identificar rápidamente la dispersión y la tendencia central de un conjunto de datos; la última medida de dispersión es el rango o intervalo entre el valor mínimo y máximo, el cual se obtiene de la resta del mayor valor y el mínimo, En general, el análisis exploratorio engloba las técnicas para determinar los esquemas de asociación espacial, concentraciones locales en un conjunto de datos, Es importante indicar en este punto, que dos (2) estaciones han sido suprimidas, quedando ocho (8) que serán objeto de la evaluación EGD,

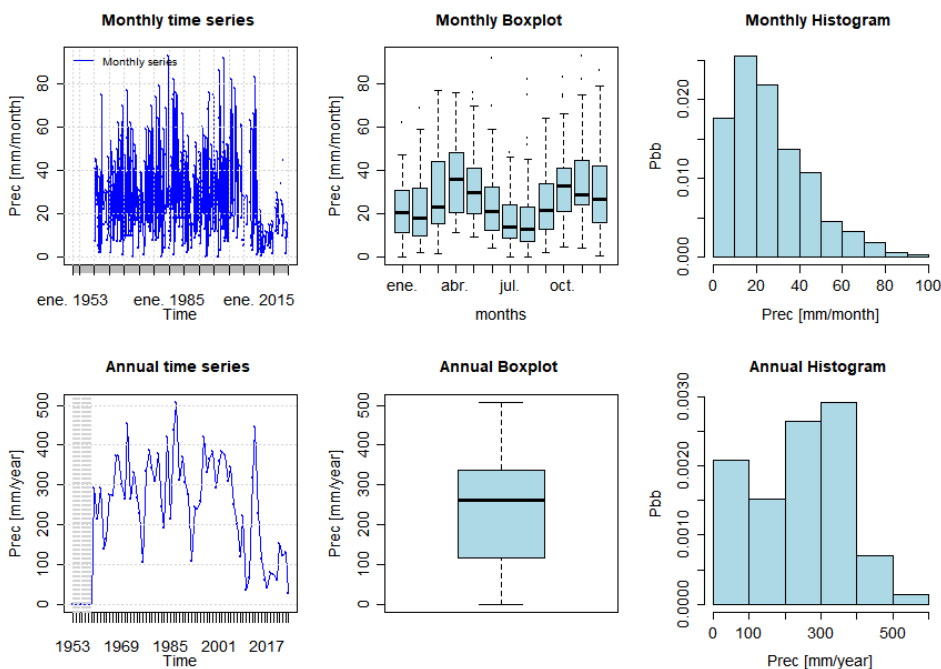


Figura 40, Análisis exploratorio de datos – estación colegio San Juan Bosco,

Fuente: Elaboración propia

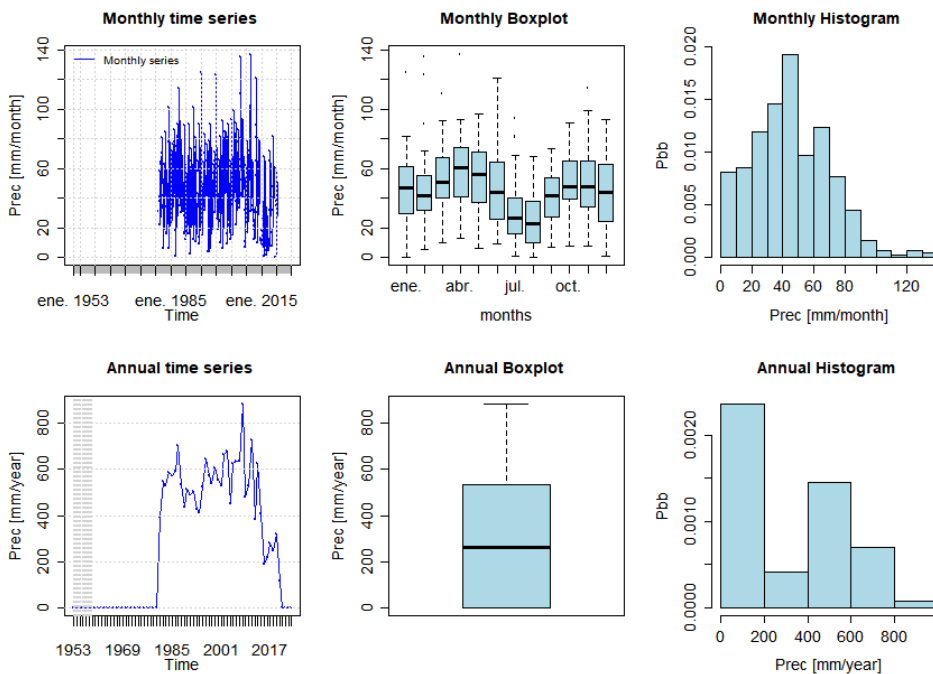


Figura 41, Análisis exploratorio de datos – estación Alto Iglesias,

Fuente: Elaboración propia

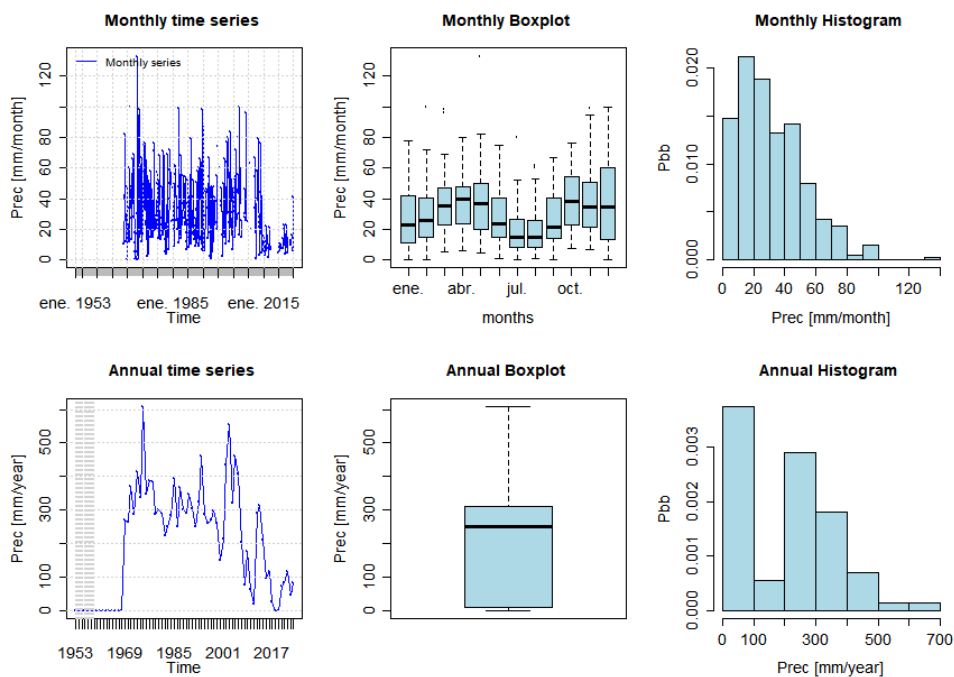


Figura 42, Análisis exploratorio de dato – Estación Cañaveralejo,

Fuente: Elaboración propia

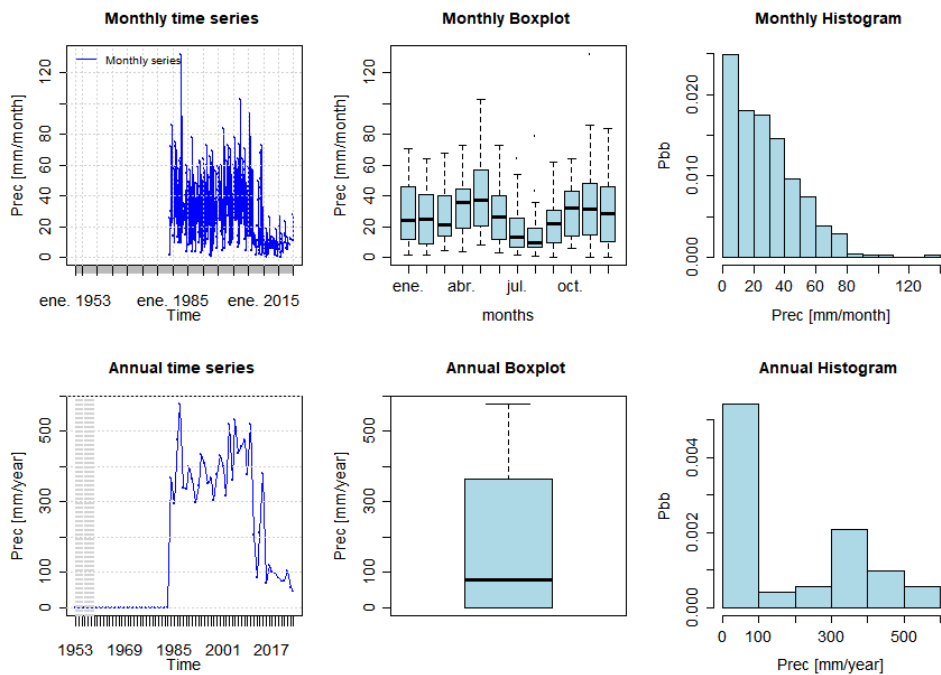


Figura 43, Análisis exploratorio de datos – Estación Edificio CVC,

Fuente: Elaboración propia

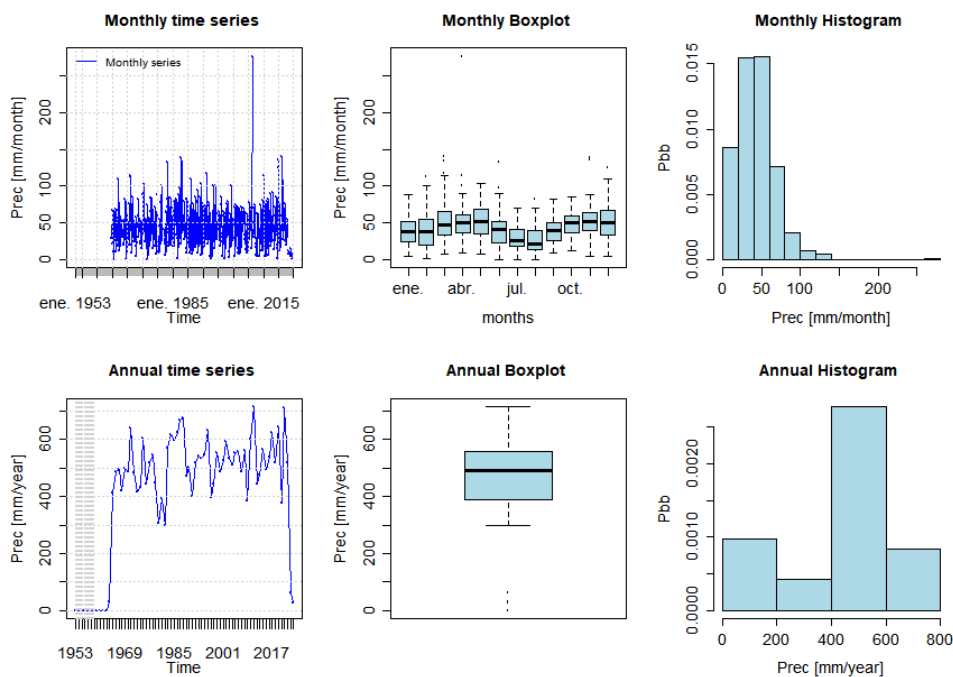


Figura 44, Análisis exploratorio de datos – Estación La Fonda,

Fuente: Elaboración propia



Figura 45, Análisis exploratorio de datos – Estación Lili San Sebastián,

Fuente: Elaboración propia

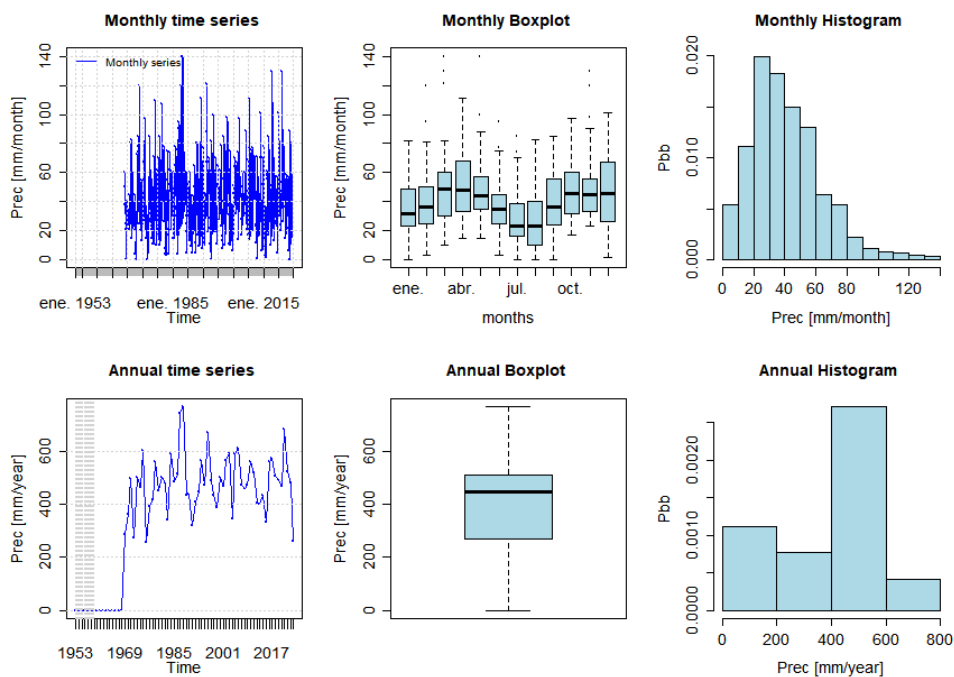


Figura 46, Análisis exploratorio de datos – Estación Los Cristales,

Fuente: Elaboración propia

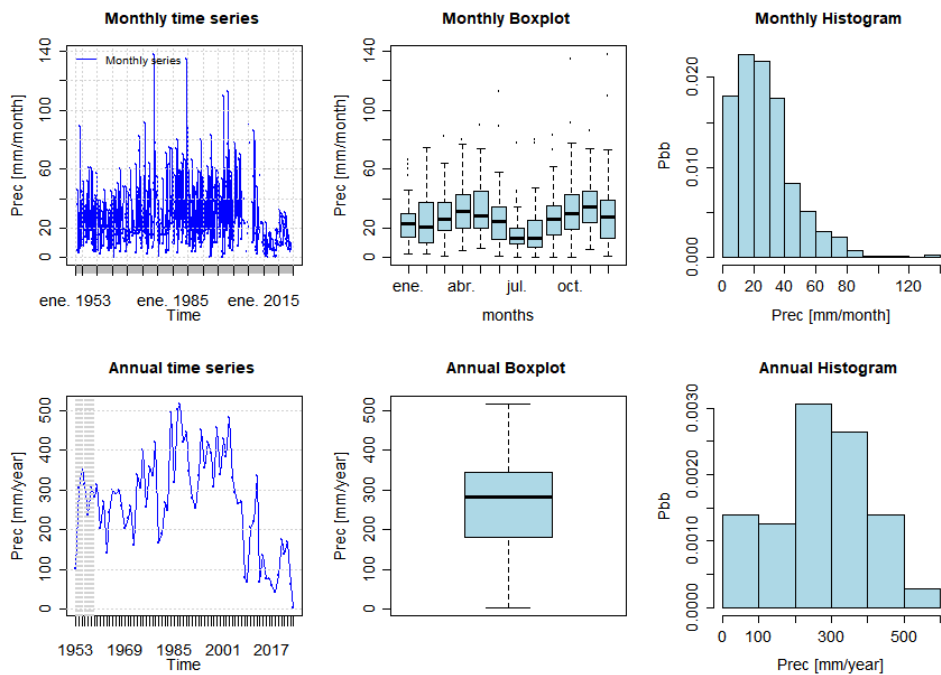


Figura 47, Análisis exploratorio de datos – Estación Panamericano,

Fuente: Elaboración propia

La exploración grafica para cada estación incluyó:

- **Gráficos de líneas:** Muestran la evolución de los datos a lo largo del tiempo, con agregación mensual,
- **Diagramas de cajas y alambres (Boxplots):** Representan la distribución de los datos en diferentes escalas de tiempo, con agregación mensual,
- **Histogramas:** Muestran la distribución de frecuencias de los valores hidrológicos,
- **Comparación de meses:** Se pueden generar varios diagramas de caja para diferentes meses (o años) en el mismo gráfico, permitiendo comparar visualmente sus distribuciones,
- **Análisis de tendencias:** Se observa cómo la variabilidad (longitud de la caja y los alambres) y la tendencia central (mediana) cambian de un mes a otro, revelando patrones estacionales o tendencias a largo plazo,
- **Detección de anomalías:** Al comparar los meses, se pueden identificar rápidamente períodos con valores atípicos o con distribuciones inusuales,

Los diagramas de cajas y bigotes son una representación gráfica que resume la distribución de datos (Tabla 43), mostrando cinco valores clave: el mínimo, el primer cuartil (Q1), la mediana (Q2), el tercer cuartil (Q3) y el máximo, Al agregar los datos mensualmente, estos diagramas permiten visualizar la variabilidad y la tendencia central de diferentes periodos, facilitando la comparación de distribuciones de datos a lo largo del tiempo, Los cinco (5) valores clave son los siguientes:

- **Valor mínimo:** El valor más bajo en el conjunto de datos,
- **Primer cuartil (Q1):** El 25% de los datos se encuentran por debajo de este valor,
- **Mediana (Q2):** El 50% de los datos están por debajo de este valor,
- **Tercer cuartil (Q3):** El 75% de los datos están por debajo de este valor,
- **Valor máximo:** El valor más alto en el conjunto de datos,

Las estaciones con mayor porcentaje de datos perdidos son, Cañaveralejo (32,59%) y Colegio San Juan Bosco (20,77%), mientras que las estaciones que menor porcentaje presentan son Los Cristales (4,33%), La Fonda (5,13%) y Edificio CVC (9,55%), El conjunto total suma 4,999 datos de precipitación máxima diaria; se identificaron 775 datos faltantes, que corresponde a un 15,50% del total de registros,

Tabla 34, Resultados exploración de datos,

COL, SAN JUAN BOSCO	ALTO IGLESIAS	CAÑAVERALEJO	EDIFICIO CVC	LA FONDA	LILI SAN SEBASTIAN	LOS CRISTALES	PLANTA RIO CALI
Min, : 0,0	Min, : 0,00	Min, : 0,00	Min, : 0,20	Min, : 0,00	Min, : 0,20	Min, : 0,0	Min, : 0,00
1st Qu.,:14,0	1st Qu.,: 28,00	1st Qu.,: 15,00	1st Qu.,: 10,20	1st Qu.,: 26,00	1st Qu.,: 10,00	1st Qu.,: 25,0	1st Qu.,: 14,00
Median :24,0	Median : 43,00	Median : 27,00	Median : 25,00	Median : 42,00	Median : 30,25	Median : 38,0	Median : 25,00
Mean :27,2	Mean : 45,56	Mean : 32,02	Mean : 28,29	Mean : 44,12	Mean : 35,65	Mean : 41,8	Mean : 28,17

COL, SAN JUAN BOSCO	ALTO IGLESIAS	CAÑAVERALEJO	EDIFICIO CVC	LA FONDA	LILI SAN SEBASTIAN	LOS CRISTALES	PLANTA RIO CALI
3rd Qu.:38,0	3rd Qu.: 63,75	3rd Qu.: 46,00	3rd Qu.: 40,00	3rd Qu.: 57,00	3rd Qu.: 55,00	3rd Qu.: 54,0	3rd Qu.: 38,00
Max, :93,0	Max, :137,00	Max, :133,00	Max, :132,00	Max, :276,00	Max, :123,00	Max, :140,0	Max, :138,00
NA's :162	NA's :82	NA's :219	NA's :47	NA's :37	NA's :34	NA's :29	NA's :165
NA's :20,77%	NA's :15,53%	NA's :32,59%	NA's :9,55%	NA's :5,13%	NA's :12,14%	NA's :4,33%	NA's :19,28%

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.3 Procesamiento series de precipitación, estimación de datos faltantes, detección de cambios y homogenización

##### 4.4.3.1 Método de imputación (multivariado) con MissForest

Para la imputación de datos (datos faltantes), se utilizó el paquete *MissForest* (Stekhoven, 2022) bajo el entorno y lenguaje de programación *R* (R Core Team, 2025), *MissForest* funciona iterativamente para imputar valores faltantes mediante el enfoque de *Random Forest*, Los bosques aleatorios (*Random Forest*), creados por Breiman (2001), Ibarra-Berastegi et al, (2011), se basan en árboles de decisión y son extremadamente adaptables y poderosos clasificadores de conjuntos, Además, el marco proporciona una comprensión de la capacidad del *Random Forest* para predecir en términos de la fuerza de los predictores individuales y sus correlaciones entre ellos, El *Random Forest* se puede usar para clasificación, regresión y aprendizaje no supervisado,

Inicialmente *MissForest* imputa todos los datos faltantes usando la media/moda, luego, para cada variable con valores faltantes, *MissForest* ajusta un "bosque aleatorio" en la parte observada y luego predice la parte faltante, Este proceso de entrenamiento y predicción se repite en un proceso iterativo hasta que se cumple un criterio de parada establecido por la programación del paquete o se alcanza un número máximo de iteraciones especificadas por el usuario,

##### 4.4.3.2 Resultados para la imputación de datos con *MissForest*

En la figura 48 se presenta una gráfica con formato de serie temporal de los datos imputados por el método *MissForest*, se puede ver como las series temporales se han graficado de forma continua, es decir, no se presentan segmentos de gráfica sin trazar, por lo tanto, los datos han sido imputados en su totalidad,

### Datos de precipitaciones completadas en las estaciones meteorológicas

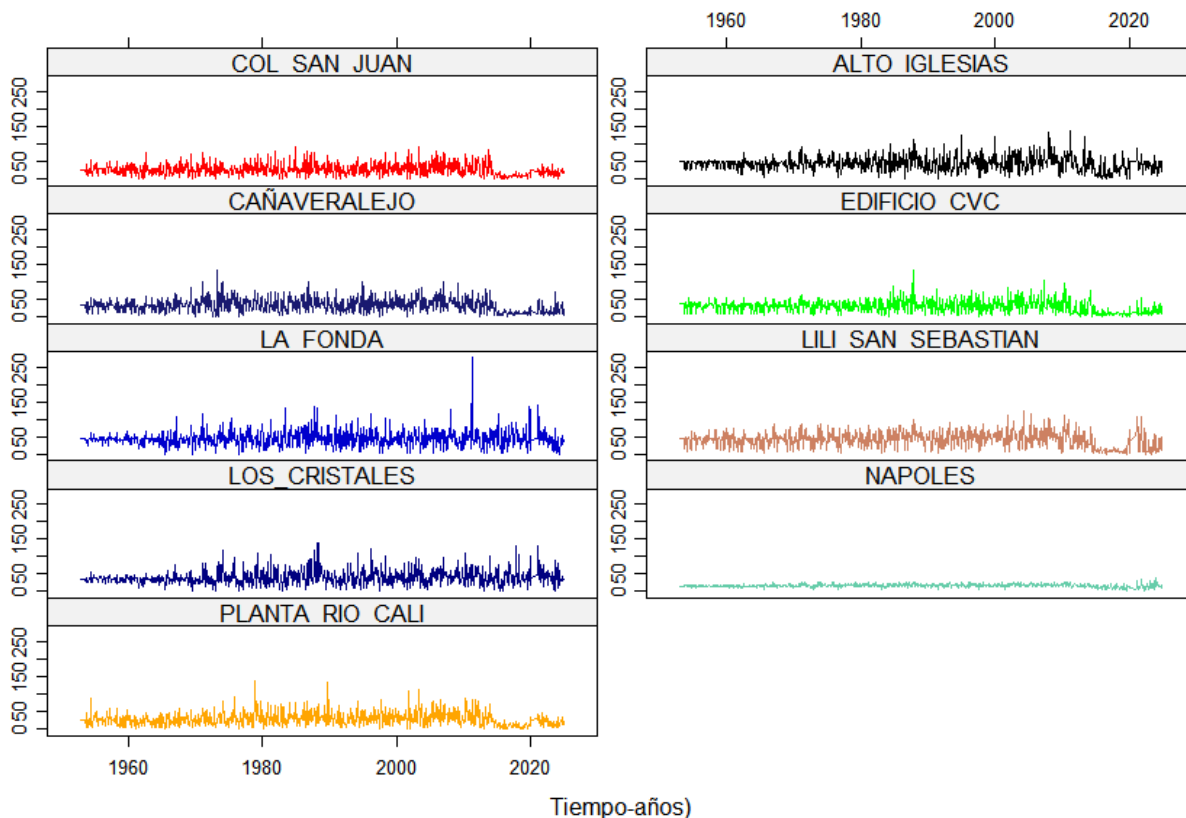


Figura 48, Imputación de datos resultantes con missforest variable precipitación máxima diaria en las diferentes estaciones,

Fuente: Elaboración propia

El error cuadrático medio (RMSE) es la métrica de evaluación de la precisión utilizada en el método de imputación con *MissForest*, El RMSE proporcionó una medida directa del error de predicción en las mismas unidades que la variable de respuesta, El valor  $RMSE = 0,58276$  para el procesamiento, significa que, en promedio las imputaciones del modelo difieren 0,58 mm de las cifras reales, Esto refleja la precisión de las predicciones del modelo utilizado,

Los Anexo se encuentran en el documento “Estudios hidrológicos e hidráulicos”,

#### 4.4.3.3 Detección de cambios en el promedio: prueba de razón de verosimilitud de Worsley

Según los valores de precipitación para cada uno de los meses, se empleó la prueba estadística de Worsley (1979), con el fin de detectar cambios en los valores promedio de la precipitación máxima diaria, Estos análisis relacionados con detección de cambios han sido abordados por autores como Beaulieu et al, (2012), quienes refieren algunos métodos para la detección de cambios, entre ellos: i) cambios en el promedio y varianza, ii) uso de modelos de regresión, iii) uso de métodos no paramétricos (Pettitt, 1979), Stěpánek (2008) y Stěpánek et al, (2009),

en el *software* Anclim, implementan varias pruebas estadísticas para la detección de puntos de cambio, entre ellas: Worsley, Mann-Whitney, Pettitt, desviaciones acumuladas y t-máxima penalizada,

De acuerdo con la descripción de Buishand (1982), en la prueba de razón de verosimilitud de Worsley, la hipótesis nula se relaciona con probar la homogeneidad de una secuencia  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ , Según la hipótesis nula  $H_0$  se asume que las  $Y_i$ 's poseen el mismo valor promedio, y las pruebas estadísticas suponen que los  $Y_i$ 's son estocásticamente independientes y con distribución normal con promedio:

$$E(Y_i) = \begin{cases} \mu & i = 1, 2, \dots, m \\ \mu + \Delta & i = m + 1, \dots, n \end{cases}$$

Y varianza:  $Var(Y_i) = \sigma_y^2$

El modelo asume un salto en el promedio de magnitud  $\Delta$  después de  $m$  observaciones,

De esta forma, para la prueba de Worsley asume que se desea probar  $\Delta=0$ , contra la hipótesis alterna  $\Delta \neq 0$ , En las situaciones en las cuales no se tiene información acerca del punto de cambio  $m$ , la prueba se basa en:

$$W = \max_{i \leq k \leq n-1} |t_k|$$

$t_k$  denota el valor t para probar una diferencia en el promedio entre las primeras  $k$  y las últimas  $n-k$  observaciones,

De acuerdo a lo anterior, se detectan los puntos de cambio de las series de tiempo a través de la prueba estadística de Worsley implementada en el *software* Anclim (Stepanek, 2008) para comprobar si coinciden con periodos de El Niño o La Niña, Además, se establece la hipótesis de que cuando los cambios no son influenciados por la ocurrencia de dichos eventos, estas variaciones se deben principalmente a alteraciones en las condiciones de la estación (reubicación o cambios en los instrumentos de medida) o a errores de lectura o posicionamiento asociados al uso de instrumentos análogos,

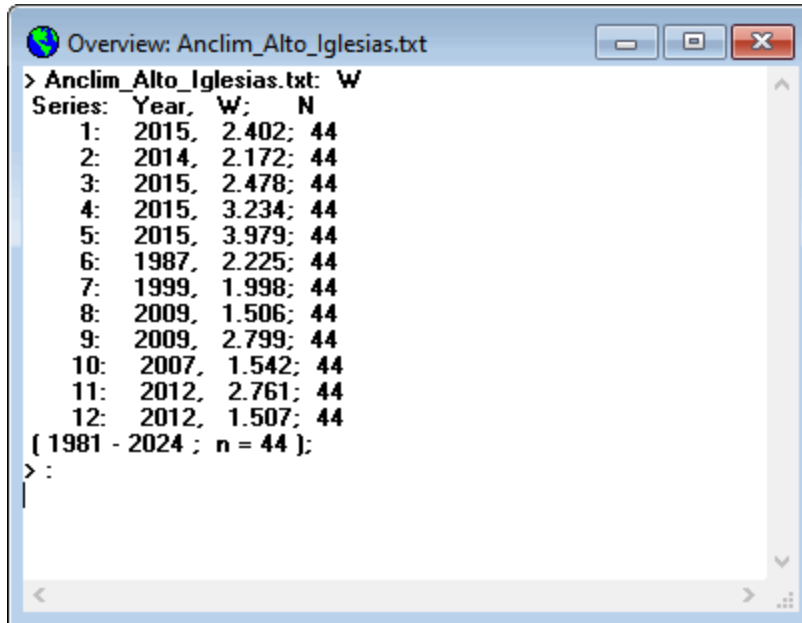


Figura 49, Prueba de worsley series de tiempo de precipitación máxima de valores estimados-estación alto iglesias, cali (valle del cauca),

Fuente: Elaboración propia, Elaboración con Software *AnClim* (Stepanek, 2008),

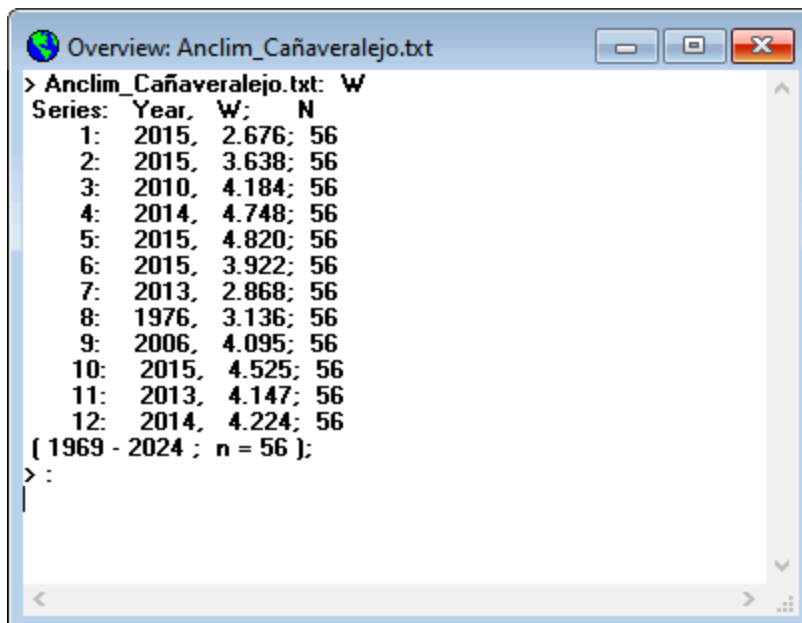


Figura 50, Prueba de worsley series de tiempo de precipitación máxima de valores estimados-estación Cañaveralejo, cali (valle del cauca),

Fuente: Elaboración propia, Elaboración con Software *AnClim* (Stepanek, 2008),

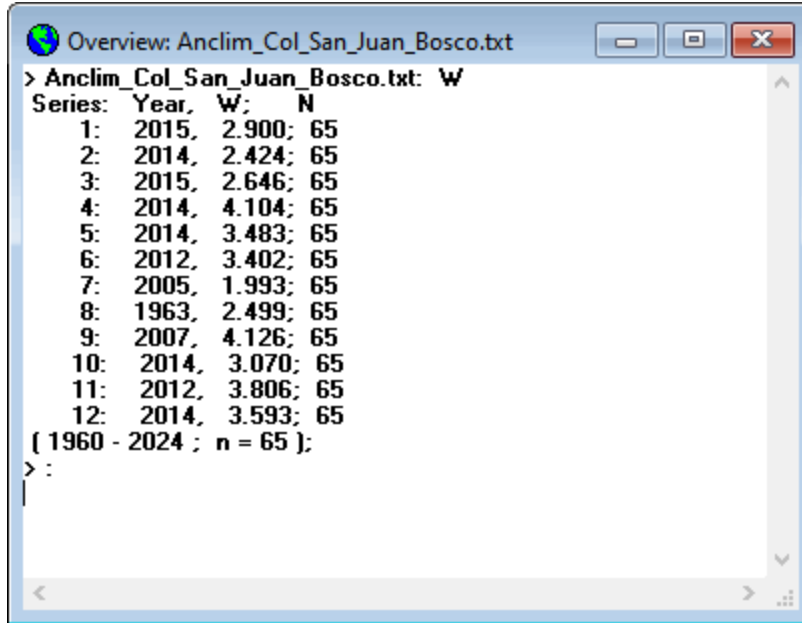


Figura 51, Prueba de worsley series de tiempo de precipitación máxima de valores estimados-estación col, san juan Bosco, cali (valle del cauca),

Fuente: Elaboración propia, Elaboración con Software *AnClim* (Stepanek, 2008),

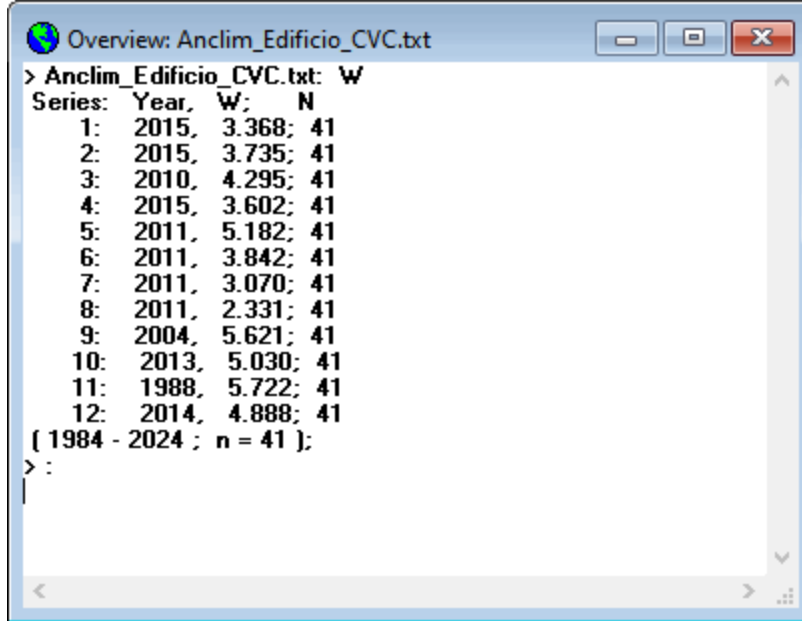


Figura 52, Prueba de worsley series de tiempo de precipitación máxima de valores estimados-estación edificio cvc, Cali (valle del cauca),

Fuente: Elaboración propia, Elaboración con Software *AnClim* (Stepanek, 2008),

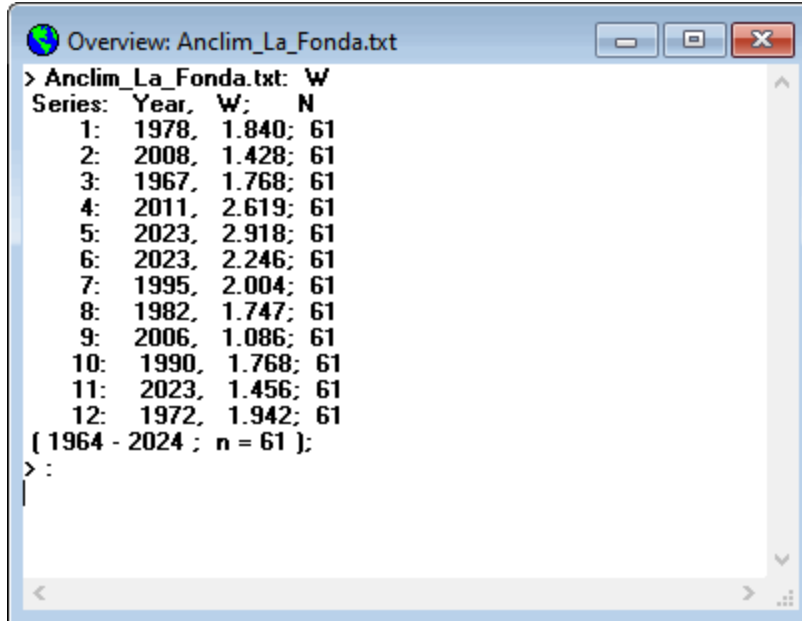


Figura 53, Prueba de worsley series de tiempo de precipitación máxima de valores estimados-estación la fonda, Cali (valle del cauca),

Fuente: Elaboración propia, Elaboración con Software *AnClim* (Stepanek, 2008),

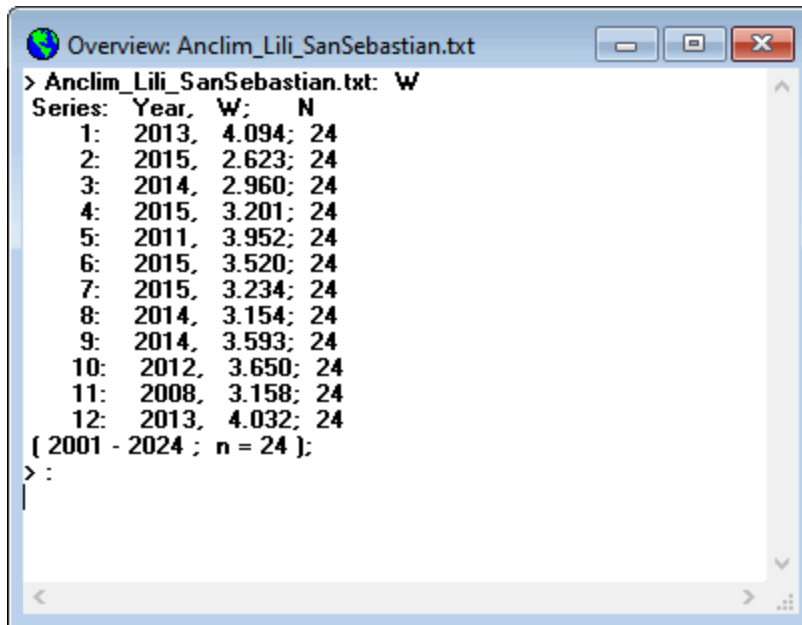


Figura 54, Prueba de worsley series de tiempo de precipitación máxima de valores estimados-estación Lili-san Sebastián, Cali (valle del cauca),

Fuente: Elaboración propia, Elaboración con Software *AnClim* (Stepanek, 2008),

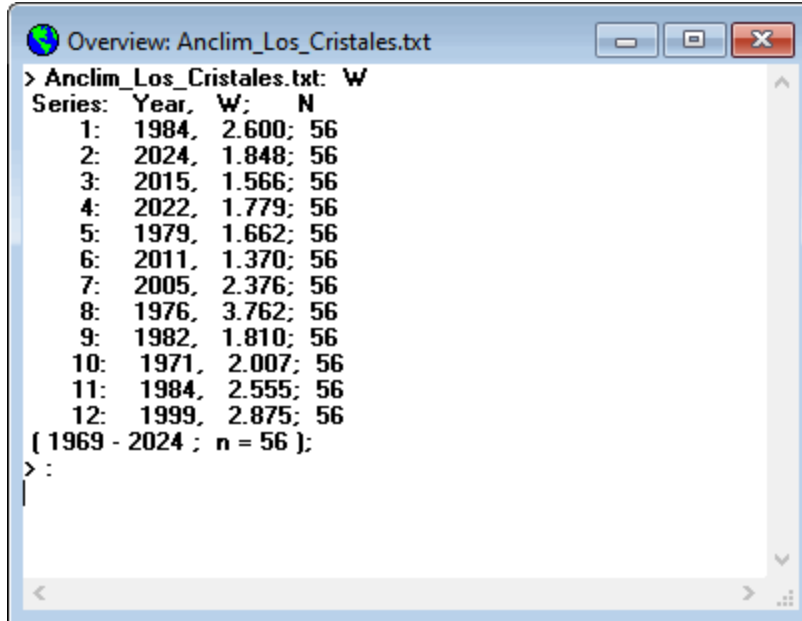


Figura 55, Prueba de worsley series de tiempo de precipitación máxima de valores estimados-estación los cristales, Cali (valle del cauca),

Fuente: Elaboración propia, Elaboración con Software AnClim (Stepanek, 2008),

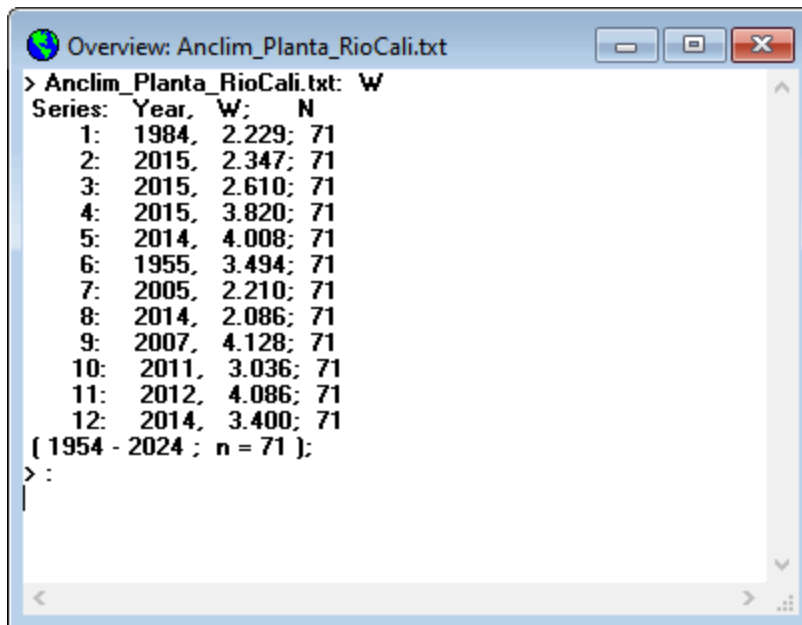


Figura 56, Prueba de worsley series de tiempo de precipitación máxima de valores estimados-estación planta río cali, cali (valle del cauca),

Fuente: Elaboración propia, Elaboración con Software AnClim (Stepanek, 2008),

Luego de detectar los puntos de cambio y de verificar su coincidencia con las ocurrencias de fenómenos ENOS empleando como criterio de clasificación el índice ONI (*Oceanic Niño Index*), se eliminan los datos en los puntos de cambio que no coinciden y, por tanto, requieren ser ajustadas, (Ver Anexo “Estudios hidrológicos e hidráulicos”.)

Tabla 35, Índice oceánico del niño (oni) período 1987-2024

AÑO	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1950	-1,5	-1,3	-1,2	-1,2	-1,1	-0,9	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,6	-0,8
1951	-0,8	-0,5	-0,2	0,2	0,4	0,6	0,7	0,9	1	1,2	1	0,8
1952	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0	-0,1	0	0,2	0,1	0	0,1
1953	0,4	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8
1954	0,8	0,5	0	-0,4	-0,5	-0,5	-0,6	-0,8	-0,9	-0,8	-0,7	-0,7
1955	-0,7	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8	-0,7	-0,7	-0,7	-1,1	-1,4	-1,7	-1,5
1956	-1,1	-0,8	-0,6	-0,5	-0,5	-0,5	-0,6	-0,6	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4
1957	-0,2	0,1	0,4	0,7	0,9	1,1	1,3	1,3	1,3	1,4	1,5	1,7
1958	1,8	1,7	1,3	0,9	0,7	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6
1959	0,6	0,6	0,5	0,3	0,2	-0,1	-0,2	-0,3	-0,1	0	0	0
1960	-0,1	-0,1	-0,1	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1
1961	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,1	-0,1	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2
1962	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,2	0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4
1963	-0,4	-0,2	0,2	0,3	0,3	0,5	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,3
1964	1,1	0,6	0,1	-0,3	-0,6	-0,6	-0,6	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
1965	-0,6	-0,3	-0,1	0,2	0,5	0,8	1,2	1,5	1,9	2	2	1,7
1966	1,4	1,2	1	0,7	0,4	0,2	0,2	0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3
1967	-0,4	-0,5	-0,5	-0,4	-0,2	0	0	-0,2	-0,3	-0,4	-0,3	-0,4
1968	-0,6	-0,7	-0,6	-0,4	0	0,3	0,6	0,5	0,4	0,5	0,7	1
1969	1,1	1,1	0,9	0,8	0,6	0,4	0,4	0,5	0,8	0,9	0,8	0,6
1970	0,5	0,3	0,3	0,2	0	-0,3	-0,6	-0,8	-0,8	-0,7	-0,9	-1,1
1971	-1,4	-1,4	-1,1	-0,8	-0,7	-0,7	-0,8	-0,8	-0,8	-0,9	-1	-0,9
1972	-0,7	-0,4	0,1	0,4	0,7	0,9	1,1	1,4	1,6	1,8	2,1	2,1
1973	1,8	1,2	0,5	-0,1	-0,5	-0,9	-1,1	-1,3	-1,5	-1,7	-1,9	-2
1974	-1,8	-1,6	-1,2	-1	-0,9	-0,8	-0,5	-0,4	-0,4	-0,6	-0,8	-0,6
1975	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,8	-1	-1,1	-1,2	-1,4	-1,4	-1,6	-1,7
1976	-1,6	-1,2	-0,7	-0,5	-0,3	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	0,8
1977	0,7	0,6	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,6	0,7	0,8	0,8
1978	0,7	0,4	0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,1	0
1979	0	0,1	0,2	0,3	0,2	0	0	0,2	0,3	0,5	0,5	0,6
1980	0,6	0,5	0,3	0,4	0,5	0,5	0,3	0	-0,1	0	0,1	0
1981	-0,3	-0,5	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1	-0,2	-0,1
1982	0	0,1	0,2	0,5	0,7	0,7	0,8	1,1	1,6	2	2,2	2,2
1983	2,2	1,9	1,5	1,3	1,1	0,7	0,3	-0,1	-0,5	-0,8	-1	-0,9
1984	-0,6	-0,4	-0,3	-0,4	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2	-0,6	-0,9	-1,1
1985	-1	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,6	-0,5	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4
1986	-0,5	-0,5	-0,3	-0,2	-0,1	0	0,2	0,4	0,7	0,9	1,1	1,2
1987	1,2	1,2	1,1	0,9	1	1,2	1,5	1,7	1,6	1,5	1,3	1,1
1988	0,8	0,5	0,1	-0,3	-0,9	-1,3	-1,3	-1,1	-1,2	-1,5	-1,8	-1,8
1989	-1,7	-1,4	-1,1	-0,8	-0,6	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1
1990	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4
1991	0,4	0,3	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,6	0,6	0,8	1,2	1,5

AÑO	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1992	1,7	1,6	1,5	1,3	1,1	0,7	0,4	0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,1
1993	0,1	0,3	0,5	0,7	0,7	0,6	0,3	0,3	0,2	0,1	0	0,1
1994	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,7	1	1,1
1995	1	0,7	0,5	0,3	0,1	0	-0,2	-0,5	-0,8	-1	-1	-1
1996	-0,9	-0,8	-0,6	-0,4	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,5
1997	-0,5	-0,4	-0,1	0,3	0,8	1,2	1,6	1,9	2,1	2,3	2,4	2,4
1998	2,2	1,9	1,4	1	0,5	-0,1	-0,8	-1,1	-1,3	-1,4	-1,5	-1,6
1999	-1,5	-1,3	-1,1	-1	-1	-1	-1,1	-1,1	-1,2	-1,3	-1,5	-1,7
2000	-1,7	-1,4	-1,1	-0,8	-0,7	-0,6	-0,6	-0,5	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7
2001	-0,7	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,3
2002	-0,1	0	0,1	0,2	0,4	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,3	1,1
2003	0,9	0,6	0,4	0	-0,3	-0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4
2004	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7
2005	0,6	0,6	0,4	0,4	0,3	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0,6	-0,8
2006	-0,9	-0,8	-0,6	-0,4	-0,1	0	0,1	0,3	0,5	0,8	0,9	0,9
2007	0,7	0,2	-0,1	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,8	-1,1	-1,3	-1,5	-1,6
2008	-1,6	-1,5	-1,3	-1	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	-0,2	-0,4	-0,6	-0,7
2009	-0,8	-0,8	-0,6	-0,3	0	0,3	0,5	0,6	0,7	1	1,4	1,6
2010	1,5	1,2	0,8	0,4	-0,2	-0,7	-1	-1,3	-1,6	-1,6	-1,6	-1,6
2011	-1,4	-1,2	-0,9	-0,7	-0,6	-0,4	-0,5	-0,6	-0,8	-1	-1,1	-1
2012	-0,9	-0,7	-0,6	-0,5	-0,3	0	0,2	0,4	0,4	0,3	0,1	-0,2
2013	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,3
2014	-0,4	-0,5	-0,3	0	0,2	0,2	0	0,1	0,2	0,5	0,6	0,7
2015	0,5	0,5	0,5	0,7	0,9	1,2	1,5	1,9	2,2	2,4	2,6	2,6
2016	2,5	2,1	1,6	0,9	0,4	-0,1	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,7	-0,6
2017	-0,3	-0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1	-0,1	-0,4	-0,7	-0,8	-1
2018	-0,9	-0,9	-0,7	-0,5	-0,2	0	0,1	0,2	0,5	0,8	0,9	0,8
2019	0,7	0,7	0,7	0,7	0,5	0,5	0,3	0,1	0,2	0,3	0,5	0,5
2020	0,5	0,5	0,4	0,2	-0,1	-0,3	-0,4	-0,6	-0,9	-1,2	-1,3	-1,2
2021	-1	-0,9	-0,8	-0,7	-0,5	-0,4	-0,4	-0,5	-0,7	-0,8	-1	-1
2022	-1	-0,9	-1	-1,1	-1	-0,9	-0,8	-0,9	-1	-1	-0,9	-0,8
2023	-0,7	-0,4	-0,1	0,2	0,5	0,8	1,1	1,3	1,6	1,8	1,9	2
2024	1,8	1,5	1,1	0,7	0,4	0,2	0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5

Fuente: Índice ONI (National Oceanic and Atmospheric Administration-NOAA, 2024),

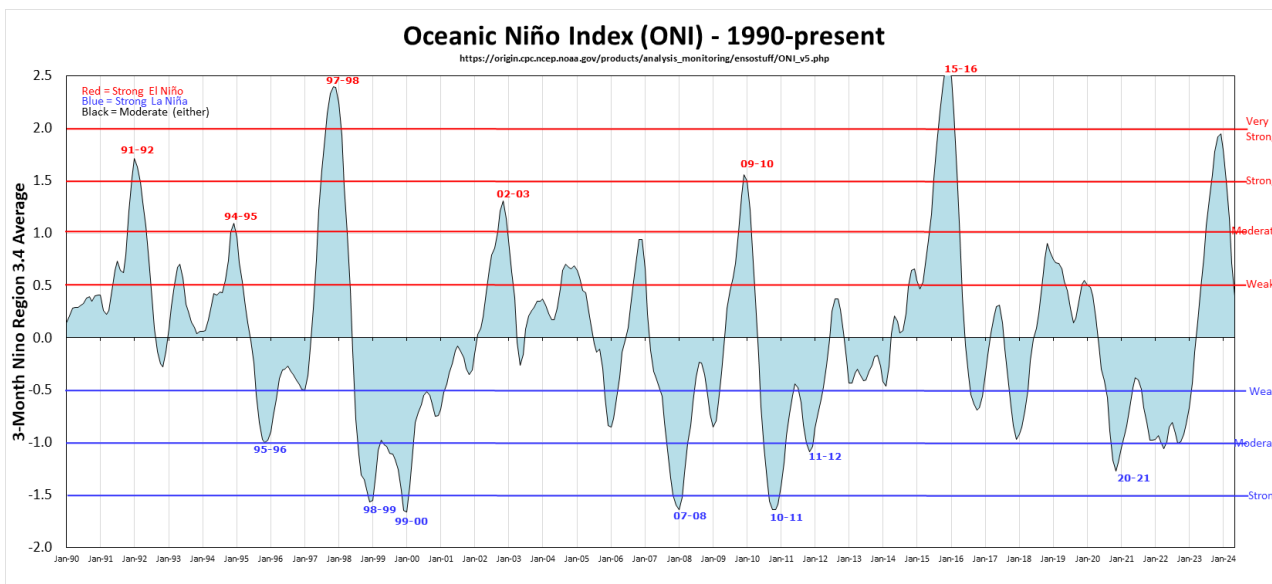


Figura 57, índice oceánico del niño (oni) 1990-2024,  
Fuente: Índice ONI (Golden Gate Weather Services, 2025),

#### 4.4.4 Modelo ARIMA imputación de datos faltantes (univariado)

Eliminados los datos en los puntos de cambio que no coinciden, debe imputarse nuevamente la información y series de precipitación máxima diaria suprimidos, Para lograr la completitud de datos, se utilizó el modelo *ARIMA* permitiendo integrar componentes autorregresivos y aleatorios en la modelación de la variabilidad temporal de una serie de tiempo, El modelo *ARIMA* (*Auto Regresive Integrated Moving Average*), deriva su nombre de sus tres componentes AR (Autoregresivo), I (Integrado) y MA (Medias Móviles), Este enfoque originalmente fue presentado por Box y Jenkins (1976), quienes señalan algunas aplicaciones de las series en el contexto de la naturaleza del sistema que genera las series, los pronósticos óptimos y las funciones de transferencia,

Para la estimación de los datos faltantes, se ha utilizado el *software* TSW+ (CAPORELLO & MARAVALL, 2025), TSW+ es un programa para el análisis estadístico de series de tiempo desarrollado por Gianluca Caporello y Agustín Maravall con enfoque *ARIMA* para la estimación de datos faltantes,

El modelo *ARIMA*  $(p,d,q)x(P,D,Q)_E$  puede describirse así:

$$\phi(B)\phi(B^E)\nabla^d\nabla_E^D Z_t = \theta(B)\theta(B^E)a_t$$

Para el caso particular del modelo, queda expresado:

$$\nabla^1\nabla_{12}^1 Z_t = (1 - \theta_1 B)(1 - \theta B^{12})a_t$$

En donde:

$Z_t$  = Es la serie de precipitaciones máximas mensuales

$A_t$  = Corresponde al componente aleatorio

$\nabla^1$  = Es el operador de diferencia de orden 1 no estacional

$\nabla_{12}^1$  = Es el operador de diferencia de orden 1 estacional (E=12)

$\theta_1$  = Es el coeficiente no estacional vinculado con  $a_t$

$\Theta_1$  = Es el coeficiente estacional vinculado con  $a_t$

De esta forma, se expresa la variabilidad de las series de tiempo de precipitación diferenciada como la suma ponderada de choques aleatorios representados en los  $\alpha'_t S$ , donde los valores de los coeficientes representan las ponderaciones,

Este modelo supone que la serie de tiempo que se modela  $Y_t = \nabla^d \nabla_E^D Z_t$  es una serie de tiempo estacionaria, Acorde con Montgomery et al, (2008) y citado por (Bernal S. y otros, 2021), es aquella que “muestra una variabilidad similar en el tiempo, caracterizado por una distribución de probabilidad constante en el tiempo”, Se define como estacionaria (débil) si satisface: i) el valor esperado de la serie no depende del tiempo y ii) la función de auto-covarianza definida como  $Cov(y_t, y_{t+k})$  para cualquier rezago  $k$  es solo función de  $k$  y no del tiempo; así  $\gamma_y(k) = Cov(y_t, y_{t+k})$ ,

Para la validación de los supuestos, se emplearon las siguientes pruebas estadísticas según (Bernal S. y otros, 2021): i) normalidad de los residuales: Shapiro-Wilk (1965); ii) no auto-correlación de los residuales: Ljung-Box (1978); y iii) varianza constante: prueba de Levene (1960),

Los resultados para la estimación de datos faltantes modelo ARIMA, se adjunta en anexo a este documento,

#### 4.4.4.1 Homogenización y consistencia de datos de precipitación

Los análisis de homogeneidad de series hidrológicas son un aspecto fundamental en los análisis hidrológicos y deben realizarse previamente a cualquier otro análisis, con el objetivo de determinar la calidad de la información hidrológica que se está utilizando, Los análisis hidrológicos serán tan buenos como la información hidrológica que se use (Smith & Campuzano , 2000), Indican (Valderrama C. y otros, 2022), que es de suma importancia identificar y ajustar las in-homogeneidades en las series de datos hidro-climatológicos, estos registros a largo plazo a menudo contienen variaciones causadas por cambios en la exposición del sitio, la ubicación de las estaciones, la instrumentación, el cambio de observador, cambios en el instrumental y los procedimientos de observación, por tal manera es imprescindible la homogeneización de los datos (Coll, y otros, 2020) (Oscar, 2018) citados por (Valderrama C. y otros, 2022),

#### 4.4.4.2 Prueba de *Buishand* (Prueba de desviaciones acumuladas)

La prueba de Buishand (1982) puede utilizarse con variables que siguen cualquier tipo de distribución, Sin embargo, sus propiedades se han estudiado especialmente para el caso normal, En su artículo, Buishand se centra en el caso de la prueba bilateral, pero para el estadístico  $Q$  presentado a continuación, también son posibles los casos unilaterales, Buishand desarrolló un segundo estadístico,  $R$ , para el cual solo es posible una hipótesis bilateral,

En el caso de la estadística  $Q$ , las hipótesis nula y alternativa vienen dadas por:  $H_0$ : Las variables  $T$  siguen una o más distribuciones con la misma media, Prueba bilateral:  $H_a$ : Existe un tiempo  $t$  a partir del cual las variables cambian de media, Prueba de cola izquierda:  $H_a$ : Existe un tiempo  $t$  a partir del cual la media de las variables se reduce en  $D$ , Prueba de cola izquierda:  $H_a$ : Existe un tiempo  $t$  a partir del cual la media de las variables se aumenta en  $D$ ,

Tamaño muestra $n$	$Q/\sqrt{n}$			$R/\sqrt{n}$		
	90 %	95 %	99 %	90 %	95 %	99 %
10	1.05	1.14	1.29	1.21	1.28	1.38
20	1.10	1.22	1.42	1.34	1.43	1.60
30	1.12	1.24	1.46	1.40	1.5	1.70
40	1.13	1.26	1.5	1.42	1.53	1.74
50	1.14	1.27	1.52	1.44	1.55	1.78
100	1.17	1.29	1.55	1.50	1.62	1.86
$\infty$	1.22	1.36	1.63	1.62	1.75	2.0

Figura 58, Valores críticos de la prueba de desviaciones acumuladas,  
Fuente: (Buishand, 1982),

Los análisis y homogenización de series de precipitación se presentará en anexo “Estudios hidrológicos e hidráulicos”,

#### 4.4.5 Lluvias máximas en 24 horas – Análisis de estacionariedad

El análisis y ajuste de las series de tiempo de precipitación máxima diaria a nivel mensual para la cuenca Lili-Meléndez-Cañaveralejo aplica la metodología propuesta por (Bernal S. y otros, 2021) consistente en: 1, Estimar los datos faltantes detectando los puntos de cambio a través de la prueba estadística de *Worsley* para comprobar si coinciden con periodos de fenómenos de El Niño o La Niña, Además, se establece la hipótesis de que cuando los cambios no son influenciados por la ocurrencia de dichos eventos, estas variaciones se deben principalmente a alteraciones en las condiciones de la estación o a errores de lectura o posicionamiento asociados al uso de instrumentos análogos, 2, Luego de detectar los puntos de cambio y de verificar su coincidencia con la ocurrencia de fenómenos ENOS, se homogenizan las series, 3, Análisis y ajuste de los valores máximos de la serie de lluvias máximas en 24 horas a una distribución de probabilidad de valores extremos,

Es importante señalar que el uso de las distribuciones de valores extremos se aplica en el contexto espacial, a fin de determinar probabilidades de ocurrencia de eventos extremos, y es allí donde cobra relevancia el resultado de periodos de retorno que estiman para cada mes del año; por esta razón, estos valores estimados no se consideran en años, Se utiliza la opción para el ajuste a una distribución de probabilidad general de valores extremos y se estiman los periodos de retorno a nivel puntual (10, 20, 50, 100 años) y por intervalo (nivel de confianza de 95%), Finalmente, se emplean modelos probabilísticos de valores extremos (GEV) para el análisis de los valores de máximos,

#### **4.4.5.1 Procesos estacionarios**

Un proceso estocástico ( $Y_t$ ) es estacionario cuando las propiedades estadísticas de cualquier secuencia finita  $Y_{t1}, Y_{t2}, \dots, Y_{tn}$  ( $n \geq 1$ ) de componentes de ( $Y_t$ ) son semejantes a las de la secuencia  $Y_{t1+h}, Y_{t2+h}, \dots, Y_{tn+h}$  para cualquier número entero  $h = \pm 1, \pm 2, \dots$ , De acuerdo con la definición anterior, se pone de manifiesto que cuando un proceso estocástico es estacionario, sus propiedades estadísticas se simplifican notablemente con respecto a las de un proceso que no sea estacionario, lo cual facilita la descripción de su estructura probabilística completa a partir de una única realización finita del mismo, En general, una condición necesaria para que un proceso sea estacionario es que la esperanza incondicional de cada uno de sus componentes exista y sea la misma a lo largo de toda la historia del proceso,

#### **4.4.5.2 Procesos no estacionarios**

Un proceso estocástico ( $Y_t$ ) no estacionario se da cuando las propiedades estadísticas de al menos una secuencia finita  $Y_{t1}, Y_{t2}, \dots, Y_{tn}$  ( $n \geq 1$ ) de componentes de ( $Y_t$ ) son diferentes a las de la secuencia  $Y_{t1+h}, Y_{t2+h}, \dots, Y_{tn+h}$  para al menos número entero  $h > 0$ , En general, una condición suficiente para que un proceso sea no estacionario es que la esperanza incondicional de algunos de sus componentes sea distinta de la de otros, Al menos por este motivo, las propiedades estadísticas de un proceso no estacionario son más complicadas que las de un proceso estacionario, No obstante, si la no estacionariedad de un proceso puede modelarse de alguna forma sencilla (por ejemplo, transformando adecuadamente dicho proceso para convertirlo en uno estacionario), entonces es posible describir su estructura probabilística completa a partir de una única realización finita del mismo, Dado que las propiedades estadísticas de un proceso no estacionario son muy diferentes de las de uno estacionario, uno de los primeros pasos en el análisis de series temporales consiste en determinar si cada una de las series consideradas resulta o no compatible con la hipótesis de estacionariedad,

#### **4.4.5.3 Prueba de Mann-Kendall (MK) – (en la media)**

La prueba no-paramétrica de Mann-Kendall (MK) ha sido ampliamente usada en estudios de identificación de tendencia en series de variables hidro-meteorológicas, Como antecedente, se puede señalar que ha sido recomendada por la Organización Meteorológica Mundial-OMM para su aplicación en series de variables meteorológicas e hidrológicas,

La hipótesis nula de esta prueba establece que las observaciones son variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas, Tiene como objetivo detectar la tendencia al incremento o al decrecimiento en la serie de datos, La prueba de Mann-Kendall (MK) está basada en la estadística  $S$ , Cada par de valores observados  $y_i, y_j$  ( $i > j$ ) de la variable aleatoria es inspeccionado para encontrar cuando  $y_i > y_j$  o  $y_i < y_j$ , Si el número de pares positivos es  $P$ , y el número del tipo de pares negativos es  $M$ , entonces la  $S$  es definida como  $S = P - M$ , Para  $n > 10$ , se puede definir una estadística  $Z$  que sigue la distribución estándar normal donde,

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sigma_s} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sigma_s} & \text{si } S < 0 \end{cases}$$

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}$$

El Test de Mann-Kendall (MK) proporciona un valor de significancia,  $p$ -value, así un valor de  $p$ -value inferior a 0,05-0,1 garantiza que la hipótesis adoptada tiene altas garantías de veracidad; a medida que este valor se hace más grande, las probabilidades van disminuyendo; hasta que, llegando al valor 1, la probabilidad es nula,

#### 4.4.5.4 Teoría de los valores extremos (EVA)

Con el fin de evaluar el comportamiento estadístico de variables hidrológicas se utilizan funciones de distribución de probabilidades, concretamente en la estimación de la frecuencia de ocurrencia de eventos extremos, En el enfoque clásico, se asume la estacionariedad del fenómeno y la recurrencia de los máximos se estiman a partir de una función de distribución de probabilidad que se selecciona entre varias candidatas a partir de la aplicación de distintos criterios de bondad de ajuste, no obstante, existen circunstancias en donde los valores extremos son generados por distribuciones formadas por dos o más poblaciones, considerando en estos casos la aplicación de una distribución de probabilidad mixta para modelar la probabilidad de excedencia, Cada población queda caracterizada por alguna(s) diferencia(s) en la génesis del fenómeno en cuestión y el modelo probabilístico pasa a ser mixto, A lo anterior, se agrega que la no-estacionariedad de la(s) serie(s) las hipótesis que se realizan en el análisis clásico sufren desviaciones y el modelo estándar pierde utilidad y representatividad,

En el presente trabajo se usa la metodología planteada por Waylen y Caviedes (1990) citado por (Poveda J. & Álvarez V., 2006), para la estimación de la precipitación máxima en 24 horas de distinto periodo de retorno, usando una función de distribución de probabilidades mixta generalizadas de valores extremos (GEV), La teoría de valores extremos es una

disciplina única que utiliza técnicas y modelos para describir los sucesos poco comunes (Coles, 2001), La mayoría de los estudios estadísticos tratan de la modelación del promedio de la distribución de la variable de interés, el cual se estima con la media muestral, en la EVA, el objetivo principal está en los eventos asociados a la cola de la distribución examinando los datos atípicos disponibles para poder predecir datos extremos en el futuro (Gumbel, 1958),

#### 4.4.5.5 Distribuciones generalizadas de valores extremos (GEV)

Esta distribución se utiliza a menudo para modelar el valor más pequeño o más grande entre un gran conjunto de valores aleatorios independientes e idénticamente distribuidos que representan mediciones u observaciones, La distribución generalizada de valores extremos (GEV) combina las tres posibles distribuciones asintóticas de valores extremos que se obtienen como límites tomados muestras de tamaño creciente, Estos tres tipos son la distribución Gumbel (EV-1) para  $\kappa = 0$ , Fréchet (EV-2) para  $\kappa < 0$  y Weibull (EV-3) para  $\kappa > 0$ , Las distribuciones GEV son:

$$H(x) = \begin{cases} \exp\left\{-\exp\left[-\frac{x-\psi}{\lambda}\right]\right\}, & k = 0 \\ \exp\left\{-\left[1 - \frac{k(x-\psi)}{\lambda}\right]^{1/k}\right\}, & k < 0, x > \psi + \lambda/k \\ \exp\left\{-\left[1 - \frac{k(x-\psi)}{\lambda}\right]^{1/k}\right\}, & k < 0, x < \psi + \lambda/k \end{cases}$$

Donde:

$H(x)$  = Distribución generalizada de valores extremos (GEV),

$x$  = Valor extremo,

$k$  (*Kappa*) = Parámetro de forma,

$\psi$  (*psi*) = Parámetro de ubicación,

$\lambda$  (*lambda*) = Parámetro de escala,

Este teorema es conocido como *Teorema de Valores Extremos* o *Teorema de Fisher-Tippett-Gnedenko*, estas tres clases de distribuciones son las del Tipo I familia de Gumbel, Tipo II familia de Fréchet y las del Tipo III familia de Weibull, el conjunto de estas familias de distribuciones es conocida como distribución de los valores extremos generalizada o GEV por sus siglas en inglés, Para observar diferencias significativas entre las distribuciones ajustadas y las observadas, se aplicó la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov, Esta prueba se empleó con un nivel de significancia de 1, 5 y 10%,

Para los análisis de las precipitaciones máximas en una estación de medida, se utilizan las funciones de distribución de probabilidad para establecer un comportamiento matemático de esta variable, estos análisis sirven para determinar la magnitud de las precipitaciones en una

frecuencia de tiempo determinada, estos resultados son los que se usan para el diseño de las obras hidráulicas que se ven afectadas por procesos hidrológicos,

Para determinar las precipitaciones máximas, se analizan estadísticamente los registros en donde se cuente con información de estaciones hidrométricas que suministren una serie de datos que permitan establecer con qué frecuencia podrían tomar un valor determinado y luego evaluar las probabilidades teóricas, Las bases matemáticas que se presentan a continuación son las establecidas en el libro de Hidrología Aplicada de Ven Te Chow (CHOW, 1994),

Los registros pueden ser clasificados en orden descendente y a cada uno se le puede atribuir un número de orden, La frecuencia con que sea igualado o superado un evento de orden  $i$  es:

Frecuencia (Utilizando el Método de California):  $F(x \geq x_i) = i/n$

Siendo  $n$  el número total de datos de la muestra,

A cada uno de los valores de la serie le corresponde un periodo de retorno  $T$  asociado, dependiendo de la posición  $m$  que dicho valor ocupe dentro de la serie de  $n$  datos, De esta forma existen varias expresiones para determinar  $T$ , Las más conocidas son: California y Weibull:

$$California = \begin{cases} p = \frac{m}{n} \\ T = \frac{n}{m} \end{cases}$$

$$Weibull = \begin{cases} p = \frac{m}{n+1} \\ T = \frac{n+1}{m} \end{cases}$$

Con la frecuencia calculada, se tiene una muy buena aproximación de la probabilidad teórica de la igualación o excedencia de una precipitación determinada, Ahora, se define un tiempo de recurrencia o periodo de retorno  $T$  como el periodo de tiempo promedio en que un determinado evento es igualado o superado por lo menos una vez, Este periodo se define en años,

$$T = 1/F(x \geq x_i)$$

Para periodos de retorno menores que el número de años de observaciones, el valor encontrado para la Frecuencia puede dar una buena idea del valor real de la Probabilidad Teórica, pero para periodos de retorno mayores, la repartición de frecuencia debe ser ajustada a una distribución probabilística teórica, de tal forma que se pueda hacer un cálculo más correcto de las probabilidades,

#### 4.4.5.6 Análisis de valores extremos de precipitación máxima en 24 horas

Esta etapa consiste en ajustar los valores máximos de las series de precipitación previamente completadas y homogenizadas a una distribución de probabilidad de valores extremos, considerando los valores máximos de precipitación en 24 horas del conjunto de estaciones meteorológicas localizadas en la zona de estudio, con el objetivo de obtener los valores de precipitación correspondiente a los periodos de retorno de 2, 10, 20, 50 y 100 años,

Para iniciar, se seleccionaron los valores máximos de cada serie por cada mes y estos se toman como una nueva serie y se procesa con la librería *R* (R Core Team, 2025) “*extRemes*” (Gilleland & Katz, 2016), Se utiliza la opción para el ajuste a una distribución de probabilidad general de valores extremos y se estiman los periodos de retorno a nivel puntual y por intervalo (nivel de confianza del 955), El grado de bondad de ajuste del modelo probabilístico de valores extremos se evalúa a través del criterio de información bayesiano (BIC) y el criterio de información Akaike (AIC) (entre menor sea el valor de estos criterios mejor ajuste tendrá el modelo),

Los resultados obtenidos de la aplicación de este modelo se anexan en el “Estudios hidrológicos e hidráulicos”,

#### 4.4.6 Regionalización hidrológica de la precipitación

La regionalización hidrológica es un proceso mediante el cual, aplicando herramientas estadísticas e IA se explora la información existente permitiendo estimar la precipitación en lugares carentes de información, la regionalización, se apoya en el concepto de homogeneidad hidrológica que permite dividir un territorio en regiones climáticas y topográficas similares,

En este capítulo se presenta la regionalización de las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para las Comunas 18 y 20 de la ciudad de Cali a partir del uso de Redes Neuronales Artificiales-RNA, para lo cual, se toma como área de evaluación y estudio el polígono de cada comuna, es decir, se crea una estación meteorológica “*virtual*” por comuna, Previamente, se ha realizado el cálculo de las curvas IDF a partir del análisis de las intensidades registradas en los pluviógrafos de ocho (8) estaciones meteorológicas ubicadas en la región, En la regionalización de las intensidades para la zona de estudio, se aplica un método basado en Inteligencia Artificial (IA) de los registros diarios (24h) en función de las variables topográficas y geográficas de la región (altitud, latitud y longitud),

##### 4.4.6.1 Resultados de red RNA

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la fase de entrenamiento y simulación, especificando detalles de los modelos generados como la estructura, la raíz cuadrada del error cuadrático medio [RMSE], el [NSE] y el  $r^2$  durante la ejecución de los modelos, El tipo de red utilizada para el proceso de reconstrucción de información, corresponde a la red *Perceptrón Multicapa (MLP)* con el algoritmo de aprendizaje

*Backpropagation* (4-8-1), el uso de la función de activación *logística/sigmoide*, un ciclo de entrenamiento (épocas) de 350,000 iteraciones y una tasa de 0,080,

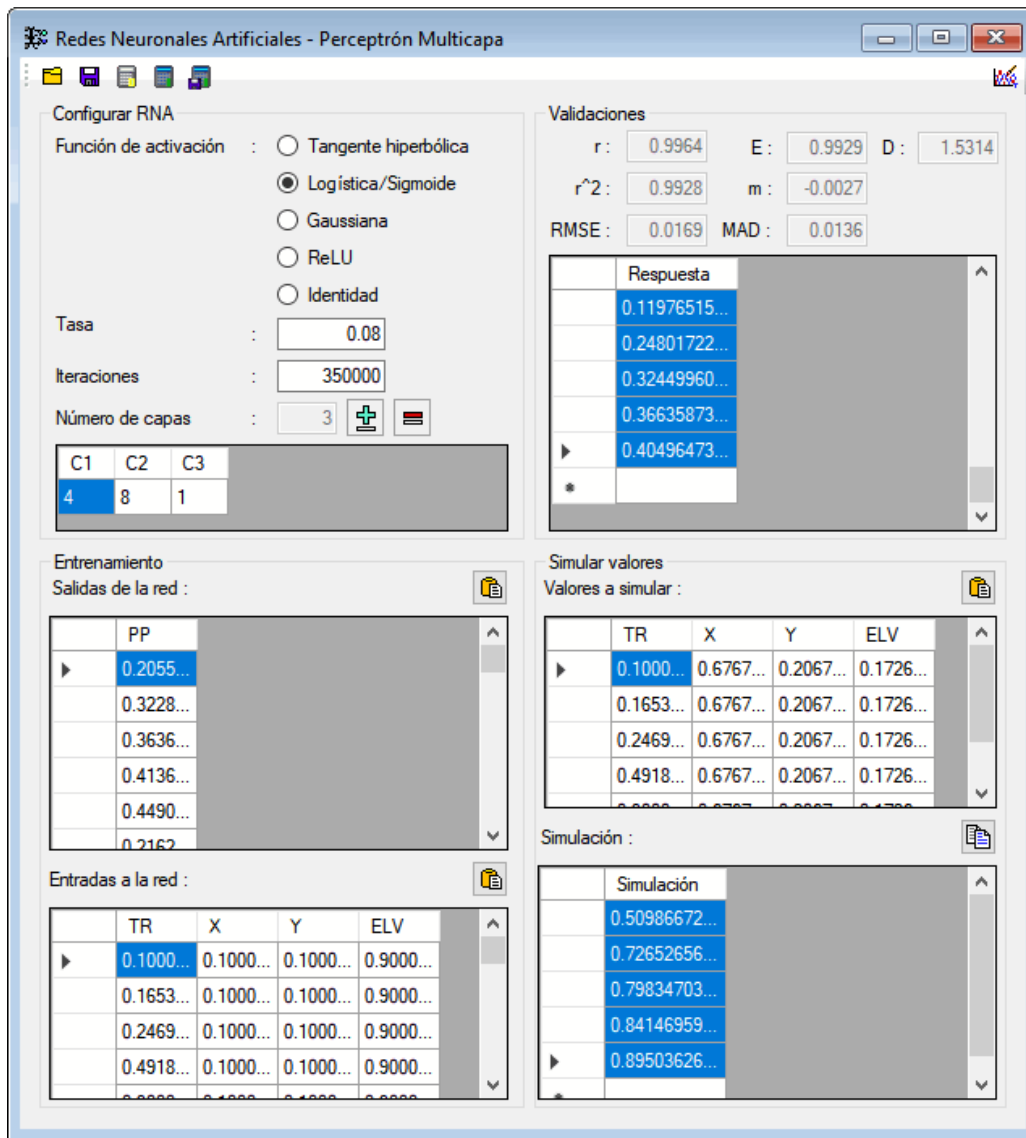


Figura 59, Resultados rna, entrenamiento y simulación-regionalización de la pmax 24h,

Fuente: Elaboración propia

El parámetro estadístico empleado para evaluar los resultados de la calibración y validación, recomendado por (Moriassi et al, 2007; Debels, 2010) es el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (1970):

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (S_i^{Observado} - S_i^{Simulado})^2}{\sum_{i=1}^n (S_i^{Observado} - S_i^{Promedio})^2} \right] [Ec, 1]$$

Los índices de error utilizados en la evaluación del modelo de acuerdo al índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (1970), se describen en el siguiente cuadro:

Tabla 36, Índices de eficiencia de NASH-SUTCLIFFE,

NSE	Interpretación del modelo
$0,75 < NSE \leq 1,0$	Muy bueno
$0,65 < NSE \leq 0,75$	Bueno
$0,50 \leq NSE \leq 0,65$	Satisfactorio
$NSE < 0,50$	No satisfactorio

Fuente: (Moriasi et al, 2007),

Como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) corresponde a 0,9929 evaluando los resultados del modelo utilizado como “Muy bueno”,

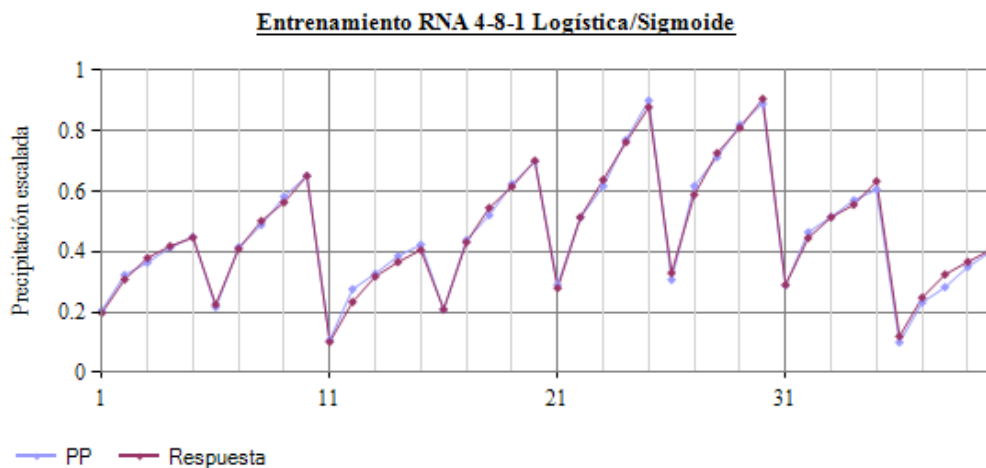


Figura 60, Gráfica Resultados RNA 4-8-1 Entrenamiento – Simulación PMAX24H,

Fuente: Elaboración propia

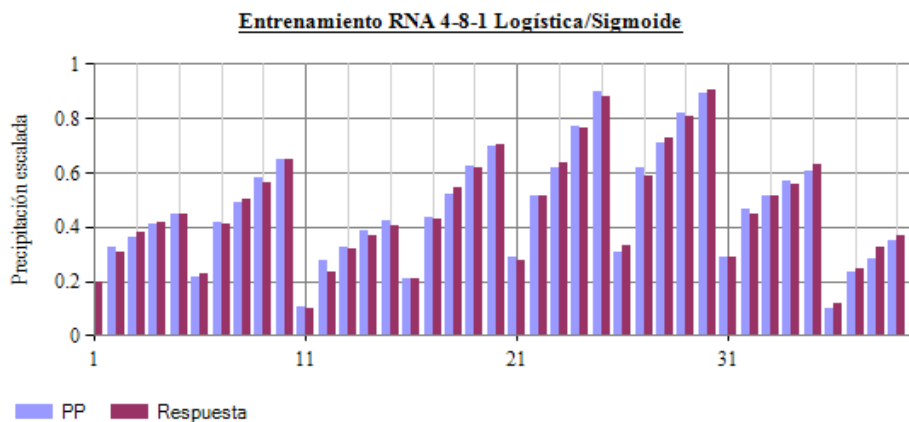


Figura 61, Gráfica Resultados RNA 4-8-1 Entrenamiento – Simulación PMAX24H,

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37, Lluvia Máxima para Diferentes Duraciones,

Tr (años)	PPmáx24h (mm)	5 min	15 min	60 min	120 min	180 min	360 min
2	138,38	33,5912	44,2085	62,5202	74,3495	82,2812	97,8494
10	182,08	44,1992	58,1694	82,2639	97,8288	108,2654	128,75
20	196,56	47,7141	62,7953	88,806	105,6087	116,8753	138,9889
50	205,26	49,826	65,5747	92,7367	110,2831	122,0483	145,1407
100	216,06	52,4477	69,025	97,6161	116,0858	128,47	152,7775

Fuente: Elaboración propia

Tabla 38, Intensidades Máximas para Diferentes Duraciones,

Tr (años)	5 min	15 min	60 min	120 min	180 min	360 min
2	403,0944	176,834	62,5202	37,1748	27,4271	16,3082
10	530,3904	232,6776	82,2639	48,9144	36,0885	21,4583
20	572,5692	251,1812	88,806	52,8044	38,9584	23,1648
50	597,912	262,2988	92,7367	55,1416	40,6828	24,1901
100	629,3724	276,1	97,6161	58,0429	42,8233	25,4629

Fuente: Elaboración propia

**Curva IFD - Comuna 18 (Cali)**

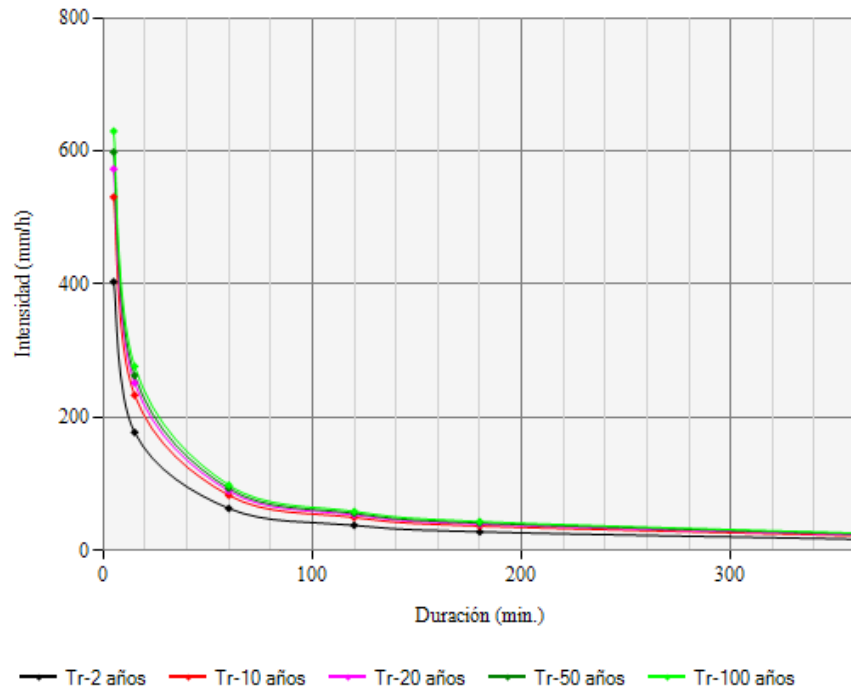


Figura 62, Curva IDF – Estación Virtual Comuna 18 (CRITERIO GROBE),

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.6.2 Ecuación de ajuste para IDF – estación “virtual” Comuna 18 (criterio de Grobe)

$$I = \frac{1305,8448 \times Tr^{0,1119}}{Tc^{0,7500}}$$

Donde:

- I = Intensidad en mm/hr,  
Tr = Periodo de retorno (Años)  
Tc = Tiempo de concentración (minutos)

$$\text{Ajuste: } R^2 = 0,9987$$

#### 4.4.6.3 Clasificación de coberturas, uso del suelo y número de curva CN

Una de las mayores fuentes de incertidumbres asociadas al uso del método del número de curva del NRCS constituye la asignación del grupo hidrológico al que pertenece a cada uno de los tipos de suelos, debido principalmente a la escasez de información disponible y a las diversas alternativas recogidas en bibliografía para su determinación, junto con la necesaria adaptación a los cuatro (4) grupos existentes en la metodología (Durán-Barroso & González, 2015), El método del Número de Curva del Natural Resources Conservation Service, anterior Soil Conservation Service SCS, del Departamento de Agricultura Americano (NRCS, 2009), NRCS-CN, constituye el procedimiento más empleado a nivel mundial en el campo de la Ingeniería Hidrológica para la evaluación de la transformación lluvia escorrentía, Su alto grado de implantación se debe a la simplicidad de su uso, estando tabulado el parámetro del que depende (Número de Curva, CN) para distintas características del suelo, uso y condiciones superficiales presentes en la cuenca, Un aspecto a tener en cuenta cuando se implementa el modelo empleando la tabla de referencia existente para el parámetro del número de curva es que dicha tabla fue generada en los años 50 y 60 para cuencas rurales ubicadas en Estados Unidos, y cuyos usos principales eran eminentemente agrícolas, y en menor medida, pastizales y bosques.

Para Durán-Barroso & González, 2,015, la reclasificación de los distintos tipos de suelo en torno a 4 grandes grupos hidrológicos (A, B, C y D), fue propuesta inicialmente en Musgrave (1955), siendo modificada posteriormente al incorporarle diversas variables con las que llevar a cabo la delimitación de los grupos (Mongil and Navarro, 2012; Gómez-Sanz and Roldán-Soriano, 2013), tales como la textura del suelo (Brakensiek and Rawls, 1983; Témez, 1987; MOPU, 1990; MOPT, 1992), la conductividad hidráulica saturada (Nearing et al., 1996; Ferrer Julià et al., 2004; NRCS, 2009) o la profundidad de la capa impermeable (NRCS, 2009), Sin embargo, la descripción no llega a ser suficiente para la correcta determinación de las características de los mismos y la información disponible en algunos casos es insuficiente para la toma de decisiones, dando lugar a una gran indefinición en

cuanto al tipo de suelo a utilizar debido a la subjetividad asociada a la misma (Hawkins et al., 2009).

Los valores de Número de Curva-CN para las unidades de cobertura y grupos de suelos presentes en el área de evaluación han sido adaptados del manual técnico de referencia: *Hydrologic Modeling System HEC-HMS* (Feldman, 2000).

Tomando como dato de entrada el análisis de coberturas y uso del suelo desarrollado por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca en su portal web *GeoCVC* (<https://geo.cvc.gov.co/portal/apps/sites/#/portal-geocvc>), se genera el mapa de coberturas y uso de suelo predominante en el sector valorado, El mapa de cobertura de la tierra, de acuerdo con la clasificación metodológica Corine Land Cover-CLC, contiene una estructura que permite generar información de cobertura y uso del suelo a nivel de cuenca hidrográfica con una escala 1:25,000, La metodología se soporta en la interpretación visual, la utilización de procesamiento de imágenes de satélite y fotografías aéreas ortorectificadas, soportadas en el trabajo de campo utilizando GPS para la captura de puntos, líneas y toma de fotografías en terreno para registro de los cambios en la cobertura y uso del suelo por parte de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca-CVC, 2025).

En la figura siguiente, se discrimina la clasificación de coberturas para la Comuna 18, de manera equivalente, conteniendo los mapas uso del suelo predominante en la zona de estudio.

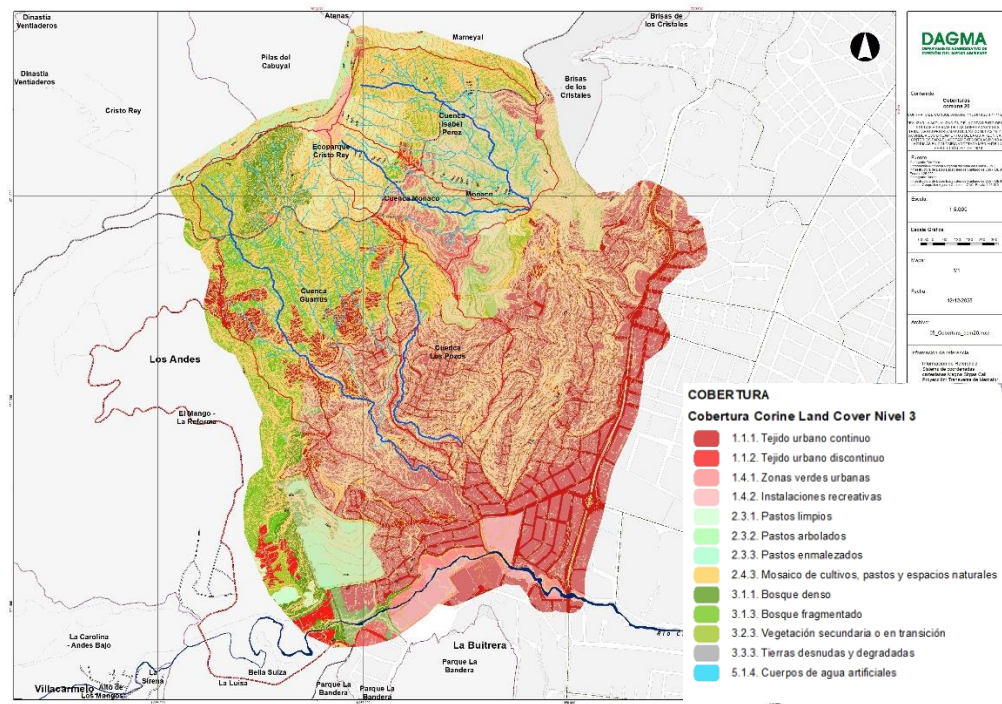


Figura 63, Clasificación Coberturas y Uso del Suelo-Comuna 20.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 39, Distribución del tipo de coberturas y uso del suelo.

CLC	COBERTURA	ÁREA (Ha.)	ÁREA (%)
111	Tejido urbano continuo	303,45	52,90%
112	Tejido urbano discontinuo	20,659	3,60%
121	Zonas industriales o comerciales	2,744	0,48%
122	Red vial y territorios asociados	3,635	0,63%
141	Zonas verdes urbanas	15,461	2,70%
231	Pastos limpios	31,094	5,42%
232	Pastos arbolados	11,421	1,99%
233	Pastos enmalezados	7,623	1,33%
311	Bosque denso	28,222	4,92%
312	Bosque abierto	0,989	0,17%
313	Bosque fragmentado	87,62	15,27%
323	Vegetación secundaria o en transición	60,742	10,59%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40, Números de curva para usos de suelo.

CLC	USO DEL SUELO	A	B	C	D
111	Tejido urbano continuo	98	98	98	98
112	Tejido urbano discontinuo	77	86	91	94
121	Zonas industriales o comerciales	85	90	92	94
122	Red vial y territorios asociados	83	89	92	93
141	Zonas verdes urbanas	30	58	71	78
231	Pastos limpios	68	79	86	89
232	Pastos arbolados	68	79	86	89
233	Pastos enmalezados	68	79	86	89
311	Bosque denso	30	55	70	77
312	Bosque abierto	45	66	77	83
313	Bosque fragmentado	45	66	77	83
323	Vegetación secundaria o en transición	36	60	73	79

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.7 Mapas de textura de suelos

De acuerdo al mapa de textura de suelos para Colombia, generado bajo el enfoque de Mapeo Digital del Suelo (MDS) a nivel de textura del suelo (arena, limo y arcilla), y basado en la geomorfología del mismo (Mayesse y otros, 2015), se han diferenciado las unidades de suelo para las cuencas y áreas en valoración. Los mapas de textura, desarrollados por el Centro Internacional de Agricultura Tropical-CIAT en el marco de la clasificación de suelos para áreas de cultivo de arroz en Colombia, fueron diferenciados por formas del terreno usando un DEM SRTM de 90 m de resolución y, además, estratificadas por unidades geopedológicas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

El mapa de textura de suelos para Colombia (Mayesse y otros, 2015), se han diferenciado las unidades de suelo para las cuencas en valoración, Los mapas digitales de textura del suelo, según descripción del producto, fueron generados usando el enfoque de lógica difusa, donde se determinaron estadísticamente los límites de los valores de las clases de porcentaje de pendiente, índice de humedad y altura normalizada en cada una de las unidades de suelo, Se usaron datos heredados de perfiles de suelos de IGAC, para determinar los valores de calibración del modelo de mapeo (80% del total de los datos) para arena, limo y arcilla, así como para validar el 20% del total de los datos según el enfoque de MDS, La raíz del error medio cuadrado (RMSE) fue 21, 12 y 15 % para arena, limo y arcilla respectivamente, valores que son iguales a la desviación estándar de los datos de campo, (Centro Internacional de Agricultura Tropical-CIAT).

Es en este contexto, y dada la necesidad de valorar los procesos de transformación lluvia-escorrentía en las cuencas focalizadas, se han adaptado los resultados de la investigación para la clasificación de suelos para áreas de cultivo de arroz en Colombia adelantados por el CIAT para los fines de asignación del grupo hidrológico al que pertenece a cada uno de los tipos de suelos,

La figura siguiente, corresponde al objeto geográfico *Mapa de Clasificación Textural de suelos*, En forma general, el mapa es agrupado en categorías, dependientes de su textura y de su capacidad de infiltración de acuerdo a lo indicado por (Bradbury K. y otros, 2000), (Villón B., 2010) y (Victoria N. y otros, 2023) (*Ver tabla siguiente*).

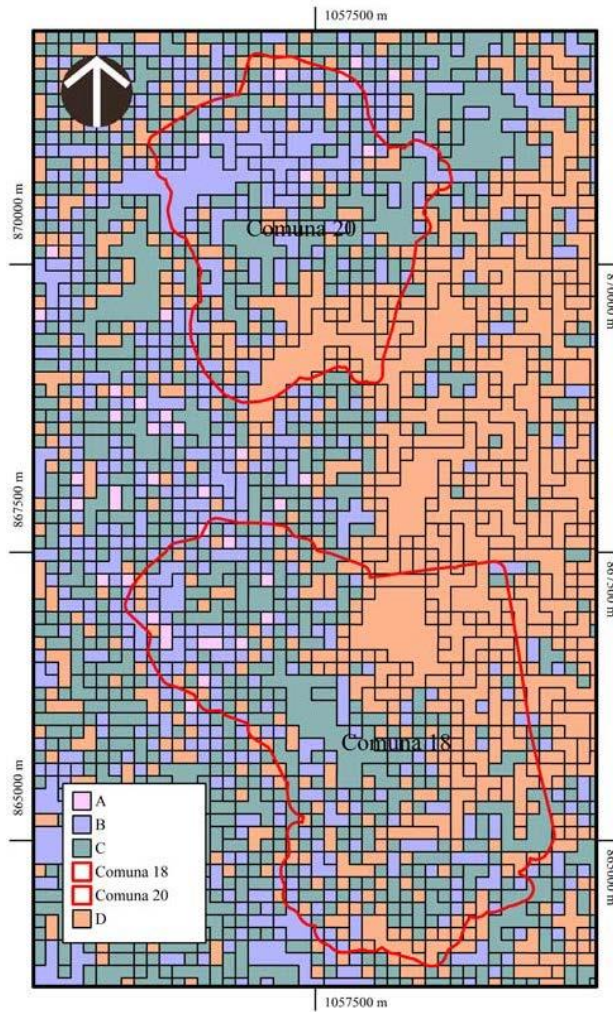


Figura 64, Clasificación Textural de los Suelos.

Fuente: Elaborado a partir de la “Clasificación de suelos para áreas de cultivo de arroz en Colombia” (Mayesse y otros, 2015).

Tabla 41, Grupos hidrológicos del suelo.

Grupo	Infiltración	Textura
A	Rápida	Arenosa Areno-limosa
B	Moderada	Franco-arenosa Franca Franco-arcillosa-arenosa Franco-limosa

C	Lenta	Franco-arcillosa Franco-arcillo-limosa Arcillo-arenosa
D	Muy lenta	Arcillosa

Fuente: Refinement of two methods for estimation of groundwater recharge rates (Bradbury K. y otros, 2000),

#### 4.4.8 Numero de curva CN

Para el procesamiento y valoración del número de curva, se ha utilizado el método y pasos indicados por (Merwade, 2012), utilizando el software ArcGIS 10,7 (Environmental Systems Research Institute Inc., 1999-2017) y HEC-GeoHMS para ArcGIS, el cual, a partir de la información básica vectorial de la distribución textural de suelos, y de la clasificación de uso de suelo y coberturas, automatiza el cálculo y ponderación del número de curva (CN), El software hace la combinación de las coberturas de tipo y uso de suelo, solo se tiene que especificar los dos nombres de los archivos a fusionar, el programa genera un número de curva que es el que se utiliza como valor relativo de la cuenca para producir escurrimiento directo, La metodología básica parte de asociar un tipo de suelo a un uso de suelo, obteniendo el número de curva que será multiplicado por el área en porcentaje con respecto del área total, esto se hace para todos los usos de suelo, donde al término solo se suman los valores obtenidos, Con la cobertura de uso de suelo y tipo de suelo se obtuvieron los resultados de la siguiente tabla.

Tabla 42, Numero de curva.

CUENCA	NOMBRE	CN
Cuenca 1	Santa Elena 1	86,80
Cuenca 2	Indumil	86,32
Cuenca 3	Santa Elena 2	82,69
Cuenca 4	Santa Elena 3	82,10
Cuenca 5	La Academia	74,66
Cuenca 6	El indio	96,88
Cuenca 7	Hospital	86,26
Cuenca 8	La Guillermina	79,31
Cuenca 9	Guarrús	79,71
Cuenca 10	Los Pozos	90,71
Cuenca 11	Mónaco	78,21
Cuenca 12	Isabel Pérez	72,84

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.9 Análisis de caudales

#### 4.4.10 Hoyas hidrográficas y tiempos de concentración

##### 4.4.10.1 Hoyas hidrográficas

El Manual de drenaje para carreteras (Instituto Nacional de Vías-INVIAS, 2009) indica: “La hoya hidrográfica es el ente físico natural de todo cálculo en hidrología, Se define como un área limitada topográficamente, drenada por un curso de agua o un sistema de cursos de

*agua, tal que todo el caudal efluente es descargado a través de una salida simple, localizada en el punto más bajo de la misma, El límite topográfico es la divisoria, la cual se define como la línea que separa las precipitaciones que caen en hoyas inmediatamente vecinas, y que encaminan la escorrentía resultante para uno u otro sistema fluvial”*,

De acuerdo a las doce (12) cuencas focalizadas y cierre hidrológico específico, las hoyas hidrográficas corresponden a la proyección horizontal de las áreas de drenaje del sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural y los sitios que recogen toda la escorrentía que se produce para una cuenca hidrográfica específica, en el presente estudio, y para las obras menores de drenaje y estructuras viales, se definen las áreas de drenaje, puntos de cierre hidrológico y tiempos de concentración de acuerdo al sistema de coordenadas (Magna-Sirgas origen Cali) y localización indicados en la tabla 50, El procesamiento de la información morfométrica se ha realizado a través del SIG ArcGIS 10,7 (Environmental Systems Research Institute Inc., 1999-2017),

Aunque ya se ha hecho referencia en el parágrafo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** del concepto y ecuaciones empíricas del cálculo del tiempo de concentración  $T_c$ , se complementa lo indicado resaltando, que para la estimación del tiempo de concentración usualmente se recomienda emplear el valor medio obtenido de varias ecuaciones empíricas disponibles en la literatura científica (*Es una práctica común en la Hidrología Aplicada es utilizar el valor medio eliminando los valores extremos*); considerando apropiado incluir al menos cinco estimaciones diferentes (Vélez U. & Bótero G., 2011), de acuerdo a esto, el valor del tiempo de concentración indicado en la tabla siguiente, corresponde al valor medio utilizando para ello las ecuaciones de Témez (1978), Kirpich (1990), Pérez Monteagudo (1985), Giandiotti (1990), Ventura-Heron y SCS,

Tabla 43. Puntos de cierre hidrológico, áreas de drenaje y tiempos de concentración,

COD, AREA	PCH	COORDENADAS – MAGNA SIRGAS ORIGEN CALI		ÁREA DE DRENAJE (ha)	CORRIENTE	Tc (min,)
		E (m)	N (m)			
1	1	1058119,093	864205,156	10,509	Santa Elena 1	6,67
2	2	1057879,926	864313,796	14,828	Indumil	7,20
3	3	1058612,948	864227,937	1,897	Santa Elena 2	2,61
4	4	1058654,322	864370,546	1,497	Santa Elena 3	2,22
5	5	1058725,468	865910,181	38,497	La Academia	17,56
6	6	1057830,061	866156,795	13,288	El indio	6,58
7	7	1057410,862	866270,112	14,571	El Hospital	7,08
8	8	1057563,403	867234,39	145,01	El Ocho	18,11
9	9	1057410,851	869622,026	114,75	Guarrús	17,42
10	10	1057483,585	869785,139	38,052	Los Pozos	10,13
11	11	1057814,779	870936,726	27,146	Mónaco	7,03
12	12	1057819,264	870940,223	53,459	Isabel Prez	8,67

Fuente: Elaboración propia

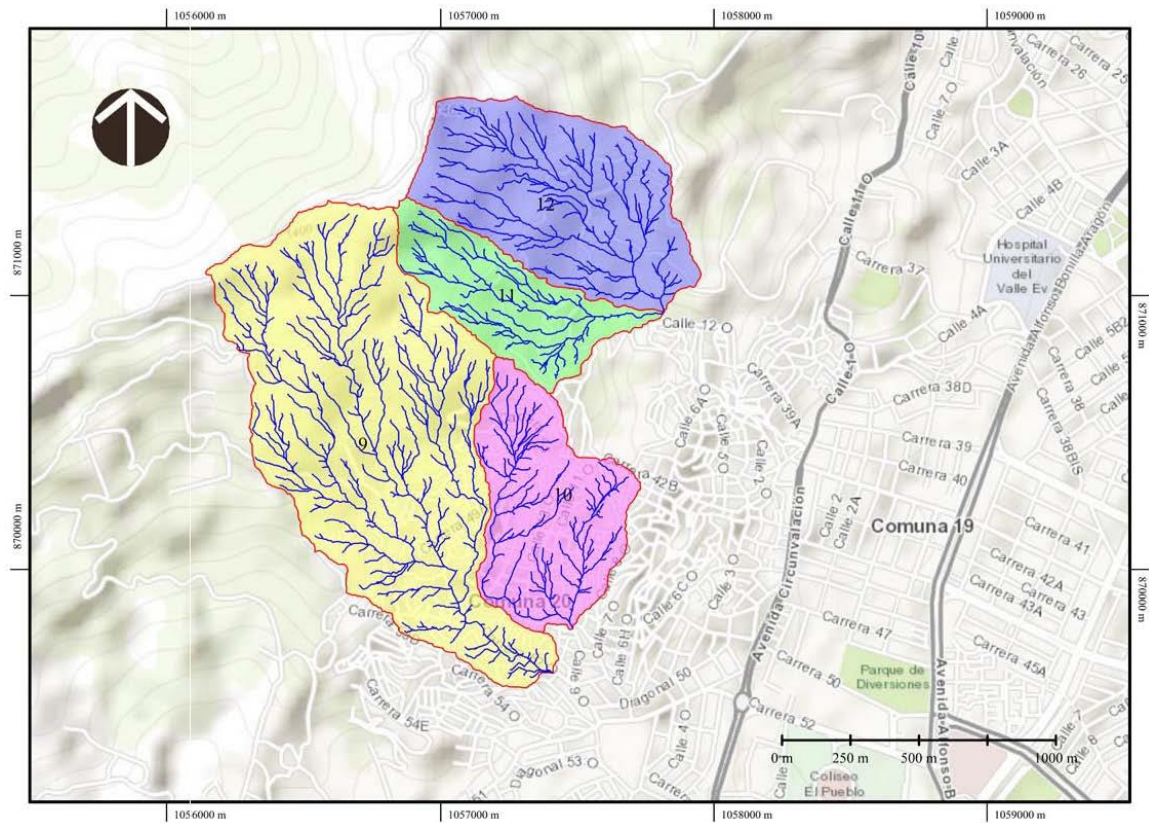


Figura 65. Localización hoyas hidrográficas,

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.11 Proceso de transformación lluvia – escorrentía para caudales máximos instantáneos

De acuerdo al Manual de Drenaje (Instituto Nacional de Vías-INVIAS, 2009), los modelos lluvia-escorrentía son utilizados cuando no existe la posibilidad de obtener medidas directas de caudales de drenaje en hoyas hidrográficas, y son modelos en los cuales se calcula la escorrentía superficial. De esta manera, a través de datos históricos de lluvia de corta duración, existentes en la cuenca de interés y representativos de ella, aplicados a la hoya hidrográfica con características específicas geométricas, de suelos, vegetación, etc., se calcula el caudal máximo instantáneo de escorrentía superficial sobre la hoya,

Existen dos métodos para ello:

- a) **Método racional**, Existe discrepancia entre los diferentes autores sobre el rango de aplicabilidad del método en relación con el área de drenaje de las hoyas, Valores entre 0,65 y 12,5 km<sup>2</sup> han sido citados en la literatura técnica (Instituto Nacional de Vías-INVIAS, 2009), La tendencia actual es usar 1,3 a 2,5 km<sup>2</sup> (130-250 ha) como el límite superior para la aplicabilidad del método racional,

- b) **Método del hidrograma de escorrentía superficial**, Utilizado para áreas de drenaje mayores a 2,5 km<sup>2</sup> (250 ha), Sherman, el autor de la metodología, lo propuso para áreas de drenaje de hasta 20 km<sup>2</sup>, pero es usual utilizarlo en hidrología para valores mayores, Cuando las áreas de drenaje en una cuenca son mayores a este valor, se aconseja subdividirla en subcuencas y aplicar metodologías computacionales (programas HEC-1 o HEC-HMS, por ejemplo) para tener en cuenta el hidrograma de creciente producido por cada una de las subcuencas y su tránsito a través del canal principal de la misma.

#### 4.4.11.1 Modelo HEC-HMS

HEC-HMS está diseñado para simular el proceso de precipitación-escorrimento en cuencas, HEC-HMS está planteado para ser aplicado en un amplio rango de regiones geográficas para solucionar un rango general de problemas, Esta herramienta puede ser utilizada en pequeñas cuencas urbanas, o en grandes cuencas sin intervención, los resultados se pueden aplicar para estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, observación de flujo, impacto de intervenciones en cuencas, reducción del daño por inundaciones, operación de sistemas, etc, (Bastidas, s.f).

**Modelo de cuenca:** El modelo de cuenca es utilizado para representar la parte física de la cuenca, El usuario desarrolla un modelo de cuenca agregando y conectando elementos hidrológicos, Los elementos hidrológicos usan modelos matemáticos para describir los procesos físicos en la cuenca.

**Modelo meteorológico:** El modelo meteorológico calcula la precipitación requerida en una sub-cuenca, Se puede utilizar precipitación puntual o por grillas, tiene la capacidad de modelar precipitación sólida y líquida junto con evapotranspiración, El modelo meteorológico, hace uso de tormentas de diseño (*Specified hyetograph*), con duración de tres (3) horas de duración generadas a través de métodos como los bloques alternados (*Alternating block method*, Chow et al, 1994) y/o el método de la *intensidad instantánea* (Keifer & Chu, 1957).

**Especificaciones de control:** Las especificaciones de control fijan el tiempo de duración de cada corrida de una simulación, La información en las especificaciones de control incluye una fecha de inicio, una fecha de finalización y el intervalo de tiempo de la simulación,

**Datos de entrada:** Las series de tiempo y los datos de las grillas son requeridos generalmente como condiciones de borde en los modelos de cuencas y meteorológicos, además del número de curva y datos de evapotranspiración calculados para el drenaje de estudio,

#### 4.4.11.2 Periodo de retorno de eventos hidrológicos máximos

Según la *Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia* (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018), el componente hidrológico de la

ronda hídrica permite el funcionamiento del sistema fluvial para los eventos extremos más frecuentes, los cuales son necesarios para la conexión de los cuerpos lóticos y lénticos en el sistema fluvial, el intercambio de sedimentos, nutrientes y organismos y en general para el mantenimiento de los ciclos biológicos de las especies en estos ecosistemas, En tal sentido, este componente está determinado por la zona ocupada por la corriente durante los eventos de crecida e inundaciones de acuerdo con la variabilidad intra-anual e inter-anual del régimen hidrológico, De acuerdo con los registros históricos de ocurrencia del fenómeno, las crecidas representativas de las condiciones máximas promedio durante una temporada “normal” de La Niña se pueden asociar a una crecida con un período de retorno de 15 años, En las regiones del país, en que los períodos húmedos son modulados por fenómenos de variabilidad climática distintos al ENOS en su fase fría, la Autoridad Ambiental competente deberá considerar el período de retorno representativo para dicho fenómeno siempre y cuando éste sea mayor al establecido de 15 años, es decir, sea un evento con menor frecuencia de presentación, Dicho criterio es aplicable para los casos de sistemas lóticos sin modificaciones considerables en su morfología, así como para los sistemas lénticos, Para los casos de sistemas lóticos con modificaciones considerables en su morfología, así como cuerpos de agua (lóticos y lénticos) afectados por la dinámica marina se orienta un criterio de seguridad mayor utilizando eventos con período de retorno de 100 años,

De acuerdo a lo anterior, y del proceso de modelado del tránsito de caudales, se simularán los caudales correspondientes a los periodos de retorno de 2,33, 15 y 100 años, de manera de determinar el área ocupada en el cauce por dichos caudales definiendo el cauce permanente y el límite hidrológico en cada una de las doce (12) cuencas valoradas,

Para efectos del presente estudio, el valor de “*r*” utilizado fue de 0,22, el cual se obtuvo a partir del análisis de una serie de lluvias máximas obtenidas en diversas estaciones a nivel nacional (HIDRO-OCCIDENTE S.A, 2008); la duración de la lluvia utilizada fue de 3 horas con desagregación temporal de 5 minutos,

Para la obtención de los hietogramas de diseño asociados a diferentes períodos de retorno, es necesario conocer de manera adicional a las profundidades de lluvia máxima a escala diaria, su distribución promedia en el tiempo, por lo anterior, se adopta el análisis de tormentas registradas en diferentes zonas geográficas del departamento del Valle del Cauca para el proyecto *Infraestructura de servicios públicos fideicomiso Las Vegas, Ciudad Meléndez, Valle de Lili Oriental* (HIDRO-OCCIDENTE S.A, 2008) , a través de la cual, se establece una distribución temporal de lluvias máximas promedia con duración de tres (3) horas de duración para la tormenta de diseño (*Specified hyetograph*),

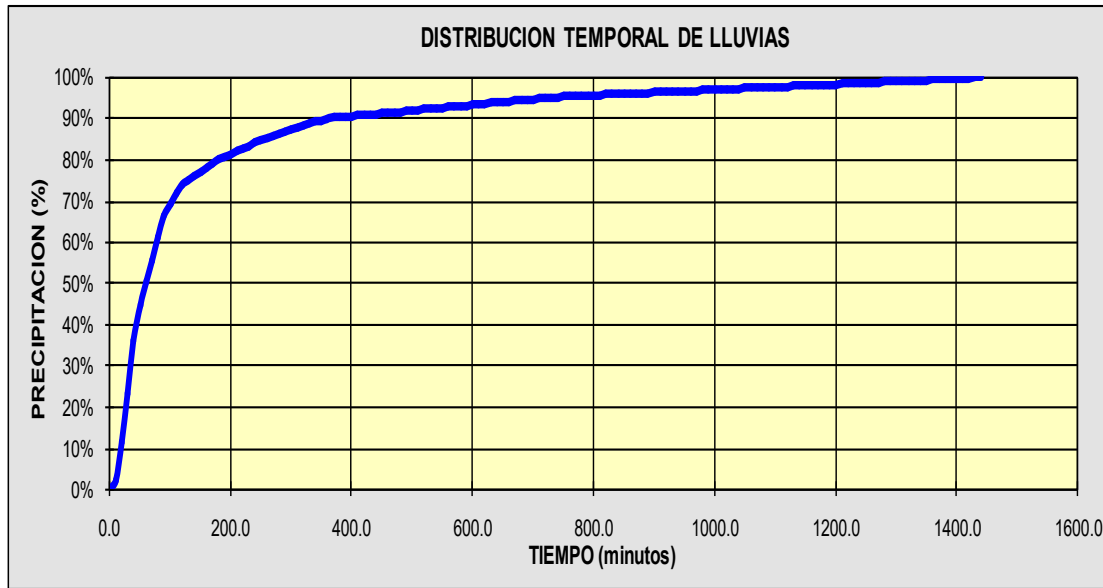


Figura 66, distribución temporal de lluvias promedio para el valle del cauca,  
Fuente: Infraestructura de servicios públicos fideicomiso Las Vegas, Ciudad Meléndez, Valle de Lili Oriental  
(HIDRO-OCCIDENTE S.A, 2008),

- Ecuación de ajuste para IDF – estación “virtual” Comuna 20 (criterio de Grobe)

$$I = \frac{735.0843 \times Tr^{0.1666}}{T_c^{0.7500}}$$

Donde:

- I = Intensidad en mm/hr,  
Tr = Periodo de retorno (Años)  
Tc = Tiempo de concentración (minutos)

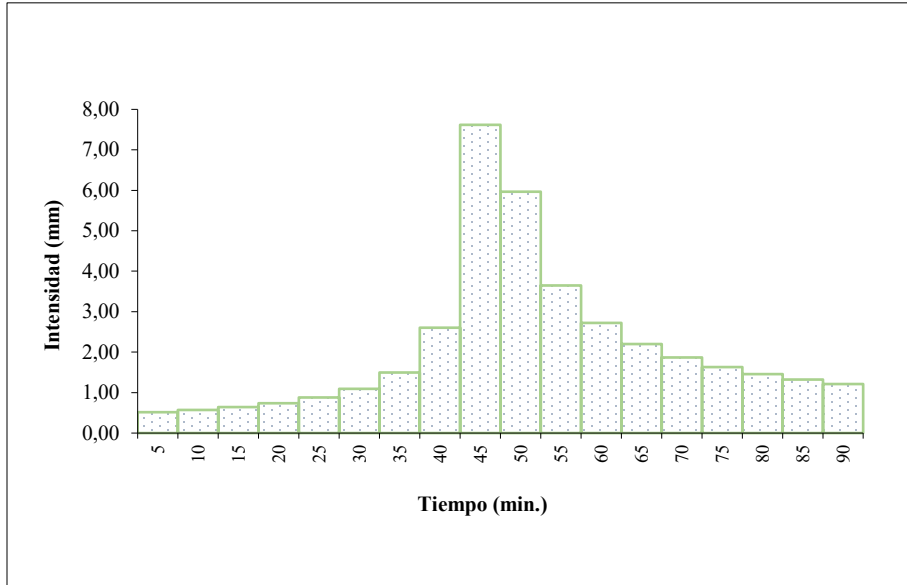


Figura 67. Hietograma de diseño comuna 20 TR=2,33 años

Fuente: Elaboración propia

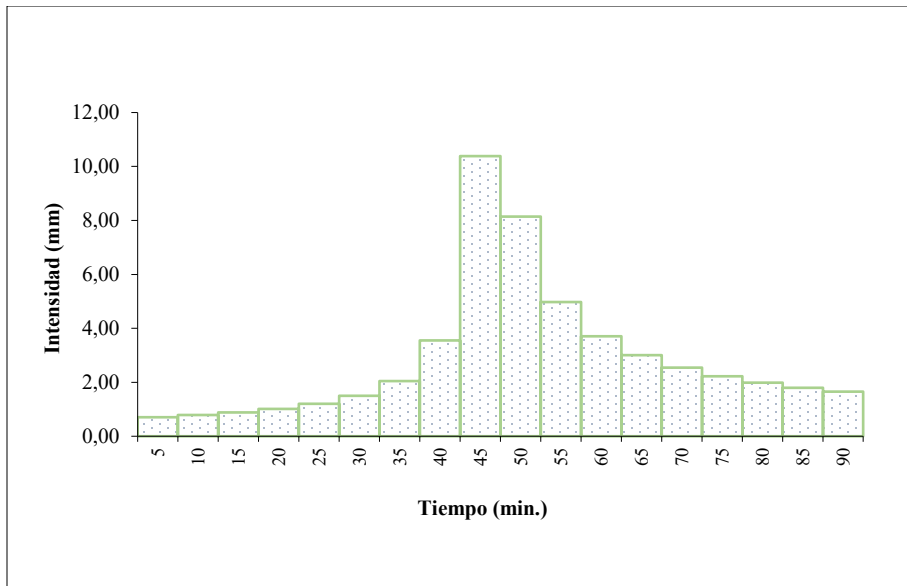


Figura 68. Hietograma de diseño comuna 20TR=15 AÑOS,

Fuente: Elaboración propia

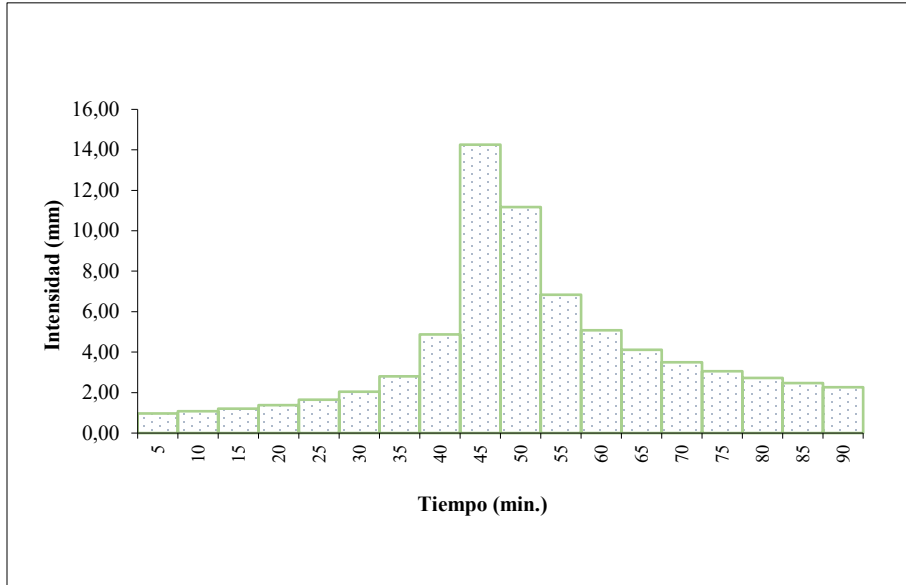


Figura 69. Hietograma de diseño comuna 20 TR=100 AÑOS,

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.11.3 Cálculo de los caudales máximos instantáneos

De acuerdo a lo indicado en el párrafo 4.4.11, y dependiendo del área drenada, se ha determinado aplicar el método del hidrograma de escorrentía superficial para las doce (12) cuencas focalizadas,

- **Resultados HEC-HMS (Tormenta de diseño)**

Tomando en cuenta las coberturas y uso de suelo clasificadas con base en la Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra Corine Land Cover nivel 2 para Colombia (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2010), los números de curva (CN) para cada cuenca (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), Loss Method: *SCS Curve Number* y Transform Method: *SCS Unit Hydrograph*, en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se evalúan los cálculos previos para el modelo HEC-HMS según área de drenaje,

Tabla 44. Cálculos previos HEC-HMS

PCH	Corriente	Área (Km <sup>2</sup> )	Tc (min.)	Lag Time=0,6 Tc (min.)	CN,	$\Delta t=0,29$ Lag Time (min.) $\leq$	Ia=(5080/CN)-50,80 (mm)
1	Santa Elena 1	0,1051	6,67	4,0	86,80	1,16	7,73
2	Indumil	0,1483	7,20	4,32	86,32	1,25	8,05
3	Santa Elena 2	0,0190	2,61	1,57	82,69	0,45	10,63
4	Santa Elena 3	0,0150	2,22	1,33	82,10	0,39	11,08
5	La Academia	0,3849	17,56	10,53	74,66	3,06	17,24
6	El indio	0,1329	6,58	3,95	96,88	1,15	1,64
7	El Hospital	0,1467	7,08	4,25	86,26	1,23	8,09
8	El Ocho	1,4500	18,11	10,87	79,31	3,15	13,25
9	Guarrús	1,1474	17,42	10,45	79,71	3,03	12,93
10	Los Pozos	0,3805	10,13	6,08	90,71	1,76	5,20
11	Mónaco	0,2714	7,03	4,22	78,21	1,22	14,15
12	Isabel Prez	0,5346	8,67	5,20	72,84	1,51	18,94

Fuente: Elaboración propia

Tabla 45. Estimación de QMAX modelo HEC-HMS.

PCH	Área (Km <sup>2</sup> )	Tiempo de Retorno (Tr)	Tc (min.)	Caudal máximo HEC-HMS (m <sup>3</sup> /seg)
1	0,1051	2,33	6,67	2,1
		15	6,67	2,9
		100	6,67	4,0
2	0,1483	2,33	7,20	2,8
		15	7,20	4,0
		100	7,20	5,5
3	0,0190	2,33	2,61	0,33
		15	2,61	0,50
		100	2,61	0,70
4	0,0150	2,33	2,22	0,30
		15	2,22	0,40
		100	2,22	0,50
5	0,3849	2,33	17,56	2,6
		15	17,56	4,1
		100	17,56	6,3
6	0,1329	2,33	6,58	4,5
		15	6,58	5,6
		100	6,58	7,1
7	0,1467	2,33	7,08	2,8
		15	7,08	3,9
		100	7,06	5,4
8	1,4500	2,33	18,11	13,2
		15	18,11	20,0
		100	18,11	29,4

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4.12 Calibración de caudales máximos

Con el objeto de calibrar los resultados obtenidos en la modelación hidrológica para las cuencas focalizadas, se evalúan los métodos de análisis regional de frecuencias para validar las crecientes de interés definidas en la tabla 46, Siguiendo conceptos similares, en Colombia se han desarrollado las siguientes metodologías (Ochoa R., Hidrología hidráulica y socavación en puentes, 2017):

- 1) Método de multiescalamiento aproximado para la regionalización de caudales máximos en Colombia, Atlas hidrológico de Colombia, Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Diciembre de 2000,
- 2) Método del multiescalamiento ajustado para la regionalización de caudales máximos en Colombia, Atlas hidrológico de Colombia, Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Diciembre de 2000,
- 3) Regionalización de parámetros para determinación de caudales máximos en Colombia, Oscar José Mesa Sánchez, Germán Poveda y Jaime I, Vélez, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín Colombia, 2001,
- 4) Estudio de regionalización de caudales máximos, Valle del Cauca, Colombia, Adriana María Erazo,
- 5) Evaluación preliminar de crecientes en Colombia, Tomás Ochoa Rubio, 1995
- 6) Regionalización de crecidas en Colombia, IMAT, 1991,

De manera general, el método cumple el siguiente procedimiento: 1, Se calculan los valores del caudal para diferentes períodos de retorno en cada una de las estaciones hidrométricas; 2, Se calcula la relación generalizada para la región, entre el caudal con período de retorno de 2,33 años (caudal promedio en la distribución Gumbel) y el área de drenaje A, con base en los datos de cada una de las estaciones hidrométricas,  $Q_{2,33} = f(A)$ ; 3, Para cada estación, se calcula la relación entre el caudal para cada período de retorno  $T_r$  definido (dando valores de períodos de retorno iguales a 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años) y el caudal con período de retorno de 2,33 años:  $(Q_{T_r} / Q_{2,33})$ ; 4, Se adelanta un ensayo (test) de homogeneidad estadístico, con el fin de asegurar que los datos obtenidos correspondan a una región hidrológicamente homogénea, Si el resultado de una de las estaciones queda por fuera de la franja de confianza del referido ensayo, se debe eliminar tal valor (Manual de Drenaje, Invias), La pregunta de si los datos en un grupo de estaciones son homogéneos, se puede contestar en un sentido estadístico determinando si ellos difieren de uno a otro por cantidades que no pueden ser explicadas al azar, Por otro lado, donde esas diferencias no son más que debidas a la casualidad, se puede concluir que los datos representan aspectos diferentes de la misma entidad y, por consiguiente, pueden ser tenidos como homogéneos; 5, Se calcula el valor promedio o el valor mediano de la relación  $Q_{T_r} / Q_{2,33}$  en la región para los diferentes períodos de retorno considerados, con base en los valores individuales para cada estación; 6, Para una

estación no aforada en la región con un área de drenaje  $A$ , el valor del caudal con un período de retorno determinado  $Q_{Tr}$  se calcula estableciendo, en primer lugar, el valor del  $Q_{2,33}$  con la relación generalizada  $Q_{2,33} = f(A)$  para la región y, luego, utilizando la relación generalizada  $Q_{Tr}/Q_{2,33}$  para la región,

#### 4.4.12.1 Calibración de caudales máximos instantáneos modelo HEC-HMS

La calibración de caudales en HEC-HMS es el proceso de ajustar los parámetros del modelo para que los resultados simulados (hidrogramas) se ajusten lo mejor posible a los datos obtenidos en el análisis de regionalización, minimizando la diferencia entre ambos, Para ello, se comparan iterativamente los hidrogramas simulados con los reales, ajustando parámetros como el tiempo de concentración, pérdidas de caudal y métodos de flujo base hasta lograr un ajuste aceptable, lo que a menudo implica el uso de métodos automáticos o manuales y métricas de evaluación, Para el proceso de calibración se realizó la optimización mediante el tiempo de retardo (*Lag Time*) de las microcuencas evaluadas, El tiempo de retardo en HEC-HMS es el tiempo que tarda un hidrograma en viajar a través de una cuenca, haciendo referencia al tiempo entre el centro de gravedad del hietograma de entrada y el del hidrograma de salida,

Tabla 46, Calibración de QMAX modelo HEC-HMS,

PCH	Tiempo de Retorno (Tr)	Caudal (m <sup>3</sup> /s) Simulado	Caudal (m <sup>3</sup> /s) Observado	Lag Time (min.) Inicial	Lag Time (min.) Optimizado	Caudal máximo HEC-HMS calibrado (m <sup>3</sup> /seg)
9	1.1474	2.33	17.42	3.1	4.43	9
	15	15	17.42	6.7	10.22	3,02
	100	100	17.42	13.2	17.21	3,91
10	0.3805	2.33	10.13	3.7	2.77	10
	15	15	10.13	6.2	4.58	4,09
	100	100	10.13	10.0	6.28	5,91
11	0.2714	2.33	7.03	0.70	1.97	11
	15	15	7.03	1.8	3.14	1,20
	100	100	7.03	3.7	4.20	1,26
12	0.5346	2.33	8.67	0.70	3.86	12
	15	15	8.67	2.00	6.33	1,15
	100	100	8.67	4.8	8.62	1,20

Fuente: Elaboración propia

La modelación detallada y cálculos se en cuentan en el anexo “Estudios hidrológicos e hidráulicos”.

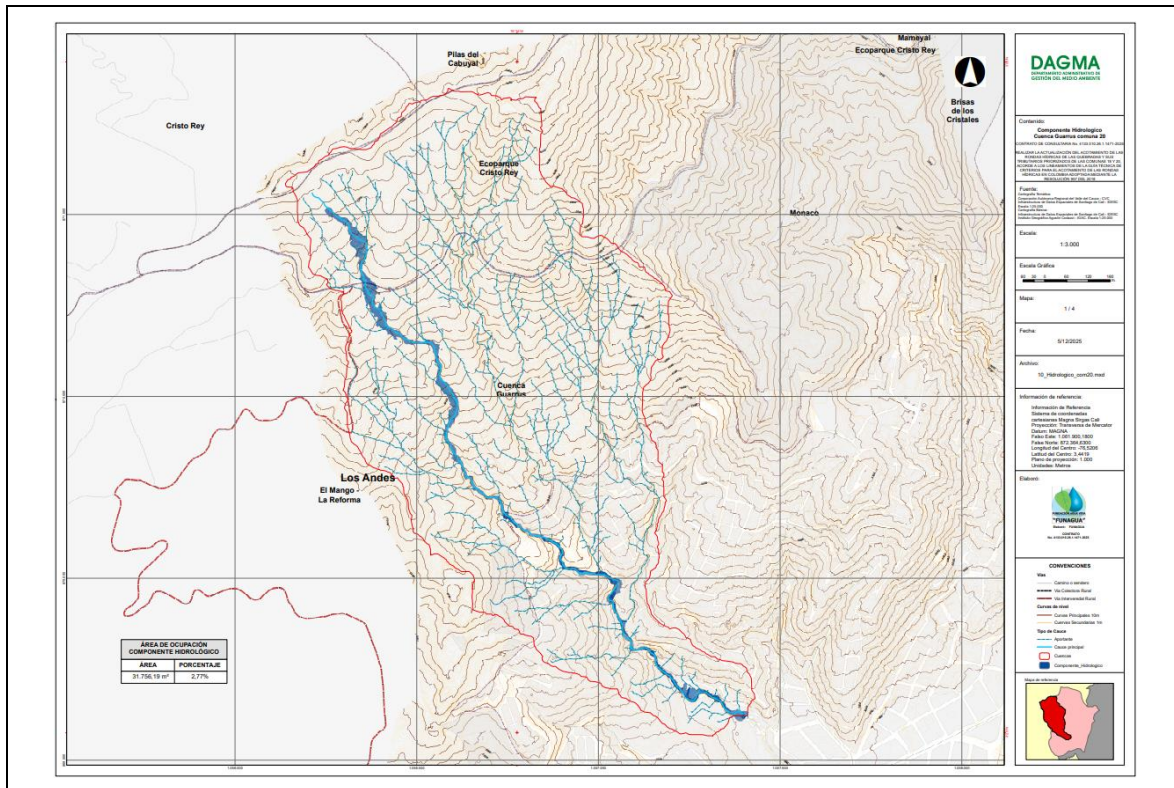
#### 4.4.13 Criterios para determinar el componente hidrológico de las rondas hídricas,

Tomando en consideración el parágrafo 6,2,2 de la Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia (Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018), el componente hidrológico (tanto para cuerpos de agua con modificaciones considerables en su morfología o los que no) es el criterio con base en el cual se define el primer elemento de la ronda hídrica, esto es, la faja paralela a que refiere el literal d) del artículo 83 del Decreto-Ley 2811 de 1974, Para el caso de las cuencas en la Comuna 18, y en consideración a que el componente hidrológico no comprende una extensión mayor a 30 metros a partir del cauce permanente, “la faja paralela” será igual a la extensión del componente hidrológico, y el “área de protección o conservación aferente” corresponderá con el área complementaria obtenida desde la envolvente que integra los otros dos componentes (geomorfológico y ecosistémico).

Tabla 47, Cálculo de área de protección por el componente hidrológico,

Nombre Microcuenca	Área (m <sup>2</sup> )	%
Guarrús	31.756,19	2,77
Los Pozos	7.502,33	1,97
Mónaco	10.145,90	3,74
Isabel Pérez	11.467,65	2,14

Fuente: Elaboración propia





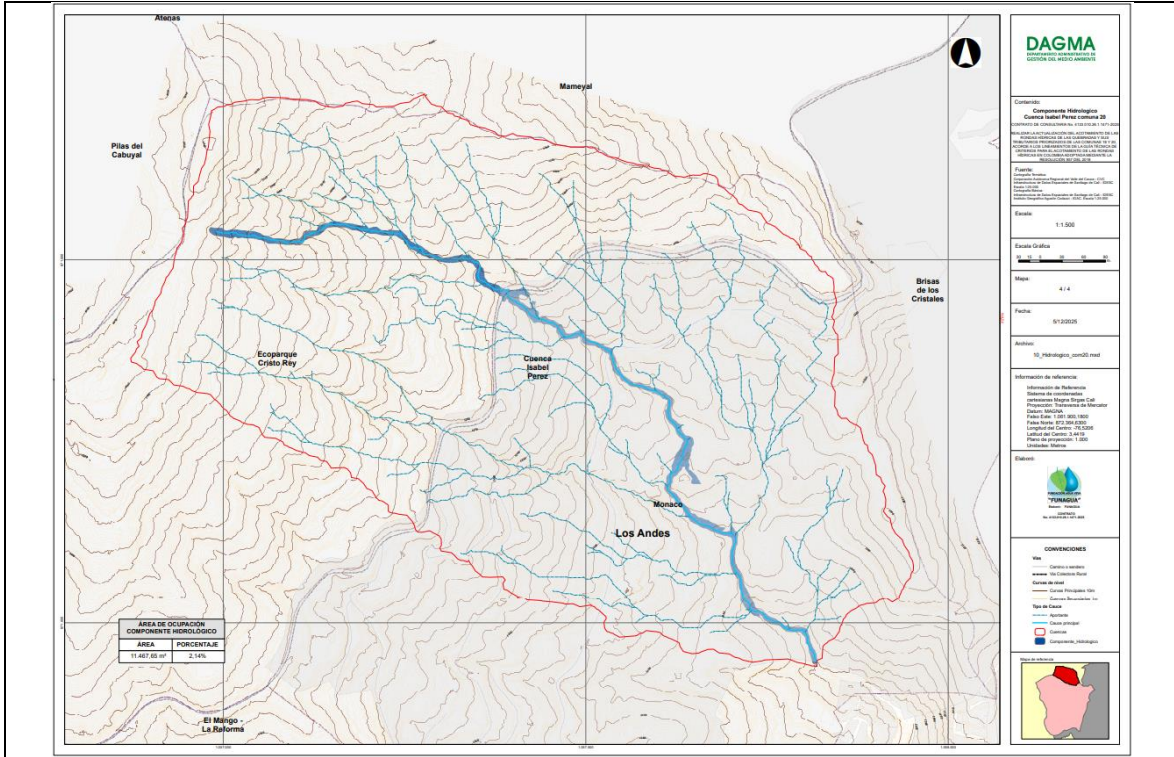


Figura 70, Mapas del Componente Hidrológico

Fuente: Elaboración propia

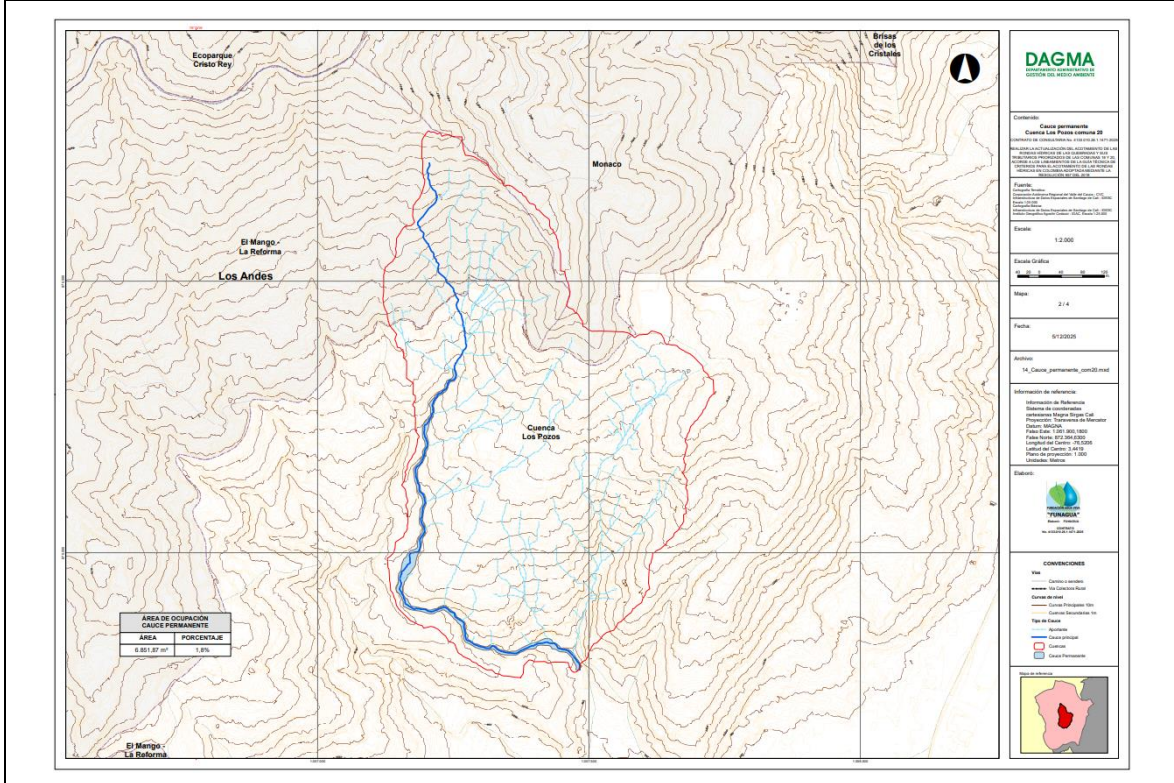
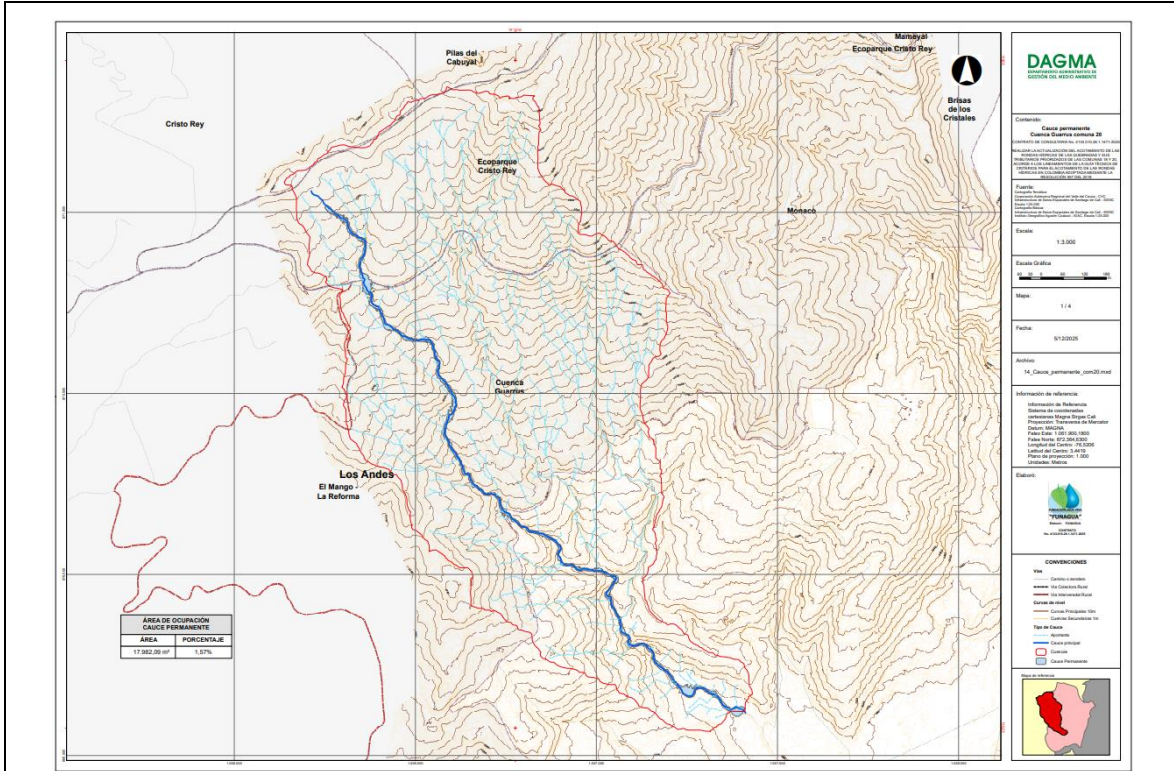
#### 4.5 Definición del cauce permanente

Siendo corrientes de comportamiento recto, la superposición cronológica, no muestra mayores variaciones del cauce activo, en la parte alta, Se hace la determinación de cauce permanente con criterios hidrológicos e hidráulicos, con la modelación hidráulica a banca llena, para un tiempo de retorno  $TR=2,33$  años,

Tabla 48. Cálculo de área de protección por el cauce permanente.

Nombre Microcuenca	Área (m <sup>2</sup> )	Área (%)
Guarrús	17.982,09	1,57
Los Pozos	6.851,87	1,80
Mónaco	9.093,88	3,35
Isabel Pérez	10.324,22	1,93

Fuente: Elaboración propia



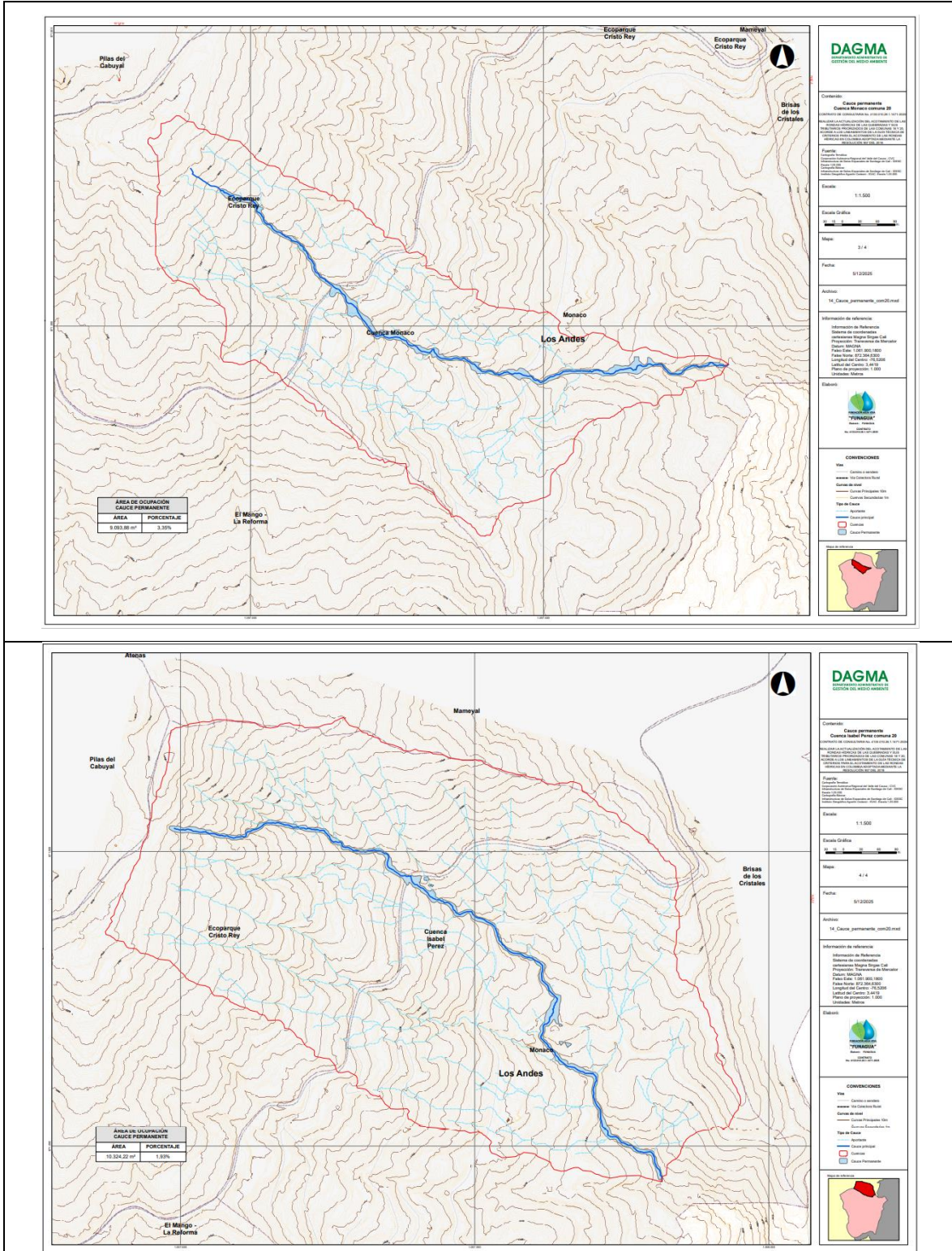


Figura 71. Mapas Cauces Permanente.  
Fuente: Elaboración propia

#### 4.6 Delimitación del límite funcional de la Ronda Hídrica

El límite funcional de la ronda hídrica es el resultado de la envolvente que genera la superposición de los tres componentes físicos preponderantes de las características físico-bióticas de estos ecosistemas de transición: geomorfológicas, hidrológico-hidráulicas y ecosistémicas, En la siguiente figura, se presentan las figuras de los componentes geomorfológico, hidrológico y ecosistémicos, El cruce de dichos mapas, define el límite funcional de la ronda hídrica para cada una de las cuencas,

Para cada uno de los componentes, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Ronda hídrica componente hidrológico: determinado por un TR=100 años.
- Ronda hídrica componente geomorfológico: Se realiza la delimitación de unidades geomorfológicas a lo largo del drenaje, asociadas a la ronda hídrica, en este caso, la zona de influencia del drenaje en el cauce permanente, delimitando procesos morfodinámicos (procesos erosivos), generación de secciones transversales cada 200 m., sobre el cauce permanente.

Con la información obtenida en las secciones transversales, zonas de cambios de pendiente lateral, depósitos aluviales identificados, la definición y localización del talweth en las secciones, se elabora el plano con la definición en planta de la componente geomorfológica, Para determinar la calidad de la cobertura, se debe conocer el tipo geomorfológico de la zona de ribera.

En este contexto se genera el plano de componente geomorfológico, indicando zonas anexas a banca llena (cauce permanente), para lo cual se generaron cortes topográficos perpendiculares a la dirección de la corriente, determinando los cambios abruptos de las pendientes en las orillas del drenaje, así como, la delimitación de depósitos aluviales o deslizamientos, movimientos de masa, depósitos de ladera, obras y actividades que tienen incidencia en la definición del criterio geomorfológico,

Se aclara que los eventos erosivos, que no tienen incidencia directa sobre la dinámica del cauce, no se incluyen en la ronda, Cuando se incluyen se hace la salvedad, de restricción geotécnica, que requiere información para aprobar un uso de esa área,

Este análisis de la geomorfología, permite delimitar un área en planta, la cual será, parte de la envolvente, para generar la ronda hídrica.

- Ronda hídrica componente ecosistémico: según la guía el resultado de este criterio es Para la estimación de la ronda hídrica, presenta un valor relativamente “pequeño” o “bajo”, lo cual se encuentra asociado a áreas que presentan alta densidad de drenaje y áreas aferentes pequeñas sin embargo, se consideró que las microcuencas contiene un valor ecosistémico considerable de bosque ripario y/o realitos boscosos asociados al ecosistemas predominante, por lo que el valor de este componente es mayor al resultado obtenido al aplicar la metodología de la guía técnica.

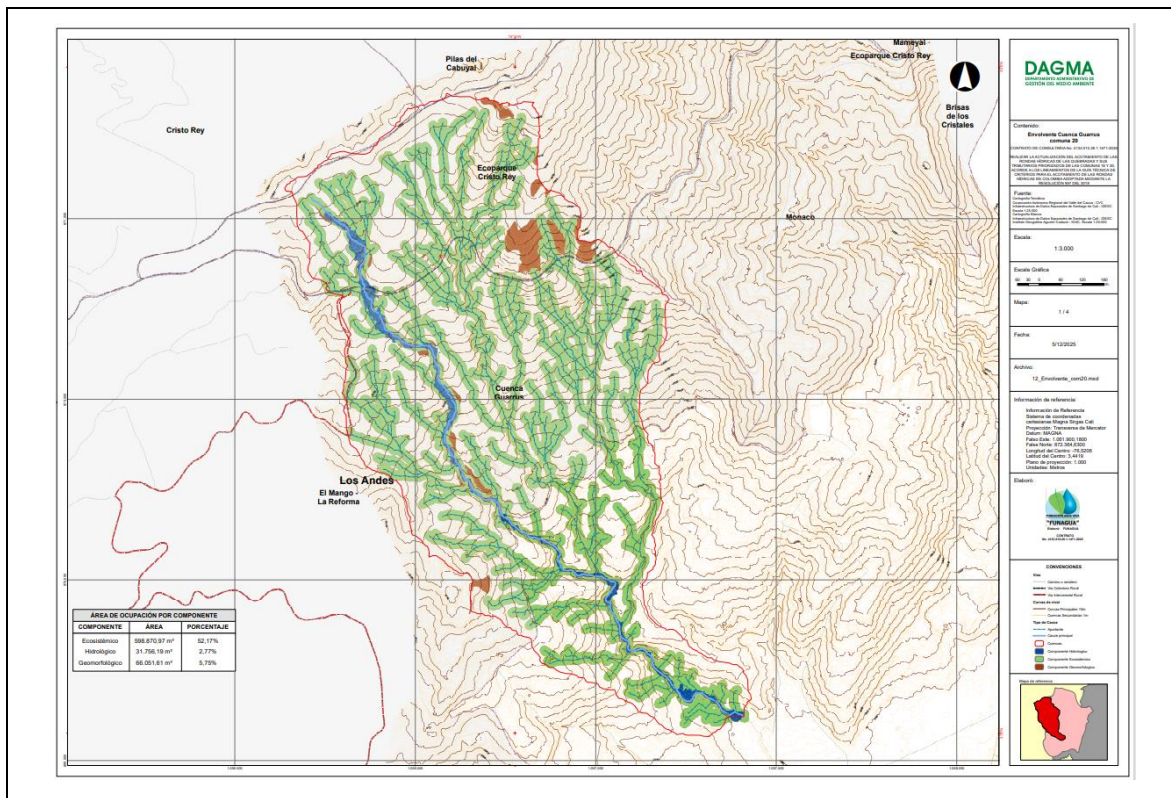
A partir del cruce de los tres componentes: geomorfológico, hidrológico y ecosistémico, se obtiene que el límite estimado de la ronda funcional, en la siguiente tabla se presenta las áreas envolventes por cada cuenca priorizada en la comuna.

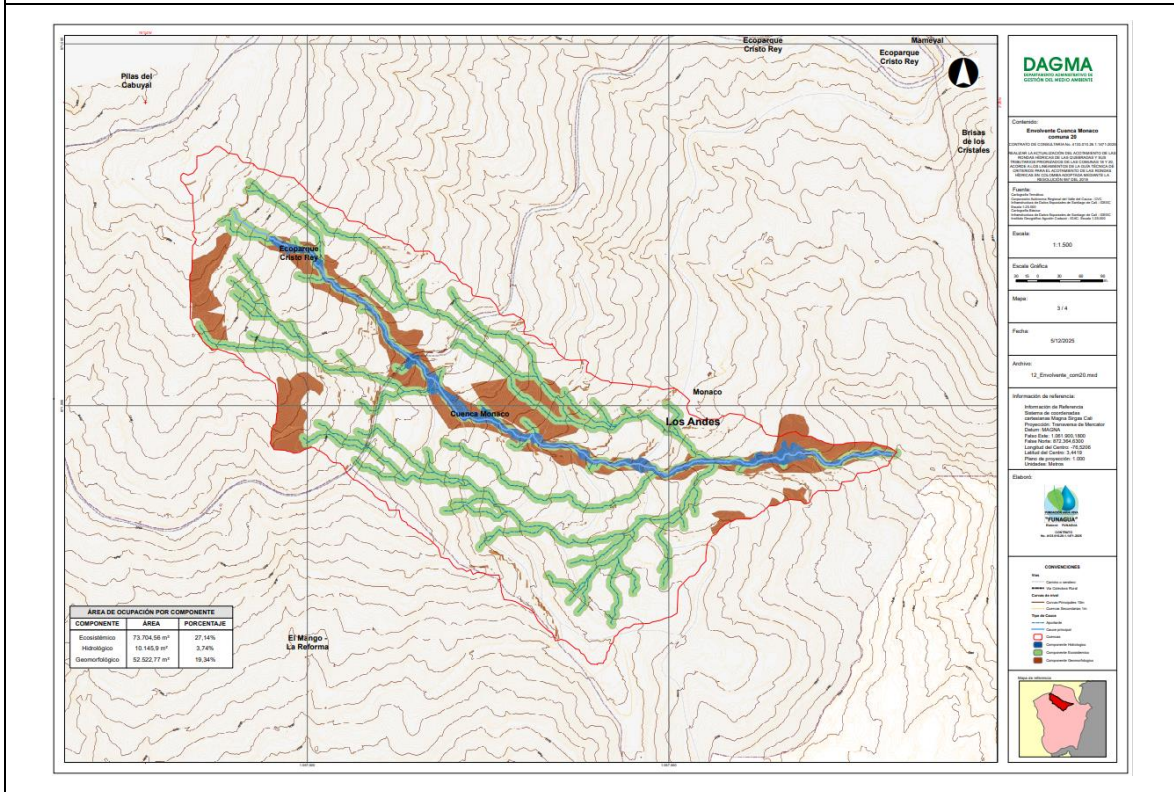
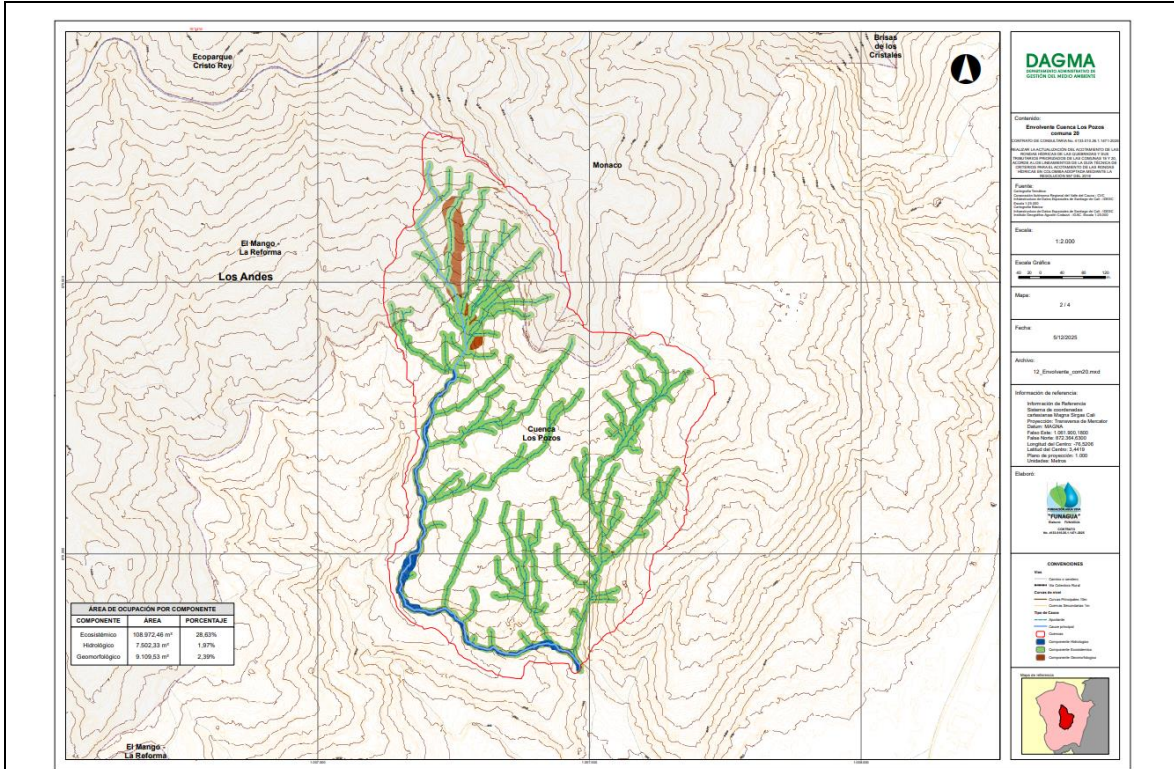
En la siguiente figura, se presenta la delimitación del límite funcional, para las cuencas identificadas en la comuna 20, y un anexo cartográfico donde se presentan los límites de cada área,

Tabla 49, Cálculo de Área para el límite Funcional,

Nombre Microcuenca	Área Comp, Ecos, (m <sup>2</sup> )	%	Área Comp, Hidr, (m <sup>2</sup> )	%	Área Comp, Geom, (m <sup>2</sup> )	%	Área Envolvente (m <sup>2</sup> )	%
Guarrús	598.870,97	52,17	31.756,19	2,77	66.051,61	5,75	625.053,01	54,45
Los Pozos	108.972,46	28,63	7.502,33	1,97	9.109,53	2,39	113.697,78	29,87
Mónaco	73.704,56	27,14	10.145,90	3,74	52.522,77	19,34	106.937,91	39,38
Isabel Pérez	202.115,34	37,80	11.467,65	2,14	98.989,94	18,51	258.975,70	48,43

Fuente: Elaboración propia





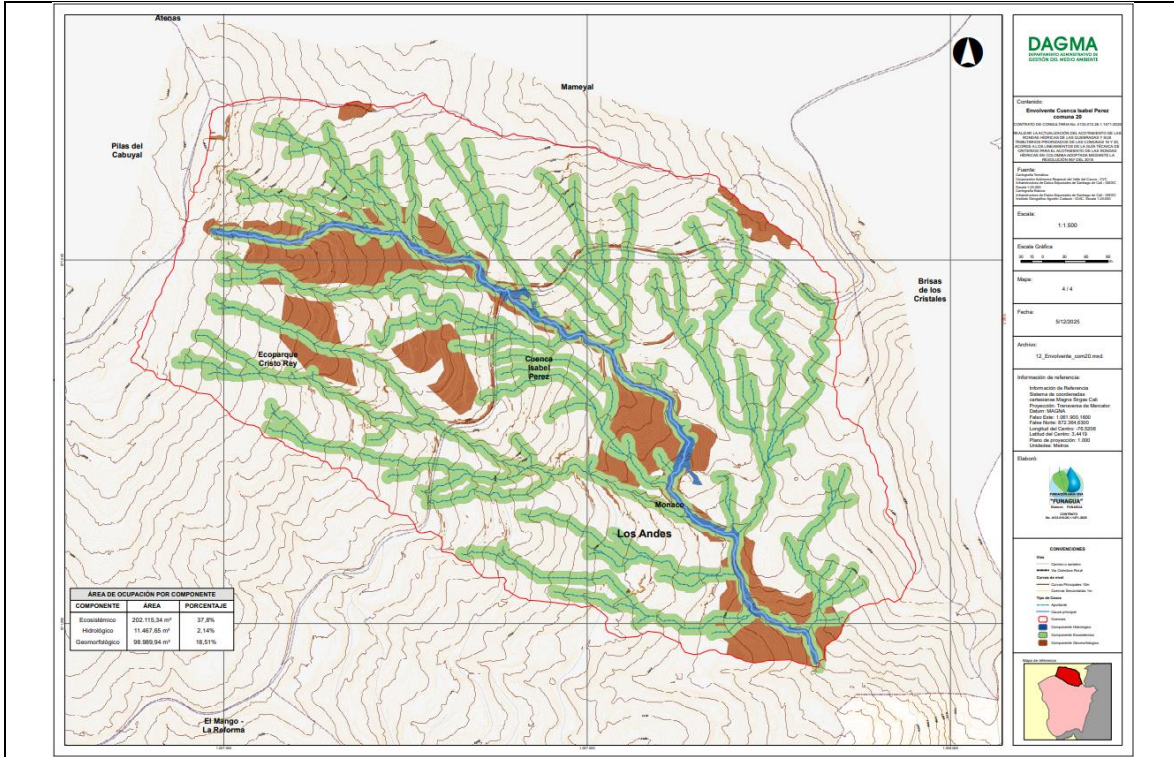
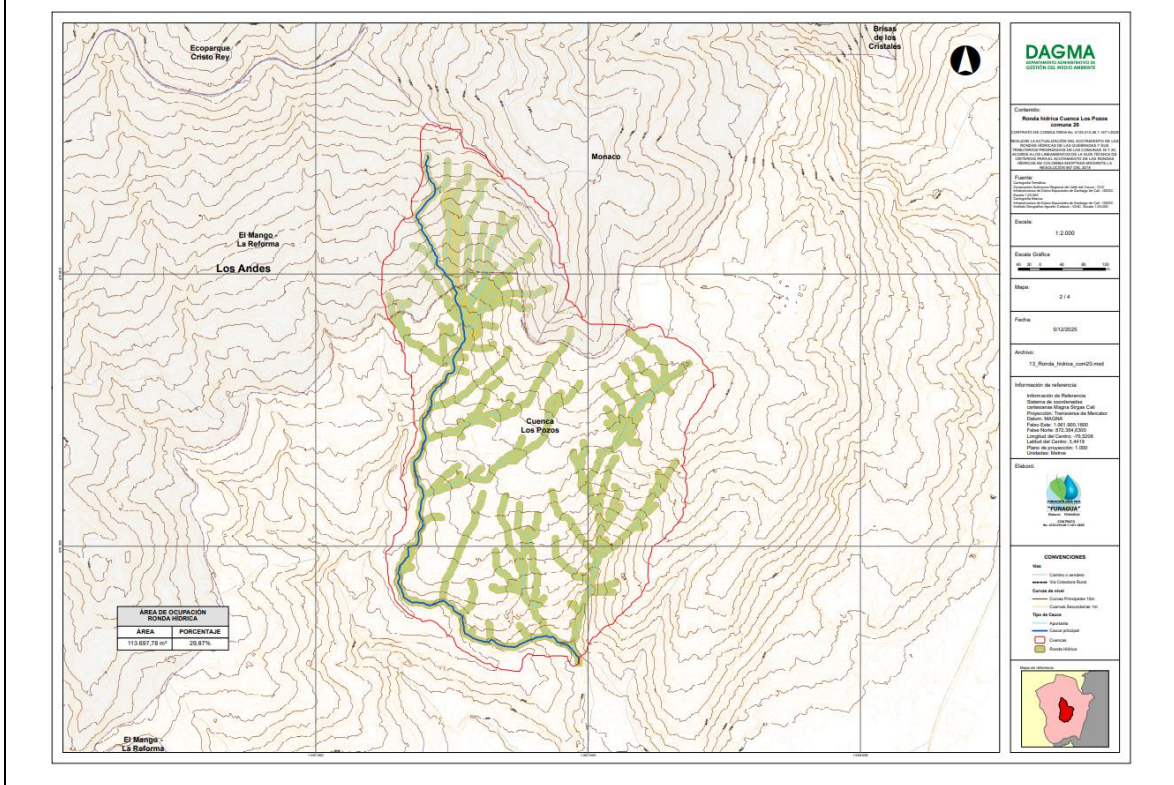
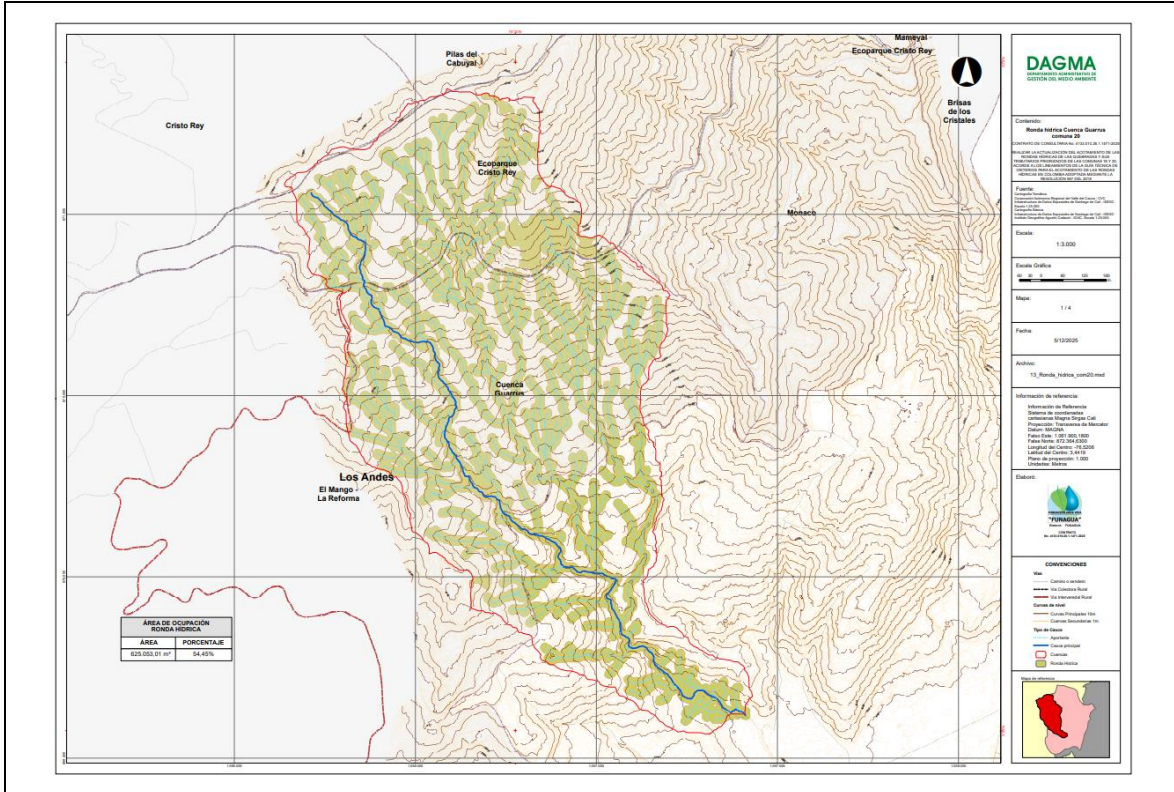


Figura 72, Mapa Envoltente,

Fuente: Elaboración propia



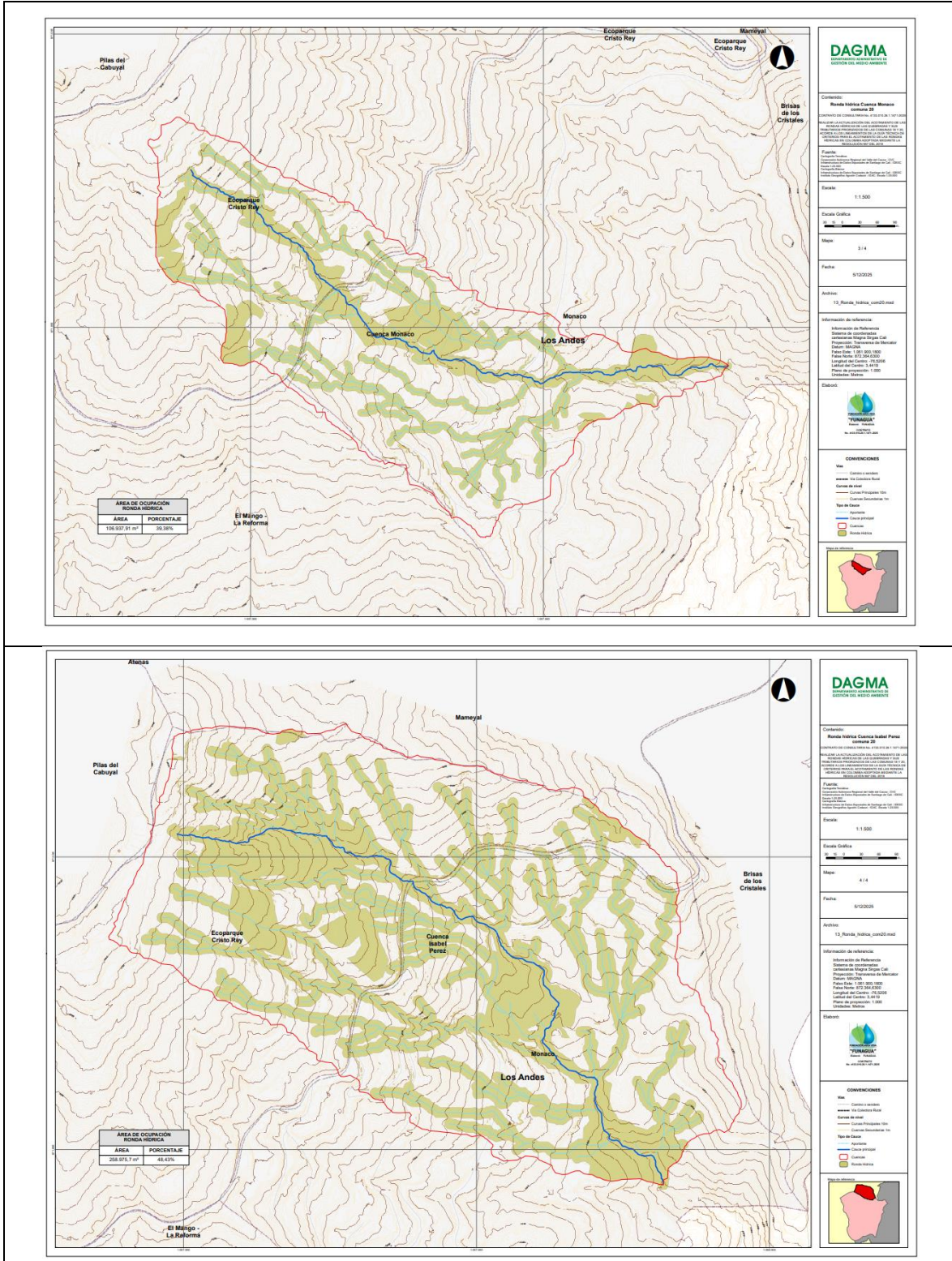


Figura 73, Mapas Limite Funcional por Ronda Hídrica, Fuente: Elaboración propia

## 5. CONCLUSIONES

Se evidencia la gran cantidad de área que ocupan las áreas mínimas de la envolvente en todas las micro-cuencas evaluadas, dado que oscila entre 37 y más de 90%, En ese aspecto es muy importante la evaluación permanente de las dimensiones geomorfológica y ecosistémica con estrategias de seguimiento y monitoreo para orientar las acciones de manejo que se vayan a implementar en ellas.

En el caso de la geomorfología el aporte varió entre 0 – 93%, Posiblemente en relación con el grado de intervención antrópica que aqueja cada tramo superior en las cuencas analizadas.

Es relevante considerar la relación longitud del cuerpo de agua respecto del área de la micro-cuenca, debido a que en varios casos es el atributo determinante en el cálculo de la envolvente.

Las Quebradas el Indio, Chorritos y las dos vertientes conocidas como pila seca, perdieron completamente su naturalidad y por ende no se consideraron en el análisis de ronda hídrica.

Las Quebradas Guarrús, Cristalina, Sultana y Sultanita están sufriendo procesos de intervención antrópica principalmente en sus cabeceras o zona media alta, factor que influye negativamente en su posibilidad de permanencia futura.

Las Quebradas Isabel Pérez y Mónaco sufrieron intervenciones desde hace más de 70 años en la parte media de la micro-cuenca; alteraciones que permanecen hoy.

## 6. RECOMENDACIONES

Se demanda la necesidad de incluir este análisis en su integridad como uno de los determinantes ambientales del POT en la comuna,

Concordantemente, la interacción de estos hallazgos con los polígonos que describen las áreas de interés ambiental entre ellas aquellas protegidas, así como hitos geográficos o paisajísticos ya reconocidos (p.ej., cerro el Morro) en el POT, deben adicionar los resultados aquí descritos,

Se invita a reconocer la urgencia de evaluar objetivamente los puntos de cierre operativos de cada cuerpo de agua aquí descrito, Habida cuenta de la utilidad de los resultados de este contrato para orientar las estrategias de mitigación del riesgo que se pueda relacionar con volúmenes excesivos en escenarios de cambio climático debidas a la insuficiencia de las obras que recogen el caudal, en los mencionados puntos,

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bastidas, C, (s,f), Manual para el uso del modelo hidrológico HEC-HMS, Universidad Central de Venezuela, Ingeniería Hidrometeorológica, Universidad Central de Venezuela,
- Bernal S,, N, R,, Barrios M,, J, S,, Ramos C,, M, A,, Velázquez M,, W, C,, Beltrán V,, J, E,, Ibarra B,, Y, C,, & Velázquez M,, W, I, (2021), *Homogenización de series de tiempo mensuales de precipitación y su utilidad en estudios climáticos y procesos de toma de desiciones*, Bogotá: Editoria UD,
- Bradbury K,, R,, Dripps, W,, Hankley, C,, Anderson, M,, & Potter, K, (2000), *Refinement of two methods for estimation of groundwater recharge rates*, University of Wisconsin,
- Buishand, T, A, (1982), Some methods for testing the homogeneity of rainfall records, *Journal of hydrology*, 58, 11-27,
- CAPORELLO, G,, & MARAVALL, A, (2025), TSW+,
- Centro Internacional de Agricultura Tropical-CIAT, (s,f), *CIAT Research Online*, Obtenido de <https://dataverse.harvard.edu/dataset.xhtml?persistentId=doi:10.7910/DVN/WKAOIL>
- CHOW, V, T, (1994), *Hidrología Aplicada*, Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S,A,
- Coles, S, (2001), *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, London: Springer London, doi:<https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca-CVC, (26 de Noviembre de 2025), *GeoPortal de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca-CVC*, Obtenido de <https://geo.cvc.gov.co/arcgis/apps/sites/#/inicio>
- CVC, C, I, (2015), *CARACTERIZACION ECOSISTEMAS DEL VALLE DEL CAUCA*, Santiago de Cali: CVC,
- Dirección Técnica Ambiental-Grupo Recursos Hídricos-CVC, (17 de Septiembre de 2025), *Portal Hidroclimatológico - Modulo de consulta*, Obtenido de Portal Hidroclimatológico - Modulo de consulta: <https://portal-hidroclimatologico.cvc.gov.co/modulo-consulta>
- Durán-Barroso, P,, & González, J, (2015), Variabilidad de los grupos hidrológicos del método del número de curva del NRSC (NRSC-CN), *IV Jornadas de Ingeniería del Agua*, Córdoba,
- Environmental Systems Research Institute Inc, (1999-2017), *Software: ArcGIS [software GIS], Versión 10,7*, Redlands, CA,
- Feldman, A, D, (2000), *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*,
- Gilleland, E,, & Katz, R, W, (2016), Extreme Value Analysis Package in R, *Journal of Statistical Software*, 72(8), 1-39, doi:[doi:doi.org/10.18637/jss.v072.i08](https://doi.org/10.18637/jss.v072.i08)
- Golden Gate Weather Services, (Julio de 2025), *El Niño and La Niña Years and Intensities, Based on Oceanic Niño Index (ONI)*, Obtenido de El Niño and La Niña Years and Intensities, Based on Oceanic Niño Index (ONI): <https://ggweather.com/enso/oni.htm>

- Gumbel, E, J, (1958), *Statistics of extremes*, Columbia university press,
- HIDRO-OCCIDENTE S,A, (2008), *Infraestructura de servicios públicos fideicomiso Las Vegas, Ciudad Meléndez, Valle de Lili Oriental*, Santiago de Cali,
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, (2010), *Leyenda nacional de coberturas de la tierra, Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia Escala 1: 100,000*, Bogotá: IDEAM,
- Instituto Nacional de Vías-INVÍAS, (2009), *Manual de Drenaje*, Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías,
- Keifer, D, J,, & Chu, H, H, (1957), Synthetic Storm Pattern for Drainage Design, *ASCE Journal of the Hydraulics Division*, 83 (HY4), 1332,1-1332,25,
- Mayesse, D,, Rodriguez, M,, Marvin, M,, & Ngonidzashe, C, (2015), Da Silva, Mayesse; Rodriguez, Maryory; Majin, Textural classification of soils in rice-growing areas in Colombia,
- Merwade, V, (2012), Creating SCS Curve Number Grid using Land Cover and Soil Data, Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/228757776\\_Creating\\_SCS\\_Curve\\_Number\\_Grid\\_using\\_HEC-GeoHMS](https://www.researchgate.net/publication/228757776_Creating_SCS_Curve_Number_Grid_using_HEC-GeoHMS)
- Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible, (2018), *Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia*, Bogotá: Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible,
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, (2018), *Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia*,
- National Oceanic and Atmospheric Administration-NOAA, (2024), *Oceanic Niño; Index (ONI) V2*, Obtenido de Oceanic Niño; Index (ONI) V2: <https://psl.noaa.gov/data/timeseries/monthly/ONI/>
- Oba, S,, Sato, M, A,, Takemasa, I,, Monden, M,, Matsubara, K,, & Ishii, S, (2003), A Bayesian missing value estimation method for gene expression profile data, *Bioinformatics*, *Bioinformatics*, 19, 2088-2096,
- Ochoa R,, T, (2017), *Hidrología hidráulica y socavación en puentes* (1 ed,), Bogotá: Ecoe Ediciones Ltda,
- Oliveira Cândido, M,, & Naghettini, M, (2008), SEAF – A prototype of an expert system for atsite frequency analysis of hydrological annual maxima, *Avances en Recursos Hidráulicos*(18), 37-56,
- Poveda J,, G,, & Álvarez V,, D, M, (2006), Análisis de Frecuencia de los Caudales Máximos Diarios en Ríos de Colombia Considerando las Fases del Fenómeno ENSO, *XVII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA*, (págs, 184-193), Envigado,
- R Core Team, (2025), *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, Vienna, Austria, doi:<https://www.R-project.org/>

- Smith, R, A,, & Campuzano , C, (2000), Análisis exploratorio para la detección de cambios y tendencias en series hidrológicas, *XIV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*,
- Stekhoven, D, J, (2022), missForest: Nonparametric Missing Value Imputation using Random Forest,
- Stepanek, P, (2008), *AnClim Software for Time Series Analysis Version 5,025*, Dep, of Geography, Fac, of Sciences, Masaryk University,
- Valderrama C,, D,, Giler O,, A,, & Mejía A,, J, (2022), Homogeneización de datos hidrometeorológicos con Climatol en la Cuenca del río Portoviejo , *Dominio de las ciencias*, 7(2), 782-799, doi:<http://dx.doi.org/10.23857/dc,v8i2,2675>
- Vélez U,, J, J,, & Bótero G,, A, (2011), Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales, *DYNA*, 78(165), 58-71,
- Victoria N,, M, J,, Cantor S,, J, P,, Hernández, M, A,, & Ramírez C,, A, M, (2023), *Evaluación indirecta de la variable infiltración en la cuenca hidrográfica del río Guadalajara (Buga - Valle del Cauca) mediante funciones de pedotransferencia (FPTs) utilizando una plataforma SIG [Tesis de Especialización, Universidad INCCA de Colombia]*,
- Villón B,, M, (2010), HEC-HMS Ejemplos, Lima - Perú: Ediciones Maxsoft y Villón,
- Zambrano B,, M, (2024), *hydroTSM: Gestión y análisis de series temporales para modelado hidrológico, Versión del paquete R 0,7-0*, doi:<https://cran.r-project.org/package=hydroTSM>

## 8. ANEXO CARTOGRÁFICO