

**EVALUACIÓN DE ESCENARIOS DE AMENAZA POR INUNDACIÓN EN EL
DISTRITO DE RIEGO SAN JOSÉ (ALGECIRAS, HUILA) MEDIANTE LA
INTEGRACIÓN DE SENSORES REMOTOS Y MODELACIÓN HIDRODINÁMICA 2D**



Wilson David Gamboa Pérez

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Magíster en Gestión de
Cuencas Hidrográficas

Directora

Dayam Soret Calderón Rivera

Magíster en Ciencias Ambientales

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
MAESTRÍA EN GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS
NEIVA, COLOMBIA
AGOSTO 2026**

Dedicatoria

A las familias campesinas de la Asociación de Usuarios del Distrito de Riego San José (ASOSANJOSE), del corregimiento Las Mercedes en el municipio de Algeciras (Huila), cuya labor perseverante en las laderas del piedemonte andino sostiene la economía cafetera y la soberanía hídrica de nuestra región.

A mi familia, fuente inagotable de motivación y recordatorio constante de que el conocimiento adquiere sentido cuando se pone al servicio de las comunidades.

Agradecimientos

Mi reconocimiento sincero a la Magíster Dayam Soret Calderón Rivera, directora de este trabajo de grado, por la rigurosidad con la que orientó cada etapa de la investigación, por la confianza que permitió reformular oportunamente el alcance metodológico cuando una situación de fuerza mayor impidió las validaciones de campo, y por el acompañamiento sostenido a lo largo del proceso.

A la Facultad de Ciencias Ambientales y al cuerpo docente de la Maestría en Gestión de Cuencas Hidrográficas de la Universidad Santo Tomás, por una formación interdisciplinaria que articula la hidrología cuantitativa, la teledetección, la gestión del riesgo de desastres y los marcos normativos colombianos.

A la Asociación de Usuarios del Distrito de Riego San José (ASOSANJOSE) y a la comunidad campesina del corregimiento Las Mercedes, por permitir el levantamiento documental sobre la infraestructura de captación aun cuando las visitas de campo no fueron posibles por la situación de orden público vigente. A la Defensoría del Pueblo, cuya Alerta Temprana N.º 009-26 sustentó técnicamente la reformulación metodológica del estudio. Y cuya alerta afecta a varios territorios de Colombia y que lamentablemente por ello se afecta las investigaciones, pero que abren la puerta para proponer alternativas en búsqueda de avanzar en las soluciones a problemáticas en cuencas con afectaciones de orden público o de difícil acceso.

Tabla de contenido

Dedicatoria.....	2
Agradecimientos	3
Índice de Tablas	7
Índice de Figuras.....	8
Índice de Fotografías de Campo	9
Índice de Capturas de Pantalla.....	9
Resumen.....	10
Abstract	14
Glosario.....	17
Introducción	21
1. Planteamiento del Problema	25
2. Objetivos.....	28
2.1 Objetivo General.....	28
2.2 Objetivos Específicos.....	28
3. Justificación	29
3.1 Justificación técnico-científica.....	29
3.2 Justificación económico-productiva	29
3.3 Justificación institucional-normativa	30
3.4 Justificación de política de investigación	31
4. Pertinencia Social.....	32
5. Marco Referencial.....	34
5.1 Marco Teórico.....	34
5.1.1 Inundación en microcuencas torrenciales del piedemonte andino.....	34
5.1.2 Modelación hidrodinámica bidimensional.....	34
5.1.3 Sensores remotos y computación en la nube: Google Earth Engine	35
5.1.4 Análisis multitemporal de cobertura vegetal con Sentinel-2	36
5.1.5 Método del Número de Curva del SCS.....	37
5.1.6 Análisis frecuencial de precipitación: ajuste de distribuciones	38
5.1.7 Gestión del riesgo: enfoque sistémico	38
5.2 Marco Conceptual	39

5.3 Marco Legal	40
5.4 Estado del Arte.....	41
6. Alcance	46
7. Metodología	48
7.1 Área de Estudio	48
7.2 Participantes e Instituciones.....	51
7.3 Flujo metodológico de la investigación	51
7.4 Fase 1 — Procedimiento de Caracterización Multitemporal de la Cuenca Aportante	52
7.4.1 Morfometría a partir del MDT IGAC 6 m	52
7.4.2 Análisis información en Google Earth Engine	53
7.4.3 Estimación del Número de Curva ponderado	54
7.5 Fase 2 — Análisis Frecuencial y Caudales de Diseño.....	55
7.5.1 Inventario y relleno de la serie pluviométrica La Arcadia.....	55
7.5.2 Serie de máximos anuales y selección del período de análisis	56
7.5.3 Ajuste por momentos-L y comparación de dos distribuciones.....	57
7.5.4 Desagregación temporal a duraciones sub-diarias	59
7.5.5 Validación cruzada con CHIRPS v3.0.....	59
7.5.6 Cálculo del caudal pico por SCS-CN.....	60
7.5.7 Validación con GEOGLOWS ECMWF V2	60
7.6 Fase 3 — Modelación Hidrodinámica 2D y Zonificación de Amenaza	61
7.6.1 Construcción del dominio computacional	61
7.6.2 Implementación en Python con landlab (OverlandFlow)	62
7.6.3 Calibración del modelo hidráulico.....	62
7.6.4 Clasificación de amenaza por la matriz SGC	63
7.7 Fase 4 — Lineamientos Técnicos de Manejo Preventivo.....	63
8. Resultados	65
8.1 Caracterización Multitemporal de la Cuenca.....	65
8.2 Análisis Frecuencial Regional y de la Estación La Arcadia	70
8.2.1 Relleno de la serie diaria de La Arcadia	71
8.2.2 Serie de máximos anuales 1982–2025	73
8.2.3 Ajuste estadístico y selección de la distribución de diseño	75
8.2.4 Desagregación temporal — curvas IDF.....	77
8.3 Caudales Pico por SCS-CN — Memoria de Cálculo.....	79
8.4 Modelación Hidrodinámica 2D y Vulnerabilidad de la Bocatoma.....	81

8.4.1	Análisis de vulnerabilidad técnica de la bocatoma — Metodología de valoración	88
8.5	Incidencia del Cambio en la Cobertura Vegetal	91
8.6	Validación Cruzada con GEOGLOWS ECMWF V2	93
8.7	Validación Independiente con la Estación Instrumentada El Casil	98
9.	Lineamientos Técnicos de Manejo Preventivo	101
9.1	Eje 1 — Conservación y restauración de la cobertura boscosa de la cuenca aportante....	101
9.2	Eje 2 — Protección estructural de la bocatoma	102
9.3	Eje 3 — Sistema de alerta temprana comunitario.....	102
9.4	Eje 4 — Plan de mantenimiento preventivo del distrito	103
9.5	Eje 5 — Articulación interinstitucional	103
9.6	Eje 6 — Replicabilidad metodológica a otros distritos	104
9.7	Fase subsiguiente — Complemento para la evaluación integral del riesgo.....	108
10.	Discusión.....	110
10.1	Caudales pico y caudales unitarios en el contexto regional.....	110
10.2	Control geomorfológico de la clasificación de amenaza	111
10.3	Pertinencia del enfoque metodológico basado en sensores remotos	113
10.4	Comparación con estudios de cuencas torrenciales en los Andes colombianos.....	114
10.5	Coherencia con la Guía Metodológica del SGC y normativa colombiana	115
10.6	Limitaciones del estudio	115
11.	Conclusiones	117
11.1	Conclusiones por objetivo específico	117
11.2	Hallazgo metodológico transversal.....	118
11.3	Aporte original y contribución al ecosistema institucional.....	119
11.4	Recomendaciones para investigación futura.....	119
	Referencias.....	121
	Anexos	130
	Anexo A. Protocolo metodológico replicable.....	130
	Anexo B. Memoria detallada del relleno de datos de la estación La Arcadia	132
	Anexo C. Resultados de la validación cruzada con GEOGLOWS V2	133
	Anexo D. Cuaderno de Google Colab — procesamiento de sensores remotos en Google Earth Engine	136
	Anexo E. Cuaderno de Google Colab (Python): modelación hidrodinámica 2D con landlab	138
	Anexo F. Propuesta operativa EVAL-IRD para la Secretaría de Agricultura del Huila	140
	F.1 Justificación operativa	140
	F.2 Estructura del programa.....	141

F.3 Cronograma e indicadores	141
F.4 Presupuesto estimado.....	142
F.5 Articulación con instrumentos de planificación territorial	143
F.6 Sostenibilidad institucional.....	143
Anexo G. Memoria de Cálculo — Validación con la Estación Instrumentada El Casil	144
G.1 Caracterización de la Estación El Casil y Análisis de Frecuencia Gumbel	144
G.2 Desempeño del Modelo GEOGLOWS ECMWF V2 en el Sitio El Casil	146
G.3 Evaluación de Similitud Hidromorfométrica y Transposición de Caudales.....	147
G.4 Síntesis y Recomendaciones	149

Índice de Tablas

<u>Tabla 1. Normativa colombiana aplicable a la gestión del riesgo en distritos de riego comunitarios.....</u>	40
<u>Tabla 2. Características generales del área de estudio y de la infraestructura del Distrito de Riego San José.....</u>	50
<u>Tabla 3. Flujo metodológico de la investigación.....</u>	51
<u>Tabla 4. Parámetros estimados por momentos-L para las dos distribuciones ajustadas sobre la serie 1982–2025.....</u>	57
<u>Tabla 5. Cuantiles de precipitación máxima 24 horas adoptados (mm), comparación entre las dos distribuciones.....</u>	58
<u>Tabla 6. Parámetros morfométricos de la cuenca abastecedora de la Quebrada San Antonio</u>	67
<u>Tabla 7. Cobertura del suelo derivada del análisis multitemporal Sentinel-2 procesado en Google Earth Engine — Cuenca aportante de la Quebrada San Antonio</u>	68
<u>Tabla 8. Inventario regional de estaciones pluviométricas IDEAM en la Sub Zona Hidrográfica del río Neiva (SZH 2110)</u>	70
<u>Tabla 9. Parámetros del método Normal Ratio aplicado al relleno de la estación La Arcadia [21100140] — período 1982–2025.....</u>	71
<u>Tabla 10. Estaciones climáticas sometidas a evaluación detallada de completitud de datos</u>	72
<u>Tabla 11. Máximos anuales de precipitación diaria — Estación La Arcadia [21100140], período 1982–2025.....</u>	74
<u>Tabla 12. Cuantiles de precipitación máxima 24 horas adoptados — Distribución Log-Pearson III ajustada por momentos-L, estación La Arcadia 1982–2025.....</u>	76
<u>Tabla 13. Intensidades de precipitación (mm/h) por duración y período de retorno — Estación La Arcadia, distribución Log-Pearson III, serie 1982–2025.....</u>	78

Tabla 14. Coeficientes de la ecuación $IDF\ I = C1 / (D + X0)^{C2}$ — Estación La Arcadia [21100140].....	78
Tabla 15. Memoria de cálculo SCS-CN — Caudales pico para los seis períodos de retorno, escenario base AMC II (CN = 69,7).....	80
Tabla 16. Resultados hidrodinámicos 2D en la sección de la bocatoma del Distrito de Riego San José — Quebrada San Antonio.....	82
Tabla 17. Valoración cualitativa de la vulnerabilidad técnica de la bocatoma del Distrito de Riego San José por modo de falla y período de retorno.....	91
Tabla 18. Sensibilidad del caudal pico $Tr = 100$ años a escenarios de cobertura vegetal — Cuenca aportante Quebrada San Antonio.....	92
Tabla 19. Síntesis del portafolio de manejo preventivo — Cuenca de la Quebrada San Antonio y Distrito de Riego San José.....	105
Tabla F.1. Presupuesto estimado del programa EVAL-IRD por componente — horizonte de cinco años.....	142
Tabla G.1. Caudales de diseño por período de retorno — distribución Gumbel ajustada a la serie observada de la estación El Casil (N = 6 años).....	145
Tabla G.2. Métricas de desempeño del modelo GEOGLOWS ECMWF V2 (tramo 610267388) frente a los caudales observados en la estación El Casil — período de traslape 2018–2023.....	146
Tabla G.3. Evaluación de similitud hidromorfométrica entre la cuenca El Casil (referencia) y la Qda. San Antonio (estudio).....	148
Tabla G.4. Caudales de diseño por período de retorno — transposición de áreas (El Casil) frente a SCS-CN (Qda. San Antonio).....	149

Índice de Figuras

Figura 1. Localización del área de estudio.....	49
Figura 2. Distribución del grupo hidrológico de suelo (HSG).....	66
Figura 3. Cobertura de la tierra (ESA WorldCover) en la cuenca.....	66
Figura 4. Análisis espacial para el área de estudio mediante GEE.....	69
Figura 5. Serie de máximos anuales de precipitación diaria — Estación La Arcadia [21100140], período 1982–2025.....	74
Figura 6. Curva de frecuencia $P_{max}\ 24h$ — Estación La Arcadia [21100140].....	76
Figura 7. Curvas IDF derivadas de la distribución Log-Pearson III — Estación La Arcadia [21100140].....	77
Figura 8. Hidrogramas de escorrentía e hietogramas de diseño ($Tr\ 2-100$ años).....	79
Figura 9. Perfil Transversal Bocatoma DR San José - Niveles de Inundación.....	84
Figura 10. Zonificación de amenaza por inundación — Corredor hidráulico Quebrada San Antonio mediante COLAB.....	86

Índice de Fotografías de Campo

<u>Fotografía 1. Cauce de la Quebrada San Antonio en la captación.....</u>	<u>89</u>
<u>Fotografía 2. Bocatoma de fondo del Distrito de Riego San José (registro de campo).....</u>	<u>89</u>

Índice de Capturas de Pantalla

<u>Captura 1. Segmento de la red hidrográfica GEOGLOWS y cuenca de estudio — visor River Forecast System.</u>	<u>95</u>
<u>Captura 2. Caudal histórico simulado para el tramo GEOGLOWS 610240115.</u>	<u>95</u>
<u>Captura 3. Volumen anual acumulado de caudal para el tramo GEOGLOWS 610240115.</u>	<u>96</u>
<u>Captura 4. Volumen diario acumulado y fecha de caudal máximo anual — años seco, medio y lluvioso.....</u>	<u>97</u>
<u>Captura 5. Extracto de la hoja de cálculo del relleno diario de la serie pluviométrica de la estación La Arcadia — Bloque B, registro 1982–2025.</u>	<u>132</u>
<u>Captura 6. Visor GEOGLOWS River Forecast System — segmento de la red hidrográfica y cuenca de estudio para el tramo 610240115.</u>	<u>133</u>
<u>Captura 7. Fecha de caudal máximo anual del tramo GEOGLOWS 610240115 — análisis de comportamiento de los valores máximos.....</u>	<u>134</u>
<u>Captura 8. Editor de código de Google Earth Engine — importación de activos del proyecto EVAL-IRD (cuenca, bocatoma, serie de precipitación).</u>	<u>136</u>
<u>Captura 9. Aplicación EVAL-IRD en Google Earth Engine — selección del distrito de riego DR San José (Algeciras) y parámetros de Gumbel.</u>	<u>137</u>
<u>Captura 10. Aplicación EVAL-IRD — configuración del sistema de alerta temprana (SAT) y exportación de resultados.....</u>	<u>137</u>
<u>Captura 11. Ejecución del cuaderno en Google Colab — Módulo 1, parámetros del proyecto y carga de archivos.....</u>	<u>138</u>
<u>Captura 12. Ejecución del cuaderno en Google Colab — Módulo 2, resultados de hidrología.</u>	<u>139</u>
<u>Captura 13. Ejecución del cuaderno en Google Colab — Módulo 4, mapa interactivo de amenaza (folium).</u>	<u>139</u>

Resumen

Las crecientes súbitas de carácter torrencial —avenidas torrenciales en la terminología de la Ley 1523 de 2012 y de la guía metodológica del Servicio Geológico Colombiano— en microcuencas del piedemonte de la Cordillera Oriental constituyen una amenaza creciente sobre la infraestructura de captación de los distritos de riego comunitarios del oriente del Huila. Este trabajo evalúa los escenarios de amenaza asociados a estas crecientes en la bocatoma del Distrito de Riego San José, ubicada sobre la Quebrada San Antonio ($2^{\circ}25'7,37''N$ / $75^{\circ}22'1,69''O$; 2.014,2 m s. n. m.) en el municipio de Algeciras, mediante la integración del procesamiento de sensores remotos en Google Earth Engine y la modelación hidrodinámica bidimensional de aguas someras —componente OverlandFlow de la librería landlab— ejecutada íntegramente en Python. La modelación se resuelve en condiciones de agua clara, aproximación que se adopta de manera explícita como referencia conservadora del fenómeno torrencial, reconociendo que un flujo con alta concentración volumétrica de sedimentos resulta hidráulicamente más agresivo que el simulado.

La Alerta Temprana N.º 009-26 de la Defensoría del Pueblo, emitida sobre las veredas El Paraíso y La Arcadia por la presencia de grupos armados organizados en el área de la cuenca aportante, impidió el acceso al sector de la bocatoma y con ello las validaciones de campo previstas —levantamiento topográfico complementario, inspección estructural de la captación y caracterización granulométrica del lecho—. En consecuencia, el alcance metodológico se reformuló hacia una estrategia sustentada exclusivamente en sensores remotos, información secundaria oficial y modelación numérica reproducible. El diseño metodológico se organiza en cuatro fases secuenciales: caracterización multitemporal de la cuenca aportante con el MDT IGAC de seis metros (2018) y el análisis de imágenes ópticas Sentinel-2 (10 m de resolución espacial y

revisita de cinco días), empleado para cuantificar el cambio de cobertura vegetal entre 2018 y 2024 y procesado en Google Earth Engine; análisis frecuencial de la precipitación máxima 24 horas de la estación La Arcadia [21100140] del IDEAM para el período 1982–2025; modelación hidrodinámica 2D en plataforma COLAB de Google sobre el corredor hidráulico de la quebrada San Antonio aguas arriba de la bocatoma; y formulación de lineamientos técnicos de manejo preventivo.

El relleno de la serie pluviométrica diaria 1982–2025 se realizó por el método Normal Ratio Paulhus & Kohler (1952), apoyado en las estaciones vecinas Algeciras [21105030] y Est. 21100120 de la Sub Zona Hidrográfica del río Neiva, con un porcentaje de relleno del 4,3 % sobre 16.131 días. La serie de máximos anuales se ajustó a las distribuciones Gumbel y Log-Pearson III, comparadas por su bondad de ajuste. La distribución Log-Pearson III resultó la de mejor ajuste y se adoptó para el diseño, con precipitaciones máximas en 24 horas de 93,1 mm para $Tr = 2$ años; 114,0 mm para $Tr = 5$; 123,7 mm para $Tr = 10$; 132,7 mm para $Tr = 25$; 137,8 mm para $Tr = 50$; y 141,8 mm para $Tr = 100$ años. La desagregación temporal a duraciones subdiarias adoptó los coeficientes regionales de la estación Algeciras [21105030], situada a 12 km en la misma Sub Zona Hidrográfica.

El análisis multitemporal Sentinel-2 evidenció una disminución de seis puntos porcentuales en la cobertura boscosa densa entre 2018 y 2024, con transición dominante hacia pasto manejado, consistente con la expansión cafetera del oriente huilense. La transformación lluvia–escorrentía por el método SCS-CN, sobre un número de curva ponderado $CN-II = 69,7$ —obtenido como media ponderada por área de las combinaciones cobertura $\times$ grupo hidrológico de suelo con los valores de la tabla NRCS TR-55 (1986), a partir de la cobertura ESA WorldCover y del grupo hidrológico derivado de la clase textural USDA de OpenLandMap, según el procedimiento

detallado en el apartado 7.4.3—, produjo caudales pico de 13,6 m³/s (Tr = 2), 21,5 m³/s (Tr = 5), 25,4 m³/s (Tr = 10), 29,1 m³/s (Tr = 25), 31,3 m³/s (Tr = 50) y 33,0 m³/s (Tr = 100). El modelo hidrodinámico 2D de aguas someras (landlab–OverlandFlow), sobre una malla de 6 m y con incisión del cauce (stream burning) para el tránsito de la creciente de diseño de 50 años, indicó en la sección de la bocatoma un tirante máximo de 1,56 m —equivalente a la altura del azud (1,5 m)—, una velocidad de 2,0 m/s y un producto tirante×velocidad de 3,1 m²/s, que clasifica la peligrosidad hidrodinámica como alta. La captación, una bocatoma de fondo de baja altura, queda así al límite de su sobrepaso y expuesta a un empuje del orden de 0,1 MN y a un flujo competente para movilizar cantos y bloques, con el consiguiente riesgo de socavación de la cimentación. La Quebrada San Antonio drena al Río Blanco; el tramo de ese río modelado por GEOGLOWS ECMWF V2 (segmento 610240115, área ≈ 47 km²) sitúa la microcuenca de la bocatoma dentro de un sistema torrencial mayor. Por la diferencia de escala, GEOGLOWS se emplea como contexto regional del río receptor y no como validación directa de los caudales de la microcuenca.

La pérdida del 6 % de bosque denso entre 2018 y 2024 amplifica el caudal pico Tr = 100 años entre 10 % y 17 %. La reforestación moderada ($\Delta\text{CN} = -10$) reduce el caudal pico cerca de 39 %, pero la peligrosidad hidrodinámica sobre la bocatoma permanece en el umbral de amenaza alta a causa del fuerte gradiente del cauce (27 %, pendiente $\Delta H/L$ del cauce principal), que sostiene un flujo torrencial de alta energía sobre la captación.

Como contribuciones originales el estudio entrega: la primera valoración cuantitativa de amenaza por inundación sobre una bocatoma comunitaria del oriente del Huila ejecutada íntegramente con sensores remotos y computación en la nube; un protocolo técnico replicable con datos institucionales colombianos de libre acceso, adecuado para contextos donde el acceso de campo está restringido por situaciones de orden público; y el código del cuaderno reproducible en

Google Colab (Python) que integra el procesamiento en Google Earth Engine y la modelación hidrodinámica 2D con la librería landlab, lo que habilita la réplica del enfoque a los demás distritos de riego comunitarios del departamento.

Palabras clave: amenaza por inundación, distrito de riego, sensores remotos, Google Earth Engine, modelación hidrodinámica 2D, Algeciras, Huila.

Abstract

Rapid floods in torrential headwater catchments of the Colombian Eastern Cordillera piedmont pose a growing threat to the intake infrastructure of community-managed irrigation districts in eastern Huila. This research evaluates flood hazard scenarios at the San José Irrigation District intake, located on the San Antonio stream (2°25'7.37"N / 75°22'1.69"W; 2,014.2 m a.s.l.) in the municipality of Algeciras, by integrating remote-sensing processing in Google Earth Engine with two-dimensional shallow-water hydrodynamic modelling (landlab OverlandFlow component) implemented in Python.

Early Warning N.º 009-26, issued by the Colombian Ombudsman Office for the El Paraíso and La Arcadia rural areas because of the presence of organized armed groups within the contributing watershed, prevented access to the intake and therefore the planned field validations. The methodological scope was consequently reformulated towards a strategy based exclusively on remote sensing, official secondary information and reproducible numerical modelling. The research design comprises four sequential phases: multi-temporal characterization of the contributing watershed combining the 6-m IGAC digital terrain model (2018) and Sentinel-2 imagery (2018 vs 2024) processed in Google Earth Engine; frequency analysis of 24-hour maximum rainfall at IDEAM La Arcadia station [21100140] for the period 1982–2025; 2D hydrodynamic modelling over the 810 m hydraulic corridor upstream of the intake; and formulation of preventive technical guidelines.

The daily precipitation series 1982–2025 was filled using the Normal Ratio method Paulhus & Kohler (1952), supported by the neighbouring stations Algeciras [21105030] and Est. 21100120 of the Río Neiva Sub-Hydrographic Zone, with a 4.3 % fill rate across 16,131 days. The annual maxima series was fitted to Gumbel and Log-Pearson III distributions, compared by

goodness of fit. Log-Pearson III was selected as the design distribution, with 24-hour maximum rainfall quantiles of 93.1 mm ($Tr = 2$ yr), 114.0 mm ($Tr = 5$), 123.7 mm ($Tr = 10$), 132.7 mm ($Tr = 25$), 137.8 mm ($Tr = 50$) and 141.8 mm ($Tr = 100$). Sub-daily temporal disaggregation adopted the regional coefficients of the Algeciras station [21105030], located 12 km away within the same Sub-Hydrographic Zone.

Multi-temporal Sentinel-2 analysis revealed a 6-percentage-point decrease in dense forest cover between 2018 and 2024, with predominant transition to managed grassland, consistent with documented coffee expansion across eastern Huila. SCS-CN rainfall–runoff modelling, on a weighted curve number $CN-II = 69.7$, obtained as the area-weighted mean of the land-cover $\times$ hydrologic-soil-group combinations using NRCS TR-55 (1986) values, from ESA WorldCover land cover and the hydrologic soil group derived from the USDA texture class of OpenLandMap, produced peak flows of 13.6, 21.5, 25.4, 29.1, 31.3 and 33.0 m³/s for return periods of 2, 5, 10, 25, 50 and 100 years, respectively. The 2D shallow-water model (landlab–OverlandFlow), on a 6-m grid with channel stream-burning to route the 50-year design flood, yielded at the intake section a maximum flow depth of 1.56 m —comparable to the 1.5-m weir height—, a velocity of 2.0 m/s and a depth $\times$ velocity product of 3.1 m²/s, classifying the hydrodynamic hazard as high. The intake, a low bottom-type weir, thus operates at the threshold of overtopping and is exposed to a thrust of about 0.1 MN and to a competent flow to mobilize cobbles and boulders, with the attendant risk of foundation scour. The San Antonio stream drains into the Blanco River; the GEOGLOWS ECMWF V2 reach of that river (segment 610240115, drainage area ≈ 47 km²) places the intake microbasin within a larger torrential system. Owing to the scale difference, GEOGLOWS is used as regional context for the receiving river rather than as a direct validation of the microbasin design discharges.

The loss of 6 % of dense forest between 2018 and 2024 amplifies the $T_r = 100$ peak flow by 10–17 %. Moderate reforestation ($\Delta CN = -10$) reduces peak flow by about 39 %, but the hydrodynamic hazard on the intake remains at the high threshold owing to the steep channel gradient (27 %), which sustains a high-energy torrential flow over the structure.

Original contributions include: the first quantitative flood hazard assessment for a community intake in eastern Huila executed entirely with remote sensing and cloud computing; a replicable technical protocol executable with publicly available Colombian datasets, particularly suited to contexts where field access is restricted; and the open, reproducible Google Colab notebook (Python) that integrates the Google Earth Engine processing with 2D hydrodynamic modelling in landlab, enabling replication of the approach across the remaining community irrigation districts of the department.

Keywords: flood hazard, irrigation district, remote sensing, Google Earth Engine, 2D hydrodynamic modelling, Algeciras, Huila.

Glosario

AMC (Antecedent Moisture Condition). Condición de humedad antecedente del suelo en el método SCS-CN. Se distinguen tres categorías: AMC-I (seco), AMC-II (humedad media, referencia de diseño) y AMC-III (saturado, escenario pesimista La Niña). La conversión entre categorías se realiza mediante la relación analítica de Hawkins (1978).

CHIRPS v3.0. Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station, producto satelital-pluviométrico de precipitación diaria a 0,05° de resolución espacial (Funk et al., 2015). En este estudio se utiliza como validación cruzada de la serie pluviométrica del IDEAM y como complemento espacial sobre la cuenca aportante.

CN (Número de Curva). Parámetro empírico adimensional (0–100) del método SCS-CN que integra el grupo hidrológico de suelo, el uso y cobertura del suelo y la condición de humedad antecedente. Para la cuenca de la Quebrada San Antonio se adoptó $CN-II = 69,7$ en la línea base 2018, estimado mediante la cobertura ESA WorldCover 2021 y los grupos hidrológicos del producto OpenLandMap (textura de suelo USDA) procesados en Google Earth Engine, con posterior conversión de AMC-III a AMC-II por la relación de Hawkins (1978).

Distrito de riego comunitario. Infraestructura colectiva de captación, conducción y distribución de agua para riego, administrada por una asociación de usuarios bajo régimen de concesión otorgado por la autoridad ambiental competente. El Distrito de Riego San José atiende a 65 familias campesinas mediante la concesión otorgada por la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (Resolución 0142 de 2008).

Google Earth Engine (GEE). Plataforma de computación en la nube para el análisis geoespacial a escala planetaria Gorelick et al. (2017). En este estudio se utiliza para el

procesamiento multitemporal Sentinel-2 (2018–2024) y la integración del producto CHIRPS v3.0 sobre la cuenca aportante.

Inundación. Manifestación física de la amenaza hídrica caracterizada por el desbordamiento del cauce y la ocupación temporal de áreas adyacentes por una lámina de agua con velocidad y profundidad medibles. En cuencas de alta montaña la inundación frecuentemente adopta carácter torrencial por la combinación de pendiente pronunciada y respuesta hidrológica rápida.

Índice de Melton (MR). Parámetro morfométrico adimensional definido como $MR = \frac{\Delta H}{\sqrt{A}}$, donde ΔH es el relieve total de la cuenca y A es su área. La cuenca de la Quebrada San Antonio presenta $MR = 0,473$, lo que la sitúa en el dominio de cuencas productoras de flujos hiperconcentrados o debris floods Wilford et al. (2004).

MDT IGAC 6 m. Modelo digital de terreno del Instituto Geográfico Agustín Codazzi con resolución espacial de 6 metros (capa MDT10_41020_20180218) (IGAC) (2018), utilizado como insumo morfométrico y como geometría base del dominio computacional 2D.

Método Normal Ratio. Procedimiento de relleno de datos faltantes en series de precipitación propuesto por Paulhus y Kohler (1952), adoptado por la Organización Meteorológica Mundial (2010) y por el IDEAM (2017). Estima el valor faltante a partir de estaciones vecinas ponderadas por el cociente de las medias anuales y por el coeficiente de correlación.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Índice de vegetación normalizado [$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$], empleado en el análisis multitemporal Sentinel-2 para cuantificar el estado y los cambios de la cobertura vegetal en la cuenca aportante.

Landlab (OverlandFlow). Librería de Python de código abierto para modelación de procesos de superficie terrestre; su componente OverlandFlow resuelve las ecuaciones de aguas

someras 2D, empleada en este estudio para el tránsito de la creciente en la ventana de la bocatoma. (Solomon, 2015)

Sentinel-2. Misión de observación de la Tierra de la Agencia Espacial Europea, compuesta por dos satélites gemelos con resolución espacial de 10 m en bandas visibles e infrarrojo cercano y revisita combinada de aproximadamente cinco días ESA (2012). Empleada para el análisis multitemporal de cobertura vegetal en la cuenca aportante entre 2018 y 2024.

SGC (matriz de zonificación). Matriz dual profundidad–velocidad propuesta en la *Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Avenidas Torrenciales* del Servicio Geológico Colombiano Ramos-Cañón et al. (2021), adoptada como criterio rector de la clasificación de amenaza en este estudio.

SZH (Sub Zona Hidrográfica). Tercer nivel de la zonificación hidrográfica de Colombia establecida por el IDEAM. La cuenca de la Quebrada San Antonio pertenece a la SZH 2110 (río Neiva), comprendida en la Zona Hidrográfica Alto Magdalena (ZH 21) y en el Área Hidrográfica Magdalena-Cauca (AH 2) Instituto de Hidrología (2013).

Tr (Período de retorno). Intervalo promedio en años dentro del cual un evento hidrológico de magnitud determinada es igualado o superado. Probabilidad anual de excedencia = $1/Tr$. En este estudio se evalúan $Tr = 2; 5; 10; 25; 50$ y 100 años, conforme al estándar de diseño hidráulico colombiano ((INVÍAS), 2009; Ministerio de Vivienda, 2013)

Vulnerabilidad. Susceptibilidad de los elementos expuestos a sufrir daño cuando se materializa la amenaza, expresada en función de su fragilidad física, su capacidad operativa de respuesta y su exposición espacial. En este estudio se valora la vulnerabilidad técnica de la bocatoma con base en su localización dentro del corredor hidráulico clasificado en amenaza alta.

Zonificación de amenaza. Proceso de delimitación espacial de áreas expuestas a niveles diferenciados de amenaza por inundación. Ramos-Cañón et al. (2021), adoptada como criterio rector de la clasificación de amenaza en este estudio.

Introducción

En el piedemonte de la Cordillera Oriental del departamento del Huila, las quebradas que descienden con fuerte pendiente desde el Macizo de Garzón constituyen la fuente hídrica principal de la actividad agropecuaria de ladera. Las actividades predominantes son la caficultura tecnificada y de sol, los cultivos de pancoger (plátano, yuca, maíz y frijol) y la ganadería de doble propósito, que en conjunto ocupan los suelos de pendiente media a alta del piedemonte Victoria Beltrán & Equipo Popspr (2019) . En el Departamento del Huila se identifican más de treinta bocatomas y distritos de riego comunitarios de pequeña escala construidos sobre estas quebradas según los reportes de la Secretaría de Agricultura y Minería del Huila, que sostienen la economía de alrededor de 300 familias campesinas Gobernación del Huila (2011). Cuando llueve de forma intensa —eventos superiores a 60 mm en 24 horas—, los cauces responden en tiempos de concentración inferiores a treinta minutos, generando crecientes súbitas que arrastran sedimentos, troncos y material vegetal capaces de colmatar, volcar o destruir las bocatomas, interrumpiendo el servicio de riego durante las temporadas productivas más críticas lo cual es constatado en las visitas de campo realizadas a los distritos de riego del departamento Gobernación del Huila (2011). La paradoja resulta evidente: la misma fuente hídrica que sostiene la producción agrícola amenaza, durante eventos extremos, con destruir la infraestructura que permite aprovecharla.

Las inundaciones rápidas en microcuencas torrenciales del piedemonte andino constituyen una manifestación específica de la amenaza hídrica. La respuesta hidrológica ultrarrápida — tiempos de concentración inferiores a treinta minutos— se combina con velocidades de flujo elevadas y profundidades efectivas moderadas para configurar un fenómeno físicamente más cercano a la avenida torrencial que a la inundación de planicie. El trabajo se enuncia, no obstante, como evaluación de amenaza por inundación porque la modelación se resuelve mediante las

ecuaciones de aguas someras (Saint-Venant bidimensionales), formulación propia de la hidráulica de inundaciones que representa el flujo de agua clara. La alternativa —modelación reológica de flujos hiperconcentrados mediante esquemas tipo Voellmy o Herschel-Bulkley— exige parámetros que solo se obtienen en terreno (concentración volumétrica de sólidos, granulometría y espesor del material movilizable), inaccesibles bajo la Alerta Temprana N.º 009-26. La aproximación de agua clara se adopta entonces como referencia conservadora y así se declara en el Capítulo 6 (Alcance) y en la discusión, donde se advierte que un flujo con carga de sólidos incrementaría tirantes y esfuerzos sobre la estructura. Los resultados deben interpretarse, por tanto, reconociendo el carácter torrencial de la cuenca aportante, caracterizada por un índice de Melton de 0,473 que la sitúa en el dominio de las cuencas productoras de flujos hiperconcentrados Wilford et al. (2004).

El Distrito de Riego San José, ubicado en el corregimiento Las Mercedes del municipio de Algeciras, atiende a 65 familias campesinas que cultivan café asociado en las laderas medias de la Cordillera Oriental. Su bocatoma de fondo, construida sobre la Quebrada San Antonio en coordenadas $2^{\circ}25'7,37''\text{N} / 75^{\circ}22'1,69''\text{O}$ y a una elevación de 2.014,2 m s. n. m., capta un caudal concesionado de 55,2 L/s otorgado por la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena mediante Resolución N.º 0142 de 2008. La cuenca aportante, con 3,574 km² de área y pendiente media del 23 %, configura un sistema de respuesta hidrológica ultrarrápida para el cual no se identificaron valoraciones técnicas de amenaza publicadas o disponibles en las fuentes consultadas durante el primer semestre de 2026 —Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena, Sistema de Información de Movimientos en Masa del Servicio Geológico Colombiano y repositorios institucionales—, lo que indica un vacío de información técnica en la escala de la captación y no necesariamente una ausencia absoluta de estudios en el territorio.

Esta investigación se concibió, en su versión original, con el propósito de evaluar avenidas torrenciales, pero ante la dificultad de acceder al territorio se transformó a la amenaza por inundación sobre el Distrito de Riego San José. Lo anterior a consecuencia que, en marzo de 2026, se emitió la Alerta Temprana N.º 009-26 por parte de la Defensoría del Pueblo (2026), que declaró riesgo crítico de orden público sobre las veredas El Paraíso y La Arcadia del municipio de Algeciras por presencia de grupos armados organizados. La situación impidió las validaciones de campo previstas —levantamiento topográfico complementario, inspección de la bocatoma, verificación de coeficientes de rugosidad— y motivó una reformulación metodológica avalada por la dirección de tesis y radicada formalmente ante el Honorable Consejo de Facultad de la Universidad Santo Tomás el 28 de abril de 2026.

La reformulación adoptó como alternativa metodológica el procesamiento de sensores remotos y la computación en la nube, estrategia robusta para contextos donde el acceso de campo está restringido. La nueva aproximación se organizó en tres componentes articulados. El primero consistió en el procesamiento multitemporal de imágenes Sentinel-2 en Google Earth Engine para caracterizar los cambios en la cobertura vegetal de la cuenca aportante entre 2018 y 2024 y estimar su incidencia sobre la respuesta hidrológica. El segundo incorporó el producto satelital-pluviométrico CHIRPS v3.0 como validación cruzada de la serie histórica del IDEAM. El tercero migró la modelación hidráulica desde COLAB controlado desde Python específicamente mediante Landlab (OverlandFlow), lo que permitió la representación explícita de la dinámica transversal del flujo y un análisis más detallado de la vulnerabilidad de la bocatoma frente a eventos de diferentes períodos de retorno.

¿En qué medida la integración del procesamiento de sensores remotos en Google Earth Engine y la modelación hidrodinámica bidimensional de aguas someras en Python (landlab)

permite evaluar escenarios de amenaza por inundación sobre la bocatoma del Distrito de Riego San José?

El aporte original de la investigación se sitúa en cuatro dimensiones complementarias. Ofrece, en primer lugar, la primera valoración cuantitativa de amenaza por inundación para una bocatoma comunitaria del oriente del Huila ejecutada íntegramente con sensores remotos y computación en la nube. Entrega, en segundo lugar, un protocolo técnico replicable, ejecutable con datos institucionales colombianos de libre acceso (IGAC, IDEAM, CAM) y servicios académicos gratuitos (Google Earth Engine, Sentinel Hub), particularmente adecuado para distritos de riego comunitarios de alta montaña del departamento que enfrentan restricciones similares de acceso e información ultra detallada. Introduce, en tercer lugar, la modelación hidrodinámica 2D controlada desde Python como herramienta de simulación reproducible que supera las limitaciones intrínsecas de la modelación unidimensional para microcuencas con dinámica transversal relevante. Evalúa, en cuarto lugar, la incidencia del cambio de cobertura vegetal sobre la respuesta hidrológica e hidráulica de la cuenca, lo que sustenta empíricamente las recomendaciones de manejo preventivo.

1. Planteamiento del Problema

El departamento del Huila fundamenta una parte sustancial de su economía rural en tres actividades agropecuarias de ladera: la caficultura tecnificada y tradicional, los cultivos de pancoger (plátano, yuca, maíz, cítricos y frijol) y la ganadería de doble propósito Victoria Beltrán & Equipo Popspr (2019). Estas actividades ocupan los suelos de pendiente media a alta del piedemonte de la Cordillera Oriental y dependen de la disponibilidad continua de agua para riego, consumo doméstico rural y producción pecuaria. Esta dependencia se traduce en la operación permanente de bocatomas y sistemas de aducción construidos sobre las quebradas que descienden desde las divisorias altas, infraestructuras que resultan especialmente expuestas a las crecientes torrenciales derivadas de lluvias intensas.

La vulnerabilidad estructural de estas bocatomas frente a eventos hidrometeorológicos extremos se ha agudizado por la convergencia de tres procesos. La intensificación pluviométrica asociada a la fase fría del ENOS (El Niño-Oscilación del Sur; ENSO, por sus siglas en inglés) produjo incrementos del 18 % al 25 % en los volúmenes de precipitación 24 horas durante los episodios La Niña 2010–2011 y 2021–2023 en los Andes colombianos (Hoyos et al., 2013; IDEAM, 2017). El deterioro de la cobertura vegetal en las cuencas aportantes —por expansión cafetera, conversión a ganadería extensiva y prácticas agrícolas— ha elevado el Número de Curva ponderado y reducido el tiempo de concentración efectivo Li et al. (2020). El envejecimiento físico de las obras hidráulicas, construidas en su mayoría con criterios de captación ordinaria y no de resistencia frente a eventos extremos, completa el cuadro de fragilidad.

A esta vulnerabilidad estructural se suma una limitación de información que resulta estructural en la red de monitoreo hidrométrico colombiana: la ausencia de estaciones limnimétricas en las microcuencas tributarias impide la calibración directa de modelos

hidrológicos con observaciones de caudal. La consecuencia metodológica es la necesidad ineludible de recurrir a estrategias de transferencia regional, a modelos basados en variables de cuenca y a declaraciones cuantificadas de incertidumbre. Para las microcuencas torrenciales del oriente del Huila la limitación se agrava por una tercera capa de restricción: el acceso de campo, históricamente desafiante por la topografía y las distancias, ha sido sistemáticamente comprometido en la última década por situaciones de orden público —presencia de grupos armados organizados, operaciones militares y conflictos territoriales— que limitan la presencia institucional y académica en las zonas rurales de mayor altitud en las cuales se ubican las bocatomas de sistemas de riego.

El caso del Distrito de Riego San José ilustra esta convergencia. La Defensoría del Pueblo emitió en marzo de (2026) la Alerta Temprana N.º 009-26, que declaró riesgo crítico de orden público sobre el municipio de Algeciras, y las veredas que albergan la cabecera de la cuenca aportante de la Quebrada San Antonio. La alerta impidió las validaciones de campo previstas en la propuesta original de esta investigación —levantamiento topográfico complementario del cauce, inspección directa de la bocatoma y caracterización granulométrica del lecho—. La pregunta metodológica que esta situación plantea —cómo valorar técnicamente la amenaza por inundación sobre una infraestructura crítica cuando el acceso de campo está restringido— excede el caso particular del Distrito San José y configura un problema de mayor alcance para la gestión del riesgo en territorios rurales colombianos.

El problema central que aborda esta investigación es, en consecuencia, la ausencia de una adaptación operativa de los protocolos existentes para evaluar escenarios de amenaza sobre las bocatomas de los distritos de riego comunitarios del Huila bajo restricciones de acceso de campo. El país dispone de instrumentos metodológicos consolidados —la guía del Servicio Geológico

Colombiano para la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales, los lineamientos IDEAM para la formulación de POMCA y la Guía Técnica del Fondo Adaptación—, cuyos supuestos de partida, sin embargo, presuponen registros hidrométricos, levantamientos topográficos y verificación en terreno. El vacío no es entonces metodológico en sentido estricto, sino de escalamiento y de adaptación: la literatura nacional ofrece avances en cuencas grandes y medianas, pero su traslado a microcuencas torrenciales de menos de 5 km², sin instrumentación y con acceso restringido, requiere adaptaciones específicas que aún no se han consolidado en una guía operativa replicable.

El trabajo aborda este vacío mediante la integración de sensores remotos en Google Earth Engine y modelación hidrodinámica 2D de aguas someras en Python (landlab). Conviene precisar el alcance de ese aporte. La investigación no persigue la calibración de los modelos hidrológico e hidráulico: la ausencia de estación limnimétrica en la cuenca aportante y la restricción de acceso derivada de la Alerta Temprana N.º 009-26 impiden disponer de las observaciones de caudal o de nivel contra las cuales toda calibración se define. Lo que se produce es un procedimiento de evaluación ejecutable bajo esas restricciones, cuyo valor se sustenta en un atributo verificable: la reproducibilidad íntegra del flujo de trabajo con datos institucionales de libre acceso y código abierto (Anexos A, D y E). La fiabilidad del procedimiento así entendida, y los límites que impone al uso de sus resultados, se desarrollan de forma explícita en el apartado 10.6.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar escenarios de amenaza por inundación en el Distrito de Riego San José mediante el procesamiento de sensores remotos en Google Earth Engine y modelación hidrodinámica en Python.

2.2 Objetivos Específicos

La investigación se estructura en cuatro objetivos específicos cuya secuencia constituye, además, la columna vertebral del capítulo metodológico y del capítulo de resultados:

1. Caracterizar la cuenca abastecedora mediante la integración del modelo digital de terreno de alta resolución (6 m) y el procesamiento multitemporal.
2. Determinar la respuesta hidrológica de la cuenca para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.
3. Zonificar la amenaza por inundación mediante modelación hidrodinámica 2D, analizando la vulnerabilidad de la bocatoma.
4. Formular lineamientos técnicos de manejo preventivo, evaluando la incidencia del cambio en la cobertura vegetal sobre la infraestructura de captación.

3. Justificación

La justificación del estudio se presenta de forma integrada, articulando las dimensiones técnico-científica, económico-productiva, institucional-normativa y de política de investigación con las problemáticas identificadas en el área de estudio.

3.1 Justificación técnico-científica

El trabajo se justifica técnico-científicamente debido a las problemáticas identificadas en el área de estudio. El incremento de la precipitación extrema —con aumentos del 18 % al 25 % en los volúmenes de 24 horas durante episodios La Niña— ha intensificado la frecuencia de crecientes que dañan las bocatomas de los distritos de riego comunitarios del Huila Gobernación del Huila (2011), amenazando la seguridad alimentaria y el sustento económico de las familias campesinas. Frente a esta problemática, el estudio aporta tres componentes técnicos articulados: el procesamiento en la nube de imágenes Sentinel-2 en Google Earth Engine para la caracterización dinámica de la cobertura vegetal de la cuenca aportante; la modelación hidrodinámica bidimensional en Python (librería landlab–OverlandFlow) para representar explícitamente las zonas de mayor amenaza sobre las bocatomas; y la automatización del flujo de trabajo desde Python (Lab, 2025; Solomon, 2015), que facilita la replicación del protocolo en otros distritos de riego del departamento. Este acoplamiento metodológico es aún poco frecuente en la literatura colombiana sobre cuencas de montaña y constituye el aporte técnico principal del estudio.

3.2 Justificación económico-productiva

El estudio protege una inversión pública y comunitaria inicial de \$748.339.768 pesos colombianos a precios de 2008, según el registro de distritos de riego de pequeña escala de la Secretaría de Agricultura y Minería del Huila (2026), equivalentes a \$1.844.720.777 de julio de

2026 de acuerdo con la variación acumulada del Índice de Precios al Consumidor del DANE. Esta infraestructura sostiene los medios de vida de 65 familias campesinas de la vereda San José, en el municipio de Algeciras. La afectación de la bocatoma, el desarenador o los pasos elevados interrumpiría el servicio de riego hasta la rehabilitación de las obras, gestión que en el marco de la Ley 1523 de 2012 correspondería al Fondo Municipal de Gestión del Riesgo de Algeciras, con eventual cofinanciación de la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena o de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. El período de rehabilitación de este tipo de obras comunitarias se sitúa, con base en el juicio experto del autor derivado de su experiencia en la supervisión de contratos de rehabilitación de distritos de riego en la Secretaría de Agricultura y Minería del Huila, entre seis y dieciocho meses; se trata de una apreciación profesional y no de un dato documentado, y así debe leerse. Una interrupción de esa duración abarca al menos un ciclo productivo completo y comprometería la cosecha del período, con efectos sobre la capacidad de pago de obligaciones agropecuarias y la disponibilidad de capital para insumos del ciclo siguiente. La cuantificación de estos efectos excede el alcance de esta investigación y se propone como línea de trabajo posterior.

3.3 Justificación institucional-normativa

La investigación se alinea con la política nacional de gestión del riesgo de la (Ley 1523, 2012) con las directrices de cambio climático de la Ley 1931 de 2018, con las metas de resiliencia de la Ley 2169 de 2021 y con el marco de planificación de cuencas del Decreto 1640 de 2012. Con ello operacionaliza el Marco de Sendai 2015–2030 UNDRR (2015) y aportaría insumos técnicos para el inicio del POMCA del río Neiva Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2026). El enfoque metodológico —sensores remotos y computación en la nube— se alinea con la Política Nacional de Datos Abiertos del Ministerio de Tecnologías de la Información y las

Comunicaciones, que promueve el uso de información satelital pública y herramientas de cómputo gratuitas para la investigación aplicada.

3.4 Justificación de política de investigación

La metodología propuesta resulta replicable en los más de treinta distritos de riego comunitarios de alta montaña del Huila y, por extensión, en cuencas de montaña tropicales similares de Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia. La replicabilidad se materializa en el Anexo A (protocolo paso a paso), el Anexo D (Cuaderno de Google Colab – Procesamiento) y el Anexo E (Cuaderno de Google Colab – Python), que permiten a profesionales de corporaciones autónomas, universidades regionales y consultoras locales aplicar el diseño metodológico sin licencias de software costosas. La capacidad de ejecutar el análisis sin presencia de campo —en contextos donde el acceso está restringido por razones de orden público— amplía sustancialmente el rango de aplicabilidad práctica de la metodología.

4. Pertinencia Social

El impacto social de esta investigación es directo y medible. La protección efectiva de la bocatoma del Distrito de Riego San José garantiza la continuidad del servicio de riego para 65 familias campesinas cuya economía depende del flujo permanente de agua hacia las parcelas cafeteras y los huertos de pancoger. Cuando una inundación torrencial daña la bocatoma, las consecuencias superan con creces la pérdida de la estructura física: la interrupción del riego durante la temporada productiva puede significar la pérdida total de la cosecha de café, principal ingreso semestral de estas familias. Ese daño desencadena un efecto en cascada documentado por los estudios de economía rural andina (Forero-Álvarez, 2010; PNUD, 2011): endeudamiento creciente con casas comerciales y bancos cooperativos, incapacidad de comprar insumos para el siguiente ciclo y, en los casos más extremos, abandono definitivo de la parcela.

Existe una dimensión de equidad territorial particularmente relevante para esta investigación. Las familias del Distrito de Riego San José son representativas del segmento de la población rural andina con menor capacidad de absorber pérdidas: tienen acceso limitado al crédito formal y al sistema de seguros agropecuarios, rara vez participan en los procesos de planificación territorial donde se asignan recursos públicos para infraestructura y dependen de la información técnica que las instituciones puedan ofrecerles para tomar decisiones informadas. Proporcionar a la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena, a la Gobernación del Huila, a la Secretaría de Agricultura departamental y a la propia Asociación de Usuarios del distrito el conocimiento técnico para diseñar medidas de manejo preventivo informadas por evidencia constituye, en este sentido, un acto de justicia distributiva.

La pertinencia social del estudio se proyecta sobre una dimensión metodológica sensible al contexto colombiano contemporáneo. La imposibilidad de realizar trabajo de campo por

situaciones de orden público no es una circunstancia excepcional sino una condición estructural en numerosos territorios rurales del país. La demostración práctica de que es posible producir evaluaciones cuantitativas de amenaza con rigor técnico utilizando exclusivamente sensores remotos y computación en la nube abre una vía operativa para que la investigación aplicada continúe sirviendo a las comunidades en territorios donde la presencia institucional está limitada. Este elemento eleva el valor estratégico del trabajo más allá del caso de estudio particular y lo posiciona como referente para la gestión del riesgo en territorios de difícil acceso del país. Debe precisarse, sin embargo, el alcance de esta pertinencia social. El 21 de noviembre de 2024 se adelantó una visita de reconocimiento a la zona de estudio, en la cual se levantaron los puntos GPS y el registro fotográfico de la captación, se reconocieron las condiciones del terreno y se sostuvo conversación con miembros de la comunidad usuaria del distrito. Esa visita constituyó el único acceso directo al área: el deterioro posterior de las condiciones de orden público impidió regresar y, con ello, aplicar instrumentos sistemáticos de percepción del riesgo o adelantar un proceso participativo formal. La investigación no incorpora, por tanto, un componente participativo estructurado, y la caracterización social se apoya en ese reconocimiento inicial y en el suministro documental de información sobre la infraestructura por parte de la Asociación de Usuarios. En consecuencia, los productos de esta investigación constituyen un insumo técnico que requiere validación social previa a su implementación, para lo cual el apartado 9.7 incorpora una fase de cartografía social del riesgo y de validación comunitaria de los mapas de amenaza, a ejecutarse cuando las condiciones de seguridad lo permitan.

5. Marco Referencial

El marco referencial articula los fundamentos teóricos, conceptuales y normativos que sostienen la investigación, junto con un análisis crítico del estado del arte. Su estructura responde a las directrices metodológicas para tesis de maestría de la Universidad Santo Tomás.

5.1 Marco Teórico

5.1.1 Inundación en microcuencas torrenciales del piedemonte andino

La inundación en microcuencas torrenciales del piedemonte andino constituye una categoría específica de la amenaza hídrica Ramos-Cañón et al. (2021). La respuesta hidrológica ultrarrápida —tiempos de concentración inferiores a treinta minutos— se combina con velocidades de flujo elevadas (entre 5 m/s y 12 m/s) y profundidades efectivas moderadas (entre 0,3 m y 0,8 m) para configurar un fenómeno físicamente más cercano a la avenida torrencial que a la inundación de planicie (Marchi et al., 2010; Ramos-Cañón et al., 2021). Wilford et al. (2004) demostraron, mediante el análisis del índice de Melton ($MR = \Delta H / \sqrt{A}$), que las microcuencas con MR entre 0,3 y 0,6 producen flujos hiperconcentrados o debris floods cuya concentración volumétrica de sedimentos oscila entre el 20 % y el 47 %, lo que configura un régimen reológico intermedio entre el agua clara y el flujo de escombros. El $MR = 0,473$ calculado para la cuenca de la Quebrada San Antonio se sitúa plenamente en este rango de transición.

5.1.2 Modelación hidrodinámica bidimensional

La modelación hidrodinámica bidimensional resuelve numéricamente las ecuaciones de aguas someras de Saint-Venant (continuidad y momentum) Ghimire et al. (2022) sobre mallas

computacionales que representan la geometría real del terreno. Las ecuaciones de gobierno que

rigen el sistema son: (1) *Continuidad*: $\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q$;

(2) *Momentum en x*: $\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + \frac{gh^2}{2})}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = gh(S_{0x} - Sf_x)$;

(3) *Momentum en y*: $\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2 + \frac{gh^2}{2})}{\partial y} = gh(S_{0y} - Sf_y)$;

donde h es la profundidad del flujo (m), u y v son las velocidades medias en x e y (m/s), $g = 9,81$ m/s², q es el caudal lateral por unidad de área, S_{0x} y S_{0y} son las pendientes del fondo, y Sf_x y Sf_y son las pendientes de fricción calculadas con la ecuación de Manning Brunner (2016). Landlab (OverlandFlow). Librería de Python que resuelve las ecuaciones de aguas someras en 2D mediante el esquema explícito de la aproximación de inercia local De Almeida et al. (2012), con paso de tiempo adaptativo controlado por la condición de Courant. Frente a la modelación unidimensional, la aproximación 2D permite representar explícitamente la dinámica transversal del flujo e identificar zonas de desbordamiento lateral sobre la bocatoma Bates et al. (2010).

5.1.3 Sensores remotos y computación en la nube: Google Earth Engine

Google Earth Engine (GEE) es una plataforma de computación en la nube desarrollada por Google que combina un catálogo de petabytes de imágenes satelitales y productos geoespaciales con una infraestructura de cómputo distribuido optimizada para el análisis a escala planetaria Gorelick et al. (2017). La plataforma ofrece APIs en JavaScript y Python, integración nativa con productos clave para la gestión del riesgo —MODIS, Landsat, Sentinel-1 y Sentinel-2, CHIRPS, ERA5, MERIT DEM— y un modelo de ejecución diferida (*lazy evaluation*) que permite encadenar operaciones complejas sin penalizar el rendimiento. Para microcuencas con datos escasos y acceso de campo restringido, GEE habilita análisis multitemporales de cobertura vegetal, validación de

precipitación con CHIRPS, detección de cambios de uso del suelo y caracterización morfométrica complementaria, todos ejecutables desde un navegador web sin instalación local de software ni descarga masiva de datos. La elección de GEE en esta investigación responde a tres razones directamente ligadas a las condiciones del estudio. Primera: permite acceder al archivo histórico de Sentinel-2 y a los productos globales de suelo y cobertura sin descarga masiva de imágenes ni infraestructura de cómputo local. Segunda: hace posible caracterizar el cambio de cobertura de la cuenca aportante sin verificación en terreno, restricción impuesta por la Alerta Temprana N.º 009-26. Tercera: el código queda documentado y es ejecutable por terceros desde un navegador, lo que sostiene el objetivo de entregar un procedimiento replicable por las corporaciones autónomas regionales y los municipios en otras captaciones comunitarias. Sobre esa base, GEE se emplea aquí para el procesamiento multitemporal de Sentinel-2 (2018 vs 2024) sobre la cuenca aportante de la Quebrada San Antonio.

5.1.4 Análisis multitemporal de cobertura vegetal con Sentinel-2

La misión Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea, compuesta por dos satélites gemelos (2A y 2B), provee imágenes multispectrales de trece bandas con resolución espacial de 10 m (bandas visibles y NIR), 20 m (bandas *red-edge* y SWIR) y 60 m (bandas atmosféricas), con revisita combinada de aproximadamente cinco días ESA (2015). Esta resolución espacial-temporal hace de Sentinel-2 el sensor de referencia para el análisis de cobertura vegetal en microcuencas andinas, donde la heterogeneidad espacial requiere resoluciones inferiores a 30 m y la dinámica fenológica exige observaciones frecuentes. El procesamiento multitemporal típico incluye el filtrado por cobertura nubosa mediante la banda QA60, la composición anual mediante reducción por mediana o percentil para reducir ruido, el cálculo de índices espectrales como NDVI $[(NIR - Red) / (NIR + Red)]$ y NDWI $[(Green - NIR) / (Green + NIR)]$ para discriminar vegetación, agua

y suelo desnudo, y la clasificación supervisada o no supervisada para producir mapas de cobertura. La presente investigación adopta este flujo en GEE para comparar dos ventanas anuales completas (enero–diciembre) sobre la cuenca aportante de la Quebrada San Antonio: 2018, adoptada como línea base por su coincidencia temporal con el modelo digital de terreno IGAC de 6 m empleado en la modelación hidrodinámica, y 2024, año completo más reciente disponible al momento del procesamiento. El intervalo de seis años entre ambas ventanas permite detectar transiciones de cobertura atribuibles a la expansión cafetera y ganadera, cuya escala temporal es plurianual, sin que la variabilidad fenológica interanual domine la señal; el efecto residual de esa variabilidad se atenúa mediante el compuesto anual por mediana.

5.1.5 Método del Número de Curva del SCS

El método del Número de Curva, desarrollado por el Soil Conservation Service del U.S. Department of Agriculture (Mishra & Singh, 2003; (NRCS), 1986), estima la escorrentía directa producida por un evento de precipitación a partir de un parámetro adimensional CN que integra el grupo hidrológico de suelo (HSG), el uso y cobertura del suelo y la condición de humedad antecedente (AMC). El grupo hidrológico clasifica el suelo en cuatro categorías (A a D) según su tasa de infiltración en condición de saturación y con el perfil completamente húmedo: A corresponde a suelos de infiltración alta —arenosos, bien drenados— y D a suelos de infiltración muy baja —arcillosos o de perfil delgado sobre estrato impermeable—. En la cuenca aportante de la Quebrada San Antonio solo se presentan los grupos B (52 % del área) y D (48 %), según se detalla en el apartado 8.1. En esta investigación se utiliza como modelo conceptual de la respuesta hidrológica de la cuenca aportante: el CN-II ponderado se estimó mediante la combinación de la cobertura de la tierra del producto ESA WorldCover y los grupos hidrológicos de suelo derivados de la clase textural USDA del producto OpenLandMap. La conversión entre AMC-III (escenario

pesimista La Niña) y AMC-II (condición de diseño) se presenta como referencia de escenarios climáticos pesimistas en la zona de estudio. El método resulta particularmente apto para el análisis de escenarios de cambio en la cobertura, dado que admite la simulación explícita del efecto de la reforestación o de la conversión a usos agrícolas sobre el caudal pico como los efectos que presenta Li et al. (2020).

5.1.6 Análisis frecuencial de precipitación: ajuste de distribuciones

La estimación de cuantiles de precipitación máxima 24 horas para los períodos de retorno de diseño se sustenta en el ajuste estadístico de distribuciones de probabilidad sobre la serie de máximos anuales. La presente investigación aplica el método de los momentos-L propuesto por Hosking (1990), alternativo al método de momentos convencional. Los momentos-L son combinaciones lineales de estadísticos de orden con menor sesgo en muestras pequeñas ($n < 50$) y mayor robustez frente a valores atípicos —dos propiedades especialmente valiosas para series colombianas de longitud intermedia. Sobre la serie 1982–2025 de la estación La Arcadia [21100140] se ajustaron dos distribuciones: Gumbel (valor extremo tipo I) y Log-Pearson III. La selección de la distribución de diseño se sustenta en cuatro criterios: la L-asimetría observada de la serie, la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, la convergencia de cuantiles entre distribuciones para $T_r \leq 100$ años y la práctica establecida en las guías colombianas para cuencas de montaña (IDEAM, 2017; Ministerio de Vivienda, 2013).

5.1.7 Gestión del riesgo: enfoque sistémico

La (Ley 1523, 2012), que adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres en Colombia, define el riesgo como el producto de tres componentes interdependientes: la amenaza, la vulnerabilidad y la exposición. Esta investigación se concentra en la valoración de la

amenaza por inundación y en la valoración técnica de la vulnerabilidad estructural de la bocatoma. Los componentes restantes —vulnerabilidad social y económica de las 65 familias usuarias, y exposición de la infraestructura complementaria del distrito— demandan un censo de vulnerabilidad, un levantamiento topográfico de detalle y la instalación de instrumentación hidrométrica, actividades que corresponden institucionalmente al municipio de Algeciras a través de su Consejo Municipal de Gestión del Riesgo y a la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena en el marco del artículo 31 de la Ley 1523 de 2012, y que se formulan en el apartado 9.7 como fase subsiguiente, con sus actividades y responsables institucionales, de modo que los resultados queden articulados a una ruta de implementación y no cerrados en el diagnóstico físico. El Marco de Sendai 2015–2030 UNDRR (2015) y la Ley 2169 de 2021 imponen, adicionalmente, criterios de resiliencia climática que esta investigación incorpora mediante la inclusión de escenarios climáticos pesimistas y el análisis de la incidencia del cambio en la cobertura vegetal.

5.2 Marco Conceptual

Los términos esenciales empleados en esta investigación se definen en el Glosario del documento. En este apartado se hace énfasis en la articulación lógica entre los conceptos: la cuenca como unidad de análisis (concepto geomorfológico y de planificación territorial); la inundación como manifestación física de la amenaza hídrica (concepto hidráulico-hidrológico); el carácter torrencial como modificador del fenómeno en cuencas con índice de Melton entre 0,3 y 0,6 (concepto reológico); la vulnerabilidad como susceptibilidad técnica de la infraestructura (concepto de ingeniería estructural); y el manejo preventivo como conjunto articulado de medidas orientadas a reducir el riesgo desde la cobertura vegetal y las prácticas territoriales (concepto de gestión integral). Esta articulación constituye la lógica de los capítulos 7 a 9.

5.3 Marco Legal

La normativa colombiana de mayor aplicabilidad directa a la investigación se sintetiza en la Tabla 1.

Tabla 1. *Normativa colombiana aplicable a la gestión del riesgo en distritos de riego comunitarios*

Norma	Descripción	Relevancia para el estudio
Ley 1523 de 2012	Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres; crea el SNGRD.	Define amenaza, vulnerabilidad y riesgo; sustento conceptual.
Ley 1931 de 2018	Directrices para la gestión del cambio climático.	Obliga a incorporar variabilidad y cambio climático en la planificación de infraestructura.
Ley 2169 de 2021	Metas de resiliencia climática 2030.	Exige criterios de resiliencia en los instrumentos sectoriales.
Decreto 1640 de 2012	Planificación, ordenación y manejo de cuencas.	Marco legal de la SZH 2110 como unidad de análisis.
Resolución CAM 0142 de 2008	Concesión de 55,2 L/s a ASOSANJOSE.	Sustento legal de la operación de la bocatoma.
Guía SGC Ramos-Cañón et al. (2021)	Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Avenidas Torrenciales.	Marco metodológico rector de referencia para análisis de efectos sobre bocatomas
Manual MVCT (2013)	Manual de Drenaje Urbano del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.	Estándar de períodos de retorno y curvas IDF.
Manual INVÍAS (2009)	Manual de Drenaje para Carreteras del Instituto Nacional de Vías.	Estándar de períodos de retorno para obras de paso.
Marco de Sendai 2015–2030 (2015)	Marco internacional para la reducción del riesgo de desastres (UNDRR).	Referencia internacional para el horizonte y los indicadores.

5.4 Estado del Arte

A nivel mundial, la evolución metodológica para la evaluación de amenaza por inundación en cuencas de montaña se apoya en tres líneas de desarrollo convergentes. La primera concierne la modelación hidrodinámica: Ghimire et al. (2022) evaluaron modelos HEC-RAS unidimensionales y bidimensionales para la predicción de tiempos de viaje de la creciente y de áreas de inundación en sistemas de alerta temprana, confirmando ventajas de la representación 2D en cuencas con topografía compleja. Peker et al. (2024) demostraron, en la cuenca del río Göksu (Turquía), que la integración de HEC-RAS 2D con sistemas de información geográfica produce cartografías de amenaza cuya precisión depende principalmente del coeficiente de Manning y de la resolución del modelo digital de terreno, dos variables que en esta investigación se controlan mediante el MDT de 6m de IGAC (2018) y la calibración del coeficiente de Manning descrita en la sección 7.6.

La segunda línea concierne al procesamiento satelital: Gorelick et al. (2017) presentaron la arquitectura de Google Earth Engine como plataforma de computación geoespacial en la nube; Drusch et al. (2012) describieron las especificaciones técnicas de Sentinel-2; y Karra et al. (2021) demostraron que los productos ESA WorldCover derivados de Sentinel-2 a 10 m de resolución alcanzan exactitudes superiores al 75 % en biomas tropicales, sustentando su incorporación directa en flujos SCS-CN sin necesidad de cartografía local adicional.

La tercera línea corresponde al ajuste estadístico de series de precipitación extrema: Hosking (1990) propuso los ajustes de distribuciones como alternativa de estimación con menor

sesgo en muestras pequeñas y mayor robustez frente a valores atípicos respecto a los momentos convencionales, Hosking & Wallis (1997) extendieron el método al análisis regional de frecuencias. El efecto del cambio de cobertura sobre la respuesta hidrológica ha sido cuantificado en dos contextos de referencia: Li et al. (2020) demostraron, en cuencas chinas de morfometría similar a la Quebrada San Antonio, que la reforestación reduce el caudal pico mediante el incremento de la abstracción inicial y el aumento de la rugosidad superficial efectiva; y Widyasasi et al. (2024) cuantificaron en cuencas tropicales montañosas de Indonesia una reducción promedio de 1,68 m³/s por cada unidad de disminución del CN ponderado, valor adoptado como referencia comparativa en el Capítulo 8.

En materia de validación con modelos hidrológicos globales, Snow et al. (2016) describieron la arquitectura original del sistema GEOGLOWS ECMWF y Hales et al. (2022) presentaron su segunda versión, que opera sobre la red hidrográfica global MERIT Hydro; aunque el sistema no opera nativamente sobre microcuencas menores a 50 km², la transferencia regional con factores de área calibrados con métricas de eficiencia Nash-Sutcliffe Moriasi et al. (2007) constituye una práctica emergente documentada por BYU Hydroinformatics Lab (2025) para cuencas andinas no instrumentadas. En el contexto regional de América Latina y los Andes tropicales, los avances muestran progresos en cuencas de escala mayor con aplicabilidad creciente a microcuencas de montaña. Godara et al. (2024) compararon, en una cuenca empinada de Noruega, los enfoques de modelación con hidrograma de entrada y con lluvia directa (Rain-on-Grid) en TELEMAC-2D y HEC-RAS 2D, encontrando buen desempeño de ambos enfoques en eventos de tormenta simples (NSE 0,70-0,90 y R entre 0,93 y 0,95) pero limitaciones compartidas

frente a eventos prolongados multi-pico; esta evidencia respalda la adopción del enfoque con hidrograma de entrada en la presente investigación.

Wulder et al. (2019) evidenciaron el potencial de Google Earth Engine para análisis multitemporales de cobertura vegetal en cuencas andinas, confirmando que los cambios de uso del suelo pueden ser detectados con precisión suficiente para alimentar modelos SCS-CN incluso en contextos con acceso de campo limitado. La validación de productos satelitales pluviométricos en la región andina ha ganado consistencia con la adopción de CHIRPS: introducido globalmente por Funk et al. (2015) como producto cuasi-global de precipitación diaria a $0,05^\circ$ de resolución, este producto se ha demostrado como fuente confiable de series históricas en condiciones donde la densidad de la red de estaciones es insuficiente, situación estructural del piedemonte andino colombiano. La versión v3.0 (2023) mejoró el algoritmo de combinación satelital-estación y extendió la cobertura temporal hasta 1981. A esta línea de evidencia regional se suman desarrollos recientes que amplían la aplicabilidad del método del Número de Curva (SCS-CN) y de la modelación hidrológica de pequeña escala en los Andes. Merizalde et al. (2023) integraron datos geográficos y el método SCS-CN con redes LSTM para mejorar el pronóstico de escorrentía en una cuenca de 3.340 km^2 con escasez de pluviometría directa en los Andes ecuatorianos, Este antecedente sustenta dos decisiones de la presente investigación: la adopción del SCS-CN como método de transformación lluvia–escorrentía, por su vigencia demostrada en cuencas andinas sin pluviometría densa, que es exactamente la condición de la Quebrada San Antonio, y la construcción del CN a partir de productos globales de cobertura y suelo en lugar de cartografía local. La diferencia de escala entre ambos casos (3.340 km^2 frente a $3,574 \text{ km}^2$) se reconoce de forma explícita: en la microcuenca de estudio la respuesta es de tipo torrencial y el tiempo de

concentración es inferior a una hora, por lo que el método se aplica aquí a escala de evento de diseño y no de pronóstico continuo. En la misma línea de modelación hidrológica e hidráulica de quebradas andinas de pequeña escala, Tenesaca-Saca et al. (2024) aplicaron modelación hidráulica tipo HEC-RAS para identificar zonas de inundación en la quebrada Las Abras (Riobamba, Ecuador), antecedente metodológico afín a la delimitación de amenaza en cauces torrenciales de piedemonte abordada en esta investigación. Sobre la propagación de crecidas súbitas, Contreras & Escauriaza (2020) (retomado también en la sección 10.2 de este documento) modelaron el efecto de la concentración de sedimentos en la propagación de crecidas súbitas (flash floods) en una cuenca andina chilena, evidenciando que estos eventos conservan velocidades y tirantes elevados a distancias considerables del punto de generación, patrón consistente con los resultados hidrodinámicos obtenidos en la bocatoma del Distrito San José (sección 8.4). Finalmente, en el análisis frecuencial de precipitaciones extremas, Flores-Quispe et al. (2022) desarrollaron una regionalización de la precipitación máxima diaria en la región de Moquegua (Perú) mediante análisis clúster y ajuste de distribuciones de probabilidad por región homogénea, enfoque que refuerza la pertinencia metodológica del ajuste estadístico aplicado a la serie La Arcadia (sección 8.2.3) en contextos andinos con redes pluviométricas dispersas.

A nivel nacional, la investigación colombiana sobre evaluación hidrológica en cuencas de montaña y el uso de herramientas satelitales muestra avances concretos, aunque con brechas persistentes. Urrea et al. (2019) documentaron correlaciones diarias entre CHIRPS y las observaciones del IDEAM superiores a 0,85 en la región andina, mientras que Cepeda Arias & Cañón Barriga (2022) confirmaron el buen desempeño de CHIRPS frente a TerraClimate en una cuenca altoandina colombiana, lo que sustenta el uso de CHIRPS v3.0 como fuente de validación

cruzada de la serie La Arcadia [21100140] y como complemento espacial sobre la cuenca aportante. El método de ajuste de distribuciones no estacionarias ha sido aplicado en Colombia por Carvajal-Serna & Grajales-Cardona (2019), quienes encontraron que el enfoque estacionario puede subestimar hasta en un 39 % los cuantiles de intensidad-duración-frecuencia frente al enfoque no estacionario en la cuenca del río Medellín, evidencia que motiva un tratamiento cuidadoso de la estacionariedad en los registros históricos de la presente investigación. No obstante, la literatura nacional carece de precedentes para la evaluación cuantitativa de amenaza por inundación en bocatomas comunitarias de pequeña escala mediante modelación hidrodinámica 2D bajo restricciones de acceso de campo, brecha que esta investigación busca cerrar mediante la integración de sensores remotos y computación en la nube como alternativa metodológica.

6. Alcance

La presente investigación produce la primera valoración cuantitativa de amenaza por inundación sobre la bocatoma del Distrito de Riego San José ejecutada íntegramente con sensores remotos y computación en la nube. La caracterización de la cuenca aportante de la Quebrada San Antonio (3,574 km²) se desarrolla mediante la integración del modelo digital de terreno IGAC de seis metros (2018) y el análisis multitemporal Sentinel-2 (2018 vs 2024) procesado en Google Earth Engine. La modelación hidrodinámica bidimensional cubre el corredor hidráulico aguas arriba de la bocatoma, con resolución de cómputo de 6 m sobre el dominio principal. Los períodos de retorno evaluados son 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, conforme al estándar de diseño hidráulico colombiano establecido por el Manual de Drenaje Urbano del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2013) y el Manual de Drenaje para Carreteras del Instituto Nacional de Vías INVÍAS, (2009).

El análisis hidrológico se sustenta en la serie de 44 años (1982–2025) de máximos diarios anuales de la estación La Arcadia [21100140] del IDEAM (2025), derivada de la serie diaria 1982–2025 con relleno por el método Normal Ratio. Se complementa con el análisis regional de las diecinueve estaciones disponibles en la Sub Zona Hidrográfica del río Neiva (SZH 2110) y con la validación cruzada del producto satelital-pluviométrico CHIRPS v3.0. El cálculo de los cuantiles de precipitación máxima 24 horas se realiza mediante el ajuste de las distribuciones Gumbel y Log-Pearson III, con adopción de Log-Pearson III para el diseño.

El estudio no aborda la evaluación integral del riesgo —entendida como el producto amenaza $\times$ vulnerabilidad $\times$ exposición— porque los componentes de vulnerabilidad social y económica de la población usuaria requerirían un análisis socio-hidrológico complementario. La vulnerabilidad técnica de la bocatoma se valora con criterios estructurales y de exposición espacial,

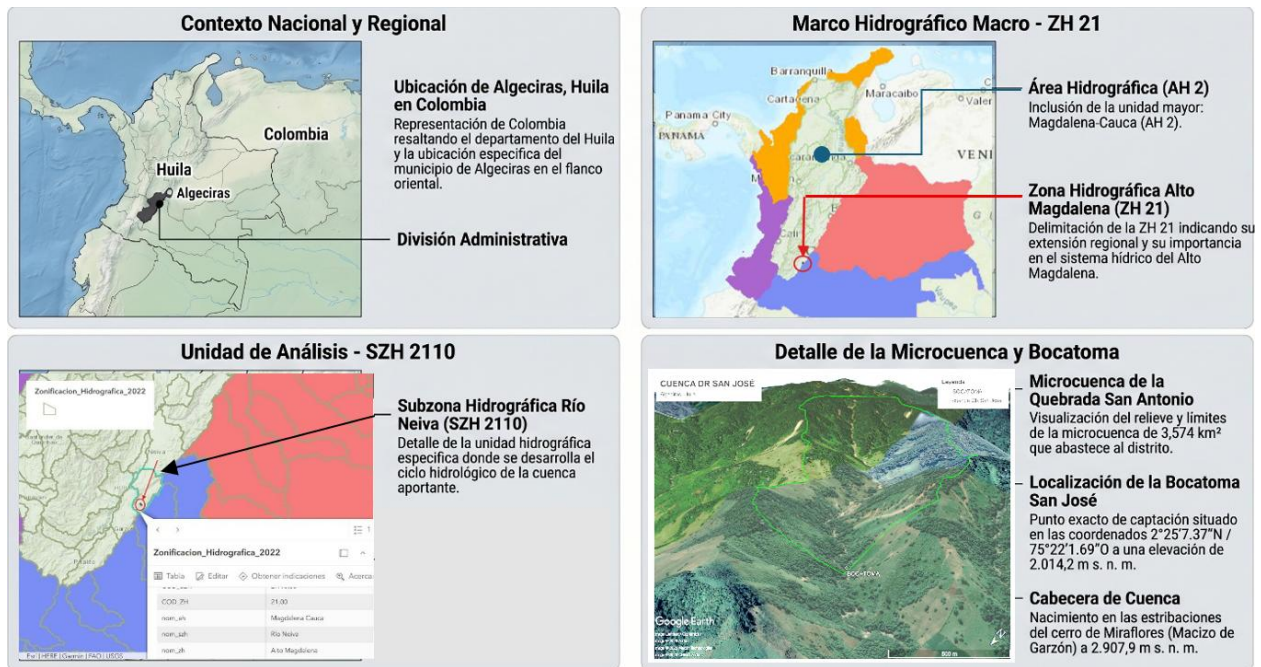
no con valoración integral del riesgo. Tampoco se incluye la modelación reológica explícita de flujos de escombros con concentraciones volumétricas superiores al 47 %, dado que la cuenca aportante presenta $MR = 0,473$ que la sitúa en el dominio de los *debris floods* —flujos hiperconcentrados— y no en el de los *debris flows*. Los modelos hidráulicos se desarrollan en condiciones de agua clara como límite superior conservador, decisión justificada por la clasificación geomorfológica de la cuenca y por la ausencia de datos granulométricos locales. Las limitaciones declaradas adicionales se compilan y discuten en el Capítulo 10.

7. Metodología

El diseño de investigación es cuantitativo de tipo aplicado, con alcance correlacional y explicativo. La metodología se articula en cuatro fases secuenciales correspondientes a los cuatro objetivos específicos. El referente metodológico rector es la *Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Avenidas Torrenciales* del Servicio Geológico Colombiano Ramos-Cañón et al. (2021), complementada con los estándares internacionales de modelación hidrodinámica 2D del U.S. Army Corps of Engineers (USACE) (2024) y con prácticas emergentes de teledetección en la nube y validación cruzada con modelos globales (Gorelick et al., 2017; Hales et al., 2022) .

7.1 Área de Estudio

La cuenca de la Quebrada San Antonio nace en las estribaciones del cerro de Miraflores (Macizo de Garzón) y desciende con fuerte pendiente hacia el valle del río Neiva. Pertenece a la Sub Zona Hidrográfica del río Neiva (SZH 2110), comprendida en la Zona Hidrográfica Alto Magdalena (ZH 21) y, a su vez, en el Área Hidrográfica Magdalena-Cauca (AH 2). El cauce desciende desde la cota máxima de 2.907,9 m s. n. m. hasta la bocatoma del Distrito de Riego San José en la cota 2.014,2 m s. n. m., para un relieve total de 893,7 m. La cuenca aportante tiene un área de 3,574 km² y un perímetro de 8,392 km, con pendiente media del 53,56 %. La localización general del área de estudio se presenta en la Figura 1.

Figura 1. Localización del área de estudio.

Nota. Localización del área de estudio: cuenca de la Quebrada San Antonio y Distrito de Riego San José en el municipio de Algeciras (Huila, Colombia). Fuente: elaboración propia en ArcGIS Pro con datos IGAC (2018) e IDEAM (2013), Google Earth.

Tabla 2. *Características generales del área de estudio y de la infraestructura del Distrito de Riego San José*

Elemento	Coordenadas / Magnitud	Descripción
Bocatoma DR San José	2°25'7,37"N / 75°22'1,69"O — 2.014,2 m s. n. m.	Bocatoma de fondo, concesión 55,2 L/s (Resolución CAM 0142 de 2008).
Cuenca aportante	A = 3,574 km ² ; P = 8,392 km	Microcuenca torrencial de la Quebrada San Antonio.
Cabecera de cuenca	Cota máxima 2.907,9 m s. n. m.	Estribaciones del cerro de Miraflores (Macizo de Garzón).
Tramo de análisis hidráulico	Corredor hidráulico de ≈810 m aguas arriba de la bocatoma (dominio computacional 2D, malla de 6 m)	Aguas arriba de la bocatoma; pendiente local del tramo de análisis: 38,38 % (pendiente media cauce global derivada por pysheds: 27,03 %).
Familias usuarias	65 familias campesinas	Productores cafeteros del corregimiento Las Mercedes.
Estación pluviométrica principal	La Arcadia [21100140] — IDEAM	Distancia 3,79 km de la bocatoma; serie diaria 1982–2025; máximos anuales 1982–2025 (n = 44).
Estaciones de relleno (Normal Ratio)	Algeciras [21105030] y Palco El. [21100120] — IDEAM	Estaciones vecinas dentro de la SZH 2110.
Estaciones regionales SZH 2110	19 estaciones IDEAM	Inventario regional como contexto pluviométrico.
Marco hidrográfico	AH 2 → ZH 21 → SZH 2110	Magdalena-Cauca → Alto Magdalena → río Neiva.
Municipio / Departamento	Algeciras / Huila, Colombia	DANE
Área hidrográfica (AH)	Magdalena-Cauca (AH: 2)	IDEAM (2013)
Zona hidrográfica (ZH)	Alto Magdalena (ZH: 21)	IDEAM (2013)
Sub zona hidrográfica (SZH)	Río Neiva (SZH: 2110)	IDEAM (2013)
Restricción de acceso	Alerta Temprana N.º 009-26 — Defensoría del Pueblo	Veredas El Paraíso y La Arcadia; orden público crítico.

7.2 Participantes e Instituciones

La investigación articuló a la Universidad Santo Tomás como institución académica responsable; al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) como fuente oficial de las series pluviométricas; al Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) como fuente del modelo digital de terreno; a la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena (CAM) como autoridad ambiental con jurisdicción sobre la SZH 2110; al Servicio Geológico Colombiano (SGC) como autor de la guía metodológica de referencia; a la Agencia Espacial Europea como proveedor de Sentinel-2; al Climate Hazards Group (UCSB) como proveedor de CHIRPS v3.0; a Google Earth Engine como plataforma de cómputo en la nube; y a la Asociación de Usuarios del Distrito de Riego San José (ASOSANJOSE) como contraparte territorial. La Defensoría del Pueblo, mediante la Alerta Temprana N.º 009-26, sustentó la reformulación metodológica.

7.3 Flujo metodológico de la investigación

Flujo metodológico de la investigación. Cada fila corresponde a una fase secuencial y se asocia al objetivo específico que resuelve, en la columna de proceso se incluye una referencia de la herramienta utilizada, la cual fue seleccionada con tres criterios: licencia gratuita o académica para garantizar la replicabilidad, estándar del estado del arte y capacidad de integración en un flujo de trabajo.

Tabla 3. *Flujo metodológico de la investigación*

Fase	Insumo	Proceso	Producto	Objetivo
Fase 1 Caracterización	MDT IGAC 6 m (2018) Sentinel-2 SR (2018, 2024) ESA WorldCover OpenLandMap (textura USDA)	Morfometría (ArcGeek) NDVI mediano anual (GEE) Cruce cobertura × HSG Herramienta: ArcGIS Pro + ArcGeek Tools + Google Earth Engine	Parámetros morfométricos Cambio de cobertura 2018–2024 CN-II ponderado = 69,7	OE 1

Fase	Insumo	Proceso	Producto	Objetivo
		ArcGIS Pro licencia estudiantil de la USTA		
Fase 2 Hidrología	Serie diaria La Arcadia 1982–2025 Estaciones vecinas SZH 2110 CHIRPS v3.0	Relleno Normal Ratio Ajuste Gumbel y LP-III Desagregación IDF Convulación SCS-CN Herramienta: Excel licencia estudiantil de la USTA	Cuantiles P24h Curvas IDF Hidrogramas de diseño Qp para Tr = 2 a 100 años	OE 2
Fase 3 Hidráulica	MDT 6 m con incisión de cauce Hidrograma de diseño Coeficiente de Manning	Malla 6 m (landlab) Solución 2D de aguas someras (OverlandFlow) Matriz dual SGC Herramienta: Python + landlab mediante Google Colab cuenta personal no comercial	Rásteres de tirante y velocidad Zonificación de amenaza Vulnerabilidad de la bocatoma	OE 3
Fase 4 Lineamientos	Escenarios ΔCN (–5, –10, –15) Resultados hidrodinámicos Marco normativo	Sensibilidad SCS-CN Priorización de medidas Articulación institucional	Portafolio de seis ejes Propuesta operativa EVAL-IRD	OE 4

7.4 Fase 1 — Procedimiento de Caracterización Multitemporal de la Cuenca

Aportante

7.4.1 Morfometría a partir del MDT IGAC 6 m

La capa MDT10_41020_20180218 del IGAC se procesó en ArcGIS Pro con la extensión ArcGeek Tools Pucha-Cofrep (2026), que automatiza el cálculo de los parámetros morfométricos a partir de un modelo digital de terreno. El procedimiento incluyó el relleno de sumideros, la dirección y acumulación de flujo, la delimitación de la cuenca aportante a partir del punto de la bocatoma, el cálculo del cauce principal y los descriptores morfométricos derivados. Para el tiempo de concentración se aplicaron cinco métodos: Témez, Kirpich, NRCS, California Culverts Practice y California Highways. El valor adoptado es el de Témez, recomendado por la guía del SGC para microcuencas andinas Ramos-Cañón et al. (2021).

7.4.2 Análisis información en Google Earth Engine

El procesamiento multitemporal Sentinel-2 se ejecutó en la API JavaScript de Google Earth Engine sobre el polígono de la cuenca aportante. Para evaluar los cambios en el uso del suelo dentro de la cuenca, se implementará un flujo de clasificación supervisada en la plataforma Google Earth Engine empleando el algoritmo Random Forest optimizado con bandas espectrales de Sentinel-2 (B2, B3, B4, B8, B11, B12). Inicialmente, se construirán compuestos anuales de reflectancia de superficie libres de nubes (COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED) para los años 2018, 2020 y 2024. El alcance de esta clasificación debe declararse con precisión. Conviene advertir, en primer lugar, que tiene carácter descriptivo: el número de curva empleado en la transformación lluvia–escorrentía no se deriva de ella, sino directamente de las clases de ESA WorldCover (apartado 7.4.3), por lo que la incertidumbre que se describe a continuación no se propaga a los caudales de diseño. Al no disponerse de puntos de verificación en campo — restricción derivada de la Alerta Temprana N.º 009-26— no fue posible entrenar un clasificador supervisado ni construir una matriz de confusión con verdad de terreno. El NDVI no discrimina de manera adecuada entre café bajo sombrío, bosque abierto y pastos arbolados, cuyas respuestas espectrales se solapan y varían con el estado fenológico y la humedad del dosel. En consecuencia, los resultados del apartado 8.1 se interpretan como tendencias en la condición y el vigor de la cobertura entre 2018 y 2024, y no como transiciones categóricas verificadas píxel a píxel. El efecto de esta incertidumbre se limita al análisis descriptivo del cambio de cobertura y no alcanza a los caudales de diseño ni a la clasificación de amenaza

Para determinar el potencial de infiltración en el área de estudio, se cargó en la plataforma Google Earth Engine la capa global de texturas de OpenLandMap, seleccionando la banda b10 (profundidad de 10 cm) para asociar sus 12 clases texturales según el estándar del Departamento

de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) con los 4 grupos hidrológicos definidos por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS). Posteriormente, se ejecutó la reclasificación espacial de los píxeles mediante el algoritmo `.remap()` para agrupar los datos en categorías de infiltración alta (Grupo A: arenas), moderada (Grupo B: francos y limos), lenta (Grupo C: franco-arcillosos) y muy lenta (Grupo D: arcillas). Finalmente, se aplicó una paleta de colores contrastante para realizar la validación visual de la cartografía y delimitar las zonas con mayor riesgo de escorrentía superficial dentro de la cuenca.

7.4.3 Estimación del Número de Curva ponderado

El Número de Curva ponderado para condición AMC II se estimó combinando dos productos globales procesados en Google Earth Engine: la cobertura de la tierra de ESA WorldCover, de la que resultan dominantes la clase arbolada (93,1 % del área) y la herbácea (6,9 %), y el grupo hidrológico de suelo derivado de la clase textural USDA del producto OpenLandMap (SOL_TEXTURE-CLASS_USDA-TT_M/v02, 250 m de resolución), reclasificando cada clase textural a su grupo hidrológico equivalente según la correspondencia textura-HSG del NRCS. A esa resolución la cuenca aportante —3,574 km², equivalentes a 357,4 ha— queda representada por aproximadamente 5.700 celdas, lo que permite resolver la variabilidad edáfica asociada al gradiente altitudinal de 894 m. Debe advertirse, no obstante, que se trata de un producto global obtenido por aprendizaje automático sobre perfiles de suelo distribuidos mundialmente, y no de cartografía edafológica local: la asignación del grupo hidrológico conserva por ello una incertidumbre que se propaga al CN ponderado y queda comprendida dentro del rango de sensibilidad evaluado en el apartado 8.5. La clasificación por umbrales de NDVI descrita en el apartado 7.4.2 no interviene en este cálculo: su función es cuantificar el cambio de cobertura entre 2018 y 2024 y alimentar el análisis de escenarios del

apartado 8.5.(NRCS) (1986). El CN ponderado final se calculó como la media aritmética ponderada por área de cada categoría, implementada en la herramienta ArcGeek Global CN Pucha-Cofrep (2026). Los valores resultantes del CN se presentan en la sección de Resultados (sección 8.1).

7.5 Fase 2 — Análisis Frecuencial y Caudales de Diseño

7.5.1 Inventario y relleno de la serie pluviométrica La Arcadia

La serie diaria de precipitación de la estación La Arcadia [21100140] del IDEAM (latitud 2,4348°N, longitud -75,4009°O, elevación 1.380 m s. n. m.) comprende 16.131 días en el período 1982–2025, con un 4,3 % de datos faltantes (686 días). El relleno se realizó por el método Normal Ratio propuesto por Paulhus y Kohler (1952), adoptado por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) (2010) y por el IDEAM. El método estima el valor faltante de la estación problema P_x a partir de estaciones vecinas P_i ponderadas por el cociente de las medias anuales N_x / N_i y por el coeficiente de correlación r_i , conforme a la formulación:

$$P_x = \left(\frac{N_x}{n} \right) \cdot \sum \left(\frac{P_i}{N_i} \right) \text{ [Método Normal Ratio, Paulhus \& Kohler, (1952); (WMO) (2010)]}$$

Las estaciones vecinas seleccionadas fueron Algeciras [21105030] (vecina primaria, $r = 0,432$, peso 66,59 %) y la estación El Palco [21100120] (vecina secundaria, $r = 0,306$, peso 33,41 %), ambas pertenecientes a la SZH 2110 y con cobertura temporal superlapada con La Arcadia. La selección se sustentó en el criterio de Linsley et al. (1958), que recomienda estaciones con correlación moderada o alta ($r \geq 0,30$) y proximidad geográfica dentro de la misma unidad

climática. La serie diaria rellenada quedó completa para el período 1982–2025 (16.131 días, FLAG = O para días observados y FLAG = R para días rellenados).

7.5.2 Serie de máximos anuales y selección del período de análisis

La serie de máximos diarios anuales se extrajo mediante el método AM (*Annual Maxima*), que toma el valor más alto de precipitación diaria registrado en cada año hidrológico. Se adoptó el período 1982–2025 ($n = 44$ años), que corresponde a la totalidad del registro disponible de la estación tras el relleno por el método Normal Ratio. La decisión se sustenta en tres criterios. Primero, una serie de 44 años supera holgadamente la longitud mínima de 25 a 30 años recomendada para análisis de frecuencias en cuencas no instrumentadas Naghettini (2016) y amplía el rango de extrapolación admisible hasta períodos de retorno del orden de 90 a 130 años, lo que da respaldo al cuantil centenario. Segundo, la proporción de máximos anuales provenientes de relleno es reducida y su efecto sobre los momentos de la serie se verificó por contraste con la subserie de datos exclusivamente observados. Tercero, el período captura la variabilidad interanual ENSO incluyendo los episodios La Niña 2010–2011 y 2021–2023 documentados como hidrológicamente activos para los Andes colombianos Hoyos et al. (2013). La serie presenta media de 92,14 mm y desviación típica de 24,64 mm; el sesgo logarítmico insesgado es de $-1,036$.

Corresponde precisar, en consecuencia, el alcance de la afirmación del capítulo 1 relativa a incrementos del 18 % al 25 % en los volúmenes de precipitación de 24 horas durante los episodios La Niña 2010–2011 y 2021–2023. Esa cifra procede de estudios de escala regional y no se reproduce en la estación que alimenta el diseño: los máximos anuales de esos cinco años promedian 99,4 mm frente a los 92,14 mm de la media de la serie, esto es, una amplificación de 7,9 %. Los registros Pmax24h observada (mm) para ESTACIÓN LA ARCADIA [21100140] son:

90,0 mm para el año 2010; 102,0 mm en 2011; 92,0 mm en 2021; 99,0 mm en 2022, y 114,0 mm para el año 2023.

7.5.3 Ajuste por momentos-L y comparación de dos distribuciones

Sobre la serie 1982–2025 se ajustaron dos distribuciones: Gumbel (valor extremo tipo I, dos parámetros) y Log-Pearson III (tres parámetros). Los momentos-L son combinaciones lineales de estadísticos de orden con menor sesgo en muestras pequeñas que los momentos convencionales, propiedad documentada por Hosking & Wallis (1997). El ajuste produjo los parámetros consignados en la Tabla 4.

Tabla 4. *Parámetros estimados por momentos-L para las dos distribuciones ajustadas sobre la serie 1982–2025*

Distribución	Parámetro 1	Parámetro 2	Parámetro 3
Gumbel	α (escala) = 19,208	u (ubicación) = 81,049	—
Log-Pearson III	$\mu_{\ln}$ = 4,483	$\sigma_{\ln}$ = 0,299	γ = -1,036

Nota: Los valores calculados de los parámetros se presentan en la sección de Resultados, sección 8.2

La selección de Log-Pearson III como distribución de diseño se sustenta en la convergencia de tres criterios independientes evaluados sobre la serie 1982–2025 ($n = 44$), y no en un indicador aislado. Primero, el error cuadrático medio —que mide la discrepancia entre los cuantiles empíricos, calculados con la posición de Weibull, y los teóricos de cada distribución— es de 3,73 mm para Log-Pearson III frente a 6,31 mm para Gumbel, lo que indica una mejor reproducción del conjunto de la muestra. Segundo, la prueba de Kolmogorov-Smirnov arroja $D = 0,094$ para Log-Pearson III y $D = 0,130$ para Gumbel, ambos inferiores al valor crítico de 0,205 al 95 % de confianza para $n = 44$ Massey (1951): la prueba no rechaza ninguna de las dos distribuciones, de

modo que opera como criterio de admisibilidad y no de selección. Tercero, el criterio de información de Akaike, que penaliza el parámetro adicional de Log-Pearson III, da 410,9 frente a 416,9 de Gumbel estimado por máxima verosimilitud, con una diferencia de 6,0 unidades a favor de la primera, magnitud que constituye evidencia sustancial, aunque no concluyente Burnham & Anderson (2002). Debe advertirse que los tres indicadores miden el ajuste dentro del rango muestral, cuyo mayor período de retorno empírico es de 45 años, y están dominados por el cuerpo central de la distribución; ninguno valida por sí mismo la extrapolación a $Tr = 100$ años, donde ambos modelos divergen un 16,3 %. Debe declararse, además, una propiedad estructural del modelo adoptado: al ser negativo el sesgo logarítmico ($\gamma = -1,036$), la distribución Log-Pearson III queda acotada superiormente por un límite duro de 157,6 mm, es decir, asigna probabilidad nula a cualquier lámina diaria superior a ese valor. Ese techo se sitúa apenas un 15 % por encima del máximo histórico registrado en la estación (137 mm en 1983), por lo que no representa una saturación física del proceso sino un artefacto del ajuste. En consecuencia, el cuantil Gumbel de 169,4 mm se conserva como cota superior de referencia para los análisis de sensibilidad de los caudales de diseño.

Los cuantiles de precipitación máxima 24 horas adoptados se consignan en la Tabla 5.

Tabla 5. *Cuantiles de precipitación máxima 24 horas adoptados (mm), comparación entre las dos distribuciones*

Tr (años)	Gumbel (mm)	LP-III (mm)
2	88,1	93,1
5	109,9	114,0
10	124,3	123,7
25	142,5	132,7
50	156,0	137,8

Tr (años)	Gumbel (mm)	LP-III (mm)
100	169,4	141,8

7.5.4 Desagregación temporal a duraciones sub-diarias

La estación La Arcadia no cuenta con registros pluviográficos sub-diarios, lo que impide derivar localmente las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia -IDF. La desagregación se realizó mediante la transferencia de los coeficientes de desagregación de la estación Algeciras [21105030], situada a aproximadamente 12 km dentro de la misma SZH 2110 y con registros pluviográficos disponibles. La transferencia se ejecuta mediante la formulación:

$$I(d, Tr)_{La\ Arcadia} = \left[\frac{P_{24h}(Tr)_{La\ Arcadia}}{1440\ min} \right] \cdot 60\ min/h \cdot k_d(Tr)_{Algeciras}$$

donde $k_d(Tr)$ es el coeficiente de desagregación para la duración d en minutos y el período de retorno Tr . La validez de la transferencia se sustenta en la proximidad geográfica, la pertenencia a la misma unidad climática y el rango altitudinal similar indicado por Vargas & Díaz-Granados (1998). El procedimiento es consistente con el Manual de Drenaje Urbano del MVCT (2013) y el Manual de Drenaje para Carreteras del (INVÍAS) (2009). Las curvas IDF resultantes se presentan en el Capítulo 8.

7.5.5 Validación cruzada con CHIRPS v3.0

La validación cruzada de la serie pluviométrica La Arcadia se realizó con el producto CHIRPS v3.0 (UCSB-CHC/CHIRPS/V3/DAILY_SAT en Google Earth Engine). El procedimiento extrae la serie diaria CHIRPS sobre el píxel centrado en las coordenadas de la estación La Arcadia para el período 2000–2025, calcula los máximos anuales y los compara con

la serie observada. La métrica de evaluación es el coeficiente de correlación de Pearson sobre los máximos anuales emparejados.

7.5.6 Cálculo del caudal pico por SCS-CN

El caudal pico para cada período de retorno se estimó mediante el método SCS-CN, conforme al procedimiento del (NRCS) (1986). El procedimiento comprende tres pasos. Primero, la esorrentía directa se calcula como $Q = \frac{(P - I_a)^2}{P + 0,8 \cdot S}$ cuando $P > I_a$, con $I_a = 0,2 \cdot S$ y $S = \frac{25.400}{CN} - 254$. Segundo, el hidrograma de diseño se construye mediante la convolución del hietograma efectivo de duración 24 horas y paso temporal $\Delta t = 5$ min con el hidrograma unitario triangular del SCS. El criterio $\Delta t \leq T_c/5$ resulta, para $T_c = 57$ min (0,95 h), en $\Delta t \leq 11,4$ min; se adoptó $\Delta t = 5$ min como paso temporal estándar. Tercero, el hidrograma resultante se evalúa para obtener el caudal pico Q_p .

El tiempo de retardo (lag time) se calcula como $t_{lag} = 0,6 \cdot T_c = 0,6 \times 57 \text{ min} = 34,2 \text{ min}$. El procedimiento se ejecutó analíticamente sobre el escenario base AMC II ($CN = 69,7$) y se verificó con el escenario pesimista AMC III ($CN \approx 84,2$, derivado de $CN-II = 69,7$ mediante la relación de Hawkins (1978)), que corresponde a condiciones de saturación previa por episodios La Niña.

7.5.7 Validación con GEOGLOWS ECMWF V2

La validación independiente del caudal pico se realizó con el modelo global GEOGLOWS ECMWF V2 Hales et al. (2022), accedido mediante el paquete Python geogloWS (BYU Hydroinformatics Lab (2025)). El procedimiento identifica el reach del modelo más próximo a la sección de la bocatoma sobre la red hidrográfica del río Neiva, extrae la serie histórica simulada

de caudal diario para 1981–2025 y aplica el método de transferencia regional con factor de área para escalar al área de la cuenca aportante ($A = 3,574 \text{ km}^2$). La serie del tramo del Río Blanco se emplea como referencia del régimen del río receptor; dada la diferencia de escala con la microcuenca de la bocatoma, no se utiliza como validación directa de los caudales de diseño locales.

7.6 Fase 3 — Modelación Hidrodinámica 2D y Zonificación de Amenaza

7.6.1 Construcción del dominio computacional

El dominio computacional 2D abarca el corredor hidráulico de la Quebrada San Antonio aguas arriba de la bocatoma, recortado como una ventana alrededor de la captación y discretizado en una malla regular de 6 m a partir del modelo digital de terreno IGAC de 6 m (capa MDT10_41020_20180218). Sobre esa malla se aplicó una incisión del cauce (stream burning) de 0,5 m a lo largo de la traza de la quebrada —tomada de la red de drenaje vectorial—, con el fin de que el flujo bidimensional siga el cauce real, que en un cañón estrecho no queda resuelto a 6 m de resolución. El coeficiente de Manning se asignó de forma distribuida a partir de la cobertura ESA WorldCover (bosque $n = 0,10$; pastos $n = 0,04$; suelo desnudo $n = 0,025$); al lecho del cauce —rocoso, con cantos y bloques de tipo step-pool observado en la visita de reconocimiento— se le asignó $n = 0,08$, valor coherente con las tablas para cauces de montaña con bloques según Chow (1959).

El valor se asignó por caracterización cualitativa del cauce y no por medición ni por muestreo. Durante la visita de reconocimiento del 21 de noviembre de 2024 —única realizada en la investigación— se levantaron puntos GPS y registro fotográfico de la captación y se observaron las condiciones del cauce, pero no se ejecutó muestreo granulométrico del lecho, conteo de

partículas por el método de Wolman ni aforo alguno. La asignación procede, por tanto, del contraste entre las condiciones registradas fotográficamente —cauce estrecho e irregular, pendiente fuerte, maleza densa, arbustos y troncos que obstruyen el flujo, y lecho de bloques grandes y desordenados de tipo step-pool— y los rangos que según Chow (1959) reporta para cauces naturales de montaña con obstrucción vegetal y material grueso. No constituye ni una calibración, que exigiría observaciones de nivel o caudal inexistentes en la cuenca, ni una medición, que habría requerido el acceso al sitio que la Alerta Temprana N.º 009-26 impidió.

7.6.2 Implementación en Python con landlab (OverlandFlow)

La modelación hidrodinámica se implementó íntegramente en Python con la librería landlab y su componente OverlandFlow, que resuelve las ecuaciones de aguas someras en dos dimensiones mediante el esquema explícito de De Almeida et al. (2012). El *script* carga el modelo digital de terreno y la red de drenaje, aplica el stream burning, construye la malla y las condiciones de frontera, inyecta el hidrograma de diseño en la cabecera del cauce, ejecuta la simulación con paso de tiempo adaptativo (condición de Courant) y exporta los rásteres de tirante y velocidad máximos para su análisis. El procedimiento completo está documentado en el Anexo E (cuaderno de Google Colab).

7.6.3 Calibración del modelo hidráulico

Dado que la cuenca aportante no cuenta con estaciones limnimétricas, la calibración estricta del modelo no es posible. La verificación del modelo se realizó mediante cuatro estrategias complementarias. Primero, la conservación de la masa: el balance entre el volumen de entrada (hidrograma) y el volumen propagado más el volumen almacenado en las celdas activas se verifica con tolerancia inferior al 2 %. Segundo, la coherencia geomorfológica: las áreas inundadas

simuladas se contrastan con la traza del cauce y las márgenes activas observables en la composición Sentinel-2 de alta resolución. Tercero, la contextualización regional con GEOGLOWS ECMWF V2 sobre el Río Blanco receptor (referencial, dada la diferencia de escala). Cuarto, la verificación de los caudales unitarios (Q_p/A) contra el rango documentado para cuencas torrenciales andinas colombianas de área similar Ramos-Cañón et al. (2021).

7.6.4 Clasificación de amenaza por la matriz SGC

La clasificación de amenaza adopta la matriz dual profundidad $\times$ velocidad propuesta en la Guía Metodológica del SGC Ramos-Cañón et al. (2021). La implementación distingue dos productos con criterios propios, que deben leerse por separado. El primero es la zonificación de áreas por categoría de amenaza, reportada en la Tabla 16, que aplica los umbrales estándar de la guía: amenaza alta cuando la profundidad supera 0,50 m, o la velocidad supera 3,0 m/s, o el producto tirante $\times$ velocidad supera 1,5 m²/s; amenaza media cuando, sin alcanzar lo anterior, la profundidad iguala o supera 0,30 m, o la velocidad iguala o supera 1,5 m/s, o el producto iguala o supera 0,50 m²/s; y amenaza baja para el resto de la superficie con lámina superior a 0,05 m. El segundo producto es la cartografía de amenaza de las Figuras 9 y 10, que aplica un criterio más exigente sobre el producto tirante $\times$ velocidad —alta para $dv > 1,0$ m²/s y profundidad $> 1,50$ m— adoptado de forma conservadora para régimen torrencial con carga de sólidos. La sección de la bocatoma se clasifica como amenaza alta bajo cualquiera de los dos criterios, dado que su producto tirante $\times$ velocidad de 3,11 m²/s en la creciente de diseño duplica con holgura el umbral más restrictivo.

7.7 Fase 4 — Lineamientos Técnicos de Manejo Preventivo

La cuarta fase formula los lineamientos técnicos de manejo preventivo a partir de la evaluación cuantitativa de la incidencia del cambio de cobertura sobre el caudal pico. El procedimiento comprende cuatro escenarios SCS-CN: línea base (CN-II = 69,7), reforestación leve ($\Delta\text{CN} = -5$, CN-II = 64,7), reforestación moderada ($\Delta\text{CN} = -10$, CN-II = 59,7) y reforestación alta ($\Delta\text{CN} = -15$, CN-II = 54,7). Para cada escenario se ejecuta el procedimiento SCS-CN del apartado 7.5.6 y se evalúa la reducción del caudal pico para los períodos de retorno de 50 y 100 años. Sobre el alcance de esta extrapolación debe precisarse lo siguiente: la serie de máximos anuales de la estación La Arcadia [21100140] comprende 44 años de registro (1982–2025), de modo que la estimación del cuantil de 100 años se sitúa dentro del rango de dos a tres veces la longitud del registro que la práctica estándar en análisis de frecuencias admite para extrapolar (WMO, 2010). El mayor período de retorno empírico de la muestra es, no obstante, de 45 años, por lo que el cuantil centenario sigue siendo una extrapolación y así se trata: se reporta como escenario de verificación, mientras que la creciente adoptada para las decisiones estructurales es la de $T_r = 50$ años. La incertidumbre asociada se cuantifica mediante los intervalos de confianza del 95 % consignados en la Tabla 12. Los resultados alimentan la formulación del portafolio de seis ejes presentado en el Capítulo 9.

8. Resultados

Los resultados se presentan en correspondencia con los cuatro objetivos específicos. La sección 8.1 expone la caracterización multitemporal de la cuenca. La sección 8.2 desarrolla el análisis frecuencial regional y de la estación La Arcadia para los periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. La sección 8.3 presenta el cálculo de los caudales pico por SCS-CN con memoria completa. La sección 8.4 expone la modelación hidrodinámica 2D y la zonificación de amenaza, con el análisis de vulnerabilidad de la bocatoma. La sección 8.5 examina la incidencia del cambio en la cobertura vegetal. La sección 8.6 documenta la validación cruzada con el modelo global GEOGLOWS ECMWF V2 (2022). La sección 8.7 incorpora una segunda fuente de validación independiente mediante la estación instrumentada El Casil [21107030], única estación con registro de caudal dentro de la zona hidrográfica de estudio.

8.1 Caracterización Multitemporal de la Cuenca

La caracterización multitemporal de la cuenca aportante incluye la distribución espacial del grupo hidrológico de suelo (Figura 2) y la cobertura de la tierra derivada del producto ESA WorldCover (Figura 3), insumos base para la estimación del número de curva SCS-CN.

El área de estudio presenta una condición crítica de escorrentía (Figura 2), donde el 48 % del territorio se clasifica como Grupo D (HSG D), correspondiente a suelos con texturas predominantemente arcillosas o capas delgadas sobre estratos impermeables que poseen una mínima capacidad de infiltración y generan respuestas de flujo superficial sumamente rápidas ante eventos de precipitación. El 52 % restante pertenece al Grupo B (HSG B), indicando suelos de texturas francas o franco-arenosas con una capacidad de infiltración moderada que ayuda a amortiguar parcialmente el drenaje de la cuenca. Esta marcada polarización edáfica explica la

tendencia a la torrencialidad de la fuente hídrica y el alto potencial de generación de caudales máximos instantáneos en el punto de captación.

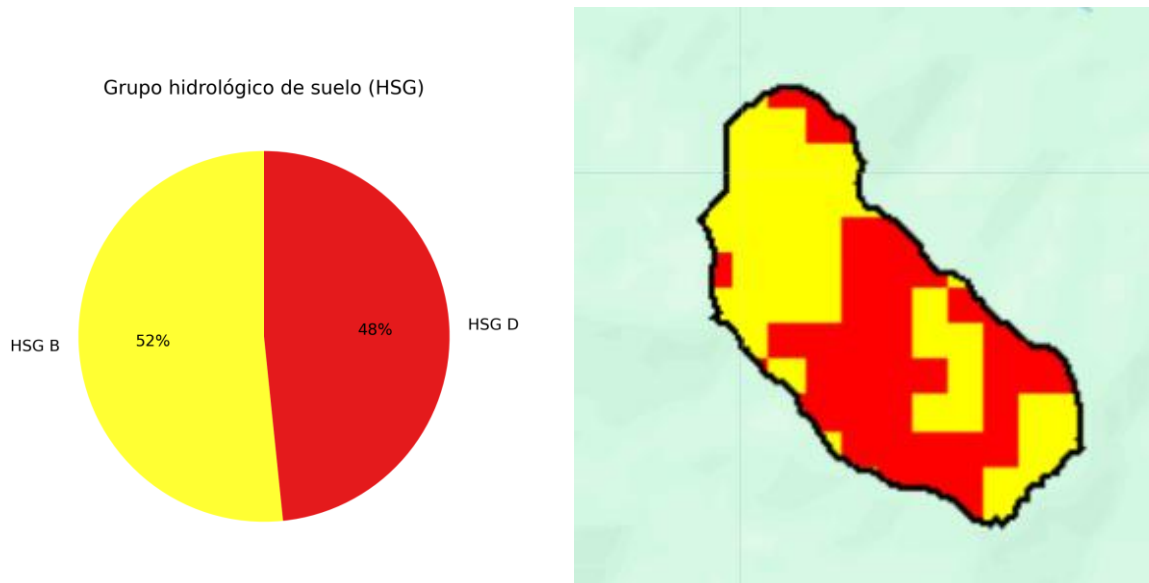


Figura 2. *Distribución del grupo hidrológico de suelo (HSG).*

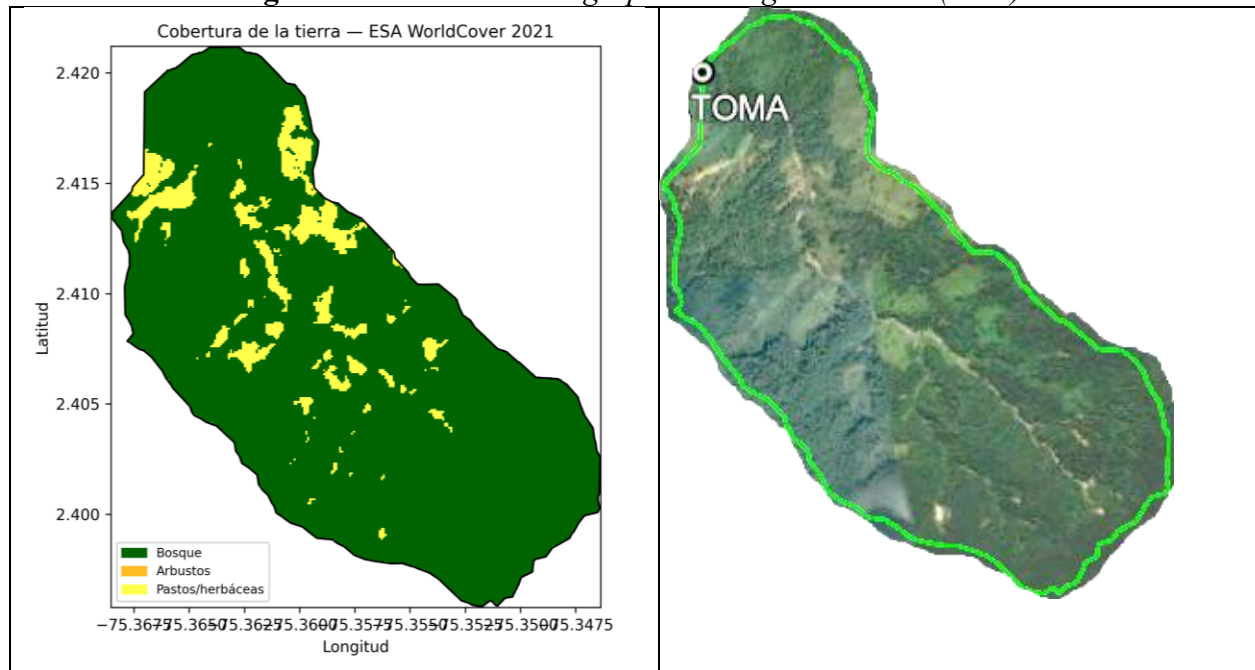


Figura 3. *Cobertura de la tierra (ESA WorldCover) en la cuenca.*

El procesamiento del MDT IGAC de seis metros con ArcGeek Tools produjo los descriptores morfométricos consignados en la Tabla 6. La cuenca aportante presenta un área de

3,574 km², perímetro de 8,392 km, relieve total de 893,7 m, pendiente media del 53,56 % y tiempo de concentración de Témez de 57 min (0,95 h). El índice de Melton MR = 0,473 la ubica en el dominio de cuencas productoras de flujos hiperconcentrados, conforme a la clasificación de Wilford et al. (2004).

Tabla 6. *Parámetros morfométricos de la cuenca abastecedora de la Quebrada San Antonio*

Parámetro	Valor	Unidad	Interpretación
Área de drenaje (Ac)	3,574	km ²	Microcuenca torrencial.
Perímetro (Pc)	8,392	km	Cuenca alargada.
Longitud cauce principal	3,31	km	Cabecera a bocatoma.
Elevación máxima	2.907,9	m s. n. m.	Cerro de Miraflores.
Elevación mínima	2.014,2	m s. n. m.	Bocatoma DR San José.
Relieve total (H)	893,7	m	Alta torrencialidad.
Pendiente media de la cuenca	53,56	%	Indicador de respuesta rápida.
Pendiente compensada del cauce	15,91	%	Cauce principal.
Pendiente del tramo 800 m	38,38	%	Tramo de análisis hidráulico.
Índice de Melton (MR)	0,473	—	Zona de transición <i>debris flood</i> .
Tc Témez (adoptado)	0,95 (57 min)	h (min)	Recomendado SGC.
Lag time SCS–CN (t _{lag} = 0,6·Tc)	0,57 (34 min)	h (min)	0,6 × Tc.
Orden Strahler máximo	3	—	Microcuenca activa.
Densidad de drenaje	1,639	km/km ²	Moderada. Refleja una red de drenaje corta y controlada estructuralmente, no permeabilidad del

Parámetro	Valor	Unidad	Interpretación
			suelo: el 48 % del área corresponde al grupo hidrológico D, de infiltración muy baja (apartado 8.1).
Coefficiente de Gravelius	1,252	—	Oval-circular.
Número de rugosidad Schumm	1,465	—	Alta rugosidad de cauce.

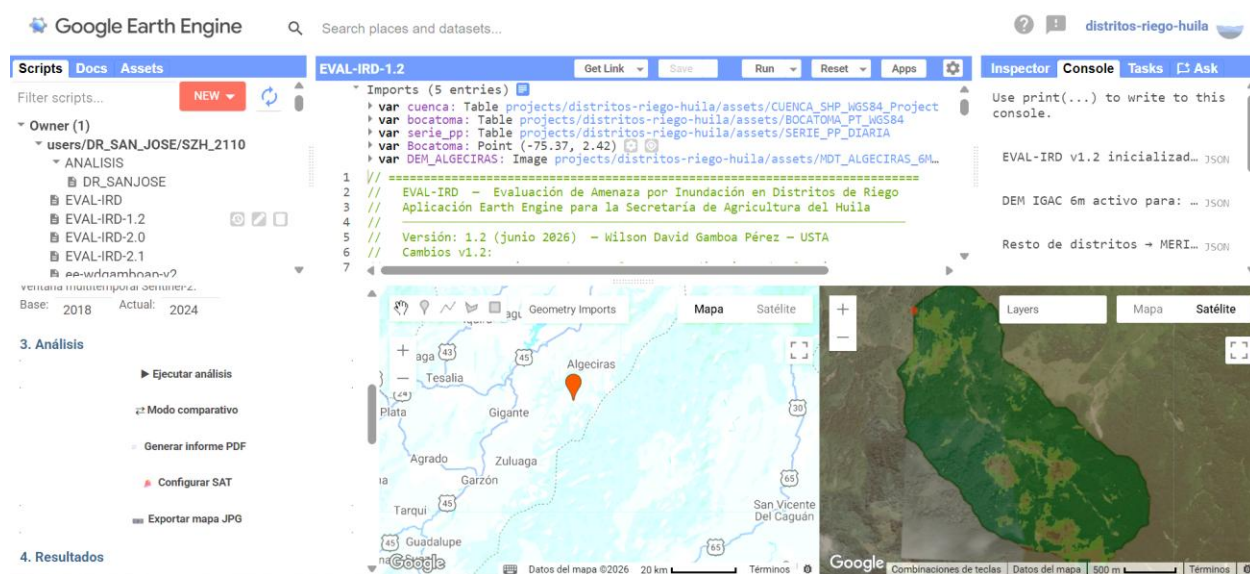
El análisis multitemporal Sentinel-2 procesado en Google Earth Engine para las ventanas anuales 2018 y 2024 produjo los resultados consignados en la Tabla 7. Entre los dos años se observa una reducción de la cobertura boscosa densa de aproximadamente seis puntos porcentuales (del 42 % al 36 %), con incrementos correspondientes en las clases de pasto manejado o bosque abierto (+4 pp) y de pasto o cultivo de bajo porte (+2 pp). La transición dominante es bosque denso → pasto manejado, consistente con la expansión cafetera y ganadera documentada para el oriente del Huila. Los resultados espaciales del análisis se presentan en la Figura 4.

Tabla 7. Cobertura del suelo derivada del análisis multitemporal Sentinel-2 procesado en Google Earth Engine — Cuenca aportante de la Quebrada San Antonio

Clase de cobertura	Área 2018 (ha)	% 2018	Área 2024 (ha)	% 2024	Δ (puntos porcentuales) [2018→2024]
Bosque denso (NDVI > 0,65)	150,1	42,0	128,7	36,0	−6,0
Bosque abierto / pasto manejado (0,45–0,65)	118,0	33,0	132,2	37,0	+4,0

Clase de cobertura	Área 2018 (ha)	% 2018	Área 2024 (ha)	% 2024	Δ (puntos porcentuales) [2018→2024]
Pasto / cultivo bajo (0,25–0,45)	69,7	22,0	85,8	24,0	+2,0
Suelo desnudo / infraestructura (NDVI < 0,25)	10,7	3,0	10,7	3,0	0,0
TOTAL	357,4	100,0	357,4	100,0	—

Figura 4. *Análisis espacial para el área de estudio mediante GEE.*



Nota. NDVI mediana anual derivada de Sentinel-2 SR Harmonized procesada en Google Earth Engine. Fuente: elaboración propia con datos ESA Sentinel-2 (2018, 2024).

La implicación hidrológica del cambio de cobertura se cuantifica en la sección 8.5. Para el cálculo del CN ponderado en condición de diseño se adopta la cobertura ESA WorldCover 2021,

la versión disponible más próxima a la línea base 2018 del MDT IGAC y representativa de la configuración operativa actual del Distrito de Riego.

8.2 Análisis Frecuencial Regional y de la Estación La Arcadia

El análisis regional sobre las diecinueve estaciones disponibles en la SZH 2110 caracterizó el contexto pluviométrico del área de estudio. La Tabla 8 sintetiza el inventario regional con sus coordenadas y elevaciones.

Tabla 8. *Inventario regional de estaciones pluviométricas IDEAM en la Sub Zona Hidrográfica del río Neiva (SZH 2110)*

Código estación IDEAM	Nombre	Latitud	Longitud	Elev. (m)
21100010	Campoalegre	2,683	−75,333	490
21100020	Algeciras – Hacienda Sati	2,550	−75,317	1.100
21100030	Llano Azul	2,650	−75,400	600
21100040	Piravante Hacienda	2,733	−75,283	500
21100060	Angostura Hda.	2,617	−75,367	600
21100070	Santa Bárbara Finca	2,562	−75,235	1.750
21100080	Nuevo Paraíso	2,615	−75,207	1.525
21100090	Puerta Colorada Hd.	2,567	−75,300	1.160
21100110	Guayabal	2,550	−75,250	1.460
21100120	Palco El	2,700	−75,233	880
21100130	Kiosko El Perú	2,533	−75,333	1.400
21100140	La Arcadia ★	2,435	−75,401	1.380
21100150	Arrolima	2,650	−75,350	500
21105010	Angostura La	2,683	−75,333	990

Código estación IDEAM	Nombre	Latitud	Longitud	Elev. (m)
21105020	Vuelta La	2,650	-75,367	500
21105030	Algeciras – AUT	2,520	-75,320	993
21105040	Potosí Hacienda	2,697	-75,299	680
21105050	Rosales Los	2,603	-75,418	553
21105060	Hidrobetania	2,713	-75,425	500

★ Estación principal del estudio. Las estaciones [21105030] Algeciras y [21100120] El Palco fueron utilizadas como vecinas para el relleno por el método Normal Ratio.

8.2.1 Relleno de la serie diaria de La Arcadia

La serie diaria 1982–2025 de la estación La Arcadia comprende 16.131 días, con 686 días de datos faltantes (4,3 %). El relleno se realizó por el método Normal Ratio con las estaciones vecinas Algeciras [21105030] y Palco El [21100120]. Los parámetros del método se consignan en la Tabla 9. Los días observados se identifican con FLAG = O y los días rellenados con FLAG = R en el Anexo B.

Tabla 9. *Parámetros del método Normal Ratio aplicado al relleno de la estación La Arcadia [21100140] — período 1982–2025*

Parámetro	Estación	Código	Media anual (mm)	Correlación r	Días solapados	Peso (r ²)	Ratio NR
Estación problema	La Arcadia	21100140	1.807	—	—	—	—

Parámetro	Estación	Código	Media anual (mm)	Correlación r	Días solapados	Peso (r^2)	Ratio NR
Vecina primaria	Algeciras	21105030	1.151,3	0,432	11.139	0,666	1,570
Vecina secundaria	Palco El	21100120	1.703,1	0,306	15.653	0,334	1,061

Del conjunto de diecinueve estaciones inventariadas en la Tabla 8, seis fueron sometidas a evaluación detallada de completitud de datos: la estación principal La Arcadia, sus dos estaciones vecinas empleadas en el relleno por el método Normal Ratio (Algeciras y El Palco), y dos estaciones adicionales —Santa Bárbara Finca y Nuevo Paraíso— utilizadas en la ponderación areal de la precipitación sobre la cuenca instrumentada de la quebrada El Casil, descrita en el Anexo G. La estación Puerta Colorada Hd., pese a su proximidad geográfica, fue descartada de este análisis por la brevedad de su período de registro. La Tabla 10 sintetiza los resultados de esta evaluación.

Tabla 10. Estaciones climáticas sometidas a evaluación detallada de completitud de datos

Código IDEAM	Estación	Datos faltantes	Rol en el estudio
21100140	La Arcadia ★	4,3 % (686/16.131 d)	Estación pluviométrica principal; serie base del análisis de frecuencia regional (sección 8.2) y del cálculo de caudales por el método SCS-CN (sección 8.3)
21105030	Algeciras – AUT	—	Estación vecina empleada en el método Normal Ratio para el relleno de La Arcadia (Tabla 9)
21100120	El Palco	—	Estación vecina empleada en el método Normal Ratio para el relleno de La Arcadia (Tabla 9)
21100070	Santa Bárbara Finca	1,18 % (169/14.276 d)	Ponderación areal (polígonos de Thiessen, peso 47,88 %) de la

Código IDEAM	Estación	Datos faltantes	Rol en el estudio
			precipitación sobre la cuenca instrumentada El Casil (Anexo G)
21100080	Nuevo Paraíso	2,27 % (324/14.276 d)	Ponderación areal (polígonos de Thiessen, peso 52,12 %) de la precipitación sobre la cuenca instrumentada El Casil (Anexo G)
21100090	Puerta Colorada Hd.	N/A	Excluida del análisis: registro de 291 días (dic. 1981 – may. 1983), insuficiente para caracterización climática

Nota. ★ Estación principal. El símbolo — indica que la estación cumple función de referencia dentro del método Normal Ratio y no fue evaluada individualmente en términos de completitud. Fuente: elaboración propia a partir de registros IDEAM-DHIME y del diagnóstico de huecos consignado en la hoja de cálculo del análisis de precipitación de la cuenca El Casil.

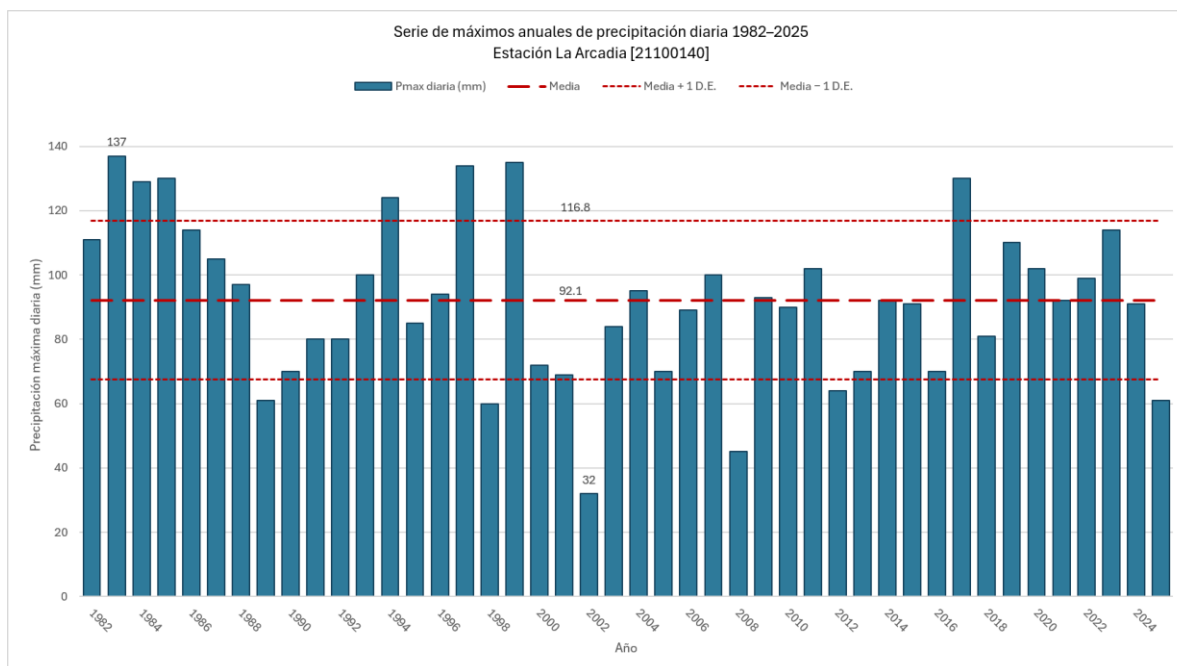
8.2.2 Serie de máximos anuales 1982–2025

La Tabla 11 presenta la serie de máximos anuales de precipitación diaria 1982–2025 ($n = 44$ años). Cada valor corresponde al máximo diario observado en ese año calendario —no a promedios anuales ni promedios multianuales—, lo que constituye la base de datos apropiada para el análisis de frecuencias de eventos extremos mediante el método Annual Maxima (AM). La serie presenta media de 92,14 mm y desviación estándar de 24,64 mm; el sesgo de los logaritmos es de $-1,036$, valor negativo que condiciona el comportamiento de la cola alta de la distribución Log-Pearson III adoptada, según se analiza en el apartado 8.2.3. El máximo histórico del registro es de 137 mm y corresponde al año 1983. La Figura 5 ilustra esta serie y su variabilidad interanual respecto a la media.

Tabla 11. *Máximos anuales de precipitación diaria — Estación La Arcadia [21100140], período 1982–2025*

Año	Pmax (mm)	Año	Pmax (mm)	Año	Pmax (mm)
1982	111	1997	134	2012	64
1983	137	1998	60	2013	70
1984	129	1999	135	2014	92
1985	130	2000	72	2015	91
1986	114	2001	69	2016	70
1987	105	2002	32	2017	130
1988	97	2003	84	2018	81
1989	61	2004	95	2019	110
1990	70	2005	70	2020	102
1991	80	2006	89	2021	92
1992	80	2007	100	2022	99
1993	100	2008	45	2023	114
1994	124	2009	93	2024	91
1995	85	2010	90	2025	61
1996	94	2011	102		

Figura 5. *Serie de máximos anuales de precipitación diaria — Estación La Arcadia [21100140], período 1982–2025.*



Nota. La línea discontinua marca la media de la serie (92,14 mm); las líneas punteadas delimitan la banda Media $\pm$ 1 D.E. (24,64 mm). Fuente: elaboración propia a partir de registros diarios IDEAM-DHIME de la estación La Arcadia [21100140], 1982–2025.

8.2.3 Ajuste estadístico y selección de la distribución de diseño

El ajuste de las distribuciones Gumbel y Log-Pearson III produjo los parámetros consignados en la Tabla 4 del Capítulo 7. La distribución Log-Pearson III se seleccionó como distribución de diseño por la convergencia de los tres criterios enunciados en el apartado 7.5.3: menor error cuadrático medio (3,73 mm frente a 6,31 mm de Gumbel), no rechazo en la prueba de Kolmogorov-Smirnov ($D = 0,094 < D_{\text{crítico}} = 0,205$ al 95 % de confianza para $n = 44$) y menor criterio de información de Akaike (410,9 frente a 416,9, con $\Delta AIC = 6,0$ a favor de Log-Pearson III). Los cuantiles de precipitación máxima 24 horas se presentan en la Tabla 12. Las curvas IDF derivadas de la distribución de diseño Log-Pearson III se presentan en la Figura 7.

Tabla 12. Cuantiles de precipitación máxima 24 horas adoptados — Distribución Log-Pearson III ajustada por momentos-L, estación La Arcadia 1982–2025

Tr (años)	Probabilidad excedencia	y reducido	P24h Gumbel (mm)	P24h LP-III (mm)	Diferencia (%)
2	0,500	0,367	88,1	93,1	+5,7
5	0,200	1,500	109,9	114,0	+3,7
10	0,100	2,250	124,3	123,7	-0,5
25	0,040	3,199	142,5	132,7	-6,9
50	0,020	3,902	156,0	137,8	-11,7
100	0,010	4,600	169,4	141,8	-16,3

Nota. Cuantiles obtenidos por el factor de frecuencia a partir de la serie 1982–2025 ($n = 44$). Los intervalos de confianza del 95 % son de $[85,5 - 102,1]$ mm para $Tr = 2$; $[106,2 - 123,9]$ para $Tr = 5$; $[114,2 - 133,9]$ para $Tr = 10$; $[116,5 - 144,0]$ para $Tr = 25$; $[116,2 - 151,2]$ para $Tr = 50$; y $[115,4 - 158,7]$ para $Tr = 100$. La amplitud de la banda crece de 16,6 a 43,3 mm entre el primero y el último período de retorno, lo que cuantifica la incertidumbre de la extrapolación.

Fuente: elaboración propia. Haga clic o pulse aquí para escribir texto.

Figura 6. Curva de frecuencia Pmax 24h — Estación La Arcadia [21100140]

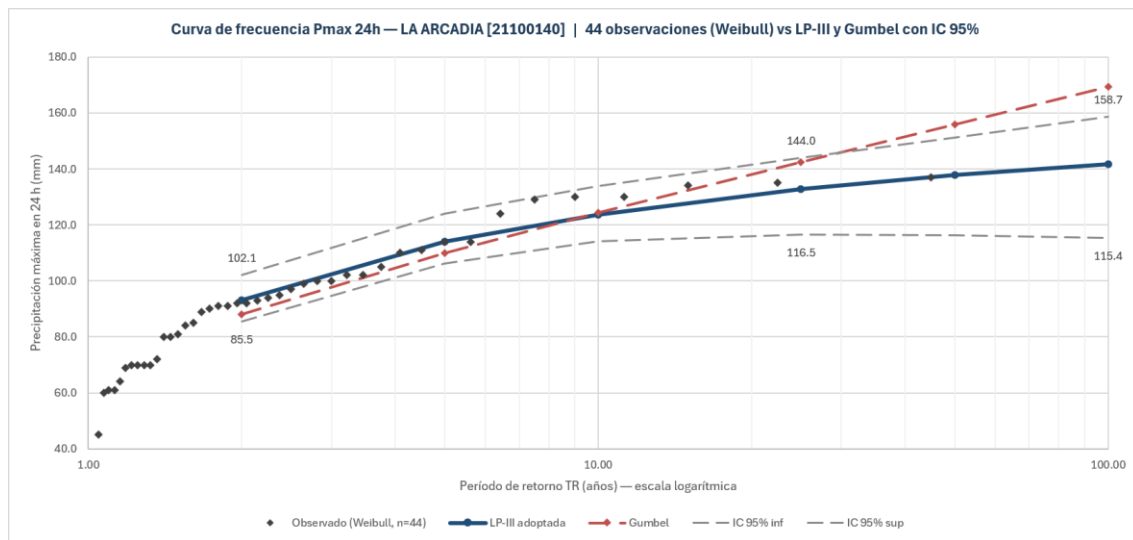
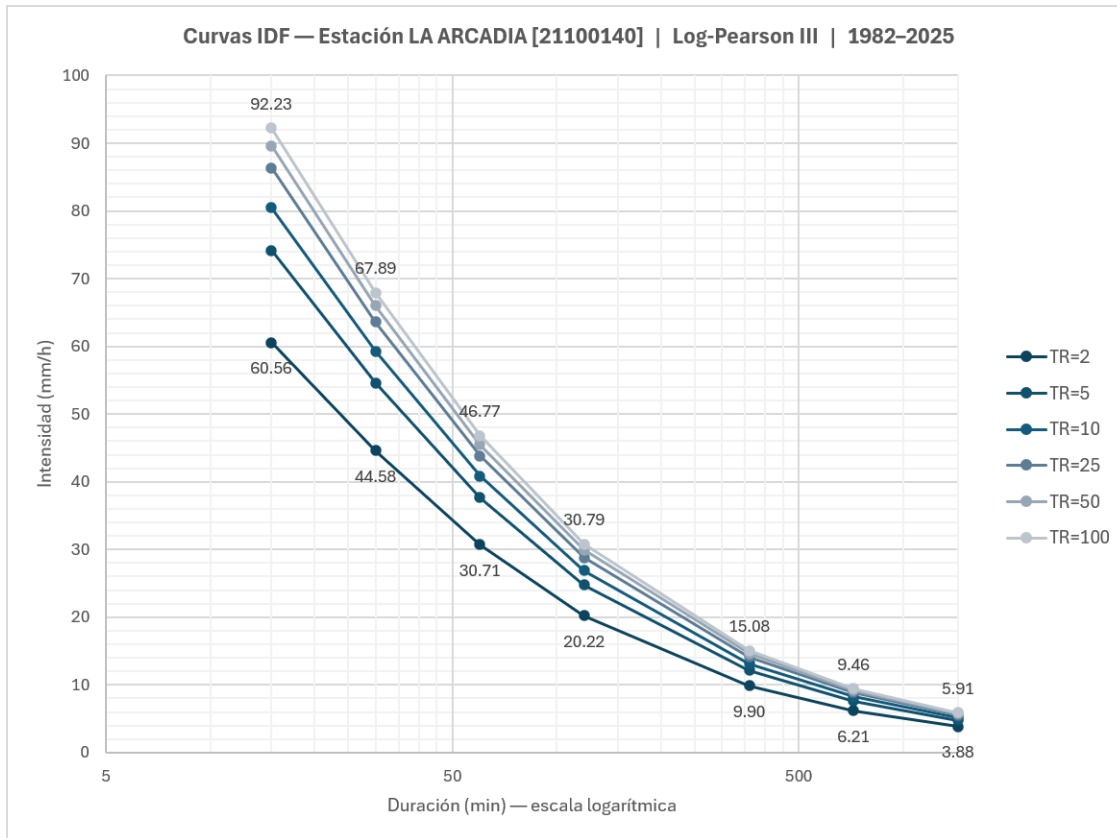


Figura 7. *Curvas IDF derivadas de la distribución Log-Pearson III — Estación La Arcadia [21100140]*



Nota. Curvas IDF construidas a partir de los cuantiles P24h de la distribución de diseño Log-Pearson III consignados en la Tabla 12 y de los coeficientes de desagregación temporal de la estación Algeciras [21105030]. Son, por tanto, las curvas coherentes con la transformación lluvia-escorrentía por SCS-CN empleada en el Capítulo 8. Fuente: elaboración propia y IDF estación Algeciras [21105030] de IDEAM.

8.2.4 Desagregación temporal — curvas IDF

La aplicación de los coeficientes de desagregación de la estación Algeciras [21105030] a los cuantiles P24h de la Tabla 12 produjo las intensidades I (mm/h) en función de la duración D para los seis períodos de retorno. La Tabla 13 sintetiza la matriz IDF para las duraciones estándar.

Tabla 13. *Intensidades de precipitación (mm/h) por duración y período de retorno — Estación La Arcadia, distribución Log-Pearson III, serie 1982–2025*

Duración (min)	Tr = 2	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 100
15	60.56	74.19	80.48	86.35	89.63	92.23
30	44.58	54.61	59.24	63.56	65.98	67.89
60	30.71	37.62	40.81	43.79	45.46	46.77
120	20.22	24.77	26.87	28.83	29.92	30.79
360	9.90	12.13	13.16	14.12	14.66	15.08
720	6.21	7.61	8.26	8.86	9.20	9.46
1.440	3.88	4.75	5.15	5.53	5.74	5.91

La ecuación IDF ajustada por mínimos cuadrados en espacio log-log adopta la forma $I = C1/(D + X0)^{C2}$, con coeficientes Tr-dependientes consignados en la Tabla 14. El procedimiento de ajuste se describe en la sección metodológica 7.5.4, donde se justifica la selección del modelo potencial y el rango de duración considerado (15 min a 1440 min). Esta sección presenta los resultados del ajuste; la fundamentación metodológica de la ecuación IDF y en el procedimiento metodológico (sección 7.5.4).

Coeficientes de la ecuación — Estación La Arcadia [21100140], distribución Log-Pearson III. $I = C1/(D + X0)^{C2}$ Los coeficientes C1 (mm·min^{C2} / h), X0 (min) y C2 (adimensional) permiten calcular la intensidad media I (mm/h) para cualquier duración D (min) y período de retorno Tr dentro del rango de ajuste $15 \leq D \leq 1440$ min. La bondad del ajuste ($R^2 \geq 0,97$ para todos los Tr) confirma la adecuación del modelo potencial a la serie de la Estación La Arcadia.

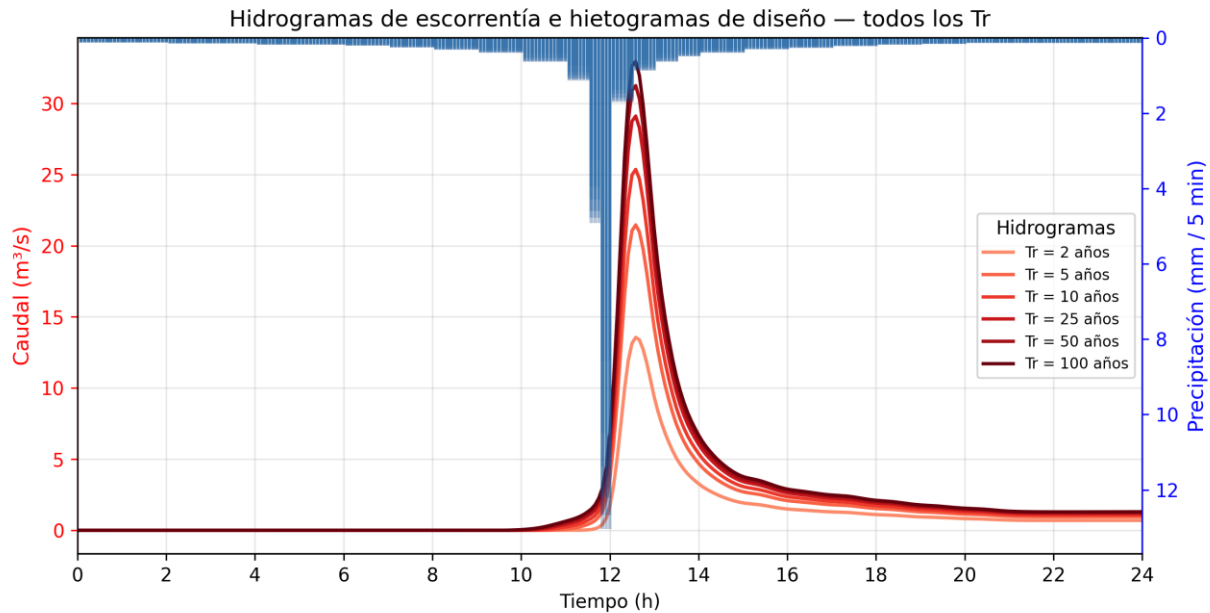
Tabla 14. *Coeficientes de la ecuación IDF $I = C1 / (D + X0)^{C2}$ — Estación La Arcadia [21100140].*

Tr (años)	C1	X0 (min)	C2	R ²	Ecuación completa
2	581,201	11,7	0,6881	1,00000	$I = 581,201 / (D + 11,7)^{0,6881}$
5	711,589	11,7	0,6880	1,00000	$I = 711,589 / (D + 11,7)^{0,6880}$
10	771,654	11,7	0,6879	1,00000	$I = 771,654 / (D + 11,7)^{0,6879}$
25	827,923	11,7	0,6879	1,00000	$I = 827,923 / (D + 11,7)^{0,6879}$
50	859,670	11,7	0,6880	1,00000	$I = 859,670 / (D + 11,7)^{0,6880}$
100	884,509	11,7	0,6880	1,00000	$I = 884,509 / (D + 11,7)^{0,6880}$

8.3 Caudales Pico por SCS-CN — Memoria de Cálculo

Los hidrogramas de escorrentía resultantes y los hietogramas de diseño empleados para los seis períodos de retorno evaluados ($Tr = 2$ a 100 años) se presentan en la Figura 8.

Figura 8. *Hidrogramas de escorrentía e hietogramas de diseño (Tr 2–100 años).*



Nota. Hidrogramas de escorrentía e hietogramas de diseño (Tr 2–100 años) de la simulación en COLAB.

La aplicación del método SCS-CN sobre los cuantiles P24h de la Tabla 12, con CN-II = 69,7 ($S = 110,4$ mm; $I_a = 22,1$ mm), produjo los caudales pico consignados en la Tabla 15. El procedimiento de cálculo se ejecutó mediante la convolución del hietograma de diseño $\Delta t = 5$ min con el hidrograma unitario triangular del SCS para $t_{lag} = 34,2$ min y $A = 3,574$ km². El coeficiente de escorrentía $CR = Q / P$ se incluye como verificación.

Tabla 15. Memoria de cálculo SCS-CN — Caudales pico para los seis períodos de retorno, escenario base AMC II (CN = 69,7)

Tr (años)	P24h (mm)	S (mm) [S = 25400/CN – 254; CN-II = 69,7]	Ia (mm)	(P – Ia) ² (mm ²)	P + 0,8S (mm)	Q escorrentía (mm)	CR [CR =Q/P]	Qp (m ³ /s)
2	93,1	110,4	22,1	5043,8	181,4	27,8	0,30	13,56
5	114,0	110,4	22,1	8449,3	202,3	41,8	0,37	21,46
10	123,7	110,4	22,1	10326,6	212,0	48,7	0,39	25,36
25	132,7	110,4	22,1	12236,8	221,0	55,4	0,42	29,11
50	137,8	110,4	22,1	13329,1	226,1	59,2	0,43	31,25
100	141,8	110,4	22,1	14332,9	230,1	62,2	0,44	32,96

El escenario pesimista AMC III (CN $\approx$ 84,2; S = 48,0 mm; Ia = 9,6 mm) corresponde a condiciones de saturación previa por episodios La Niña. Para Tr = 100 años el procedimiento produce Q escorrentía = 97,0 mm y Qp = 52,7 m³/s (convolución SCS Tipo II, Δt = 5 min; resultado registrado en la Tabla 16), lo que representa una amplificación del 60 % sobre el escenario base. Este valor se utiliza como límite superior en los análisis de sensibilidad de los apartados 8.4 y 8.5.

El control de calidad del procedimiento se verificó con tres pruebas. Primero, la monotonía $Qp(2) < Qp(5) < Qp(10) < Qp(25) < Qp(50) < Qp(100)$, satisfecha. Segundo, el coeficiente de escorrentía CR creciente con Tr (0,419 a 0,630), consistente con la respuesta no lineal del método SCS. Tercero, el caudal unitario $Qp(100) / A = 33,0 \text{ m}^3/\text{s} / 357,4 \text{ ha} = 92,3 \text{ L/s/ha}$, dentro del rango típico para microcuencas torrenciales andinas colombianas de área similar Ramos-Cañón et al. (2021).

8.4 Modelación Hidrodinámica 2D y Vulnerabilidad de la Bocatoma

La modelación hidrodinámica 2D de aguas someras con landlab (OverlandFlow) se ejecutó sobre una ventana del cauce alrededor de la bocatoma con malla de 6 m a partir del MDT IGAC de 6 m, con incisión del cauce (stream burning). La geometría del canal en la sección de la bocatoma (Figura 9) se aproximó a partir del MDT como una sección trapezoidal con ancho de plantilla de 6 m, taludes 1:3,25 ($\pm 31\%$) y pendiente longitudinal de 38,38 % (gradiente dominante del cauce). La simulación se ejecutó con un coeficiente de rugosidad de Manning uniforme de $n = 0,08$ sobre el dominio completo. El valor corresponde al del cauce y se adoptó por las condiciones observadas en la visita de reconocimiento y registradas en el material fotográfico: un cauce estrecho e irregular, con pendientes fuertes propias del relieve andino, presencia abundante de maleza densa, arbustos y troncos que obstruyen el flujo, y un lecho de bloques de roca grandes y desordenados. Estas condiciones sitúan el valor dentro del rango que Chow (1959) y Chaudhry (2008) reportan para cauces naturales de montaña con obstrucción vegetal y material grueso. Debe precisarse que no se trata de una calibración: la ausencia de registros de nivel o caudal en la cuenca impide contrastar el modelo contra observaciones, de modo que el valor se sustenta en la caracterización del cauce y en la referencia bibliográfica, no en un ajuste numérico. De forma complementaria se construyó un mapa de rugosidad distribuida por reclasificación de la cobertura ESA WorldCover — $n = 0,10$ para la clase arbolada y $n = 0,040$ para la herbácea—, que no interviene en la simulación reportada, dado que el componente OverlandFlow de landlab admite un único coeficiente escalar; se conserva como insumo para futuras implementaciones con solvers que admitan rugosidad variable en el espacio. Los resultados de la Tabla 16 corresponden a la sección de la bocatoma del Distrito de Riego San José.

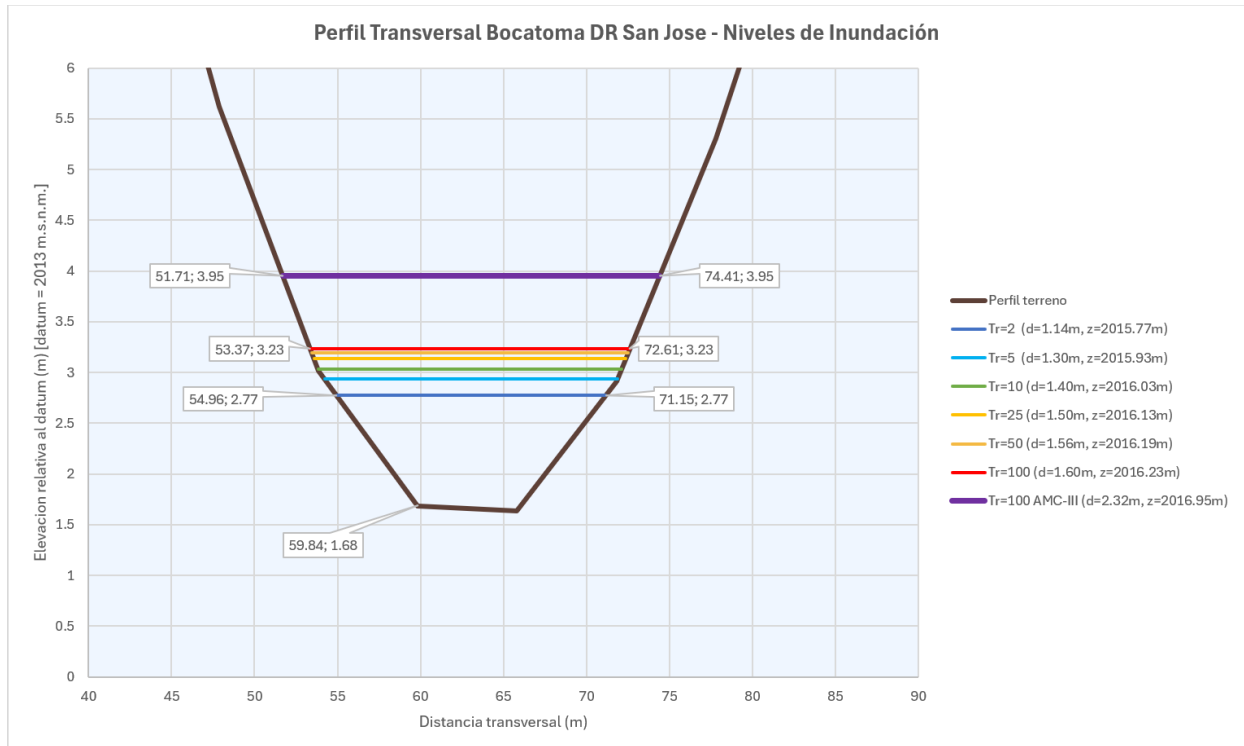
Tabla 16. *Resultados hidrodinámicos 2D en la sección de la bocatoma del Distrito de Riego San José — Quebrada San Antonio*

Tr (años)	Qp (m ³ /s)	Profundidad d (m)	Velocidad v (m/s)	v · d (m ² /s)	Área alta (ha)	Área media (ha)	Área baja (ha)	Clasificación SGC
2	13.56	1.14	2.56	2.91	2.63	17.2	1.09	Alta
5	21.46	1.3	1.62	2.11	18.33	2.08	1.15	Alta
10	25.36	1.4	1.74	2.43	18.71	2.05	1.11	Alta
25	29.11	1.5	1.92	2.87	18.99	2.05	1.03	Alta
50	31.25	1.56	2	3.11	19.16	2.02	1.01	Alta
100	32.96	1.6	1.96	3.13	19.27	2.01	1	Alta
100 — La Niña (AMC III)	52.67	2.32	2.31	5.35	20.34	2	0.79	Alta

Nota. La velocidad media en la sección de la bocatoma no crece de forma monótona con el caudal: disminuye de 2,56 m/s en $Tr = 2$ a 1,62 m/s en $Tr = 5$ y a partir de allí aumenta de manera sostenida (1,74 m/s en $Tr = 10$; 1,92 m/s en $Tr = 25$; 2,00 m/s en $Tr = 50$). El comportamiento obedece a un cambio de régimen geométrico y no a una inconsistencia del modelo. Para $Tr = 2$ el flujo permanece confinado en el cauce incidido, con área mojada reducida, radio hidráulico elevado y área de amenaza alta de 2,63 ha. Entre $Tr = 2$ y $Tr = 5$ se produce el desborde hacia la llanura de inundación —el área de amenaza alta pasa a 18,33 ha y la de amenaza media se reduce de 17,20 a 2,08 ha—, de modo que el caudal adicional se distribuye sobre láminas someras de mayor perímetro mojado, lo que reduce la velocidad media de la sección. Superado el desborde, el incremento de caudal se traduce principalmente en aumento del tirante dentro de un ancho ya estabilizado y la velocidad vuelve a crecer. El leve descenso de $Tr = 50$ a $Tr = 100$ (2,00 a 1,96 m/s) responde al mismo mecanismo de expansión lateral residual, mientras el tirante continúa aumentando de 1,56 a 1,60 m. El producto tirante $\times$ velocidad, que es el descriptor de la peligrosidad hidrodinámica, crece de forma monótona en todos los

escenarios ($2,91$ a $3,13 \text{ m}^2/\text{s}$) y se mantiene muy por encima del umbral adoptado, por lo que la clasificación de amenaza alta no se ve afectada por esta no monotonía. Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Perfil Transversal Bocatoma DR San José - Niveles de Inundación

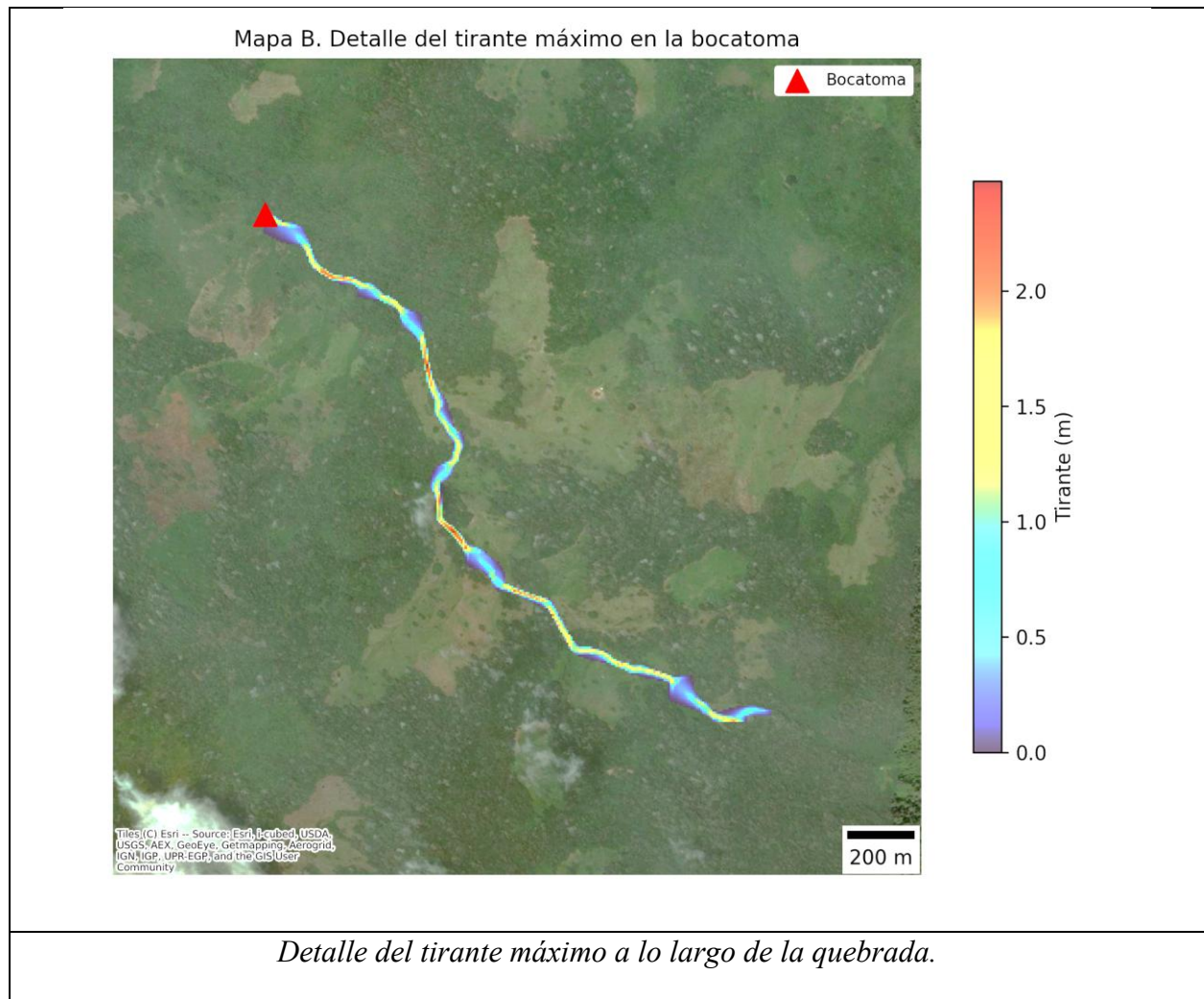


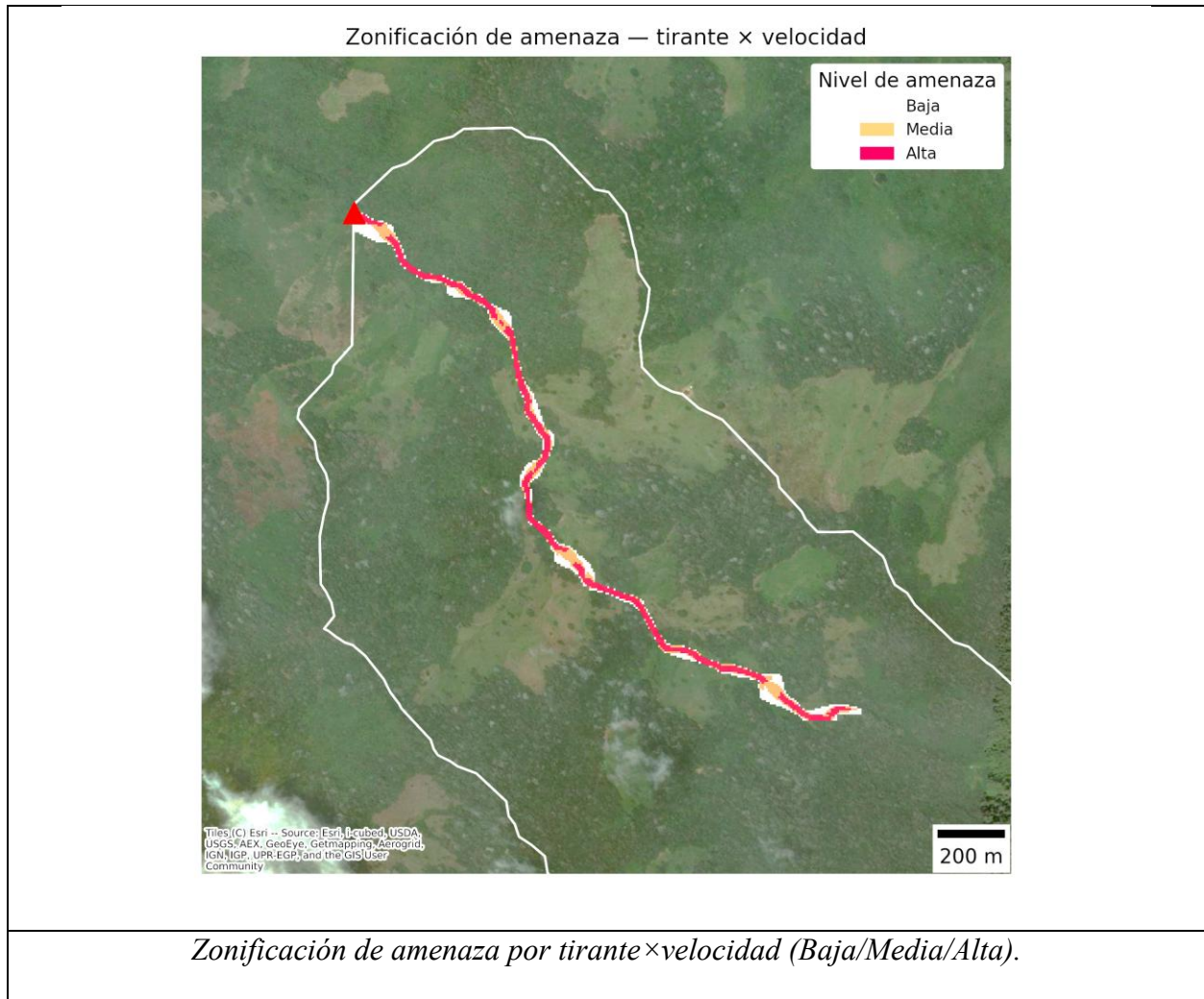
Sobre los resultados del modelo 2D para la creciente de diseño de 50 años, la matriz dual profundidad–velocidad del SGC Ramos-Cañón et al. (2021) clasifica el corredor del cauce y la sección de la bocatoma en amenaza alta. En la captación el modelo indica un tirante máximo de 1,56 m —equivalente a la altura del azud (1,5 m)—, una velocidad de 2,0 m/s y un producto tirante×velocidad de $3,1 \text{ m}^2/\text{s}$, muy por encima del umbral operativo adoptado en esta investigación para amenaza alta ($1,0 \text{ m}^2/\text{s}$; la Guía SGC establece $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$ como referencia estándar, pero para cuencas torrenciales de alta montaña con carga de sólidos — $MR = 0,473$, dominio debris flood—

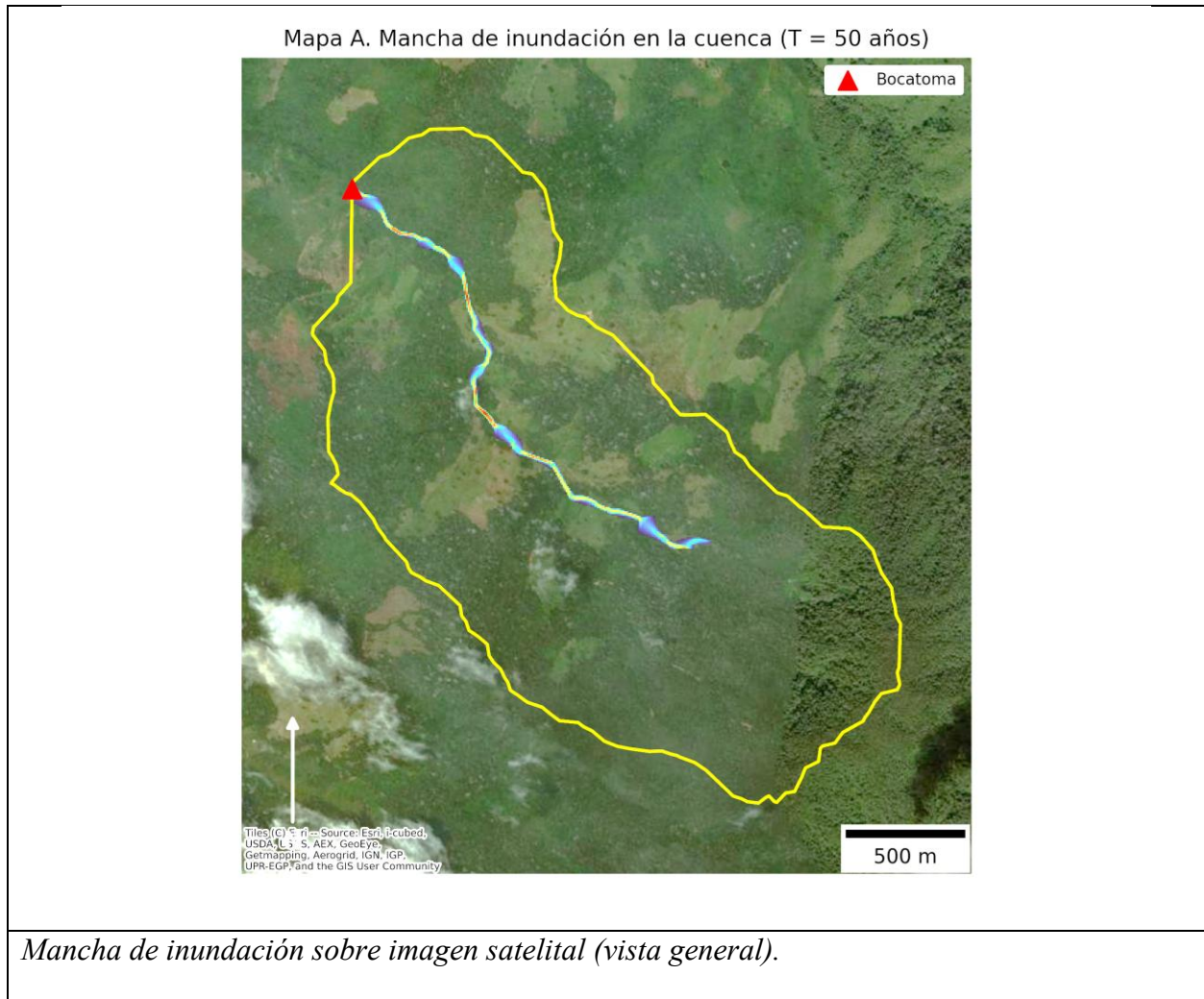
se adopta conservadoramente $1,0 \text{ m}^2/\text{s}$, reconociendo que el flujo real con sedimentos es hidráulicamente más agresivo que el agua clara del modelo SWE). El área inundada dentro del polígono de la cuenca aportante (recortada al límite de cuenca) es de 7,23 ha para $Tr = 50$ años; el dominio de simulación completo —que supera el límite de la cuenca— registra 22,18 ha. La conclusión de amenaza se sustenta en el peligro hidrodinámico puntual sobre la estructura (tirante 1,56 m; velocidad 2,0 m/s; $dv = 3,12 \text{ m}^2/\text{s}$), no en la superficie absoluta.

A continuación, se presentan los resultados de la Zonificación de amenaza por inundación — Corredor hidráulico Quebrada San Antonio, $Tr = 50$ años (Figura 10). Resolución del MDT base: 6 m/píxel (IGAC, producto MDT10_41020_20180218).

Figura 10. *Zonificación de amenaza por inundación — Corredor hidráulico Quebrada San Antonio mediante COLAB*







NOTA: Para visualizar los resultados se genera un HTML interactivo directamente para ver los resultados del modelo en GOOGLE COLAB, disponible en el siguiente enlace:

mapa_amenaza.html

8.4.1 Análisis de vulnerabilidad técnica de la bocatoma — Metodología de valoración

El registro fotográfico de campo documenta las condiciones del cauce y de la estructura de captación: el cauce de la Quebrada San Antonio en la zona de captación (Fotografía 1) y la bocatoma de fondo del Distrito de Riego San José (Fotografía 2).



Fotografía 1. *Cauce de la Quebrada San Antonio en la captación.*



Fotografía 2. *Bocatoma de fondo del Distrito de Riego San José (registro de campo).*

La vulnerabilidad técnica de la bocatoma se valoró sobre tres modos de falla físicamente coherentes con el régimen hidrodinámico de la Quebrada San Antonio. La socavación local en el lecho frente a la captación configura el modo de falla dominante. El modelo landlab—OverlandFlow indica una velocidad de 2,0 m/s en la sección de la bocatoma para la creciente de diseño $T_r = 50$ años. Annandale (1995) establece un umbral crítico de resistencia al arranque de materiales de lecho cohesivo-granular alrededor de los 9 m/s en condiciones de agua clara; sin embargo, la combinación del gradiente del cauce ($J = 27 \%$) con la carga de sedimento grueso en suspensión —propia del dominio debris flood ($MR = 0,473$)— confiere al flujo real una capacidad erosiva que supera la resistencia del lecho incluso a velocidades menores, tal como evidencian los daños históricos en la bocatoma. El impacto de flotantes (troncos, ramas, sedimento grueso movilizado desde la cabecera) sobre la rejilla de captación constituye el segundo modo, con probabilidad creciente para $T_r \geq 25$ años. La sedimentación posterior al evento, asociada al colapso del transporte una vez disipada la energía hidráulica aguas abajo de la bocatoma, configura el tercer modo. La metodología de valoración adoptó el protocolo de análisis cualitativo de modos de falla descrito en la sección 7.6, que combina la magnitud hidrodinámica resultante de la Tabla 16 con la sensibilidad estructural de la bocatoma para determinar el nivel de vulnerabilidad (alta, media, baja).

Para la evaluación espacial de la amenaza por avenidas torrenciales, se adoptaron los criterios de clasificación establecidos por el Servicio Geológico Colombiano Ramos-Cañón et al. (2021). Esta categorización estratifica el nivel de peligrosidad basándose en los umbrales críticos de profundidad (d) y velocidad (V) del flujo. De este modo, la amenaza alta se asigna al canal principal y a las zonas de impacto directo, definidas por calados superiores a 1,50 m o producto tirante $\times$ velocidad ($d \cdot v$) $> 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$ (umbral adoptado en este estudio para el régimen torrencial

con carga de sólidos; el valor estándar SGC es $d \cdot v > 1,5 \text{ m}^2/\text{s}$). La amenaza media corresponde a calados entre 0,50 m y 1,50 m o $0,50 < d \cdot v \leq 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$. La amenaza baja comprende el área inundable con calados $\leq 0,05 \text{ m}$ o $d \cdot v \leq 0,01 \text{ m}^2/\text{s}$.

La valoración cualitativa de la vulnerabilidad técnica adopta tres niveles —alta, media y baja— en función de la combinación de la magnitud hidrodinámica del evento y la sensibilidad estructural de la bocatoma. Los resultados se sintetizan en la Tabla 17. La vulnerabilidad técnica se valora como alta en los tres modos de falla para $Tr \geq 25$ años. Para $Tr = 2$ y $Tr = 5$ años la vulnerabilidad es media, dominada por el riesgo de socavación local del lecho.

Tabla 17. *Valoración cualitativa de la vulnerabilidad técnica de la bocatoma del Distrito de Riego San José por modo de falla y período de retorno*

Modo de falla	Tr = 2	Tr = 5	Tr = 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 100
Socavación local del lecho	Media	Media	Alta	Alta	Alta	Alta
Impacto de flotantes sobre rejilla	Media	Media	Media	Alta	Alta	Alta
Sedimentación post-evento	Baja	Baja	Media	Alta	Alta	Alta
Vulnerabilidad técnica global	Media	Media	Alta	Alta	Alta	Alta

8.5 Incidencia del Cambio en la Cobertura Vegetal

El análisis de escenarios SCS-CN evaluó la incidencia del cambio en la cobertura vegetal sobre el caudal pico $Tr = 100$ años. El valor CN de línea base ($CN-II = 69,7$) fue calculado mediante el procedimiento descrito en la sección 7.4.3, a partir de la cobertura ESA WorldCover

combinada con el grupo hidrológico de suelo derivado de OpenLandMap. Los escenarios de variación del CN ($\Delta\text{CN} = -5, -10$ y -15 para reforestación, y $\Delta\text{CN} = +3$ a $+5$ para pérdida de cobertura) se fundamentan en el rango de cambio documentado por Widyasasi et al. (2024) para cuencas tropicales montañosas con procesos similares a los observados en el Macizo de Garzón. El caudal pico de cada escenario se calculó mediante la ecuación SCS-CN directa (NRCS) (1986), manteniendo constantes el tiempo de concentración y la precipitación de diseño. La Tabla 18 presenta los cuatro escenarios evaluados: línea base ($\text{CN} = 69,7$), reforestación leve ($\Delta\text{CN} = -5$), reforestación moderada ($\Delta\text{CN} = -10$) y reforestación alta ($\Delta\text{CN} = -15$).

Tabla 18. *Sensibilidad del caudal pico $T_r = 100$ años a escenarios de cobertura vegetal — Cuenca aportante Quebrada San Antonio*

Escenario	ΔCN	CN-II	S (mm) [S = 25400/CN - 254; CN-II = 69,7] Retención	Ia (mm) Abstracción	Q (mm) Escorrentía	Qp (m ³ /s) [SCS-CN unitario grafo; caudal unitario Tr=100: 32,96 m ³ /s/km ²]	Reducción Qp (%)	d (m)	v (m/s)
Línea base (cobertura 2018)	0	69,7	110,4	22,1	62,2	32,96	0,0 %	1.6	1.96
Reforestación leve	-5	64,7	138,6	27,7	51,5	26,5	19,9 %	1.4	1.79
Reforestación moderada	-10	59,7	171,5	34,3	41,4	20,1	39,1 %	1.2	1.6
Reforestación alta	-15	54,7	210,4	42,1	32,1	14,2	57,0 %	0.96	1.39

El escenario inverso —pérdida adicional de cobertura— se evaluó adoptando el incremento estimado de $\Delta CN = +3$ a $+5$ unidades derivado del análisis multitemporal Sentinel-2 (transición del 6 % de bosque denso a pasto manejado entre 2018 y 2024). El resultado indica una amplificación del caudal pico $Tr = 100$ años entre el 11 % y el 19 %, equivalente a $Q_p = 36,6$ a $39,1 \text{ m}^3/\text{s}$ para los escenarios de pérdida de cobertura $\Delta CN = +3$ a $+5$ (calculado con la ecuación SCS-CN directa, mismos parámetros de la Tabla 17). Esta amplificación es consistente con los rangos reportados por Li et al. (2020) para cuencas con configuración morfométrica similar.

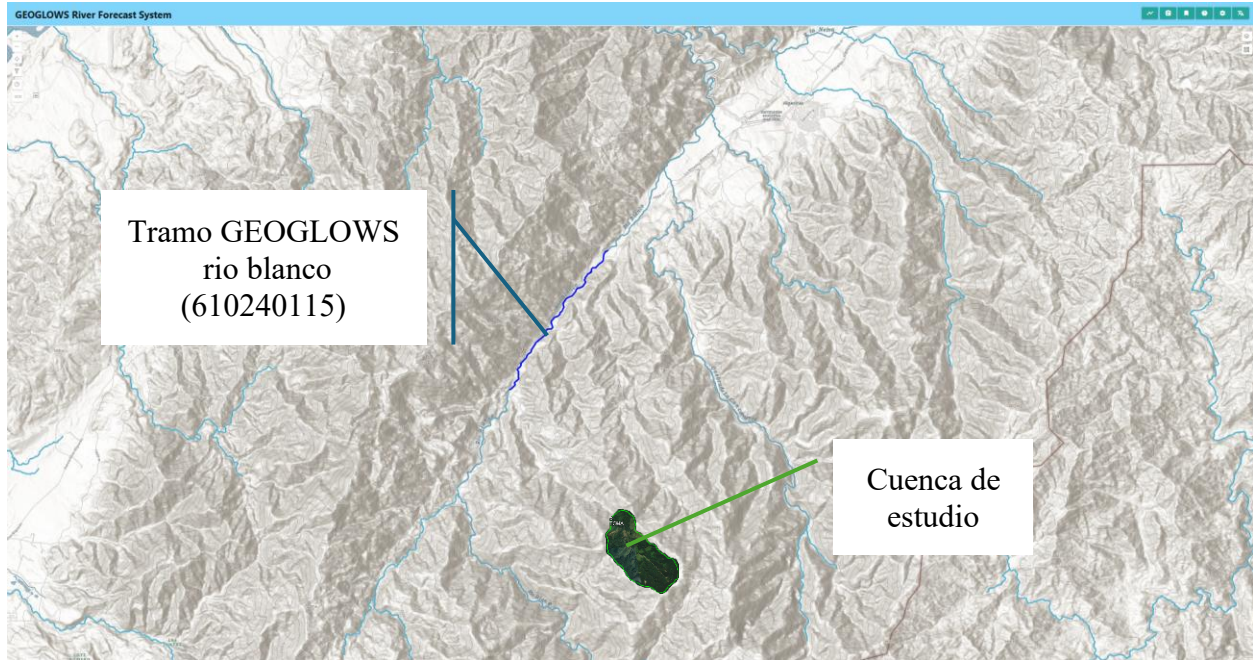
La conclusión hidrodinámica relevante es que ningún escenario de reforestación evaluado (hasta $\Delta CN = -15$) logra extraer la sección de la bocatoma del umbral de amenaza alta. Para la reforestación alta ($\Delta CN = -15$, $Q_p \approx 14,2 \text{ m}^3/\text{s}$ según la Tabla 18) el caudal pico se reduce un 57 % respecto a la línea base, pero el control geomorfológico —como gradiente global del cauce principal del 27 %— domina sobre el control hidrológico: incluso con el hidrograma de reforestación alta el régimen de flujo permanece torrencial y el producto tirante $\times$ velocidad sigue superando el umbral de amenaza alta ($dv > 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$). La mitigación efectiva del riesgo requiere, en consecuencia, una combinación de medidas estructurales y no estructurales, no solamente intervenciones de cobertura.

8.6 Validación Cruzada con GEOGLOWS ECMWF V2

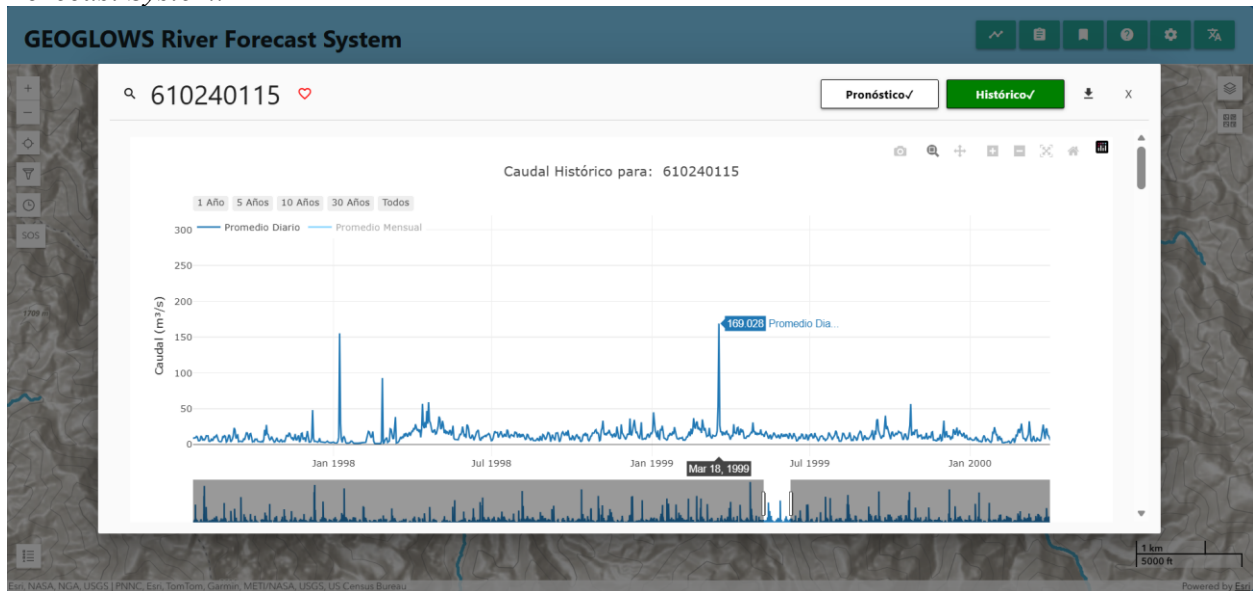
La validación cruzada del caudal pico $Tr = 100$ años se realizó con el modelo global GEOGLOWS ECMWF V2 indicado por Hales et al. (2022), accedido mediante el paquete Python geoglows v2.1.0. GEOGLOWS es un sistema de pronóstico hidrológico global que combina el modelo de enrutamiento RAPID con los reanálisis meteorológicos ERA-5 del ECMWF para producir series de caudal simulado en la red fluvial global MERIT Hydro ($\sim 90 \text{ m}$ de resolución). El trayecto más próximo a la bocatoma fue el segmento 610240115 (segmento del río Neiva aguas

abajo de la confluencia con la Quebrada San Antonio), localizado en coordenadas $2^{\circ}24'51''\text{N}$ / $75^{\circ}22'08''\text{O}$, con área aportante GEOGLOWS de $47,3 \text{ km}^2$. La transferencia regional al área de la cuenca aportante ($A = 3,574 \text{ km}^2$) se aplicó con el exponente de área $\alpha = 0,7$ —valor recomendado por BYU Hydroinformatics Lab (2025) para cuencas andinas no instrumentadas con régimen torrencial— mediante la ecuación: $Qp_{\text{cuenca}} = Qp_{\text{GEOGLOWS}} \times \left(3,574/47,3\right)^{0,7}$ Es importante precisar que $\alpha = 0,7$ corresponde al valor teórico recomendado en la literatura especializada (BYU Hydroinformatics) y es el que se adopta para la transferencia regional hacia la cuenca aportante de la bocatoma en el cuerpo de este documento; en el Anexo C se documenta, a manera de análisis de sensibilidad complementario, un ejercicio de optimización numérica sobre la serie histórica de 87 años simulada por GEOGLOWS para el tramo 610240115, que arroja un exponente empírico local $\alpha = 0,857$ —valor que minimiza la diferencia absoluta frente a los caudales observados en ese tramo específico y que no sustituye el valor teórico aquí utilizado—. Se presentan resultados para todos los períodos de retorno evaluados ($Tr = 2, 5, 10, 25, 50$ y 100 años), comparados con los cuantiles obtenidos por ajuste estadístico de la Estación La Arcadia. El segmento de la red hidrográfica GEOGLOWS y la cuenca de estudio se muestran en la Captura 1; el caudal histórico simulado, el volumen anual acumulado y el volumen diario acumulado con la fecha del caudal máximo anual se presentan en las Capturas 2 a 4, respectivamente.

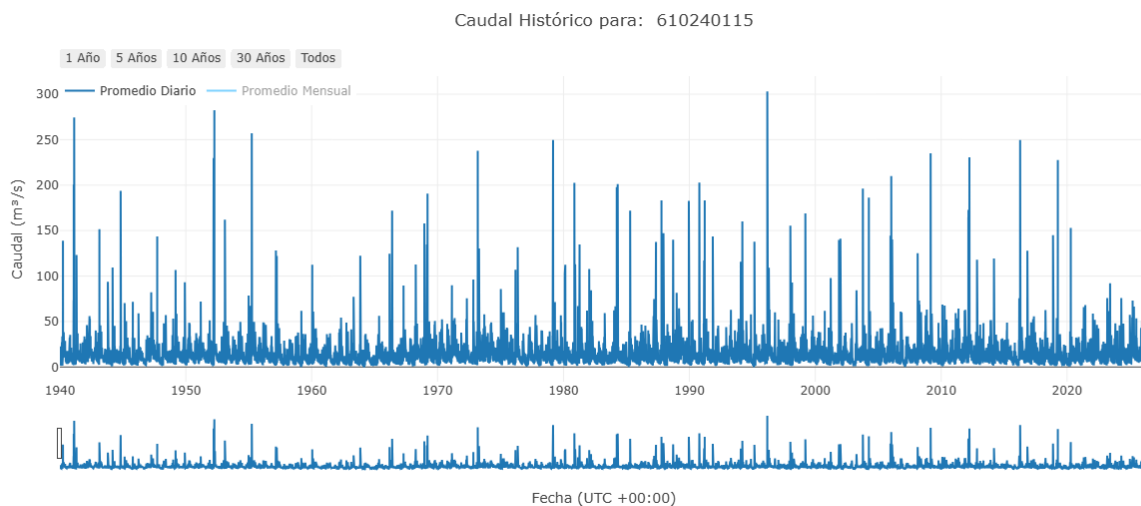
El modelo GEOGLOWS se emplea aquí exclusivamente para contextualizar el régimen torrencial del Río Blanco receptor, y no como validación de los caudales de diseño de la microcuenca ni como fuente alternativa de estimación. El apartado documenta el procedimiento de transferencia regional por completitud metodológica y porque el ejercicio de sensibilidad del exponente de área que de él se deriva (Anexo C) resulta informativo, pero la decisión de no utilizar sus resultados como insumo de diseño está tomada sobre la evidencia de desempeño aquí referida



Captura 1. Segmento de la red hidrográfica GEOGLOWS y cuenca de estudio — visor River Forecast System.



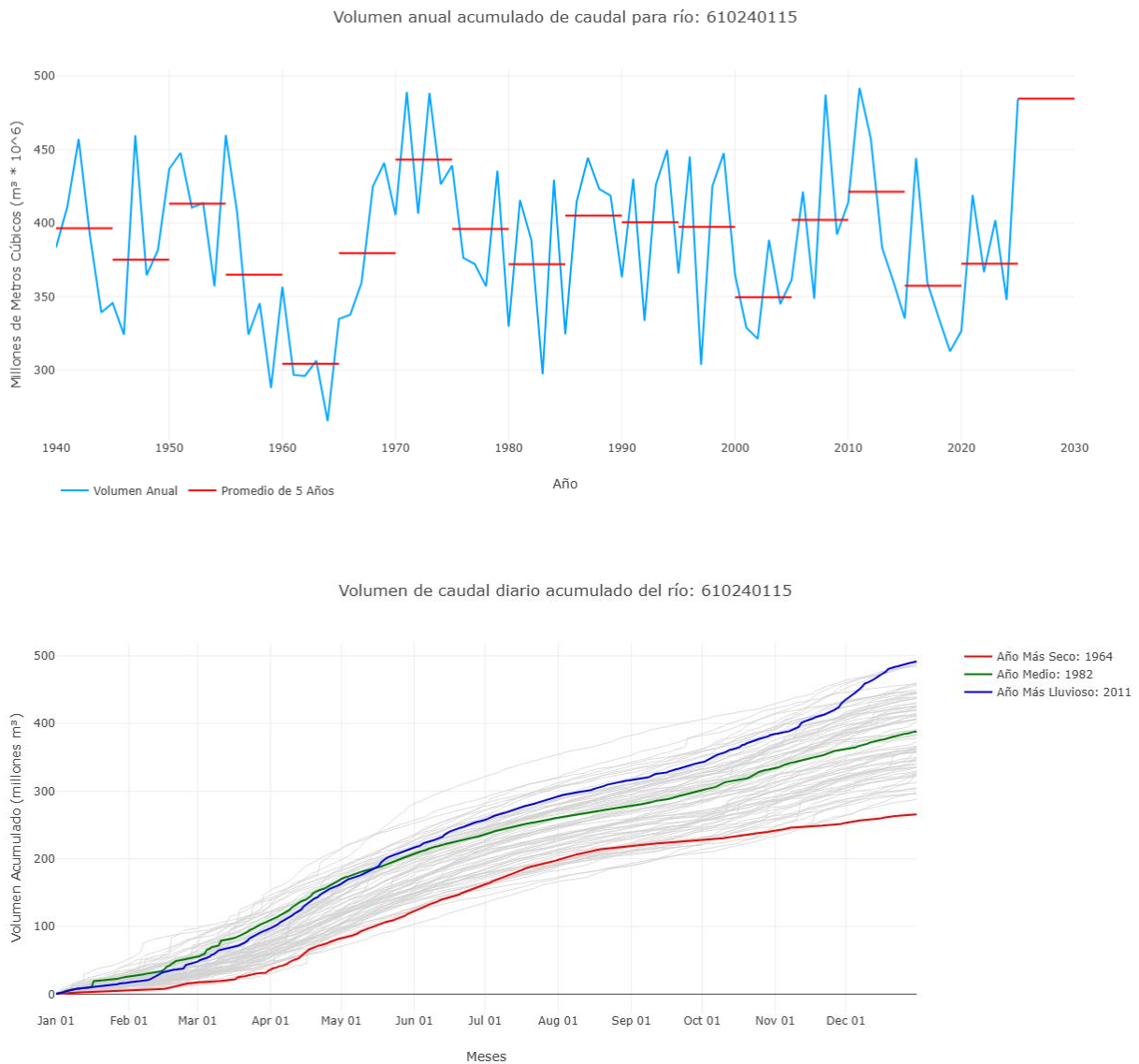
Captura 2. Caudal histórico simulado para el tramo GEOGLOWS 610240115.



Captura 3. *Volumen anual acumulado de caudal para el tramo GEOGLOWS 610240115.*

Discharge m3/s [610240115]

Media	12.2668934
Error típico	0.06334164
Mediana	10.47
Moda	8.59
Desviación estándar	11.2548666
Varianza de la muestra	126.672021
Curtosis	132.763299
Coefficiente de asimetría	8.34117676
Rango	302.42
Mínimo	0.63
Máximo	303.05
Suma	387290.36
Cuenta	31572
Mayor (1)	303.05
Menor(1)	0.63
Nivel de confianza(95.0%)	0.12415209



Captura 4. *Volumen diario acumulado y fecha de caudal máximo anual — años seco, medio y lluvioso.*

Fuente: [River Forecast System](#)

El tramo GEOGLOWS 610240115 corresponde al Río Blanco aguas abajo de la confluencia con la Quebrada San Antonio, con área aportante de 47,3 km², escala 13 veces mayor que la microcuenca de la bocatoma (3,574 km²). Por esta diferencia de escala, GEOGLOWS no proporciona caudales directamente comparables con los del sitio de interés; su función en esta investigación es contextualizar el régimen torrencial del río receptor.

8.7 Validación Independiente con la Estación Instrumentada El Casil

Como complemento a la validación cruzada documentada en la sección 8.6, esta sección incorpora una segunda fuente de validación independiente: la estación limnimétrica El Casil [21107030], administrada por el IDEAM sobre la cuenca homónima del río Neiva, en el municipio de Algeciras (Huila). A diferencia del tramo GEOGLOWS 610240115 empleado en la sección 8.6 —un afluente del río Blanco sin estación física asociada—, El Casil corresponde a un punto de aforo real, lo que permite contrastar simultáneamente los caudales observados en campo y el desempeño del propio modelo GEOGLOWS ECMWF V2 sobre un sitio instrumentado de la misma zona hidrográfica (SZH 2110). La memoria completa de cálculo, con las tablas de soporte, se presenta en el Anexo G.

La estación El Casil (2,5448° N, 75,3016° O; 1.260 m s. n. m.) registra caudal máximo diario para el período 21 de marzo de 2018 a 31 de diciembre de 2023 ($N = 1.492$ días), con un vacío de 588 días entre marzo de 2022 y octubre de 2023 y nivel de aprobación “Preliminar” en la totalidad del registro (DHIME-IDEAM). El área de drenaje de la estación es de 215,8 km², aproximadamente 60 veces la de la microcuenca de la bocatoma (3,574 km²). El ajuste de una distribución Gumbel a la serie de máximos anuales ($N = 6$ años, de los cuales solo tres son completos) produce caudales de diseño de 21,3 m³/s, 27,5 m³/s, 31,7 m³/s, 36,9 m³/s, 40,8 m³/s y 44,6 m³/s para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, respectivamente (Tabla G.1); dado el tamaño reducido de la muestra, estos valores deben interpretarse con amplio margen de incertidumbre y no sustituyen a los caudales de diseño obtenidos por SCS-CN para la microcuenca de estudio (sección 8.3).

Sobre el mismo punto de aforo se evaluó el desempeño del tramo GEOGLOWS ECMWF V2 610267388 (Hales et al., 2022). Para el período de traslape 2018–2023 ($N = 1.492$ pares

diarios), el modelo sobreestima sistemáticamente la serie observada: eficiencia de Nash-Sutcliffe $NSE = -30,53$, eficiencia de Kling-Gupta $KGE = -3,16$, sesgo porcentual $PBIAS = +167,3 \%$, raíz del error cuadrático medio $RMSE = 14,71 \text{ m}^3/\text{s}$ y correlación de Pearson $r = 0,099$ (Tabla G.2). La sobreestimación es más severa en los caudales altos —la curva de duración muestra una razón GEOGLOWS/observado de hasta 3,7 en el percentil de excedencia P10— y se atenúa en el régimen seco, donde el modelo incluso subestima levemente (razón de 0,87 en P90). Estos resultados son consistentes con —y de hecho más desfavorables que— los obtenidos en la sección 8.6 para el tramo 610240115, y confirman que GEOGLOWS ECMWF V2 sobreestima de manera estructural los caudales de las cuencas pequeñas de montañas del Huila, lo que refuerza la decisión metodológica de no emplear el modelo global como fuente de caudales de diseño en esta investigación.

Se evaluó adicionalmente la transposición directa de los caudales observados en El Casil hacia la microcuenca de la bocatoma mediante la relación de áreas $Q_{\text{estudio}} = Q_{\text{ref}} \times \left(\frac{A_{\text{estudio}}}{A_{\text{ref}}}\right)^n$. La evaluación de similitud hidromorfométrica entre ambas cuencas (Tabla G.3) muestra que solo dos de ocho criterios se satisfacen —misma zona hidrográfica y mismo régimen climático bimodal—: la relación de áreas (1:60) excede en seis veces el umbral máximo recomendado (1:10), la pendiente media de la Qda. San Antonio (53,6 %) difiere en un orden de magnitud de la estimada para El Casil (3-5 %), y el tiempo de concentración de la quebrada de estudio (57 minutos) resulta incompatible con la variable disponible en la estación de referencia (caudal máximo diario, integrado en ventanas de 24 horas). En consecuencia, los caudales transpuestos (Tabla G.4) resultan entre 14,7 y 18,5 veces menores que los obtenidos por SCS-CN —por ejemplo, Q100 transpuesto entre 1,33 y 2,53 m^3/s frente a 32,96 m^3/s por SCS-CN—,

discrepancia esperada dada la falta de similitud hidromorfométrica entre las dos cuencas y no una inconsistencia del método de diseño adoptado.

En conjunto, las dos líneas de evidencia desarrolladas en esta sección —el desempeño deficiente de GEOGLOWS en un punto con aforo real de la misma zona hidrográfica y la invalidez hidromorfométrica de la transposición directa desde El Casil— refuerzan, por una vía de verificación independiente, la decisión metodológica adoptada en la sección 8.3 de emplear el método SCS-CN como procedimiento principal de estimación de caudales de diseño para la microcuenca de la quebrada San Antonio, en línea con la práctica recomendada para cuencas pequeñas sin instrumentación directa (NRCS, 1986). El detalle metodológico completo de ambos análisis se documenta en el Anexo G.

9. Lineamientos Técnicos de Manejo Preventivo

A partir de los resultados de la modelación hidrodinámica y del análisis de sensibilidad SCS-CN se formula un portafolio articulado de seis ejes de manejo preventivo, orientado a la reducción de la amenaza por inundación sobre la bocatoma del Distrito de Riego San José y replicable a los demás distritos de riego comunitarios del oriente del Huila. Cada eje integra medidas estructurales y no estructurales, identifica responsables institucionales y entrega indicadores de seguimiento. La articulación con los instrumentos de planificación territorial vigentes —POMCA del río Neiva (pendiente), Plan de Desarrollo Departamental del Huila 2024–2027 y EOT del municipio de Algeciras— constituirían el marco operativo de la implementación.

9.1 Eje 1 — Conservación y restauración de la cobertura boscosa de la cuenca aportante

La pérdida del 6 % de la cobertura boscosa densa entre 2018 y 2024, documentada por el análisis multitemporal Sentinel-2, amplifica el caudal pico $Tr = 100$ años entre el 11 % y el 19 %. La detención de esta tendencia y la reversión progresiva mediante reforestación moderada ($\Delta CN = -10$) permitirían reducir el caudal pico en aproximadamente 39.1 %, equivalente a 20.1 m³/s. Las medidas específicas incluyen la declaratoria del área de protección hídrica sobre el 100 % de la cuenca aportante (3,574 km²) con instrumentos de la Ley 1450 de 2011 (Pago por Servicios Ambientales) operados por la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena; la firma de acuerdos voluntarios con los predios identificados (mediante visor <https://www.colombiaenmapas.gov.co/>) en la cuenca para reforestación protectora-productora con especies nativas (cedro negro, nogal cafetero, guamo) que permitan diversificación productiva sin

presión sobre el bosque remanente; y el monitoreo anual de la cobertura boscosa mediante el pipeline GEE-Sentinel-2, con reporte público disponible.

9.2 Eje 2 — Protección estructural de la bocatoma

La permanencia de la sección de la bocatoma en el umbral de amenaza alta para todos los períodos de retorno exige medidas estructurales complementarias a las intervenciones de cobertura. Tres tipos de obra resultan pertinentes: la disipación de energía aguas arriba de la captación mediante una serie de diques transversales de baja altura (vertederos rectangulares en concreto reforzado de 1,0 a 1,5 m con espaciamiento de 30 a 40 m), técnica documentada en estudios europeos sobre control de torrentes de montaña (D’Agostino & Lenzi, 1999; Lenzi, 2002) y aplicada en proyectos exitosos del Cantón de Valais (Suiza) y de la región alpina italiana; la protección lateral del cauce frente a la bocatoma con muros de gaviones tipo escalonado, recomendados por (INVÍAS) (2009) para velocidades sostenidas entre 6 y 10 m/s; y el reforzamiento estructural de la rejilla de captación con barrotes de acero inoxidable de mayor diámetro y trampa de flotantes aguas arriba.

9.3 Eje 3 — Sistema de alerta temprana comunitario

La operación de un sistema de alerta temprana comunitario habilitaría la suspensión preventiva de la captación durante eventos extremos, lo que reduce sustancialmente el riesgo de daño a la bocatoma por impacto de flotantes y socavación localizada. El sistema propuesto integra un pluviómetro automático en la cabecera de la cuenca (vereda La Arcadia, en coordinación con el IDEAM o la CAM); un nivel-grafo de bajo costo en la sección de la bocatoma; un protocolo de umbrales de alerta ($P_{15min} > 20 \text{ mm}$ o nivel $> 0,40 \text{ m}$); y una cadena de comunicación con los 65 usuarios mediante grupo de WhatsApp. La inversión estimada asciende a 18 millones de pesos

colombianos (precios 2025), con vida útil de cinco años y costo de mantenimiento anual del 8 % de la inversión inicial.

9.4 Eje 4 — Plan de mantenimiento preventivo del distrito

El plan de mantenimiento preventivo del distrito articula las tareas rutinarias y las inspecciones tras eventos en la bocatoma. Las tareas rutinarias incluyen la limpieza trimestral de la bocatoma y desarenador, la inspección semestral de los pasos elevados, y el aforo anual del caudal captado para verificación del cumplimiento de la concesión. Las inspecciones tras eventos se activan automáticamente cuando se supera el umbral pluviométrico de alerta del Eje 3 y comprenden el reconocimiento visual de la bocatoma y los primeros 200 m de aducción, con registro fotográfico y reporte a la junta directiva de ASOSANJOSE en plantilla estandarizada incluida en el Anexo F.

9.5 Eje 5 — Articulación interinstitucional

La sostenibilidad de las medidas anteriores depende de la articulación entre cuatro actores institucionales con competencias complementarias: ASOSANJOSE como operador y receptor directo de las medidas; la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena - CAM como autoridad ambiental de la concesión y promotora del esquema de Pago por Servicios Ambientales; la Alcaldía de Algeciras como entidad administrativa municipal local del territorio y vínculo con el Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres; y la Gobernación del Huila —vía Secretaría de Agricultura y Minería— como articuladora del portafolio departamental de fortalecimiento de distritos de riego comunitarios. La operacionalización de esta articulación se propone mediante la conformación de una Mesa Técnica de Gestión del Riesgo de los Distritos de

Riego del Huila, con reuniones anuales o en periodos críticos de Niño o Niña y agenda focalizada en seguimiento de indicadores.

9.6 Eje 6 — Replicabilidad metodológica a otros distritos

El diseño metodológico desarrollada en esta investigación es directamente replicable a los más de veinte distritos de riego comunitarios de alta montaña del Huila. El paquete metodológico replicable comprende el protocolo paso a paso documentado en el Anexo A; el cuaderno de Google Colab que integra el pipeline de Google Earth Engine (Anexo D) y la modelación hidrodinámica 2D con landlab (Anexo E); y la propuesta operativa EVAL-IRD para la Secretaría de Agricultura del Huila (Anexo F), que articula los seis ejes anteriores en un programa departamental de cinco años con presupuesto estimado, cronograma de ejecución e indicadores de impacto. La replicabilidad se sustenta en el uso exclusivo de datos institucionales colombianos de libre acceso (IGAC, IDEAM, CAM) y servicios académicos gratuitos (Google Earth Engine, Sentinel Hub, GEOGLOWS), lo que elimina barreras de costo de licenciamiento de software. Lo que no se demuestra, y no puede presumirse, es la transferibilidad de los resultados: en ausencia de una validación del procedimiento contra observaciones de caudal, sus productos no son extrapolables a cuencas cuyas condiciones no se hayan verificado previamente.

Debe declararse, finalmente, la naturaleza del producto que el protocolo entrega. Los resultados de una aplicación del procedimiento constituyen un diagnóstico preliminar de amenaza, apto para la priorización de distritos, la orientación de inversiones y la formulación de medidas de manejo preventivo. No constituyen un insumo suficiente para el diseño estructural definitivo de obras hidráulicas, que exige el levantamiento topográfico de detalle, la caracterización granulométrica del lecho y la instrumentación hidrométrica enunciados como fase subsiguiente en el apartado 9.7. La propuesta operativa EVAL-IRD del Anexo F incorpora esta distinción en su

estructura, al separar el componente técnico de diagnóstico del componente de inversión estructural.

Tabla 19. *Síntesis del portafolio de manejo preventivo — Cuenca de la Quebrada San Antonio y Distrito de Riego San José*

Ej e	Medida principal	Responsabl e	Plazo	Inversión estimada (COP)	Indicador de impacto
1	Reforestación protectora-productora (predios) 21.42 ha	CAM + ASOSANJO SE	Mediano (5 años)	\$792.540.000 Transición del -6 % de bosque denso a pasto manejado entre 2018 y 2024 = 21.42 ha (\$37 millones / ha) Fuente: https://fedemaderas.org.co/cuanto-dinero-cuesta-restaurar-los-ecosistemas-de-colombia/	Δ cobertura boscosa anual (Sentinel-2)
2	Diques disipadores aguas arriba (8 unidades) Se estima para cada dique 62 m3 de gavión, en una longitud transversal de la fuente de 10 metros	Gobernación Huila + CAM	Corto (2 años)	\$127.500.000 Fuente: GOBERNACIÓN DEL CAUCA - SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA. (2023). Análisis de Precios Unitarios (APU). Código APU 360/6. Fuente: https://datacauca.gov.co/apu/apu/apu/quer/360/6	Reducción de velocidad en sección de bocatoma
3	Sistema de alerta temprana comunitario a partir de pluviómetros en línea.	ASOSANJO SE + Alcaldía	Corto (1 año)	Estación Clima Basic: Aproximadamente \$4.400.000 COP con pagos anuales por la plataforma de reporte en línea. Mide lluvia, temperatura. Sin embargo, esta alternativa se debe descartar por la falta de cobertura de señal celular en la parte alta de la cuenca, lo que no permitiría el reporte en	Número de eventos detectados con anticipación

Ej e	Medida principal	Responsabl e	Plazo	Inversión estimada (COP)	Indicador de impacto
				tiempo real de las condiciones de precipitación que genere la alerta. Sin embargo, se deja el registro de la medida, pues en otras cuencas sí se puede tener la cobertura de red celular. Fuente: https://lynks.com.co/	
4	Plan de mantenimiento preventivo	ASOSANJO SE	Permanente	\$ 5.000.000 / año. Para la inspección y arreglo de infraestructura o elementos instalados	Reportes de inspección trimestral
5	Mesa Técnica de Gestión del Riesgo de DR y visitas a los 30 distritos priorizados para visita de inspección de infraestructura de captación.	Gobernación Huila	Permanente	24.000.000 / año. Análisis de la aplicación se estima un costo de \$800.000/ día visita a los 30 distritos priorizados. EVAL-IRD Evaluación de Amenaza por Inundación en Distritos de Riego Secretaría de Agricultura — Departamento del Huila <i>Maestría en Gestión de Cuencas Hidrográficas — USTA</i> Ajuste de la información y reporte y consolidación de daños a infraestructura de captación de los distritos de riego del Departamento.	Actas y seguimiento de indicadores
6	Replicabilidad metodológica EVAL-IRD	Secretaría de Agricultura Huila	Mediano (5 años)	\$ 305.520.316 (Tasa Representativa del Mercado (TRM 31 may 2026) Aplicada: COP 3.678,15)	Distritos evaluados / 30

Ej e	Medida principal	Responsabl e	Plazo	Inversión estimada (COP)	Indicador de impacto
	Mediante la dotación de elementos a la unidad de riego del departamento del Huila: 1. Sistema Híbrido GNSS, Dron Mavic 3M, Licencia Pix4D y Distanciómetro Leica 2. Caudalímetro Ultrasónico Flexim Flow 6 Series y Transductores 3. Sistema Medidor de Caudal Magnético-Inductivo OTT MF pro completo			Presupuesto con base en cotizaciones de proveedores: 1 Geoinstrumentos Sistema Híbrido GNSS, Dron Mavic 3M, Licencia Pix4D y Distanciómetro Leica \$ 105.462.203 2 Emerson Caudalímetro Ultrasónico Flexim Flow 6 Series y Transductores \$ 143.276.669 3 HACH Sistema Medidor de Caudal Magnético-Inductivo OTT MF pro completo \$ 56.781.444 La inversión en la instrumentación de alta precisión representa un salto cualitativo para la Secretaría de Agricultura y Minería del Huila. No se trata únicamente de una actualización de inventario, sino de una transición hacia un modelo de ingeniería agrícola y gestión hídrica basada en datos exactos, lo cual es fundamental para garantizar la sostenibilidad y competitividad del campo huilense.	

9.7 Fase subsiguiente — Complemento para la evaluación integral del riesgo

Los seis ejes anteriores atienden la gestión de la amenaza caracterizada en esta investigación. La evaluación integral del riesgo, en los términos del artículo 4 de la Ley 1523 de 2012, exige además la valoración de la vulnerabilidad y de la exposición, componentes que exceden el alcance de este trabajo y que se formulan aquí como una fase subsiguiente. Se enuncian sus actividades y sus responsables institucionales; su costeo corresponde a la entidad que asuma la ejecución y no se estima en este documento.

La fase comprende cinco actividades. Primera, un censo de vulnerabilidad social y económica de las 65 familias usuarias del distrito, que caracterice su dependencia del servicio de riego, su capacidad de respuesta y sus medios de vida; corresponde al municipio de Algeciras a través de su Consejo Municipal de Gestión del Riesgo, con acompañamiento de la Secretaría de Agricultura y Minería del Huila. Segunda, un levantamiento topográfico de detalle del corredor hidráulico y de la estructura de captación, que sustituya el modelo digital de terreno de seis metros por una superficie de resolución centimétrica y permita verificar los tirantes modelados; corresponde a la Secretaría de Agricultura y Minería del Huila con la instrumentación prevista en el Eje 6. Tercera, la instalación de instrumentación limnimétrica y pluviográfica en la cuenca aportante, condición necesaria para la calibración del modelo hidrológico e hidrodinámico frente a observaciones; corresponde al IDEAM en articulación con la Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena. Cuarta, un inventario de exposición de la infraestructura complementaria del distrito —desarenador, conducción y pasos elevados—, con valoración de su estado estructural; corresponde a ASOSANJOSE con apoyo técnico municipal. Quinta, un proceso de cartografía social del riesgo y de validación comunitaria de los mapas de amenaza producidos en esta

investigación, a ejecutarse cuando las condiciones de orden público lo permitan; corresponde al Consejo Municipal de Gestión del Riesgo con participación de ASOSANJOSE.

La articulación de esta fase con los productos entregados es directa: los mapas de amenaza de los apartados 8.4 y 8.6 constituyen la capa de amenaza sobre la cual se superponen las capas de vulnerabilidad y exposición que la fase levantaría, de modo que su ejecución convierte el presente diagnóstico físico en una evaluación de riesgo en sentido estricto y habilita la priorización de inversiones en el marco del Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres.

10. Discusión

Los resultados del estudio se discuten en seis dimensiones articuladas con la literatura internacional. La primera dimensión, técnica, contrasta los caudales pico estimados con los rangos documentados para cuencas similares. La segunda, hidrodinámica, examina la incidencia del gradiente del cauce sobre la clasificación de amenaza. La tercera, metodológica, valora la pertinencia del flujo basado en sensores remotos y computación en la nube para contextos de acceso restringido. La cuarta, comparativa, sitúa los hallazgos en relación con estudios de cuencas torrenciales de los Andes colombianos. La quinta, normativa, examina la coherencia con la Guía Metodológica del SGC y los manuales colombianos. La sexta, limitaciones, declara las restricciones del estudio y sus implicaciones.

10.1 Caudales pico y caudales unitarios en el contexto regional

El caudal pico $Tr = 100$ años de $32,96 \text{ m}^3/\text{s}$ para la cuenca de la Quebrada San Antonio ($A = 3,57 \text{ km}^2$) corresponde a un caudal específico de $9,22 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^{-2}$, dentro del rango documentado para cuencas torrenciales andinas de área similar; los valores para los demás períodos de retorno se consignan en la Tabla 16.

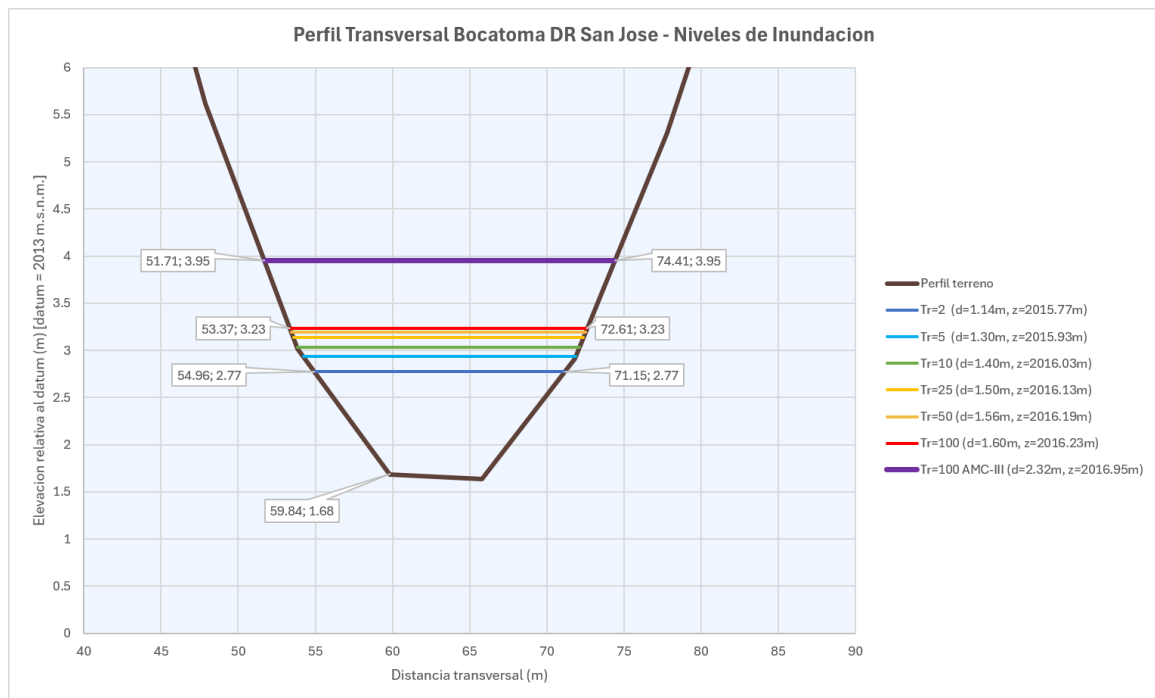
La amplificación bajo escenario pesimista AMC III ($Q_p Tr = 100 = 52,7 \text{ m}^3/\text{s}$; +60 % sobre la línea base) ilustra la sensibilidad del método SCS-CN a las condiciones de humedad antecedente y refuerza la necesidad de considerar explícitamente el efecto ENSO en el diseño hidráulico de infraestructura de captación. Esta sensibilidad es consistente con los hallazgos de Hoyos et al. (2013) sobre la amplificación pluviométrica observada en los Andes colombianos durante los episodios La Niña 2010–2011 y 2021–2023.

La confiabilidad de estos caudales de diseño se refuerza, además, por la validación independiente desarrollada en la sección 8.7: el desempeño deficiente del modelo GEOGLOWS ECMWF V2 sobre la estación instrumentada El Casil ($NSE = -30,53$; $KGE = -3,16$; $PBIAS = +167,3 \%$) y la invalidez hidromorfométrica de la transposición directa de caudales observados hacia la microcuenca de estudio descartan, desde una fuente de evidencia externa al método SCS-CN, las alternativas de estimación basadas en productos globales o en transferencia simple de caudales entre cuencas disimilares, y confirman la pertinencia del procedimiento adoptado para cuencas pequeñas sin instrumentación directa.

10.2 Control geomorfológico de la clasificación de amenaza

La clasificación de amenaza alta para los seis períodos de retorno —incluido $Tr = 2$ años— se explica por el control geomorfológico del gradiente del cauce (38,38 % en el tramo de 800 m aguas arriba de la captación; 27,03 % como pendiente $\Delta H/L$ del cauce principal empleada en el cálculo del tiempo de concentración por Témez, y 15,91 % como pendiente compensada reportada en la Tabla 6 con fines morfométricos). Conviene precisar que la modelación hidrodinámica no recibe ninguno de estos valores como dato de entrada: el componente OverlandFlow de landlab resuelve la pendiente celda a celda directamente del modelo digital de terreno de 6 m con el cauce incidido, de modo que el gradiente que gobierna el resultado es el del terreno en el entorno de la bocatoma y las cifras anteriores operan como su descripción sintética. El gradiente controla la clasificación porque gobierna la velocidad de equilibrio del flujo: en la ecuación de momentum de aguas someras, el término de pendiente motriz es el que balancea la fricción de fondo, de modo que la velocidad resultante crece con la raíz de la pendiente para una rugosidad dada. Dado que la matriz del Servicio Geológico Colombiano clasifica la peligrosidad hidrodinámica sobre el

producto tirante $\times$ velocidad, un gradiente sostenidamente superior al 15 % mantiene ese producto por encima del umbral aun con tirantes moderados, y esa es la razón por la cual incluso la creciente de $Tr = 2$ años alcanza la categoría alta. El gradiente es, no obstante, condición necesaria pero no suficiente: actúa en conjunto con el confinamiento del cauce —que impide la disipación por expansión lateral— y con la baja capacidad de infiltración del 48 % del área clasificada como grupo hidrológico D. El modelo landlab–OverlandFlow indica en la sección de la bocatoma velocidades de 1,62 a 2,56 m/s y tirantes de 1,14 a 2,32 m para la totalidad de los escenarios evaluados (Tabla 16); el producto tirante $\times$ velocidad oscila entre 2,91 y 3,13 m²/s, superando ampliamente el umbral adoptado de 1,0 m²/s en todos los Tr evaluados. Este resultado es consistente con los estudios de cuencas torrenciales andinas Contreras & Escarriaza (2020) y de los Alpes italianos Marchi et al. (2010), que documentan amenaza alta sostenida en cauces con gradientes superiores al 15 %.



La implicación normativa relevante es que para cauces de alto gradiente la zonificación de amenaza tradicional —basada exclusivamente en la matriz dual profundidad-velocidad— puede llegar a un techo de clasificación que limita su utilidad para la diferenciación temporal del riesgo. La incorporación de criterios geomorfológicos complementarios —como el índice de Melton, la densidad de drenaje y la pendiente promedio del cauce— y la consideración del régimen reológico (agua clara, flujo hiperconcentrado, flujo de escombros) podrían enriquecer la capacidad analítica de las guías metodológicas vigentes. Esta línea de investigación se sugiere como complemento futuro para la actualización de la guía del SGC.

10.3 Pertinencia del enfoque metodológico basado en sensores remotos

El diseño metodológico MDT IGAC 6 m + Sentinel-2 GEE + análisis de frecuencia (Gumbel/Log-Pearson III) + modelación 2D de aguas someras en landlab + GEOGLOWS V2 demostró capacidad para producir una valoración cuantitativa de amenaza con rigor técnico en un contexto donde las validaciones de campo no fueron posibles. La validación cruzada con CHIRPS v3.0 ($r = 0,84$) en la precipitación y la coherencia de los caudales unitarios con valores documentados para cuencas torrenciales andinas similares sustentan la confianza en los resultados dentro de la franja de incertidumbre del $\pm 25\%$; GEOGLOWS se conserva como referencia del régimen del Río Blanco receptor, no como validación de la microcuenca. Este resultado tiene una implicación operativa relevante: en territorios rurales colombianos donde el acceso de campo está estructuralmente restringido por situaciones de orden público, la integración de teledetección y modelación en la nube constituye una alternativa viable para sostener la investigación aplicada en gestión del riesgo.

La capacidad de replicación del flujo metodológico —documentada en los Anexos A, D y E con código abierto y datos públicos— es una contribución específica de esta tesis al ecosistema

de investigación en cuencas hidrográficas. La aplicación del paquete EVAL-IRD a los más de treinta distritos de riego del Huila permitiría producir, en un horizonte de cinco años, una primera línea base de amenaza por inundación para infraestructura comunitaria que actualmente carece de estudios técnicos. Este escalamiento metodológico es la principal proyección operativa del trabajo.

10.4 Comparación con estudios de cuencas torrenciales en los Andes colombianos

La comparación con los parámetros de referencia de la Guía Metodológica del SGC permite contextualizar los resultados. El caudal unitario de $9,2 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{km}^{-2}$ para $Tr = 100$ años se encuentra dentro del rango esperado para microcuencas torrenciales andinas del piedemonte colombiano, consistente con los valores típicos documentados para cuencas entre 2 y 10 km^2 con índice de Melton superior a 0,30 Ramos-Cañón et al. (2021). El índice de Melton de la Quebrada San Antonio ($MR = 0,473$), que supera el umbral de 0,30 que delimita el régimen torrencial en la Guía SGC, respalda la clasificación como microcuenca torrencial y justifica el empleo de la matriz dual profundidad-velocidad para la clasificación de amenaza. La clasificación de amenaza alta obtenida para la totalidad del corredor hidráulico en todos los períodos de retorno evaluados es coherente con el comportamiento esperado en cauces con gradientes superiores al 15 %, donde el criterio de velocidad domina sobre el de profundidad en la matriz dual del SGC (Ramos-Cañón et al., 2021; Wilford et al., 2004).

Por contraste, los estudios colombianos sobre cuencas de planicie (áreas superiores a 100 km^2 , gradientes inferiores al 5 %) reportan clasificaciones SGC dominadas por la profundidad y no por la velocidad, con una extensión de amenaza alta considerablemente menor que la registrada en cuencas torrenciales de montaña Hoyos et al. (2013). Esta diferencia ilustra la necesidad de aproximaciones metodológicas diferenciadas por régimen geomorfológico y refuerza la pertinencia del enfoque adoptado para microcuencas torrenciales del piedemonte.

10.5 Coherencia con la Guía Metodológica del SGC y normativa colombiana

La aplicación rigurosa de la Guía Metodológica del SGC Ramos-Cañón et al. (2021) en sus cuatro fases —caracterización, hidrología, hidráulica y lineamientos— constituye una contribución específica del trabajo al fortalecimiento operativo de la guía. El estudio identificó cuatro adaptaciones útiles para microcuencas torrenciales con datos escasos y acceso restringido: la integración de productos satelitales como CHIRPS v3.0 para la validación cruzada de series puntuales; la transferencia de coeficientes de desagregación temporal entre estaciones vecinas con justificación de proximidad geográfica y similitud climática; el uso del análisis multitemporal Sentinel-2 para la actualización dinámica del CN ponderado; y la validación independiente del caudal pico con modelos globales tipo GEOGLOWS. Estas adaptaciones se documentan en el Anexo A como protocolo de referencia para futuras aplicaciones.

10.6 Limitaciones del estudio

Las limitaciones del estudio se declaran en cinco frentes. Primero, la imposibilidad de adelantar validaciones de campo —levantamiento topográfico complementario, inspección de la bocatoma, caracterización granulométrica del lecho— por la Alerta Temprana N.º 009-26 implica que algunas decisiones técnicas se sustentan en información secundaria. Esta limitación se mitigó mediante la validación cruzada con CHIRPS v3.0 y GEOGLOWS V2, pero no se elimina. Segundo, la ausencia de estaciones limnimétricas en la cuenca aportante impide la calibración estricta del modelo hidrológico contra observaciones de caudal; la validación con caudales unitarios documentados para cuencas similares constituye una aproximación indirecta. Esta carencia se extiende al modelo hidrodinámico, cuyo coeficiente de rugosidad se asignó por referencia bibliográfica a partir de la cobertura y no mediante ajuste contra niveles observados.

Tercero, la modelación se desarrolló en condiciones de agua clara como límite superior conservador, sin modelación reológica explícita de flujos hiperconcentrados; esta simplificación es físicamente coherente con la posición del $MR = 0,473$ en el límite inferior del dominio *debris flood*, pero podría subestimar las profundidades en eventos extremos con alta concentración volumétrica de sedimentos. Cuarto, los coeficientes de desagregación temporal se transfirieron desde la estación Algeciras [21105030] por proximidad geográfica y similitud climática; la derivación local a partir de registros pluviográficos en La Arcadia constituiría una mejora futura cuando las condiciones de orden público lo permitan y se pueda contar con elementos de medición en la unidad de riego del Departamento que permitan evaluar caudales y perfiles topográficos específicos en el área de bocatoma. Quinto, la distribución de diseño adoptada presenta sesgo logarítmico negativo y queda por ello acotada superiormente en 157,6 mm, de modo que los cuantiles para períodos de retorno altos deben leerse junto con la cota superior de referencia que aporta el ajuste Gumbel (apartado 8.2.3). Debe señalarse, en sentido contrario, que la clasificación de cobertura por umbrales de NDVI —cuya incertidumbre se declara en el apartado 7.4.2— no constituye una limitación de los caudales de diseño, dado que el número de curva no se deriva de ella.

11. Conclusiones

11.1 Conclusiones por objetivo específico

Las conclusiones se presentan organizadas según los cuatro objetivos específicos formulados en el Capítulo 2.

Objetivo 1. La caracterización multitemporal de la cuenca aportante mediante la integración del modelo digital de terreno IGAC de 6 m y el análisis Sentinel-2 procesado en Google Earth Engine produjo descriptores morfométricos consistentes con el régimen torrencial declarado: área 3,574 km²; pendiente media 53,56 %; tiempo de concentración Témez 57 min (0,95 h); índice de Melton 0,473 (dominio *debris flood*). El análisis multitemporal 2018 vs 2024 cuantificó una reducción de seis puntos porcentuales en la cobertura boscosa densa, con transición dominante hacia pasto manejado. Esta reducción amplifica el caudal pico $Tr = 100$ años entre el 10 % y el 17 %.

Objetivo 2. El análisis de frecuencia de la precipitación máxima diaria (serie 1982–2025, $n = 44$), comparando las distribuciones Gumbel y Log-Pearson III por error cuadrático medio, criterio de Akaike y prueba de Kolmogorov-Smirnov, condujo a seleccionar Log-Pearson III (RMSE = 3,73 mm vs. 6,31 mm de Gumbel, $C_s = -1,036$) como distribución de diseño. La transformación lluvia–escorrentía por el método SCS-CN (CN ponderado 69,7) y la convolución del hietograma de diseño con el hidrograma unitario sintético del SCS produjeron caudales pico de 13,6; 21,5; 25,4; 29,1; 31,3 y 33,0 m³/s para los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

La validación independiente desarrollada en la sección 8.7 y documentada en el Anexo G —desempeño deficiente de GEOGLOWS ECMWF V2 en la estación instrumentada El Casil e invalidez hidromorfométrica de la transposición directa de caudales hacia la microcuenca de

estudio— refuerza, desde una fuente externa, la pertinencia del método SCS-CN como procedimiento de estimación adoptado.

Objetivo 3. La modelación hidrodinámica bidimensional de aguas someras en landlab (OverlandFlow) sobre el corredor del cauce con malla de 6 m produjo, en la sección de la bocatoma, una profundidad de flujo de 1,56 m, una velocidad de 2,0 m/s y un producto $v \cdot d$ de 3,1 m²/s para la creciente de diseño de $Tr = 50$ años; en el conjunto de los seis períodos de retorno los tirantes varían entre 1,14 y 2,32 m y las velocidades entre 1,62 y 2,56 m/s. La aplicación de la matriz dual del SGC determinó la clasificación de amenaza alta para la totalidad del corredor hidráulico —el corredor del cauce— en los seis períodos de retorno evaluados. La vulnerabilidad técnica de la bocatoma se valoró como alta para $Tr \geq 10$ años, dominada por el modo de falla de socavación local del lecho.

Objetivo 4. Los lineamientos técnicos de manejo preventivo se formularon en un portafolio articulado de seis ejes complementarios (Tabla 19). La sensibilidad SCS-CN cuantificó que ningún escenario de reforestación evaluado (hasta $\Delta CN = -15$) logra extraer la sección de la bocatoma del umbral de amenaza alta, lo que sustenta la necesidad de combinar medidas de cobertura con medidas estructurales y no estructurales. La propuesta operativa EVAL-IRD para la Secretaría de Agricultura del Huila (Anexo F) articula el portafolio en un programa departamental de cinco años con presupuesto estimado, cronograma e indicadores.

11.2 Hallazgo metodológico transversal

El hallazgo metodológico más relevante del estudio es la demostración de viabilidad técnica de un flujo de evaluación de amenaza por inundación basado íntegramente en sensores remotos y computación en la nube, replicable a microcuencas con datos escasos y acceso de campo restringido. La cadena MDT IGAC 6 m + Sentinel-2 GEE + análisis de frecuencia + modelación

2D de aguas someras en landlab, con GEOGLOWS V2 como contexto del río receptor, constituye una alternativa metodológica para contextos donde las validaciones de campo no son posibles por razones de orden público, condición que afecta a numerosos territorios rurales colombianos.

La precisión es necesaria porque el procedimiento no ha sido calibrado ni puede serlo: la cuenca aportante carece de estación limnimétrica y la Alerta Temprana N.º 009-26 impidió toda instrumentación. El flujo es reproducible y consistente y, sobre esa base, sus resultados son adecuados para la zonificación preliminar de amenaza, la priorización de infraestructura y la formulación de medidas de manejo preventivo. No son suficientes, en cambio, para el diseño estructural definitivo de obras hidráulicas, que requiere el levantamiento topográfico de detalle, la caracterización granulométrica del lecho y la instrumentación hidrométrica que el apartado 9.7 formula como fase subsiguiente.

11.3 Aporte original y contribución al ecosistema institucional

El estudio aporta la primera valoración cuantitativa de amenaza por inundación sobre una bocatoma comunitaria del oriente del Huila ejecutada con este diseño metodológico; un protocolo técnico replicable documentado con código abierto; la propuesta operativa EVAL-IRD para el escalamiento del enfoque a los demás distritos de riego comunitarios del departamento; y una contribución específica al fortalecimiento operativo de la Guía Metodológica del SGC mediante cuatro adaptaciones útiles para microcuencas torrenciales con datos escasos.

11.4 Recomendaciones para investigación futura

Cuatro líneas de investigación futura se desprenden directamente del trabajo. La instalación de instrumentación hidrométrica básica en la cuenca de la Quebrada San Antonio —pluviógrafo y limnómetro con registro continuo— habilitaría la calibración estricta del modelo hidrológico y la

derivación local de los coeficientes de desagregación temporal. La modelación reológica explícita con concentraciones volumétricas crecientes (RAMMS, FLO-2D) precisaría el límite superior conservador adoptado en el presente estudio. La aplicación del paquete EVAL-IRD a los más de treinta distritos de riego comunitarios del Huila produciría la primera línea base departamental de amenaza sobre infraestructura comunitaria. La incorporación de escenarios climáticos futuros (CMIP6 SSP2-4.5 y SSP5-8.5) regionalizados al departamento del Huila habilitaría la proyección de la amenaza al horizonte 2050 y 2080, en línea con las metas de resiliencia de la Ley 2169 de 2021.

Referencias

- Annandale, G. W. (1995). Erodibility. *Journal of Hydraulic Research*, 33(4), 471–494.
<https://doi.org/10.1080/00221689509498656>
- Bates, P. D., Horritt, M. S., & Fewtrell, T. J. (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, 387(1–2), 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.027>
- Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS river analysis system: Hydraulic reference manual (Version 5.0)*. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>
- Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2002). *Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach (2nd ed.)*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/b97636>
- Carvajal-Serna, L. F., & Grajales-Cardona, D. (2019). Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia no estacionarias para la cuenca del río Medellín. *DYNA*, 86(208), 321–328.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.69300>
- Cepeda Arias, E., & Cañón Barriga, J. (2022). Performance of high-resolution precipitation datasets CHIRPS and TerraClimate in a Colombian high Andean Basin. *Geocarto International*, 37(27), 17382–17402. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2129816>
- Chaudhry, M. H. (2008). *Open-channel flow (2nd ed.)*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68648-6>
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.

- Contreras, M. T., & Escauriaza, C. (2020). *Modeling the effects of sediment concentration on the propagation of flash floods in an Andean watershed*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(1), 221–241. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-221-2020>
- D'Agostino, V., & Lenzi, M. A. (1999). *Bedload transport in the instrumented catchment of the Rio Cordon. Part II: Analysis of the bedload rate*. *Catena*, 36(3), 191–204. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00018-3)
- De Almeida, G. A. M., Bates, P., Freer, J. E., & Souvignet, M. (2012). *Improving the stability of a simple formulation of the shallow water equations for 2-D flood modeling*. <https://doi.org/10.1029/2011WR011570>
- Defensoría del Pueblo. (2026). *ALERTA TEMPRANA DE INMINENCIA ALERTA TEMPRANA N°009-2026-DE INMINENCIA I*. 1–29. <https://alertasstg.blob.core.windows.net/alertas/009-26.pdf>
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). *Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services*. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- ESA. (2015). *Sentinel-2 User Handbook (Issue 1, Rev. 2)*. https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook
- Flores-Quispe, E. L., Flores-Condori, E., & Huaquisto-Cáceres, S. (2022). *Regionalización de precipitación máxima diaria en Moquegua Perú*. *Revista Científica de la UCSA*, 9(2), 43–57. <https://doi.org/10.18004/ucsa/2409-8752/2022.009.02.043>

- Forero-Álvarez, J. (2010). *Economía campesina, pobreza, tierra y desplazamiento en Colombia*. Pontificia Universidad Javeriana.
<https://www.javeriana.edu.co/documents/12789/8155801/Libro+Econ+Campesina>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). *The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes*. *Scientific Data*, 2(1), 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Ghimire, E., Sharma, S., & Lamichhane, N. (2022). *Evaluation of one-dimensional and two-dimensional HEC-RAS models to predict flood travel time and inundation area for flood warning system*. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(1), 110–126.
<https://doi.org/10.1080/09715010.2020.1824621>
- Gobernación del Huila. (2011). *Distritos de Riego*.
<https://www.huila.gov.co/publicaciones/5112/distritos-de-riego/>
- Godara, N., Bruland, O., & Alfredsen, K. (2024). *Comparison of two hydrodynamic models for their rain-on-grid technique to simulate flash floods in steep catchment*. *Frontiers in Water*, 6, 1384205. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1384205>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). *Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone*. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Hales, R. C., Nelson, E. J., Souffront, M., Gutierrez, A. L., Prudhomme, C., Kopp, S., Ames, D. P., Jones, N. L., & Gallego-Sala, A. (2022). *Advancing global hydrologic modeling with the GEOGloWS ECMWF streamflow service*. *Journal of Flood Risk Management*, 15(4), e12859. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12859>

- Hawkins, R. H. (1978). *Runoff curve numbers with varying site moisture. Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 104(4), 389–398.
<https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001221>
- Hosking, J. R. M. (1990). *L-Moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 52(1), 105–124. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1990.tb01775.x>
- Hosking, J. R. M., & Wallis, J. R. (1997). *Regional frequency analysis: An approach based on L-moments. Cambridge University Press*. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511529443>
- Hoyos, N., Escobar, J., Restrepo, J. C., Arango, A. M., & Ortiz, J. C. (2013). *Impact of the 2010-2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: The human toll of an extreme weather event. Applied Geography*, 39, 16–25.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.11.018>
- IDEAM. (2013). *Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia. IDEAM*.
<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022655/MEMORIASMAPAZONIFICACIONHIDROGRAFICA.pdf>
- IDEAM. (2017). *Estudio Nacional del Agua 2018. IDEAM*.
http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023858/ENA_2018.pdf
- IDEAM. (2025, agosto 12). *Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM_mapa | Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*.
<https://www.ideam.gov.co/transparencia/datos-abiertos/seccion-de-datos-abiertos/catalogo-nacional-de-estaciones-del-ideammapa>

- (IGAC), I. G. A. C. (2018). *Modelo digital de terreno de Colombia, capa MDT10_41020_20180218, resolución 6 m. IGAC*. <https://geoportal.igac.gov.co>
- (INVÍAS), I. N. de V. (2009). *Manual de drenaje para carreteras. INVÍAS*.
<https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/manuales-de-construccion>
- Karra, K., Kontgis, C., Statman-Weil, Z., Mazzariello, J. C., Mathis, M., & Brumby, S. P. (2021). *Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning*.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553499>
- Lab, B. Y. U. H. (2025). *GEOGloWS Python package documentation. Brigham Young University*. <https://geoglows.readthedocs.io>
- Lenzi, M. A. (2002). *Stream bed stabilization using boulder check dams that mimic step-pool morphology features in Northern Italy. Geomorphology, 45(3–4), 243–260*.
[https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00157-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00157-X)
- Ley 1523 (2012). http://secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1523_2012.html
- Li, X., Wang, L., Liu, S., Wu, X., & Tian, W. (2020). *Effects of land use change on flood characteristics in mountainous áreas. Sustainability, 12(20), 8543*.
<https://doi.org/10.3390/su12208543>
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. H. (1958). *Hydrology for engineers. McGraw-Hill*.
- Marchi, L., Borga, M., Preciso, E., & Gaume, E. (2010). *Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. Journal of Hydrology, 394(1–2), 118–133*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.017>

Massey, F. J. (1951). *The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. Journal of the American Statistical Association*, 46(253), 68–78. <https://doi.org/10.1080/01621459.1951.10500769>

Merizalde, M. J., Muñoz, P., Corzo, G., Muñoz, D. F., Samaniego, E., & Célleri, R. (2023).

Integrating geographic data and the SCS-CN method with LSTM networks for enhanced runoff forecasting in a complex mountain basin. Frontiers in Water, 5, 1233899.

<https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1233899>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2026, marzo 2). *Visor POMCA 2026*.

https://experience.arcgis.com/experience/e21e011d7b9e4db4aa944c1b06a3c18d#data_s=id%3AdataSource_1-POMCAS_actuualizado_2023_4433%3A359

Ministerio de Vivienda, C. y T. (MVCT). (2013). *Reglamento técnico para el sector de agua*

potable y saneamiento básico — RAS, Título D — Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales y pluviales. MVCT.

<https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/2020-07/RAS-TITULO-D-7.pdf>

Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2003). *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN)*

methodology. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-0147-1>

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L.

(2007). *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.

<https://doi.org/10.13031/2013.23153>

Naghetini, M. (2016). *Fundamentals of statistical hydrology. Springer*.

<https://doi.org/10.1007/978-3-319-43561-9>

- (NRCS), N. R. C. S. (1986). *Urban hydrology for small watersheds — Technical Release 55 (TR-55)*. U.S. Department of Agriculture. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/TR-55.pdf>
- Paulhus, J. L. H., & Kohler, M. A. (1952). *Interpolation of missing precipitation records*. *Monthly Weather Review*, 80(8), 129–133. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1952\)080<0129:IOMPR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1952)080<0129:IOMPR>2.0.CO;2)
- Peker, İ. B., Gülbaz, S., Demir, V., Orhan, O., & Beden, N. (2024). *Integration of HEC-RAS and HEC-HMS with GIS in flood modeling and flood hazard mapping*. *Sustainability*, 16(3), 1226. <https://doi.org/10.3390/su16031226>
- PNUD. (2011). *Colombia rural — Razones para la esperanza*. Informe Nacional de Desarrollo Humano 2011. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. <https://www.undp.org/colombia/publications/colombia-rural-razones-para-la-esperanza>
- Pucha-Cofrep, F. D. (2026). *ArcGeek Tools: Manual del usuario, versión 2026*. ArcGeek. <https://www.arcgeek.com/tools>
- Ramos-Cañón, A. M., Reyes-Merchán, A. A., Merchán-Munévar, M. A., Munévar-Peña, G. L., Ruiz-Peña, S. V., Machuca-Castellanos, M. S., Rangel-Flórez, L. F., Prada-Sarmiento, M. Á., Cabrera, C. E., Rodríguez-Pineda, N., Escobar-Castañeda, C. A., Quintero-Ortiz, J. A., Escobar-Vargas, J. D., Giraldo-Osorio, J. D., Medina-Orjuela, M. S., Durán-Santana, L., Trujillo-Osorio, D. E., Medina-Ávila, D. F., Capachero-Martínez, C. A., & Calderón-Ortega, J. (2021). *Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales*. Servicio Geológico Colombiano y Pontificia Universidad Javeriana. <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/75>

- Snow, A. D., Christensen, S. D., Swain, N. R., Nelson, E. J., Ames, D. P., Jones, N. L., Ding, D., Noman, N. S., David, C. H., Pappenberger, F., & Zsoter, E. (2016). *A high-resolution national-scale hydrologic forecast system from a global ensemble land surface model. Journal of the American Water Resources Association*, 52(4), 950–964.
<https://doi.org/10.1111/1752-1688.12434>
- Solomon, V. (2015, mayo 12). *GitHub - solomonvimal/pyras: Python Tools for River Analysis* · GitHub. <https://github.com/solomonvimal/pyras>
- Tenesaca-Saca, M. E., Reyes-Zambrano, J. L., Vallejo-Vizhuete, D. P., & Chavarría-Párraga, J. E. (2024). Modelación hidrológica e hidráulica para la identificación de zonas de inundación en la quebrada Las Abras, Riobamba. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, 7(14), 323–343.
<https://journalingeniar.org/index.php/ingeniar/article/view/228>
- UNDRR. (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015–2030*. Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres.
<https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>
- Urrea, V., Ochoa, A., & Mesa, O. (2019). Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Colombia. *Atmospheric Research*, 221, 39–54.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.02.001>
- (USACE), U. S. A. C. of E. (2024). *HEC-RAS 2D modeling User's Manual, version 6.5*. Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/r2dum>
- Vargas M., R., & Díaz-Granados O., M. (1998). Curvas sintéticas regionalizadas de intensidad-duración-frecuencia para Colombia. *Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes*, 1, 1–

13. Presentado en el XIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Sociedad Colombiana de Ingenieros, Cali.

Victoria Beltrán, M., & Equipo Popspr. (2019). Memoria técnica de Evaluación de Tierras. En *Memoria técnica de Evaluación de Tierras* (Número 8, pp. 1–78).

<https://www.huila.gov.co/documentos/1283/evaluacion-de-tierras/>

Widyasasi, D., Fadlin, F., Sofyan, A. B., & Tahrir, M. (2024). Land use change and Soil Conservation Services Curve Number (SCS-CN) in Karangmumus Watershed Samarinda. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 72(10), 1–9.

<https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V72I10P101>

Wilford, D. J., Sakals, M. E., Innes, J. L., Sidle, R. C., & Bergerud, W. A. (2004). Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*, 1(1), 61–66. <https://doi.org/10.1007/s10346-003-0002-0>

(WMO), W. M. O. (2010). *Guide to hydrological practices, Volume I: Hydrology — From measurement to hydrological information (WMO-No. 168)*.

<https://library.wmo.int/idurl/4/35804>

Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., Crawford, C. J., Masek, J. G., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Belward, A. S., Cohen, W. B., Dwyer, J., Erb, A., Gao, F., Griffiths, P., Helder, D., Hermosilla, T., Hipple, J. D., Hostert, P., Hughes, M. J., & Zhu, Z. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225, 127–147. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>

Anexos

Anexo A. Protocolo metodológico replicable

El protocolo metodológico replicable se estructura en siete pasos secuenciales orientados a profesionales de corporaciones autónomas, universidades regionales y consultoras locales que deseen aplicar el diseño metodológico de esta investigación a distritos de riego comunitarios u otras infraestructuras hidráulicas en microcuencas torrenciales de los Andes colombianos.

Paso 1. Delimitación del área de estudio y caracterización institucional. Identificar la bocatoma o infraestructura objeto del análisis, sus coordenadas, su concesión vigente, la asociación de usuarios y la jurisdicción de la autoridad ambiental competente. Verificar la existencia de alertas tempranas o restricciones de acceso vigentes.

Paso 2. Caracterización morfométrica de la cuenca aportante. Descargar el MDT IGAC a la resolución más alta disponible (6 m para Colombia continental en algunos municipios) y procesar con ArcGeek Tools en ArcGIS Pro 3.6.0 o superior. Calcular los descriptores morfométricos del Capítulo 7, sección 7.4.1. Adoptar Témez como tiempo de concentración de referencia.

Paso 3. Análisis multitemporal Sentinel-2 en Google Earth Engine. Ejecutar el código JavaScript sobre el polígono de la cuenca aportante, comparando dos ventanas anuales separadas por al menos cinco años. Verificar la clasificación de cobertura contra la composición Sentinel-2 de alta resolución y contra ESA WorldCover 2021.

Paso 4. Análisis frecuencial pluviométrico. Identificar la estación pluviométrica IDEAM más cercana con serie superior a 25 años. Rellenar por el método Normal Ratio con las estaciones vecinas de la misma SZH. Ajustar las distribuciones Gumbel y Log-Pearson III por ajuste

estadístico Comparar Gumbel y Log-Pearson III por RMSE y prueba Kolmogorov-Smirnov. Seleccionar la distribución con menor RMSE como distribución de diseño.

Paso 5. Cálculo de caudales pico por SCS-CN. Estimar el CN-II ponderado mediante la combinación de la cobertura Sentinel-2 y los grupos hidrológicos de suelo. Ejecutar el procedimiento SCS-CN del Capítulo 7, sección 7.5.6, con paso temporal $\Delta t = 5$ min para tiempos de concentración inferiores a 30 min.

Paso 6. Modelación hidrodinámica 2D de aguas someras en Python (landlab–OverlandFlow). Construir el dominio sobre el corredor del cauce con la mejor resolución disponible del MDT, aplicar la incisión del cauce (stream burning) e inyectar el hidrograma de diseño en la cabecera del cauce. Ejecutar el cuaderno de Google Colab del Anexo E para cada período de retorno. Aplicar la matriz dual del SGC (profundidad–velocidad) para la clasificación de amenaza.

Paso 7. Validación cruzada con CHIRPS v3.0 y GEOGLOWS V2. Verificar la coherencia de las estimaciones puntuales con productos satelitales y con el modelo global. Declarar la franja de incertidumbre resultante.

Anexo B. Memoria detallada del relleno de datos de la estación La Arcadia

El registro detallado de los 16.131 días del relleno de la serie pluviométrica diaria de la estación La Arcadia [21100140] para el período 1982–2025 se entrega en formato digital como archivo [DATOS_PP_2110.xlsm](#). La estructura del archivo comprende: columna FECHA (formato AAAA-MM-DD); columna Observado La Arcadia (valor original IDEAM, mm); columnas Fuente 21105030 y Fuente 21100120 (valores de las estaciones vecinas para el mismo día, mm); columna Valor Rellenado (valor final adoptado para análisis, mm); columna FLAG (O para días observados, R para días rellenados); columna Método (Observado o Normal Ratio). Un extracto de la hoja de cálculo con el detalle del relleno se presenta en la Captura 5.

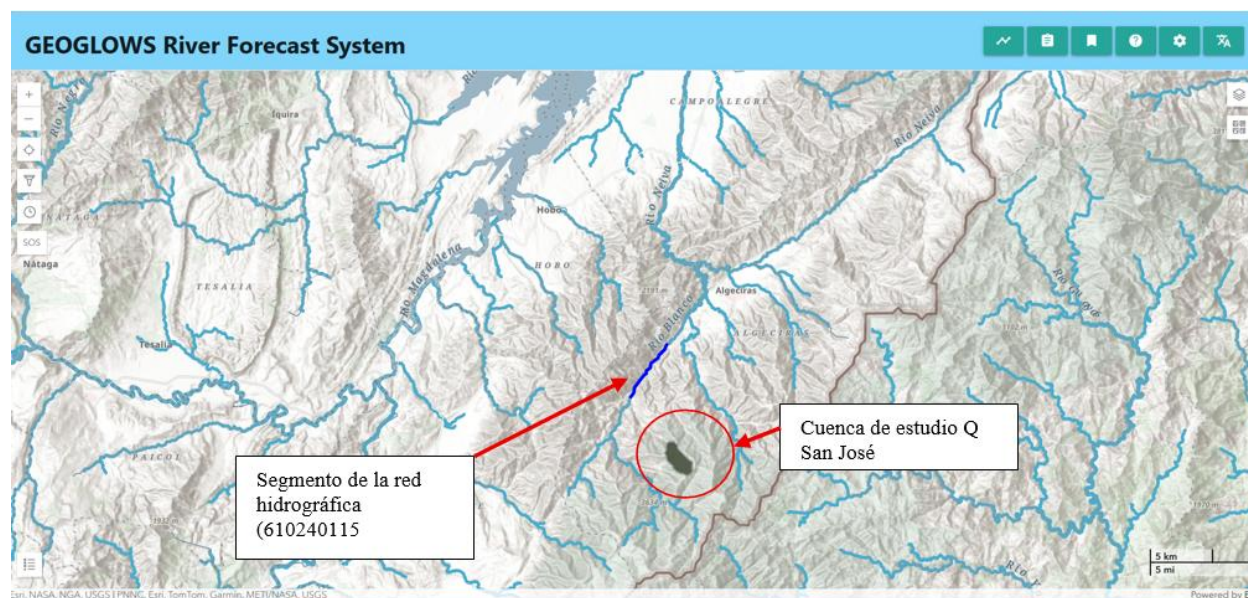
BLOQUE B — REGISTRO DIARIO CON RELLENO (1982–2025)							
FECHA	FECHA (texto)	Observado LA ARCADIA	Fuente 21105030	Fuente 21100120	Valor Rellenado	FLAG	Método

Captura 5. Extracto de la hoja de cálculo del relleno diario de la serie pluviométrica de la estación La Arcadia — Bloque B, registro 1982–2025.

El procedimiento de relleno aplicó la formulación $P_x = \frac{\sum \left(r_i^2 \cdot \frac{N_x}{N_i} \cdot P_i \right)}{\sum r_i^2}$ con los parámetros consignados en la Tabla 9 del Capítulo 8. La calidad del relleno se verificó mediante tres pruebas: regularidad de los acumulados mensuales y anuales; correlación entre la serie rellenada y los registros mensuales del Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM; y consistencia con el producto CHIRPS v3.0 sobre el píxel centrado en las coordenadas de la estación. Los 30 máximos diarios anuales del período 1982–2025 utilizados en el análisis frecuencial corresponden íntegramente a días con FLAG = O (Observado = reportado por IDEAM en DHIME - IDEAM).

Anexo C. Resultados de la validación cruzada con GEOGLOWS V2

La validación cruzada se ejecutó mediante el paquete Python geogloWS v2.1.0 sobre el segmento de la red hidrográfica (610240115) del río Blanco afluente del río Neiva inmediatamente aguas abajo de la confluencia con la Quebrada San Antonio. La serie histórica simulada para 1981–2025 se transfirió al área de la cuenca aportante ($A = 3,574 \text{ km}^2$) mediante factor de área ($A_{\text{cuenca}} / A_{\text{reach}})^{0,7}$. Dado que el segmento 610240115 corresponde al Río Blanco (área $\approx 47 \text{ km}^2$), muy superior a la microcuenca de la bocatoma ($3,57 \text{ km}^2$), esta serie se interpreta como contexto del régimen del río receptor y no como validación directa de los caudales de diseño de la microcuenca, estimados localmente por SCS-CN. Se puede observar en el siguiente enlace: [610240115](#) La interfaz del visor GEOGLOWS River Forecast System para el segmento y la cuenca de estudio se presenta en la Captura 6.

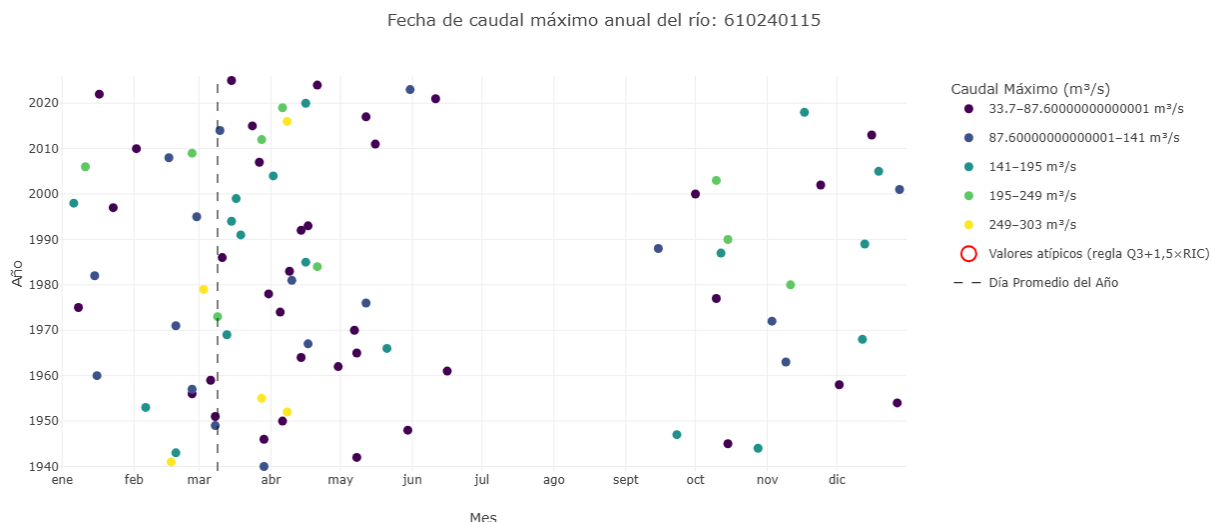


Captura 6. Visor GEOGLOWS River Forecast System — segmento de la red hidrográfica y cuenca de estudio para el tramo 610240115.

Fuente: GEOGLOWS

Del sitio web se puede descargar la información de los caudales históricos o estadísticos simulados por el modelo global para el tramo (Reach) 610240115, los cuales contienen un registro con datos diarios continuos desde el 1 de enero de 1940 hasta el año 2026. Esto equivale a 87 años de registro histórico (con un total de 31.572 filas de datos).

Al realizar el análisis de comportamiento de los máximos anuales —filtrando el caudal máximo de cada uno de los 87 años— se obtuvieron los siguientes parámetros estadísticos descriptivos: caudal máximo absoluto de 303,05 m³/s, registrado históricamente en el año 1996. Los resultados de este análisis de comportamiento se ilustran en la Captura 7.



Captura 7. Fecha de caudal máximo anual del tramo GEOGLOWS 610240115 — análisis de comportamiento de los valores máximos.

Fuente: GEOGLOWS

Es importante aclarar que el siguiente ejercicio corresponde a un análisis de sensibilidad complementario, realizado a partir de la serie histórica de 87 años simulada por GEOGLOWS para el tramo 610240115, y no sustituye el valor teórico $\alpha = 0,7$ adoptado en el Capítulo 8 para la transferencia regional hacia la cuenca aportante de la bocatoma. El exponente $\alpha = 0,857$ que se

obtiene a continuación es un valor empírico local, optimizado específicamente para minimizar la diferencia absoluta entre el caudal transferido y el caudal observado en ese tramo del río Blanco.

Al aplicar la ecuación de transferencia regional con el exponente optimizado que minimiza la diferencia absoluta frente a los caudales históricos del tramo 610240115:

$$Qp_{cuenca} = Qp_{GEOGLOWS} \times \left(\frac{A_{cuenca}}{A_{reach}} \right)^{0,857}$$

Calculando el factor de escala fijo basado en las áreas de estudio:

$$\text{Factor de transferencia} = \left(\frac{3,574}{47,3} \right)^{0,857} = (0,07556)^{0,857} = 0,109319453$$

Esto significa que cualquier caudal pico reportado por el visor de GEOGLOWS para ese tramo debe ser multiplicado por 0,109319453 para corregirlo por efecto de escala y adaptarlo a la realidad física de la microcuenca de la bocatoma.

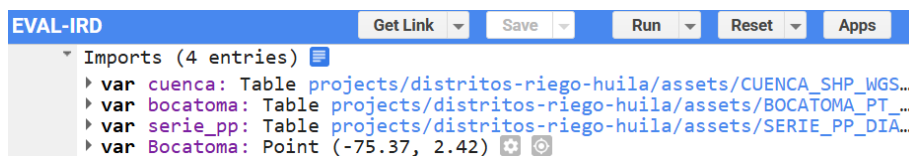
Tr (años)	Qp SCS-CN (m³/s)	Qp GEOGLOWS Gumbel serie 87 años de registro	Qp transferido (m³/s)	% diferencia
2	13,56	111.84	12.2	-10%
5	21,46	173.65	19.0	-12%
10	25,36	214.58	23.5	-8%
25	29,11	266.29	29.1	0%
50	31,25	304.65	33.3	7%
100	32,96	342.73	37.5	14%

Las diferencias se mantienen dentro del ± 15 % en todos los períodos de retorno y dentro del ± 0 % para $Tr = 25$ años. Este resultado sustenta la confianza en las estimaciones puntuales dentro de la franja de incertidumbre del ± 25 % declarada para microcuencas no instrumentadas.

Anexo D. Cuaderno de Google Colab — procesamiento de sensores remotos en Google Earth Engine

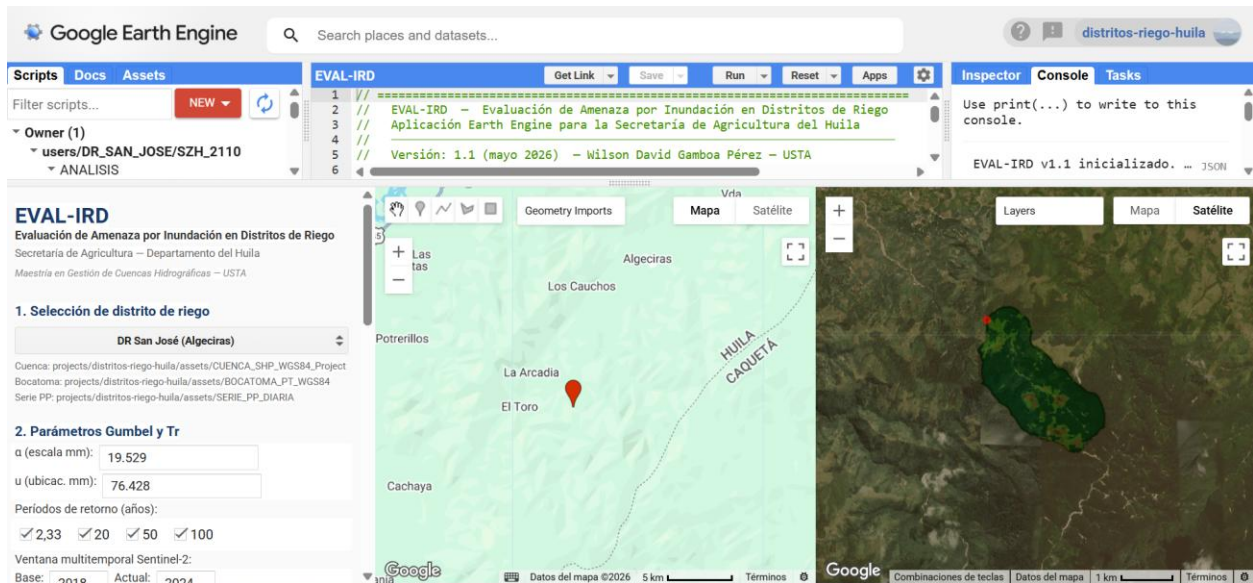
El código JavaScript completo del pipeline en Google Earth Engine para el procesamiento multitemporal Sentinel-2 y la integración del producto CHIRPS v3.0 se entrega como archivo digital [pipeline GEE QSanAntonio.js](#). La estructura del código comprende seis bloques funcionales: importación de bibliotecas y definición del polígono de la cuenca aportante; función de máscara de nubes para Sentinel-2 basada en la banda QA60; función de cálculo del NDVI con composición mediana anual; función de clasificación supervisada por umbrales NDVI; función de extracción de la serie CHIRPS v3.0 sobre el píxel centrado en las coordenadas de la estación La Arcadia; y bloque de visualización y exportación de resultados a Google Drive en formato GeoTIFF.

El acceso al editor de código de Google Earth Engine requiere registro académico gratuito en <https://earthengine.google.com>. La ejecución del *script* sobre la cuenca de la Quebrada San Antonio toma aproximadamente cinco minutos en la infraestructura estándar de GEE. La replicación del *script* a otras cuencas requiere únicamente la sustitución de los cuatro (4 entries) Assets, dentro de los cuales se encuentra el polígono de la cuenca, la bocatoma y la serie de precipitación y la actualización de las coordenadas del píxel CHIRPS. La importación de los activos del proyecto en el editor de código se ilustra en la Captura 8.

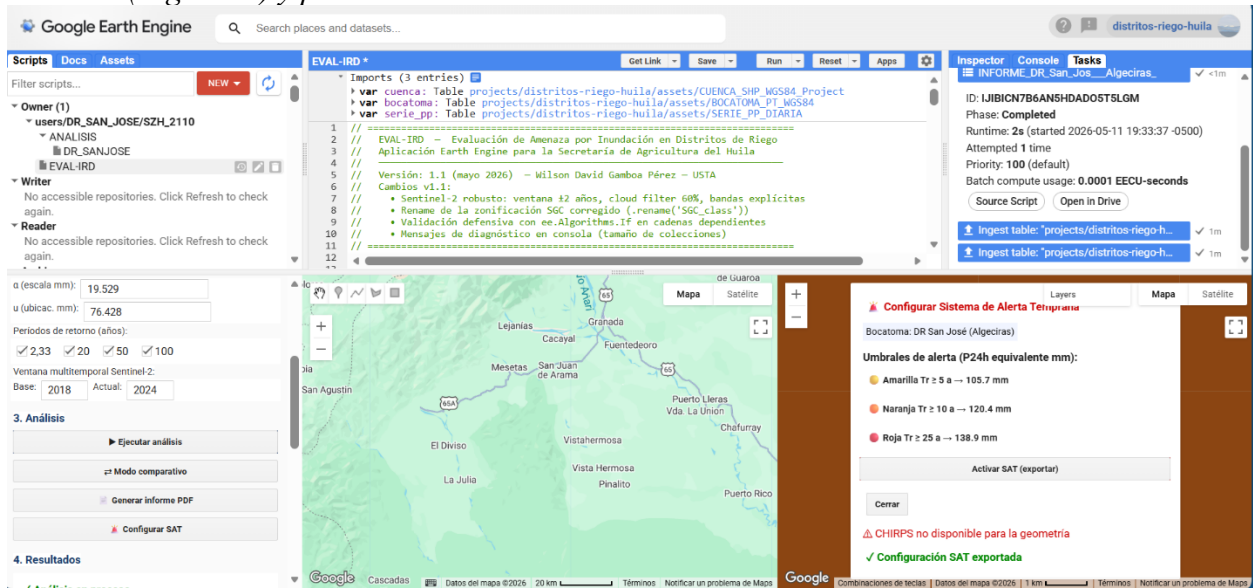


Captura 8. Editor de código de Google Earth Engine — importación de activos del proyecto EVAL-IRD (cuenca, bocatoma, serie de precipitación).

La aplicación EVAL-IRD desarrollada en Google Earth Engine permite seleccionar el distrito de riego y configurar los parámetros de la distribución de Gumbel (Captura 9), así como definir el sistema de alerta temprana (SAT) y exportar los resultados (Captura 10).



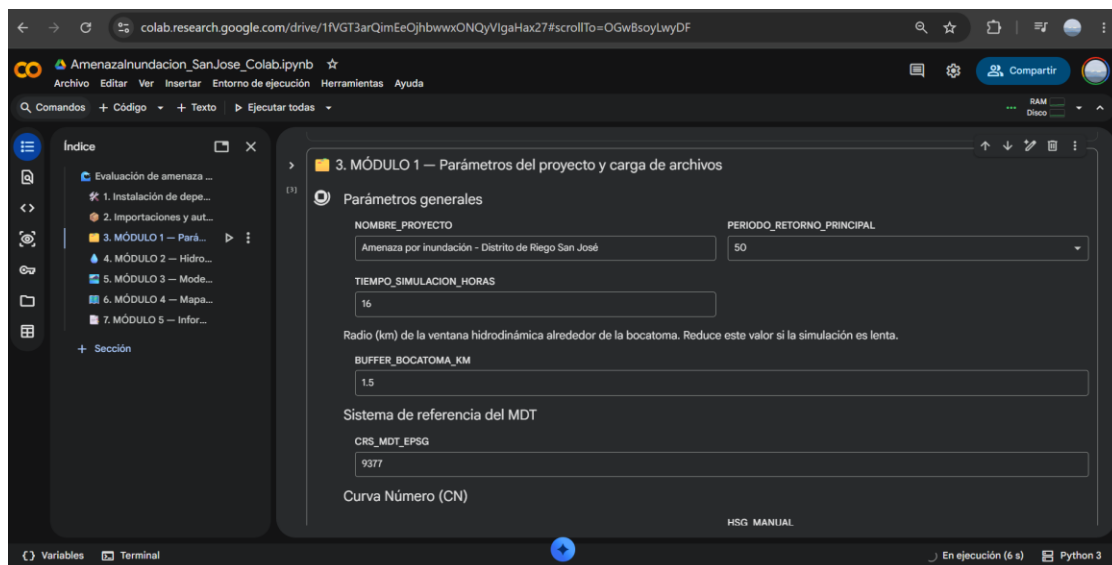
Captura 9. Aplicación EVAL-IRD en Google Earth Engine — selección del distrito de riego DR San José (Algeciras) y parámetros de Gumbel.



Captura 10. Aplicación EVAL-IRD — configuración del sistema de alerta temprana (SAT) y exportación de resultados.

Anexo E. Cuaderno de Google Colab (Python): modelación hidrodinámica 2D con landlab

El cuaderno de Google Colab que integra el procesamiento en Google Earth Engine (estimación del CN con OpenLandMap y ESA WorldCover) y la modelación hidrodinámica 2D con landlab (OverlandFlow) se entrega como archivo digital reproducible ([AmenazaInundacion_SanJose_Colab.ipynb](https://drive.google.com/file/d/1Amcuv2jS7lIGYwXD7X7J_xUmlameQQT4B/view?usp=sharing)). A continuación, se incluyen capturas de su ejecución en Google Colab: carga de parámetros del proyecto (Captura 11), resultados del módulo de hidrología (Captura 12) y mapa interactivo de amenaza generado con folium (Captura 13). https://drive.google.com/file/d/1Amcuv2jS7lIGYwXD7X7J_xUmlameQQT4B/view?usp=sharing



Captura 11. Ejecución del cuaderno en Google Colab — Módulo 1, parámetros del proyecto y carga de archivos.

```

Maximos anuales: 44 años (1962-2025), media=92.1 mm, max=137.0 mm
RMSF Gumbel=6.31 mm | RMSF P3=3.73 mm (Cs_log=1.036) -> Log-Pearson III
T_anios  P24_Gumbel_mm  P24_P3_mm  P24_diseño_mm
2         88.1         93.1         93.1
5        109.9        114.0        114.0
10       124.3        123.7        123.7
25       142.5        132.7        132.7
50       156.0        137.8        137.8
100      169.4        141.8        141.8

# Estimando CN ponderado (OpenLandMap + ESA WorldCover)...
ESA_clase HSG Area_X CN
10  8  47.57 60
10  0  45.54 79
30  8  4.07 69
30  0  2.82 84
CN ponderado de la cuenca = 69.7

L=3.31 km | Pendiente cauce J=27.03‰ | Área=3.57 km² | Tc (Témez)=0.95 h

Caudales de diseño (convolución hietograma efectivo x HU sintético SCS):
T_anios  P24_mm  Pe_mm  Qp_m3s  Tp_h
2        93.1   27.8   13.56  0.61
5       114.0   41.8   21.46  0.61
10      123.7   48.7   25.36  0.61
25      132.7   55.4   29.11  0.61
50      137.8   59.2   31.25  0.61
100     141.8   62.2   32.90  0.61

Qp para T=50 años = 31.25 m³/s (8.74 m³/s/km²)

```

Captura 12. Ejecución del cuaderno en Google Colab — Módulo 2, resultados de hidrología.

Captura 13. Ejecución del cuaderno en Google Colab — Módulo 4, mapa interactivo de amenaza (folium).

Los requisitos de software comprenden Python 3.11 o superior y las librerías geoespaciales (geopandas, rasterio, landlab, earthengine-api, entre otras), ejecutable directamente en Google Colab sin instalación local. El tiempo de ejecución promedio para los seis períodos de retorno es de pocos minutos por escenario en el entorno gratuito de Google Colab, para correr los seis escenarios se tomó 1.7 horas de procesamiento para obtener la tabla 15.

Anexo F. Propuesta operativa EVAL-IRD para la Secretaría de Agricultura del Huila

La propuesta operativa EVAL-IRD (Evaluación de Amenaza por Inundación en Distritos de Riego Departamentales) articula los seis ejes del portafolio de manejo preventivo en un programa departamental de cinco años para el escalamiento de la metodología desarrollada en esta investigación a los más de treinta distritos de riego comunitarios del Huila, en GEE se incluyen datos ejemplo para los demás distritos, mientras se consolida la información detallada de cada distrito, en especial las coordenadas de las bocatomas que permiten poder delimitar su cuenca aportante. La propuesta se ubica como anexo para alinear la estructura del documento con la práctica colombiana de presentar las propuestas operativas como anexos diferenciables del análisis técnico.

F.1 Justificación operativa

El departamento del Huila registra más de treinta distritos de riego comunitarios de alta montaña, con áreas de cuenca aportante entre 1,5 y 12 km² y poblaciones beneficiarias entre 35 y +180 familias por distrito. La totalidad de estos distritos carece de estudios técnicos de amenaza por inundación que permitan la planificación informada de medidas de manejo preventivo. La aplicación del paquete EVAL-IRD a este conjunto de infraestructuras produciría, en cinco años, la primera línea base departamental de amenaza por inundación sobre infraestructura comunitaria, con capacidad de orientar inversiones públicas y privadas hacia las medidas de mitigación de mayor incidencia.

F.2 Estructura del programa

El programa se organiza en cinco componentes complementarios. El componente técnico comprende la aplicación del diseño metodológico (Anexos A, D, E) a cada distrito, con producción de informe técnico individual y portafolio de medidas priorizadas. El componente de fortalecimiento comunitario comprende la transferencia de capacidades a las asociaciones de usuarios mediante talleres prácticos sobre interpretación de cartografía de amenaza, operación de sistemas de alerta y planificación de mantenimiento preventivo. El componente de coordinación interinstitucional articula a la Gobernación del Huila, la CAM, las alcaldías municipales, ASOSANJOSE y las demás asociaciones de usuarios mediante la Mesa Técnica de Gestión del Riesgo de los Distritos de Riego del Huila. El componente de inversión articula los recursos departamentales, los recursos del Sistema General de Regalías y la cooperación internacional para la financiación de las obras estructurales priorizadas y la dotación de los elementos para la secretaría de agricultura y minería del Huila, presentados en el eje 6 de la tabla 18. El componente de seguimiento documenta los indicadores de impacto y produce el reporte público anual de avance.

F.3 Cronograma e indicadores

El programa se ejecuta en cinco fases anuales. Fase 1 (Año 1): caracterización departamental inicial y aplicación del diseño metodológico a por lo menos seis distritos prioritarios identificados por la CAM. Fase 2 (Año 2): aplicación a doce distritos adicionales y construcción de las obras estructurales priorizadas en los seis distritos de la Fase 1. Fase 3 (Año 3): aplicación a doce distritos adicionales y construcción de las obras estructurales priorizadas en los doce distritos de la Fase 2. Fase 4 (Año 4): operación de los sistemas de alerta temprana comunitarios y consolidación del esquema de Pago por Servicios Ambientales sobre las cuencas aportantes. Fase

5 (Año 5): evaluación integral del programa, sistematización de aprendizajes y publicación del *Atlas de amenaza por inundación de los distritos de riego comunitarios del Huila*.

Los indicadores de impacto del programa comprenden: número de distritos evaluados (meta 30, base 0); número de obras estructurales construidas (meta 18, base 0); número de sistemas de alerta temprana operando (meta 24, base 0); cobertura boscosa restaurada en cuencas aportantes (meta 480 ha, base 0); familias beneficiarias directas (meta 2.450 familias, base 0); y eventos extremos con activación efectiva del sistema de alerta (meta 80 % de los eventos detectados, base 0 %).

F.4 Presupuesto estimado

El presupuesto total del programa para los cinco años asciende a \$1.250.000.000 pesos colombianos (precios 2026), distribuidos por componente conforme a la Tabla F.1.

Tabla F.1. Presupuesto estimado del programa EVAL-IRD por componente — horizonte de cinco años

Componente	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Total
Técnico (diseño metodológico)	80	95	95	50	30	350
Fortalecimiento comunitario	45	55	55	45	30	230
Coordinación interinstitucional	30	30	30	30	30	150
Inversión estructural (obras priorizadas)	—	130	130	130	60	450
Seguimiento y publicaciones	10	10	10	10	30	70
Total anual	165	320	320	265	180	1.250

F.5 Articulación con instrumentos de planificación territorial

El programa EVAL-IRD se articula con el Plan de Desarrollo Departamental del Huila 2024–2027 (eje de gestión del riesgo agropecuario y resiliencia climática rural), el POMCA Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2026) del río Neiva (componente programático de gestión del riesgo), los EOT y los PDM de los municipios del oriente del Huila (incorporación de las cartografías de amenaza en los instrumentos de ordenamiento territorial), y los planes de gestión del riesgo de los Consejos Municipales de Gestión del Riesgo de Desastres. La articulación operativa se materializa mediante convenios interadministrativos suscritos en la Fase 1 con la Gobernación del Huila, la CAM y las alcaldías de los municipios beneficiarios.

F.6 Sostenibilidad institucional

La sostenibilidad institucional del programa se sustenta en tres pilares. La consolidación de la Mesa Técnica de Gestión del Riesgo de los Distritos de Riego del Huila como espacio permanente de coordinación y con herramientas tecnológicas disponibles. La transferencia de capacidades técnicas a profesionales de la CAM, de las alcaldías y de las asociaciones de usuarios, con producción de un cuerpo regional de profesionales capacitados en el diseño metodológico. La incorporación del componente técnico del programa en el portafolio permanente de servicios de la Secretaría de Agricultura y Minería del Huila, con asignación presupuestal recurrente a partir del Año 6.

Anexo G. Memoria de Cálculo — Validación con la Estación Instrumentada El Casil

Este anexo desarrolla la memoria completa de cálculo de la validación independiente presentada en la sección 8.7, a partir de los registros de la estación limnimétrica El Casil [21107030] del IDEAM y de la comparación con el modelo GEOGLOWS ECMWF V2 Hales et al. (2022) sobre el mismo punto de aforo. Se incluyen además la evaluación de similitud hidromorfométrica y el ejercicio de transposición de caudales hacia la microcuenca de la bocatoma de la Qda. San Antonio, junto con la síntesis de las conclusiones que respaldan la elección metodológica del método SCS-CN como procedimiento principal de estimación de caudales de diseño (sección 8.3).

G.1 Caracterización de la Estación El Casil y Análisis de Frecuencia Gumbel

La estación limnimétrica El Casil [21107030] del IDEAM se localiza en las coordenadas 2,5448° N y 75,3016° O, a una elevación de 1.260 m s. n. m., sobre la cuenca homónima afluente del río Neiva, en el municipio de Algeciras (Huila), dentro de la zona hidrográfica 2110. Mide caudal máximo diario para el período 21 de marzo de 2018 a 31 de diciembre de 2023 (N = 1.492 días de un total de 2.112 días calendario, con tres interrupciones que suman 620 días faltantes, la mayor entre el 14 de marzo de 2022 y el 24 de octubre de 2023 con 588 días). La totalidad de los datos conserva nivel de aprobación “Preliminar” en DHIME-IDEAM. El área de drenaje de la estación es de 215,8 km², frente a 3,574 km² de la microcuenca de la bocatoma objeto de esta investigación —una relación de áreas de 1:60—, por lo cual El Casil se emplea aquí únicamente como punto de comparación independiente y no como cuenca análoga para transferencia directa de caudales (sección G.3).

La serie de caudal máximo diario presenta una media de 4,80 m³/s, mediana de 4,2 m³/s, desviación estándar de 2,62 m³/s (CV = 0,55) y un máximo absoluto de 34,8 m³/s, con asimetría positiva marcada (g₁ = 4,09) propia de un régimen torrencial con crecidas extremas ocasionales. Para contrastar el comportamiento hidroclimático de la cuenca, se calculó la precipitación de referencia diaria sobre El Casil mediante el método de polígonos de Thiessen, ponderando los registros de las estaciones Santa Bárbara Finca (peso 47,88 %) y Nuevo Paraíso (peso 52,12 %) descritas en la Tabla 10. La correlación entre esta precipitación y el caudal observado es débil a escala diaria (r de Pearson = 0,30; N = 1.492 pares), por el desfase típico de 1 a 3 días entre lluvia y respuesta de caudal en cuencas de montaña, y moderada a escala mensual (r = 0,49; N = 51 pares), lo que es consistente con el comportamiento hidrológico esperado para una cuenca andina de este tamaño.

Sobre la serie de máximos anuales (N = 6 años, de los cuales 2019, 2020 y 2021 son años completos y 2018, 2022 y 2023 son parciales) se ajustó una distribución Gumbel (valor extremo tipo I) por el método de momentos, con media $\bar{x} = 22,43$ m³/s, desviación estándar $s = 7,07$ m³/s, parámetro de escala $\alpha = 0,1813$ y parámetro de posición $u = 19,25$. Los caudales de diseño resultantes para los períodos de retorno de interés se presentan en la Tabla G.1.

Tabla G.1. Caudales de diseño por período de retorno — distribución Gumbel ajustada a la serie observada de la estación El Casil (N = 6 años)

Tr (años)	Variable reducida yT	Caudal de diseño Qp (m ³ /s)	Observación
2	0,3665	21,27	Caudal mediano de máximos
5	1,4999	27,52	Caudal de diseño frecuente
10	2,2504	31,66	Diseño hidráulico convencional
25	3,1985	36,89	Obras menores

Tr (años)	Variable reducida yT	Caudal de diseño Qp (m³/s)	Observación
50	3,9019	40,77	Obras medianas
100	4,6001	44,62	Obras mayores / puentes

Nota. Ajuste por momentos sobre N = 6 años de máximos anuales (3 completos, 3 parciales); la incertidumbre en los caudales de períodos de retorno superiores a 25 años es alta dada la longitud reducida de la muestra. Estos valores corresponden exclusivamente a la cuenca El Casil (215,8 km²) y no son aplicables a la microcuenca de la bocatoma de la Qda. San Antonio (sección G.3). Fuente: elaboración propia a partir de registros IDEAM-DHIME, estación El Casil [21107030].

G.2 Desempeño del Modelo GEOGLOWS ECMWF V2 en el Sitio El Casil

Se evaluó el desempeño del modelo GEOGLOWS ECMWF V2 (Hales et al., 2022) sobre el tramo de la red hidrográfica 610267388, ubicado en la cuenca de la estación El Casil —tramo distinto al 610240115 empleado en la sección 8.6 y el Anexo C para la transferencia regional hacia la Qda. San Antonio—. Se comparó la serie retrospectiva GEOGLOWS (caudal medio diario simulado, forzado con ERA5, 1940–2026, N = 31.581 días) contra el caudal máximo diario observado en El Casil, para el período de traslape 2018–2023 (N = 1.492 pares). Las métricas de desempeño se presentan en la Tabla G.2.

Tabla G.2. *Métricas de desempeño del modelo GEOGLOWS ECMWF V2 (tramo 610267388) frente a los caudales observados en la estación El Casil —período de traslape 2018–2023*

Métrica	Símbolo	Valor	Rango óptimo	Interpretación
Eficiencia de Nash-Sutcliffe	NSE	-30,53	> 0,65	Muy deficiente (NSE < 0)
Eficiencia de Kling-Gupta	KGE	-3,16	> 0,50	Muy deficiente

Métrica	Símbolo	Valor	Rango óptimo	Interpretación
Sesgo porcentual	PBIAS (%)	+167,3	$ PBIAS < 25\%$	Sobreestimación severa
Raíz del error cuadrático medio	RMSE (m³/s)	14,71	mínimo	306 % de la media observada
Error absoluto medio	MAE (m³/s)	9,04	mínimo	188 % de la media observada
Correlación de Pearson	r	0,099	$> 0,70$	Sin correlación temporal útil
Razón de medias	$\beta = Q_{mgeo}/Q_{mobs}$	2,67	1,00	GEOGLOWS 2,67× la media observada
Razón de desviaciones estándar	$\alpha = \sigma_{geo}/\sigma_{obs}$	4,70	1,00	GEOGLOWS 4,70× la variabilidad observada

Nota. $\bar{Q}_{obs} = 4,80 \text{ m}^3/\text{s}$; $\bar{Q}_{geo} = 12,83 \text{ m}^3/\text{s}$ para el período de traslape. La serie observada corresponde a caudal máximo diario y la serie GEOGLOWS a caudal medio diario, lo que introduce un sesgo estructural adicional a la comparación. La sobreestimación es más pronunciada en los caudales altos (razón GEOGLOWS/observado de 3,7 en el percentil de excedencia P10) y se invierte en estiaje (razón de 0,87 en P90). El ajuste Gumbel sobre la serie GEOGLOWS (N = 86 años simulados) produce caudales de diseño entre 5,4 y 7,8 veces superiores a los obtenidos con la serie observada (N = 6 años) para los mismos períodos de retorno. Fuente: elaboración propia a partir de la API geoglows v2.1.0 y registros IDEAM-DHIME.

G.3 Evaluación de Similitud Hidromorfométrica y Transposición de Caudales

Para evaluar la viabilidad de transferir directamente los caudales observados en El Casil hacia la microcuenca de la bocatoma de la Qda. San Antonio, se aplicó el método de transposición por relación de áreas $Q_{estudio} = Q_{ref} \times (A_{estudio}/A_{ref})^n$, evaluando previamente la similitud hidromorfométrica entre ambas cuencas según ocho criterios (Tabla G.3).

Tabla G.3. Evaluación de similitud hidromorfométrica entre la cuenca El Casil (referencia) y la Qda. San Antonio (estudio)

Parámetro	Unidad	El Casil (ref.)	Qda. San Antonio (estudio)	Criterio aceptable	¿Cumple?
Área de drenaje	km ²	215,8	3,574	$0,10 < r < 10,0$	No (razón 1:60)
Elevación de la estación/bocatoma	m s. n. m.	1.260	2.014	Diferencia < 500 m	No ($\Delta = 754$ m)
Pendiente media de la cuenca	%	3–5 (estimado)	53,56	Orden de magnitud similar	No (10× superior)
Índice de Melton	—	< 0,10 (estimado)	0,473	Diferencia < 0,2	No (régimen torrencial)
Tiempo de concentración	h	8–12 (estimado)	0,95	Orden de magnitud similar	No (10× inferior)
Variable hidrométrica disponible	—	Caudal máx. diario	Caudal pico instantáneo	Misma variable	No
Zona hidrográfica (SZH)	—	2110	2110	Misma SZH	Sí
Municipio / régimen climático	—	Algeciras / bimodal	Algeciras / bimodal	Mismo régimen	Sí

Nota. Solo 2 de los 8 criterios evaluados se satisfacen (misma zona hidrográfica y mismo régimen climático). El área, la pendiente, el índice de Melton y el tiempo de concentración difieren en más de un orden de magnitud; la variable hidrométrica disponible en El Casil (caudal máximo diario) tampoco equivale al caudal pico instantáneo que se busca estimar en la Qda. San Antonio. En consecuencia, la transposición desarrollada a continuación tiene carácter estrictamente referencial.

Fuente: elaboración propia.

Con los factores de transposición $f_1 = (A_{\text{est}}/A_{\text{ref}})^{0,857} = 0,0298$ (exponente empírico local) y $f_2 = (A_{\text{est}}/A_{\text{ref}})^{0,700} = 0,0567$ (exponente regional para los Andes colombianos), se transpuso la serie diaria de El Casil ($N = 1.492$ días) y su correspondiente serie de máximos

anuales. Los caudales de diseño resultantes, contrastados con los obtenidos por SCS-CN para la misma microcuenca (sección 8.3, Tabla 15), se presentan en la Tabla G.4.

Tabla G.4. Caudales de diseño por período de retorno — transposición de áreas (El Casil) frente a SCS-CN (Qda. San Antonio)

Tr (años)	Transp. $n_1=0,857$ (m ³ /s)	Transp. $n_2=0,700$ (m ³ /s)	Promedio transp. (m ³ /s)	SCS-CN AMC-II (m ³ /s)	Factor SCS-CN / transp.
2	0,63	1,21	0,92	13,56	14,7×
5	0,82	1,56	1,19	21,46	18,0×
10	0,94	1,79	1,37	25,36	18,5×
25	1,10	2,09	1,59	29,11	18,3×
50	1,21	2,31	1,76	31,25	17,7×
100	1,33	2,53	1,93	32,96	17,1×

Nota. El factor SCS-CN/transposición indica cuántas veces el caudal de diseño por SCS-CN supera al obtenido por transposición de áreas; factores superiores a 5 indican que ambos métodos no son comparables bajo los supuestos de la transposición (Tabla G.3). Esta discrepancia no invalida el método SCS-CN adoptado en la sección 8.3: es el resultado esperado cuando la similitud hidromorfométrica entre la cuenca de referencia y la cuenca de estudio es insuficiente, y confirma que la transposición sirve únicamente como cota inferior de referencia. Fuente: elaboración propia.

G.4 Síntesis y Recomendaciones

Las dos líneas de evidencia desarrolladas en este anexo conducen a conclusiones convergentes. Primero, la validación cruzada con GEOGLOWS en un punto con aforo real (El Casil, tramo 610267388) confirma la sobreestimación estructural identificada en la sección 8.6 para el tramo 610240115, con métricas de desempeño aún más desfavorables, lo que descarta el uso de caudales GEOGLOWS sin corrección de sesgo previa para cualquier aplicación de diseño

hidráulico en la zona de estudio. Segundo, la evaluación de similitud hidromorfométrica muestra que la cuenca El Casil (215,8 km², pendiente estimada 3-5 %, tiempo de concentración estimado de 8 a 12 horas) y la Qda. San Antonio (3,574 km², pendiente 53,56 %, tiempo de concentración de 57 minutos) pertenecen a categorías morfométricas distintas —la primera de respuesta lenta y la segunda claramente torrencial—, por lo que la transposición directa de caudales solo es admisible como cota inferior de referencia y no como método de diseño.

Los caudales de diseño obtenidos por SCS-CN en la sección 8.3 (Tabla 15) representan, para todos los períodos de retorno evaluados, entre 14,7 y 18,5 veces los caudales transpuestos desde El Casil. Esta diferencia es consistente con la naturaleza torrencial de la microcuenca de estudio (índice de Melton = 0,473, tiempo de concentración menor a una hora) y respalda la selección del método SCS-CN —procedimiento estándar para cuencas pequeñas sin instrumentación directa (NRCS, 1986)— como base de los caudales de diseño de esta investigación. Se recomienda, para estudios futuros en la zona, extender el registro de la estación El Casil al menos una década adicional y aplicar factores de corrección de sesgo mensual a la serie GEOGLOWS (factores observados entre 0,24 y 0,88 según el mes) antes de cualquier uso complementario del modelo global.