

Zonificación de la Amenaza por Avenidas Torrenciales en la Parte Alta de la Cuenca Del Río

Gualí, Municipio de Herveo, Tolima

Sofía Camila Ariza Diaz y Johanna Katherine Rodríguez Quiroga

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geóloga

Director

Leonardo Palmera Sánchez

M.Sc Geociencias

Codirector

Joaquín Valencia Ortiz

M.Sc Geología Ambiental y Aplicada

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Químicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2024

Agradecimientos

A Dios, por la fortaleza y coraje, que permitieron que llegase al final de este camino. A papá José, por su amor y bondad. A mi mamá y abuela por sus oraciones y palabras de aliento. A mi papá por su esfuerzo y dedicación. A mis hermanas Paula y Silvia por su apoyo y comprensión. A Corozo por su compañía cada noche y madrugada.

A Joha, por su confianza y compañía en el desarrollo de esta investigación y no dejarme desfallecer a 4.000 msnm en aquel volcán. A Nic, Ang y Ka por ser mis compañeras y mejores aliadas en este viaje universitario. A mi familia, en especial a mis tías Carmen y Esperanza por su apoyo incondicional. Y a todos aquellos docentes, compañeros y amigos que hicieron más amena mi trayectoria académica, infinitas gracias.

Sofía Ariza

Quiero dedicar este trabajo a la memoria de mi madre, que ha sido mi ángel y fortaleza durante esta etapa de mi vida. A mis hermanos Diana y Sergio, que siempre estuvieron presentes y fueron el aire bajo mis alas para lograr este objetivo de mi vida.

Agradezco primeramente a Dios por ser mi soporte, porque me ha dado sabiduría y fortaleza para afrontar los obstáculos que se me presentaron en el camino. Agradezco a mis hermanos por la incondicionalidad y a mi familia por su amor y palabras de aliento. A Ethel y Sandra por ser mis segundas mamás que la vida me prestó. Agradezco a Sof por su dedicación, paciencia, comprensión y compañía en el desarrollo de este trabajo. A Kathe, Laura y David por ser mis compañeros y amigos que me deja la universidad. A Pinki por la compañía. Y a todas aquellas personas, docentes, amigos y compañeros que me brindaron apoyo a lo largo de esta etapa. Mil gracias.

Johanna Rodríguez

Finalmente, y de manera conjunta, queremos agradecer a nuestros mentores Leonardo y Joaquín, por su confianza, sabiduría y calidad humana para guiarnos en este proceso. A Leo por su apoyo incondicional a cualquier hora y su amabilidad al asesorarnos, y a Joaco, por su paciencia, gentileza y compromiso aún en la distancia.

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Geología por la formación académica e integral brindada en el pregrado y al equipo del Seminario de Investigación de Geoamenazas por sus aportes en el desarrollo de la investigación.

Sofía & Johanna

Tabla de Contenido

Introducción.....	10
1. Objetivos	11
1.1 Objetivo General.....	11
1.2 Objetivos Específicos.....	11
2. Justificación.....	11
3. Localización	14
4. Marco Teórico	15
5. Estado del Arte	17
6. Marco tectónico	18
6.1 Fallas.....	19
6.1.1 Falla Palestina.....	19
6.1.2 Falla Santa Rosa	19
6.1.3 Falla Villamaría-Termalés.....	20
7. Contexto Litológico	20
8. Metodología.....	23
8.1 Fase I. Planeación	24
8.2 Fase II. Pre-Campo	24
8.3 Fase III. Campo	24
8.4 Fase IV. Tratamiento de Datos y Análisis	25
9. Análisis y Resultados	25
9.1 Mapa de Pendientes	25

9.2	Unidades Geológicas Superficiales (UGS)	25
9.2.1	Elaboración del mapa de Unidades Geológicas Superficiales	26
9.3	Subunidades Geomorfológicas (SGMF).....	30
9.3.1	Elaboración del mapa de Subunidades Geomorfológicas	30
9.4	Inventario de procesos morfodinámicos (IPM).....	35
9.5	Modelamiento Hidrológico e Hidráulico	35
9.5.1	Cálculo del caudal HEC-HMS	44
9.5.2	Cálculo de velocidad y nivel de inundación HEC-RAS	45
9.5.3	Amenaza por inundación.....	48
9.6	Control de Campo.....	49
9.7	Susceptibilidad por avenidas torrenciales	57
9.7.1	Normalizar las variables.....	57
9.7.2	Asignación de pesos relativos y álgebra de mapas	58
9.7.3	Asignación de categorías de susceptibilidad	58
9.8	Cuantificación de amenaza por avenidas torrenciales	59
9.9	Zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales	60
10.	Conclusiones.....	64
11.	Recomendaciones	66
	Referencias Bibliográficas.....	67

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Descripción de la litología aflorante en la zona de estudio. Tomado de INGEOMINAS (2001)</i>	21
Tabla 2. <i>Áreas de las Unidades Geológicas Superficiales</i>	27
Tabla 3. <i>Relación de ambientes morfogénicos de la zona de estudio</i>	31
Tabla 4. <i>Áreas de las SGMF de la zona de estudio</i>	32
Tabla 5. <i>Métodos para calcular parámetros morfométricos</i>	37
Tabla 6. <i>Métodos para calcular el tiempo de concentración (T_c)</i>	43
Tabla 7. <i>Caudales máximos para cada periodo de retorno</i>	45
Tabla 8. <i>Área de afectación de profundidades y velocidades máximas de inundación</i>	46
Tabla 9. <i>Categorías de riesgo por inundación (FEMA, 2018) y áreas de afectación para cada PR</i>	48
Tabla 10. <i>Áreas de amenaza por periodo de retorno</i>	62

Lista de Figuras

Figura 1. Localización geográfica de la parte alta de la cuenca del Río Gualí.....	15
Figura 2. Línea de tiempo	18
Figura 3. Mapa de unidades litológicas del área de estudio	22
Figura 4. Esquema metodológico del proyecto de investigación.....	23
Figura 5. Distribución porcentual de las UGS en el área de estudio	27
Figura 6. a) Mapa de UGS a escala 1:25.000, b) Leyenda	29
Figura 7. Distribución porcentual de los ambientes morfogénicos del área de estudio	32
Figura 8. a) Mapa de SGMF a escala 1:25.000, b) Leyenda	34
Figura 9. a) Esquema ilustrativo de la definición de curva hipsométrica (Quezada y Jensen, 2010 como se citó en (SGC, 2021). b) Curva hipsométrica para el área de estudio.....	40
Figura 10. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para el área de estudio	41
Figura 11. Hietograma de diseño para un PR de 100 años para el área de estudio.....	42
Figura 12. Mapa de niveles de inundación.....	47
Figura 13. Mapa de velocidades de inundación	47
Figura 14. Ortomosaico del Río Aguacatal, afluente del Río Gualí a) E: 4753824 y N: 2119696, b) E: 4753824 y N: 2119696, c) E: 4754193 y N: 2119266 y d) E: 4754519 y N: 2119266.....	51
Figura 15. Flujos de tierra, a) E: 4752910 y N: 2119970.....	52
Figura 16. Movimiento en masa compuesto, E: 4751127 y N: 2120865	53
Figura 17. Panorámica de un tramo del Río Aguacatal. a) E: 4753827 y N: 2119863	54
Figura 18. Zonas de aporte. a) E: 4752348 y N: 2121639 y b) E: 4752545 y N: 2121460.....	55
Figura 19. Avenida Torrencial. a) E: 4755597 y N: 2118864, b) E: 4755501 y N: 2118789 y c) E: 4755511 y N: 2118797	56
Figura 20. Matriz de integración	59
Figura 21. Mapa de zonificación de amenaza por avt para un periodo de retorno de 25 años...61	61
Figura 22. Mapa de zonificación de amenaza por avt para un periodo de retorno de 100 años.61	61
Figura 23. Distribución porcentual de la amenaza para los periodos de retorno de 25 y 100 años	63

Lista de Apéndices

Los apéndices están disponibles en el Repositorio Institucional

Apéndice A. Unidades Geológicas Superficiales

Apéndice B. Subunidades Geomorfológicas

Apéndice C. Susceptibilidad por Avenidas Torrenciales

Apéndice D. Mapas Temáticos

Apéndice E. Formatos de campo

Resumen

Título: Zonificación de la Amenaza por Avenidas Torrenciales en la Parte Alta de la Cuenca Del Río Gualí, Municipio de Herveo, Tolima*

Autor: Sofía Camila Ariza Diaz y Johanna Katherine Rodríguez Quiroga**

Palabras Clave: Avenida Torrencial, Susceptibilidad, Amenaza, Flujos

Descripción:

Las avenidas torrenciales son flujos compuestos por una mezcla de agua y sólidos que transitan por los cauces, removiendo material de las laderas, y que son detonados por altas precipitaciones. La zona de estudio comprende un área de 44.609 ha en la parte alta de la cuenca del Río Gualí, en el municipio de Herveo, caracterizado por ser montañoso y presentar altos niveles de precipitación. El objetivo principal es generar un mapa de zonificación de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:25.000 con el fin de identificar las áreas en amenaza. Para esto, se realiza la cartografía de unidades geológicas superficiales y subunidades geomorfológicas, caracterización morfométrica, y modelación hidrológica e hidráulica. Además, se propone una matriz de integración para relacionar la susceptibilidad del macizo y las áreas en riesgo por inundación para los periodos de retorno de 2,33;5,25,50 y 100 años.

La zonificación de amenaza por avenidas torrenciales en la parte alta de la cuenca del río Gualí se enfoca en los periodos de retorno de 25 y 100 años, fundamentales en la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial. Para un periodo de retorno de 25 años, se identifica un área de 25,83 ha en amenaza alta y 241,53 ha en amenaza media, lo que refleja la importancia en la prevención y mitigación del riesgo en estas zonas que se encuentren habitadas. Para un periodo de retorno de 100 años, se identifica un área de 69,72 ha en amenaza alta y 201,2 ha en amenaza media, lo que revela la necesidad de planificar e implementar medidas de control en obras de infraestructura a largo plazo que allí se encuentren.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Programa académico. Director: Leonardo Palmera Sánchez. Geólogo M.Sc en Geociencias. Codirector: Joaquín Andrés Valencia. Geólogo M.Sc en Geología Ambiental.

Abstract

Title: Zoning of the Torrential Flood Hazard in the Upper Part of the Gualí River Basin, Municipality of Herveo, Tolima*

Author(s): Sofía Camila Ariza Diaz y Johanna Katherine Rodríguez Quiroga**

Key Words: Torrential Flood, Susceptibility, Hazard, Flows

Description:

Torrential floods are flows composed of a mixture of water and solids that circulate through the channels, removing material from the slopes, and are caused by high precipitation. The study area comprises an area of 44,609 ha in the upper part of the Gualí River basin, in the municipality of Herveo, which is characterized by its mountainous terrain and high levels of precipitation. The main objective is to generate a torrential flood hazard zoning map at a scale of 1:25,000 to identify the areas under hazard. For this purpose, the mapping of superficial geological units and geomorphological subunits, morphometric characterization, and hydrological and hydraulic modeling are carried out. In addition, an integration matrix is proposed to relate the susceptibility of the massif and the flood hazard areas for return periods of 2, 33, 5, 25, 25, 50 and 100 years.

The hazard zoning for torrential floods in the upper part of the Gualí river basin focuses on return periods of 25 and 100 years, which are fundamental for risk management and land use planning. For a 25-year return period, an area of 25.83 ha is identified in high hazard and 241.53 ha in medium hazard, which reflects the importance of risk prevention and mitigation in these inhabited areas. For a return period of 100 years, an area of 69.72 ha is identified in high hazard and 201.2 ha in medium hazard, which reveals the need to plan and implement control measures in long-term infrastructure projects located there.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Academic program. Director: Leonardo Palmera Sánchez. Geologist M.Sc in Geosciences. Co-director: Joaquín Andrés Valencia. Geologist M.Sc in Environmental Geology.

Introducción

El municipio de Herveo se encuentra ubicado sobre la cordillera Central del país, razón por la cual el territorio en su mayor extensión presenta un relieve montañoso. De acuerdo con sus características geológicas, geomorfológicas y estructurales, lo convierten en un escenario favorable a la ocurrencia de avenidas torrenciales. El estudio busca contribuir al conocimiento de las avenidas torrenciales en Herveo, debido a la insuficiencia de literatura existente, la cual se encuentra restringida a movimientos en masa de tipo deslizamientos y flujos de tierra.

Para obtener la zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales, se emplea un análisis basado en la cartografía geológica y geomorfológica local, así como la modelación hidrológica e hidráulica de la zona con el fin de conocer el riesgo por inundación. Asimismo, se propone una matriz de integración que relaciona la susceptibilidad del macizo rocoso con el riesgo por inundación. Esto permitirá crear un mapa que categorice las áreas en alta, media y baja, proporcionando una representación clara de la amenaza asociada a las avenidas torrenciales en la parte alta de la cuenca del Río Gualí.

La zonificación contribuye a la prevención y mitigación del riesgo en zonas de amenaza alta, así como la planificación e implementación de medidas de control en la construcción de obras ingenieriles con una larga vida útil. Asimismo, ayuda a definir las áreas seguras para el desarrollo urbano, industrial y agrícola, necesarias para el ordenamiento territorial.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la amenaza por avenidas torrenciales en la parte alta de la cuenca del Río Gualí, municipio de Herveo, Tolima, teniendo en cuenta la Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Avenidas Torrenciales del Servicio Geológico Colombiano 2021.

1.2 Objetivos Específicos

1. Elaborar la cartografía geomorfológica y de unidades geológicas superficiales en función del análisis de avenidas torrenciales en la región de estudio.
2. Elaborar un modelo hidrológico e hidráulico sobre la región de estudio basados en el procesamiento descrito en la Guía Metodológica para Zonificación de Amenaza por Avenidas Torrenciales del Servicio Geológico Colombiano del 2021.
3. Caracterizar las avenidas torrenciales en el área de estudio siguiendo la Guía Metodológica del Servicio Geológico Colombiano 2021.
4. Zonificar la amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:25.000 siguiendo la guía metodológica del Servicio Geológico Colombiano 2021.

2. Justificación

Los países se orientan bajo las directrices establecidas en el Marco de Sendai para la reducción del riesgo de desastres 2015-2030, como respuesta a las consecuencias ocasionadas por fenómenos naturales. Este marco se enfoca en abordar los tres componentes del riesgo de desastres (exposición a amenazas, vulnerabilidad y capacidad, y las características específicas de las amenazas), con la intención de evitar la generación de nuevos riesgos, mitigar los ya existentes y

fortalecer la capacidad de recuperación frente a estos sucesos. De la misma manera, el Marco de Sendai mediante sus siete (7) metas globales y treinta y ocho (38) indicadores globales miden los avances que logran los países en la reducción del riesgo hasta el año 2030 ([Organización de las Naciones Unidas \(ONU\), 2015](#)).

La política de gestión del riesgo de desastres en el país tiene como propósito la protección de la población colombiana y se adopta en la ley 1523 de 2012. Se establece sobre tres pilares fundamentales: el conocimiento del riesgo, la reducción del riesgo y el manejo de desastres. De igual manera, se establece el sistema nacional de gestión del riesgo de desastres (SNGRD), que corresponde al conjunto de entidades públicas, privadas y comunitarias; de políticas, normas y estrategias que se aplican de manera organizada para garantizar la gestión del riesgo en el país ([Ley 1523 de 2012](#)).

El Sistema de Inventario de Desastres conocido como DesInventar, para el periodo 1921-2018 reportó 1.363 eventos relacionados a avenidas torrenciales en el país, con más de 2.570 víctimas fatales ([DesInventar, 2022](#)). De estos eventos, el 59% se ubica principalmente en la región Andina, caracterizada por el paso de las cordilleras Oriental, Central y Occidental y los valles interandinos de los ríos Magdalena y Cauca. Asimismo, el 24% de los eventos se concentra en la región Pacífica reconocida por sus altas precipitaciones ([Aristizábal et al., 2020](#)).

El Servicio Geológico Colombiano ([SGC, 2021](#)) define las avenidas torrenciales (AVT) como flujos rápidos que transitan por cauces permanentes o intermitentes con pendientes longitudinales altas. Estos eventos pueden ser desencadenados por precipitaciones intensas e involucran el transporte de una mezcla entre agua y una proporción significativa de sólidos. Estos sólidos pueden provenir de laderas cercanas o del lecho del cauce.

Las características fisiográficas e hidrometeorológicas propias del municipio de Herveo, tales como su mayor extensión montañosa y su precipitación media anual de 2.164 mm ([Alcaldía Municipal de Herveo, 2005](#)), lo convierten en un escenario de interés susceptible a la generación de avenidas torrenciales. A través de los años, el área de estudio se ha visto afectada por los movimientos en masa desencadenados por las fuertes lluvias. Estas afectaciones van desde pérdidas humanas, como en el 2011 el caso de una familia campesina de la Vereda El Salado, a una hora del casco urbano de Herveo, donde siete de sus integrantes perdieron la vida luego de que las lluvias ocasionaran un deslizamiento que sepultó la totalidad de su vivienda ([El Tiempo, 2011](#)). Hasta pérdidas económicas importantes a la infraestructura pública, como la ocurrida en el 2017 cuando un deslizamiento afectó la bocatoma del acueducto que suplía el recurso a los ocho mil habitantes del municipio ([Ondas de Ibagué, 2017](#)) y más recientemente, el deterioro en las vías secundarias y terciarias que imposibilitó la comunicación y transporte del comercio entre localidades ([Ramos, 2021](#)). De igual manera, para el año 2021 las pérdidas en el sector productivo agropecuario del café, aguacate, plátano y pasto reportaron pérdidas que afectaron más de 350 hectáreas ([Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres \(CMGRD\), 2021](#)).

Por consiguiente, este estudio hará un aporte a la identificación, análisis y evaluación del riesgo de varios escenarios en Herveo. Los resultados y las conclusiones generadas en este trabajo serán un valioso aporte técnico a la comunidad y a las entidades competentes en materia de control de gestión del riesgo, para la prevención y mitigación de los efectos causados por avenidas torrenciales. Dado que, los mapas de amenaza por avenidas torrenciales son herramientas de gran utilidad para la planificación estratégica y el desarrollo comunitario. Estos ayudan a evitar la intervención humana en áreas no aptas, ya que se ha demostrado que actividades como la

construcción de viviendas, zonas industriales e infraestructura pueden quedar expuestas a estos fenómenos naturales.

3. Localización

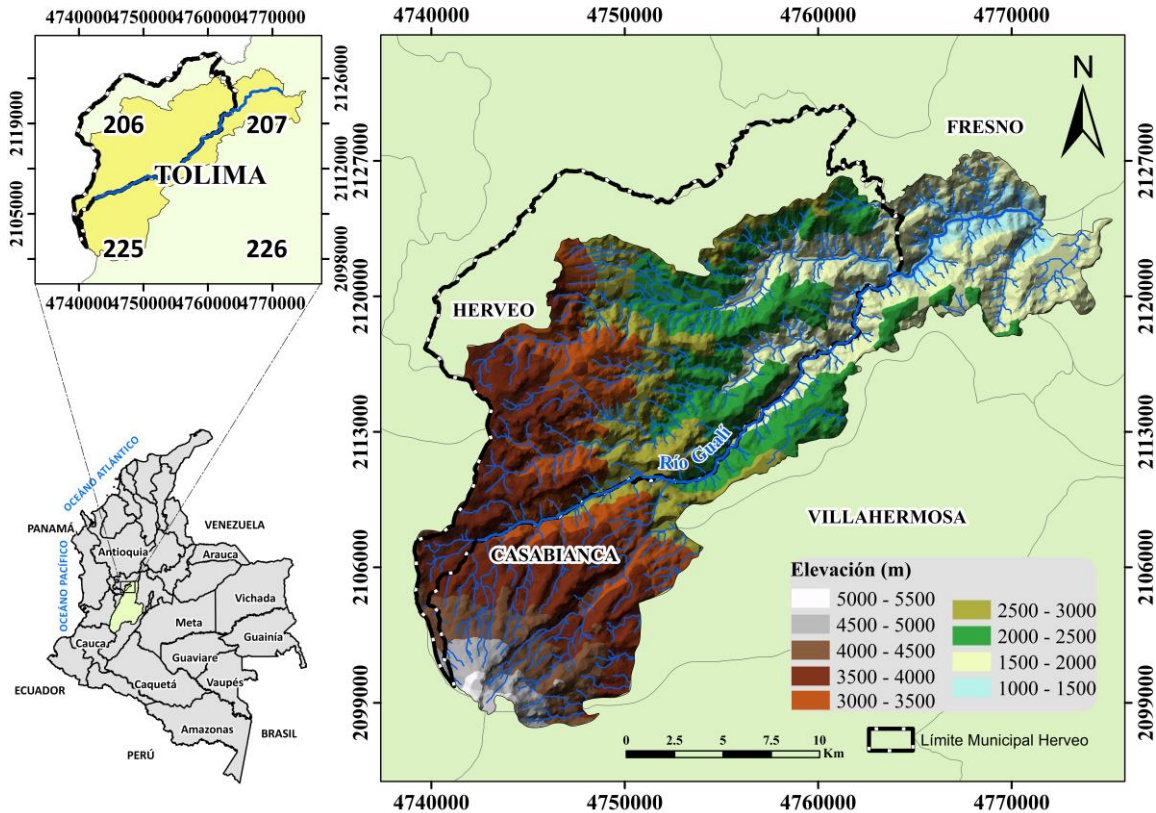
La región de estudio se presenta como una zona montañosa de la cordillera Central en Tolima, con elevaciones que varían debido a valles, ríos y quebradas. Los datos extraídos del modelo digital de elevación (MDE), muestran una elevación mínima de 1.005 m, máxima de 5.317 m y promedio de 2.798,86 m. La diversidad geográfica y climática del municipio de Herveo incluye seis provincias climáticas según la clasificación del ([Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales \(IDEAM\),2011](#)), con temperaturas de 0°C a 20°C y precipitaciones anuales entre 1.400 y 2.700 mm ([Castañeda, 2014](#)).

El área de estudio se define a partir de la expresión fisiográfica de la cuenca hidrográfica del Río Gualí en su parte alta. Comprende un área de 446 km² que atraviesa los municipios de Herveo, Casabianca, Villahermosa, Fresno y Palocabildo. Se encuentra adscrita dentro de las planchas topográficas del ([Instituto Geográfico Agustín Codazzi \(IGAC\), 2023](#)) 225IIB, 225IIA, 207IIIA, 206IVD, 206IVC, 206IVB, 206IVA Y 206IID a escala 1:25000.

Con el fin de perseverar en la continuidad cartográfica, el sistema de referencia utilizado corresponde al marco geocéntrico nacional MAGNA-SIRGAS / Origen Nacional (EPSG 9377).

Figura 1

Localización geográfica de la parte alta de la cuenca del Río Gualí



4. Marco Teórico

El presente marco teórico revisa algunos de los conceptos que explican la evolución de las avenidas torrenciales. Se analizarán factores como la amenaza, los tipos de flujos y las diferentes zonas de una avenida torrencial.

Amenaza: Existe un riesgo potencial de que un evento físico, ya sea de origen natural o provocado accidentalmente por actividades humanas, ocurra con suficiente intensidad como para causar la pérdida de vidas, lesiones u otros efectos en la salud. Además, puede provocar daños y pérdidas en propiedades, infraestructura, medios de vida, servicios esenciales y recursos

ambientales (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), 2017 como se citó en [SGC, 2021](#)).

Cuenca hidrográfica: Sistema constituido por un territorio que es drenado por una sola red de drenaje natural. Esto significa que el agua desde dentro del territorio fluye hacia el mar o un lago a través de un único drenaje. Su delimitación está directamente relacionada con la topografía, siguiendo la línea de las cumbres, conocida como la divisoria de aguas (Chow et al., 1994 como se citó en [SGC, 2021](#)).

Flujo de detritos: Flujo muy rápido (5×10^{-1} mm/s) a extremadamente rápido (5×10^3 mm/s) según Hungr et al., 2014 (como se citó en [SGC, 2021](#)). Se caracteriza por presentar altas concentraciones volumétricas de sedimentos (> 60 % vol.) que es transportado a lo largo de un canal de pendientes empinadas con fuerte poder de arrastre. Se distingue de otros movimientos en masa porque ocurre en quebradas y canales de drenaje de primer o segundo orden ([SGC, 2021](#)).

Periodo de retorno (PR): Indica la probabilidad de que ocurra un evento específico en un cierto periodo de tiempo. Es el tiempo durante el cual la probabilidad de ocurrencia se distribuye de manera uniforme entre los periodos que componen ese lapso; por lo tanto, un periodo de retorno de 100 años significa una probabilidad de excedencia de $1/100 = 0,01$ o 1 % para cualquier año (la probabilidad de excedencia anual será del 1 %) ([SGC, 2021](#)).

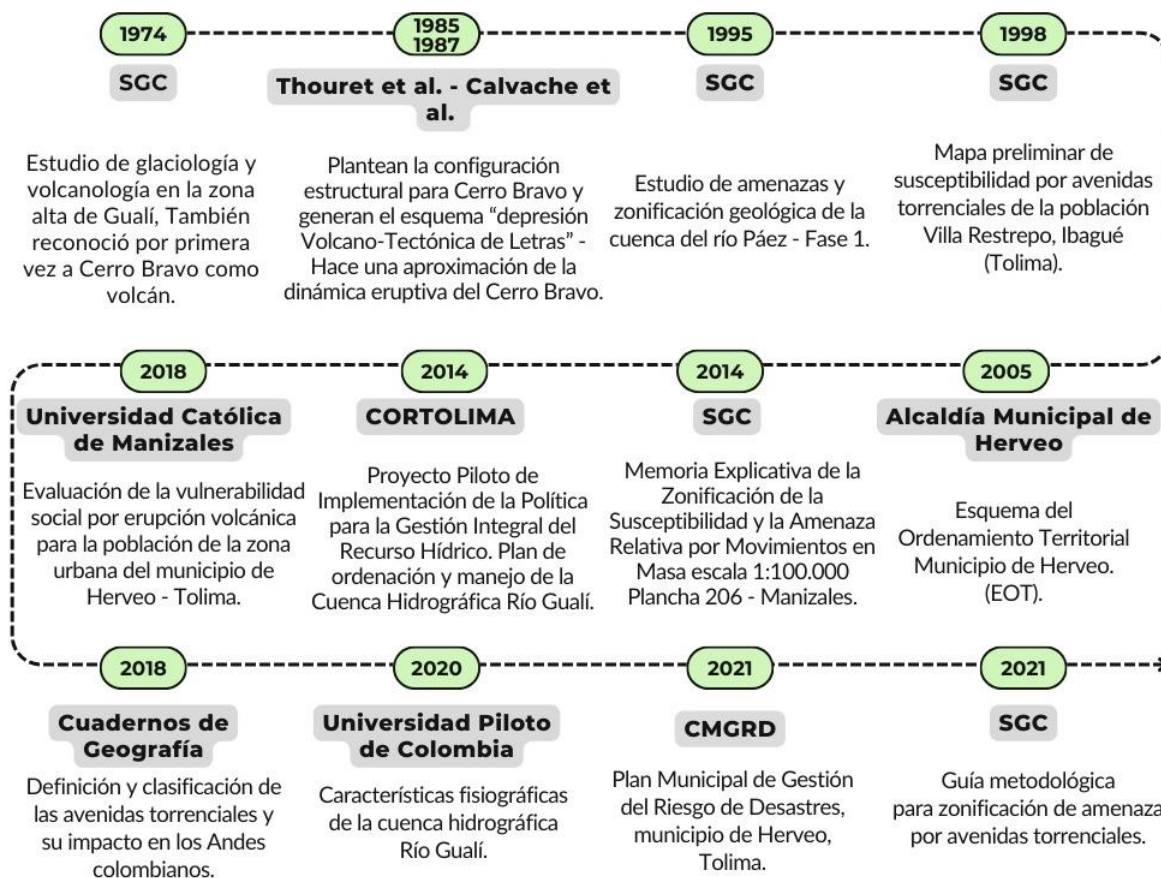
Zona de aporte: Material localizado junto a los cauces y zonas aledañas que eventualmente puede ser arrastrado aguas abajo por un cauce, en el momento que experimente aumento del caudal o velocidad. Este material es depositado en áreas topográficamente más bajas generalmente formando un abanico ([SGC, 2017](#)).

Zona de tránsito: Es uno de los componentes de la trayectoria de una avenida torrencial y corresponde al área donde se observan las huellas de la propagación del material desplazado (SGC, 2021).

Zona de depósito: Zona de acumulación principal de la cuenca donde el drenaje deposita la carga sedimentaria formando terrazas, abanicos, y otras geoformas fluviales (SGC, 2021).

5. Estado del Arte

Los principales antecedentes para el análisis de las avenidas torrenciales del área de estudio se detallan en una línea de tiempo (Figura 2). Esta incluye algunos de los primeros estudios de las avenidas torrenciales, los términos usados para definirla y guías metodológicas para su correcta caracterización. El área de estudio, compuesta principalmente de material procedente del Volcán Cerro Bravo (VCB), es propensa a avenidas torrenciales. Estudios históricos y actuales del VCB han analizado su historia eruptiva, petrografía y geomorfología. Asimismo, el SGC también ha desarrollado guías metodológicas con parámetros para estudios de geoamenazas en el país. A continuación, se representan los principales antecedentes a lo largo del tiempo que involucran la dinámica del VCB y la amenaza por avenidas torrenciales en la zona de estudio.

Figura 2*Línea de tiempo*

6. Marco tectónico

El departamento del Tolima está ubicado en la Región Andina, zona colombiana sometida a interacción de las placas tectónicas del Pacífico (Nazca) y Suramérica. Los mayores rasgos morfotectónicos son las cordilleras Central y Oriental y el valle del río Magdalena, accidentes relacionados con posibles fenómenos distensivos en el Jurásico y compresivos en el Cenozoico (Oligoceno - Mioceno), a los que se asocia el levantamiento de las cordilleras y la depresión del Magdalena (INGEOMINAS, 2012). En consecuencia, la zona de estudio se encuentra regida por

una serie de fallas, lineamientos y estructuras que favorecen el desarrollo de eventos por avenidas torrenciales.

6.1 Fallas

Los rasgos tectónicos de la zona de estudio están dominados por dos esfuerzos principales, uno compresivo en dirección WNW-ESE, asociado a fallas longitudinales NE y N-S como las Fallas de Palestina y Santa Rosa, y un esfuerzo extensivo en dirección SSW-NNE asociado a un sistema transversal NW-SE a E-W al que pertenece la Falla Villamaría- Termales (Mejía et al., 2012). También se observan lineamientos en dos poblaciones bien definidas: una con dirección N20°-30°E y otra N30°-50°W, que se asocian con los sistemas principales de fallamiento (INGEOMINAS, 2001).

6.1.1 Falla Palestina

En la zona de estudio, la falla se compone de dos ramales principales con dirección N40°E, presenta una cinemática inversa con componente lateral derecha y controla la sedimentación volcanoclástica (Mejía et al., 2012). Se encuentra afectando a las lavas recientes del complejo Ruíz-Tolima y marcando el contacto entre las Anfibolitas de Padua y el Complejo Cajamarca.

6.1.2 Falla Santa Rosa

Presenta una cinemática inversa con componente lateral derecha y afecta a los esquistos grafitosos del Complejo Cajamarca, cubiertos por flujos de lavas y depósitos piroclásticos y laháricos. Significativa, pues ejerce control sobre el cauce del río Gualí en dirección N60°-70°E y corta a la Falla Palestina en ese sector (Mejía et al., 2012).

6.1.3 *Falla Villamaría-Termals*

La falla con direcci3n WNW corresponde a una falla normal con componente lateral izquierdo, que afecta a las lavas andesíticas y tonalitas del stock de Manizales. Tambi3n, se relaciona con los conos volcánicos recientes y las fuentes termals ([Mejía et al., 2012](#)).

7. Contexto Litol3gico

El 3rea de estudio presenta rocas metam3rficas, ígneas (intrusivas y extrusivas), y sedimentarias, correspondientes desde el Mesozoico hasta la actualidad. En cuanto a rocas metam3rficas se encuentra el Complejo Cajamarca, constituido por esquistos cuarzo-sericíticos altamente fracturados ([INGEOMINAS, 2001](#)). Tambi3n hay unidades volcanoclásticas que corresponden a basaltos y flujos andesíticos provenientes del VCB, distribuidos en grandes extensiones por el 3rea de estudio ([INGEOMINAS, 2001](#)). De acuerdo con Monsalve, 1991, como se cit3 en [Arango et al., 2017](#) la actividad del VCB inici3 hace aproximadamente 50.000 ańos y se caracteriza por erupciones efusivas y explosivas, que han generado flujos y domos de lava, y dep3sitos de caída libre piroclástica, respectivamente. Estas erupciones han generado avalanchas de escombros y lahares con productos dacíticos y andesíticos seg3n Lescinsky en 1990 como se cit3 en [Pinz3n et al., 2018](#).

A continuaci3n, en la Tabla 1 se describen de manera general las unidades presentes en el 3rea de estudio y en la [Figura 3](#) se observa el mapa geol3gico ([INGEOMINAS, 2001](#)).

Tabla 1

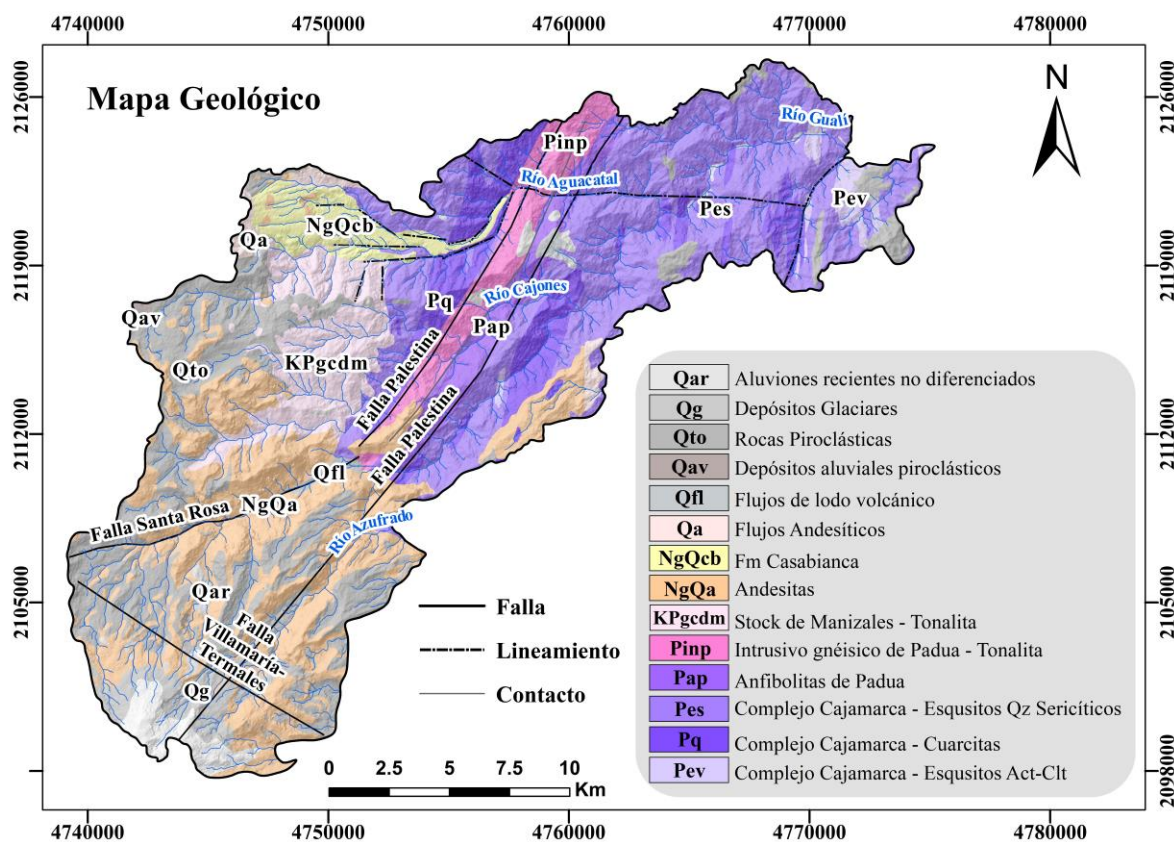
Descripción de la litología aflorante en la zona de estudio. Tomado de INGEOMINAS (2001)

Edad	Unidad Litológica	Descripción
Cuaternario	Aluviones recientes no diferenciados (Qar)	Depósitos no consolidados de material aluvial y coluvial, que, en los cañones de algunos ríos y quebradas se presentan con poco espesor y cubren las rocas más antiguas. Están compuestos por bloques y gravas de diferente tamaño y composición, embebidos en una matriz areno-arcillosa con varios grados de compactación o cementación.
	Depósitos glaciares (Qg)	Constituidos por bloques de lavas andesíticas y andesíticas basálticas en una matriz areno-arcillosa de color amarillo a blanco amarillento.
	Rocas piroclásticas (Qto)	Depósitos de material piroclástico de caída, resultado de la actividad volcánica del Complejo Ruiz-Tolima. Compuestos por cenizas, lapilli pumfítico y en ocasiones, bombas volcánicas. Los depósitos de pómez pertenecen a depósitos plinianos de caída y están ampliamente distribuidos alrededor del volcán Cerro Bravo.
	Depósitos aluviales piroclásticos y flujos de lodo volcánico	<p>La finalización de la actividad volcánica se da con la emisión de material piroclástico del Complejo Ruiz; estos productos se depositaron en un medio acuoso que sirve como medio de transporte para los alrededores de la Cadena volcánica, depositando en el cauce y en zonas de inundación, originando geofomas características en el área.</p> <p>Cenizas y lapilli (Qav) Cenizas y lapilli que están depositadas en medio glacio-lacustre y se encuentran interestratificadas en capas de arcilla.</p> <p>Flujos de lodo volcánico "lahares" (Qfl) Depositados en planchas sobre el flanco occidental de la cordillera Central. Corresponden a depósitos dejados por arrastre y retrabajamiento de material piroclástico.</p>
	Flujos andesíticos (Qa)	Flujos andesíticos recientes, con textura porfírica que no evidencian afectaciones por procesos glaciares del pleistoceno. Se presentan intercalados por flujos de lodos y cubiertos por depósitos piroclásticos de caída.
Neógeno	Formación Casabianca (NgQcb)	Agrupan sedimentitas volcanogénicas de grano grueso y en menor proporción tobas y sedimentitas volcánicas retrabajadas, como producto de una agradación en cauces fluviales inducidas por la actividad volcánica de la cadena Cerro Bravo – Ruiz. La depositación de esta formación fue y está controlada principalmente por la cuenca de los ríos Gualí y Guarínó, tributarios del río Magdalena. Las características sedimentológicas de la formación indican que su origen fue el resultado de depósitos de acreción lateral con gravas estratificadas.
	Andesitas (NgQa)	Denominadas también flujos andesíticos-Dacíticos del Mioceo-Plioceno y corresponden a lavas andesítico-dacíticas y esporádicamente basálticas, en coladas superpuestas extendidas desde el centro de emisión en forma de flujos de lavas masivas y bloques descendentes, por varios kilómetros y generalmente cubiertas por piroclastos.
Cretácico	Stock de Manizales (KPgcdm)	Cuerpo de roca conformado principalmente por granitoide, que afloran al norte del Volcán Nevado del Ruiz. Gran parte de esta roca se encuentra cubierta por piroclásticos del Complejo Volcánico Ruiz-Tolima. En el contacto con el Complejo Cajamarca se observan xenolitos, zonas de inyección y efectos térmicos con alto grado metamórfico.
Pérmico	Intrusivos gnéissicos y anfibolitas	<p>Intrusivo Néisico de Padua (Pinp) Recibe el nombre por el municipio de Padua, Tolima, predomina la composición tonalítica a granodiorítica, con estructura gnéissica definida por la orientación subparalela de láminas de biotita y moscovita, textura hipidioblástica inequigranular, además, localmente presenta textura granoblástica.</p> <p>Anfibolita de Padua (Pap) Corresponden a rocas granoblásticas de grano medio a fino, equigranulares con foliación en dirección paralela a la orientación de los cristales de hornblenda. Estas rocas se pueden considerar como metaígnea sometida a metamorfismo de grado medio de la facies anfibolita, debido a la asociación que presenta con el intrusivo néisico de Padua.</p>

Edad	Unidad Litológica	Descripción
Carbonífero	Esquistos Cuarzo-Sericíticos (Pes)	En ocasiones presenta grafito en cantidades variadas que le da un color de gris a negro a la roca y es denominado “esquistos negros”. Esta unidad además incluye, por gradación mineralógica a cuarcitas o esquistos grafiticos, y por variación textural a filitas, y se presentan como rocas laminadas con foliación clara, pero no plana por el plegamiento. La composición de las rocas que predominan es cuarzo, sericita, grafito, clorita y accesorios como micas, apatito, turmalina y opacos metálicos.
	Complejo Cajamarca Cuarcitas (Pq)	Se encuentran intercaladas con los esquistos cuarzo-sericíticos, presenta variación en su estructura de maciza granoblástica a esquistosa heteroblástica, debido a la variación de la composición del protolito sedimentario como en las condiciones de sedimentación.
	Esquistos Actinolíticos-Cloríticos (Pev)	Conocidos como esquistos verdes, presentan foliación de paralela a subparalela a la orientación del anfíbol fibroso y clorita. El anfíbol que predomina es actinolita en formas alargadas de terminación fibrosa.

Figura 3

Mapa de unidades litológicas del área de estudio

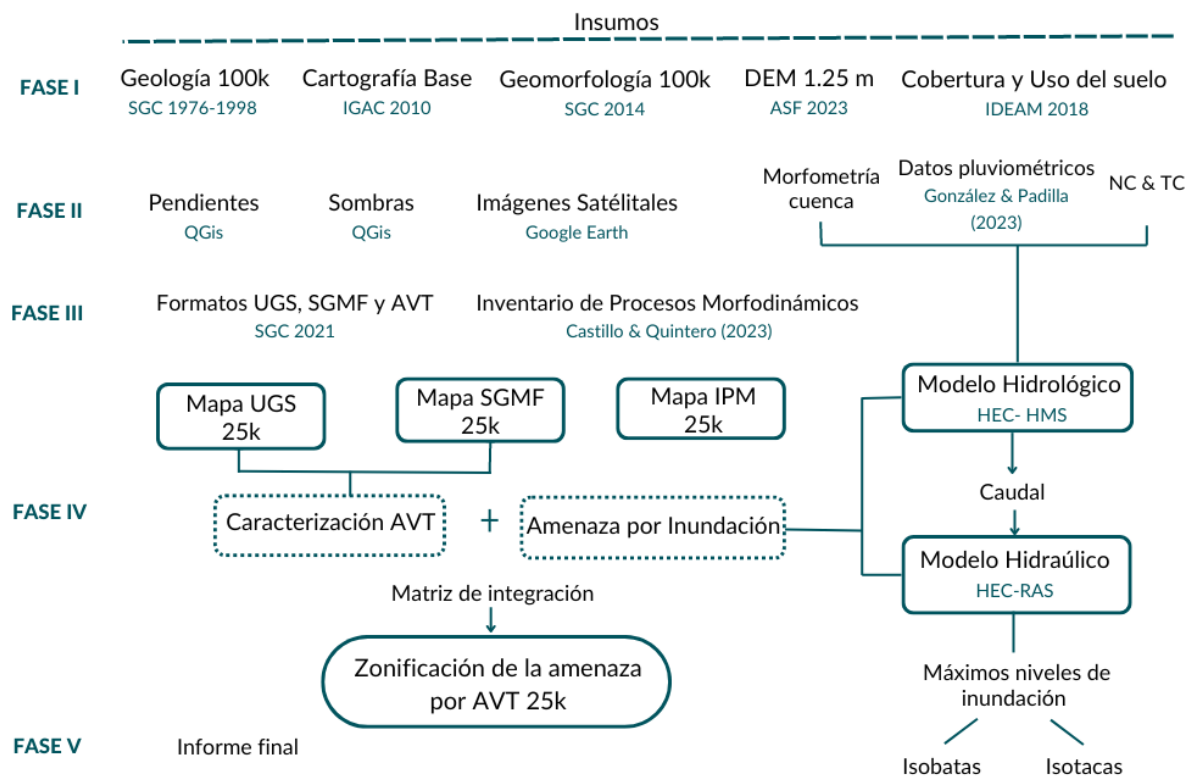


8. Metodología

La investigación se desarrolló a través de una serie de actividades en cuatros fases procedimentales, desde el reconocimiento del objetivo del proyecto de investigación y recolección de datos en campo, hasta la presentación de productos y resultados (Figura 4).

Figura 4

Esquema metodológico del proyecto de investigación



*NC: Número de curva, TC: Tiempo de concentración, UGS: Unidades Geológicas Superficiales, SGMF: Subunidades Geomorfológicas, AVT: Avenidas torrenciales, IPM: Inventario de Procesos Morfodinámicos.

8.1 Fase I. Planeación

La recopilación y análisis de información secundaria se basó en la exploración de insumos para la zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales, propuesta por el SGC en la Guía Metodológica (2021). Estos insumos corresponden a la geología y geomorfología a escala 100.000 que se obtienen del Geoportal del SGC, la cartografía base del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) de las planchas topográficas 225IIB, 225IIA, 207IIIA, 206IVD, 206IVC, 206IVB, 206IVA y 206IID a escala 25.000. Así mismo, la cobertura vegetal y uso del suelo del IDEAM, y el MDE con una resolución de 12.5 metros que se adquiere del portal ASF- ALOS PALSAR.

8.2 Fase II. Pre-Campo

La etapa pre-campo se caracterizó por la delimitación del área de estudio, la cual corresponde a la parte alta de la cuenca del río Gualí, para esto fue necesario el MDE y las herramientas de dirección y acumulación de flujo disponibles en el software QGIS v. 3.16.0. De igual manera, se generaron los modelos de pendientes, sombras y orientaciones en el mismo.

8.3 Fase III. Campo

En la etapa de campo se recopiló la información geológica, geomorfológica, estructural y morfodinámica del área de estudio, por medio de los formatos propuestos por el SGC en la Guía metodológica (**Apéndice E**). Entre ellos, los formatos de campo para macizo rocoso y suelo de unidades geológicas superficiales, de subunidades geomorfológicas y de caracterización de avenidas torrenciales.

8.4 Fase IV. Tratamiento de Datos y Análisis

En la fase de tratamiento de datos y análisis se generaron los mapas de unidades geológicas superficiales, subunidades geomorfológicas e inventario de procesos morfodinámicos a escala 25.000. A su vez, el modelamiento hidrológico e hidráulico, que requirió como insumos los datos de día pluviométrico registrados en las estaciones meteorológicas del IDEAM y que fueron procesados por González y Padilla (2023).

9. Análisis y Resultados

Este capítulo comprende el análisis de las fases metodológicas previas, incluyendo la recolección y tratamiento de datos. Además, se presenta la interpretación de los resultados.

9.1 Mapa de Pendientes

Para generar el mapa de pendientes (**Apéndice D**) se utilizó el MDE en la ruta Ráster-Análisis-Pendiente, y se reclasificó según Van Zuidam (1986) y sus rangos para zonificación de amenaza por movimientos en masa en siete categorías: Plana a casi plana de 0° a 2°, Suavemente inclinada de 2° a 4°, Inclinada de 4° a 8°, Moderadamente abrupta de 8° a 16°, Abrupta de 16° a 35°, Muy abrupta de 35° a 55° y Extremadamente abrupta >55°. El rango predominante en la zona de estudio son las pendientes Abruptas a Muy abruptas, caracterizadas por procesos denudacionales intensos y alta propensión al desarrollo de procesos erosivos, lo cual favorece al aporte de material en una avenida torrencial.

9.2 Unidades Geológicas Superficiales (UGS)

Las unidades geológicas superficiales son el resultado de procesos exógenos y endógenos en los materiales que conforman la superficie terrestre y que por su resistencia pueden clasificarse

en macizos rocosos o suelos (SGC, 2017). Estas al igual que las subunidades geomorfológicas, constituyen un insumo esencial en la zonificación de avenidas torrenciales, principalmente mediante la identificación de depósitos coluviales, fluviotorrenciales, aluviales y volcánicos.

9.2.1 *Elaboración del mapa de Unidades Geológicas Superficiales*

El mapa de unidades geológicas superficiales es fundamental para la identificación de los depósitos coluviales, aluviales, fluviotorrenciales y volcánicos, a lo largo de la zona de tránsito y la zona de depósito, pues son considerados fuente directa de sedimentos en una avenida torrencial (SGC, 2021).

Para la generación del mapa se empleó la estandarización del SGC para la descripción y caracterización de UGS validadas en campo, propuesta en el anexo 3.2.2 de la Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 (SGC, 2017). De igual manera, las UGS que no pudieron validarse en campo por motivos de difícil acceso, se describen y caracterizan por fotointerpretación de imágenes satelitales, pendientes y coberturas.

En el área de estudio se encontraron un total de 36 UGS (Figura 5) en las que predominan las rocas de calidad regular y mala, como la “Roca de calidad regular andesitas (Rra)” y la “Roca de mala calidad esquistos del Complejo Cajamarca (Rmecc)”. Así como las unidades de “Suelo transportado de flujo piroclástico (Stfp)” y “Suelo transportado de flujo lahárico (Stfl)”. La relación porcentual del área que cubre cada unidad geológica superficial en el área de estudio se observa en la Tabla 2. En la Figura 6a se muestra el mapa de UGS de la parte alta de la cuenca del Río Gualí y la leyenda en la Figura 6b.

Las principales UGS asociadas a avenidas torrenciales son los suelos transportados originados por depósitos, y las rocas vinculadas a movimientos en masa, debido a la inestabilidad de taludes presentes en la zona de tránsito. Según Castillo & Quintero (2023), en el inventario de

procesos morfodinámicos en un sector del municipio de Herveo, se observa que la concentración de movimientos en masa tipo deslizamientos traslacionales y flujo de detritos, se presenta en los suelos transportados de flujo lahárico (29), suelos transportados de flujo piroclástico (6), rocas de calidad regular tonalitas del intrusivo néisico de Padua (20) y rocas de mala calidad esquistos del Complejo Cajamarca (23).

La descripción a detalle de las unidades geológicas superficiales del área de estudio puede consultarse en el **Apéndice A**.

Figura 5

Distribución porcentual de las UGS en el área de estudio

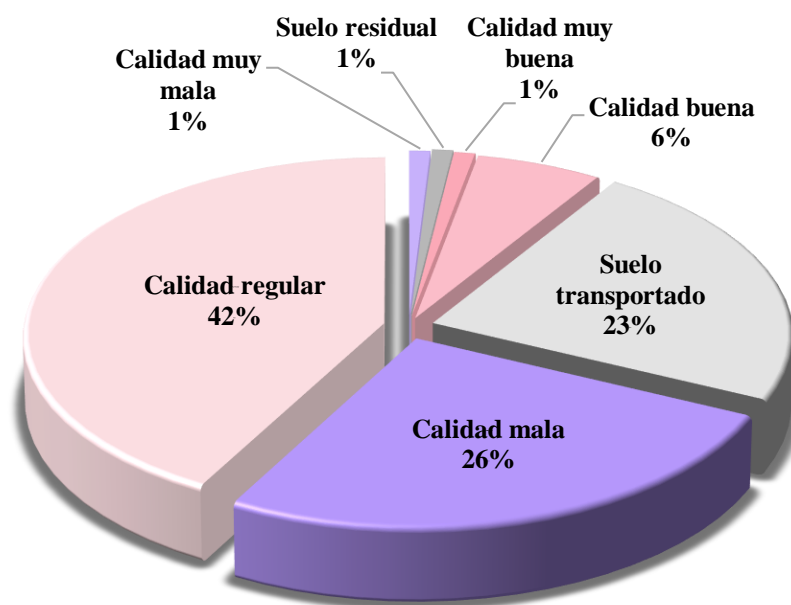


Tabla 2

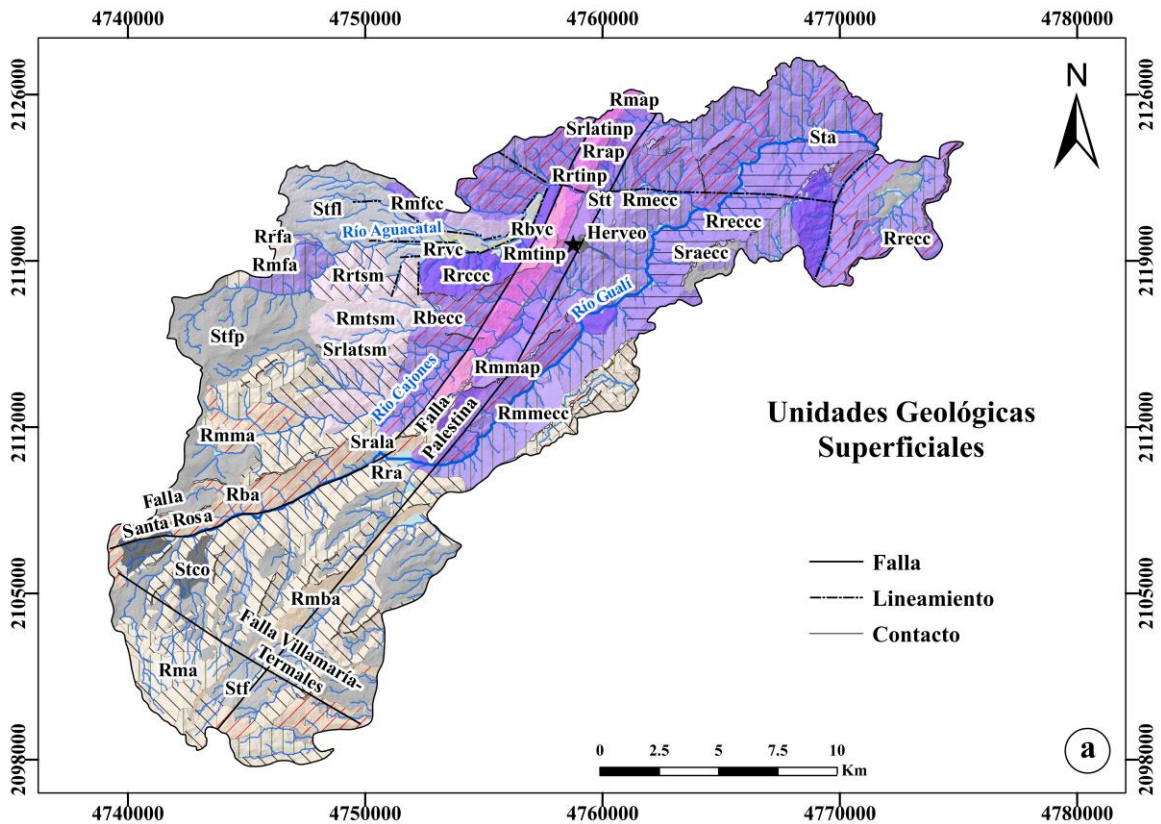
Áreas de las Unidades Geológicas Superficiales

UGS	Código	Área (ha)	%
Roca de muy buena calidad andesitas	Rmba	577,81	1,3
Roca de buena calidad esquistos del complejo cajamarca	Rbecc	14,39	0,03

UGS	Código	Área (ha)	%
Roca de buena calidad volcanogénicas de la formación casabianca	Rbvc	77,15	0,17
Roca de buena calidad flujos andesíticos	Rbfa	20,71	0,05
Roca de buena calidad andesitas	Rba	2.558,25	5,73
Roca de calidad regular volcanogénicas de la formación casabianca	Rrvc	24,94	0,06
Roca de calidad regular flujos andesíticos	Rrfa	68,13	0,15
Roca de calidad regular filitas del complejo cajamarca	Rrfcc	295,68	0,66
Roca de calidad regular tonalitas del intrusivo neisico de padua	Rrtinp	997,5	2,24
Roca de calidad regular anfibolitas de padua	Rrap	337,41	0,76
Roca de calidad regular cuarcitas del complejo cajamarca	Rrccc	1.396,55	3,13
Roca de calidad regular tonalitas del stock de Manizales	Rrtsm	1.685,86	3,78
Roca de calidad regular esquistos y cuarcitas del complejo cajamarca	Rreccc	2.122,26	4,76
Roca de calidad regular esquistos del complejo cajamarca	Rrecc	5.695,10	12,77
Roca de calidad regular andesitas	Rra	6.802,26	15,25
Roca de mala calidad filitas del complejo cajamarca	Rmfcc	234,37	0,53
Roca de mala calidad flujos andesíticos	Rmfa	43,26	0,1
Roca de mala calidad tonalitas del intrusivo neisico de padua	Rmtinp	455,03	1,02
Roca de mala calidad anfibolitas de padua	Rmap	1.124,76	2,52
Roca de mala calidad tonalitas del stock de Manizales	Rmtsm	955,8	2,14
Roca de mala calidad andesitas	Rma	2.128,29	4,77
Roca de mala calidad esquistos del complejo cajamarca	Rmeccc	5.842,50	13,1
Roca de muy mala calidad anfibolitas de padua	Rmmap	146,94	0,33
Roca de muy mala calidad andesitas	Rmma	41,17	0,09
Roca de muy mala calidad esquistos del complejo cajamarca	Rmmeccc	265,55	0,6
Suelo residual arcilloso esquistos del complejo cajamarca	Sraecc	191,07	0,43
Suelo residual limo-arcilloso tonalitas del intrusivo neisico de padua	Srlatinp	34,08	0,08
Suelo residual limo-arcilloso anfibolitas de Padua	Srlaap	6,86	0,02
Suelo residual limo-arcilloso tonalitas stock de Manizales	Srlatsm	23,49	0,05
Suelo residual arcillo-limoso andesitas	Srala	198,02	0,44
Suelo transportado coluvial	Stco	474,03	1,06
Suelo transportado aluvial	Sta	871,5	1,95
Suelo transportado de flujo piroclástico	Stfp	5.902,74	13,23
Suelo transportado de flujo lahárico	Stfl	2.125,88	4,77
Suelo transportado de terraza	Stt	75,45	0,17
Suelo transportado fluvio-glaciar	Stf	794,66	1,78
	Total	44.609	100

Figura 6

a) Mapa de UGS a escala 1:25.000, b) Leyenda



Unidades Geológicas Superficiales	
—	Falla
- - -	Lineamiento
—	Contacto

Rmmba	Roca de muy buena calidad Andesitas	Rrecc	Roca de regular calidad esquistos del C. Cajamarca
Rba	Roca de buena calidad Andesitas	Rreccc	Roca de regular calidad esq y cuarcitas del C. Cajamarca
Rbecc	Roca de buena calidad esquistos del Complejo Cajamarca	Rrfa	Roca de regular calidad flujos andesíticos
Rbfa	Roca de buena calidad flujos andesíticos	Rrfcc	Roca de regular calidad filitas del Complejo Cajamarca
Rbvc	Roca de buena calidad volcanogénicas de la Fm Casabianca	Rrtinp	Roca de regular calidad tonalitas del Int. Néisico de Padua
Rma	Roca de mala calidad Andesitas	Rrtsm	Roca de regular calidad tonalitas del Stock de Manizales
Rmap	Roca de mala calidad Anfibolitas de Padua	Rrvcc	Roca de regular calidad volcanogénicas de la Fm Casabianca
Rmecc	Roca de mala calidad esquistos del Complejo Cajamarca	Sraecc	Suelo residual arcilloso esquistos del Complejo Cajamarca
Rmfa	Roca de mala calidad flujos andesíticos	Srala	Suelo residual arcillo-limoso Andesitas
Rmfcc	Roca de mala calidad filitas del Complejo Cajamarca	Srlaap	Suelo residual limo-arcilloso Anfibolitas de Padua
Rmma	Roca de muy mala calidad Andesitas	Srlatinp	Suelo residual limo-arcilloso tonalitas del Int. Neis de Padua
Rmmap	Roca de muy mala calidad Anfibolitas de Padua	Srlatsm	Suelo residual limo-arcilloso tonalitas Stock de Manizales
Rmmecc	Roca de muy mala calidad esquistos del C. Cajamarca	Stf	Suelo transportado fluvio-glaciario
Rmtinp	Roca de mala calidad tonalitas del Int. Néisico de Padua	Stfl	Suelo transportado de flujo lahárico
Rmtsm	Roca de mala calidad tonalitas del stock de Manizales	Stfp	Suelo transportado de flujo piroclástico
Rra	Roca de regular calidad Andesitas	Stt	Suelo transportado de terraza
Rrap	Roca de regular calidad Anfibolitas de Padua	Sta	Suelo transportado aluvial
Rrecc	Roca de regular calidad cuarcitas del Complejo Cajamarca	Stco	Suelo transportado coluvial

9.3 Subunidades Geomorfológicas (SGMF)

La geomorfología es el factor clave para analizar la evolución del territorio y su relación con la ocurrencia de procesos con características definidas. Según Carvajal (2011), a una escala de 1:25.000 las subunidades geomorfológicas reflejan aspectos relacionados con la morfometría, la morfología, la disposición estructural y las diferencias en los materiales, así como los procesos morfodinámicos actuales que los afectan.

9.3.1 Elaboración del mapa de Subunidades Geomorfológicas

Para la generación del mapa de subunidades geomorfológicas, se emplearon los mapas de sombras, de pendientes y orientación. También, imágenes satelitales de Google Earth Pro para visualizar y delimitar las geoformas. Posteriormente, para la clasificación y denominación de las geoformas se usó el glosario de unidades, subunidades y elementos geomorfológicos proporcionado por la Guía metodológica para la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25.000 (SGC, 2017). Además, el Glosario de términos geomorfológicos presentado en la "Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:100.000" (SGC, 2012). Para la cartografía de las geoformas indicativas de avenidas torrenciales presentes en la zona de tránsito y depósito de la cuenca de análisis, se empleó la propuesta de la guía metodológica para avenidas torrenciales del SGC (2021).

Las SGMF predominantes (Figura 7) corresponden a flujos de lava, depósitos piroclásticos y laderas erosivas. Estas presentan movimientos en masa activos, que aportan sedimentos directamente a los cauces y pueden provocar avenidas torrenciales, especialmente durante precipitaciones intensas. En el área de estudio también se encuentran depósitos fluvio-torrenciales clastosoportados, dispuestos caóticamente en las márgenes de los ríos Aguacatal y Gualí. Estos

depósitos evidencian la capacidad de transporte de los ríos y reflejan diferentes comportamientos del drenaje en términos de caudal, velocidad y capacidad de transporte. Las geoformas fluviales identificadas en campo están asociadas con estas características, destacándose terrazas fluviotorrenciales y escarpes fluviotorrenciales, que actúan como indicadores de aporte y depósito en las avenidas torrenciales.

En el área de estudio se identificaron cinco ambientes morfogenéticos (Tabla 3) que comprenden 52 subunidades geomorfológicas (Tabla 4). El ambiente volcánico presenta la mayor área, correspondiente al 43.34% (19.332,72 ha) del área cartografiada, seguido por el ambiente denudacional con el 40.30% (17.975,61 ha). El ambiente estructural abarca el 11.60% (5.174,53 ha), mientras que los ambientes glacial y fluvial representan menos del 5% del área cartografiada (Figura 7). La descripción a detalle de las subunidades geomorfológicas del área de estudio puede consultarse en el **Apéndice B**. En la Figura 8a se muestra el mapa de SGMF de la parte alta de la cuenca del Río Gualí y la leyenda en la Figura 8b.

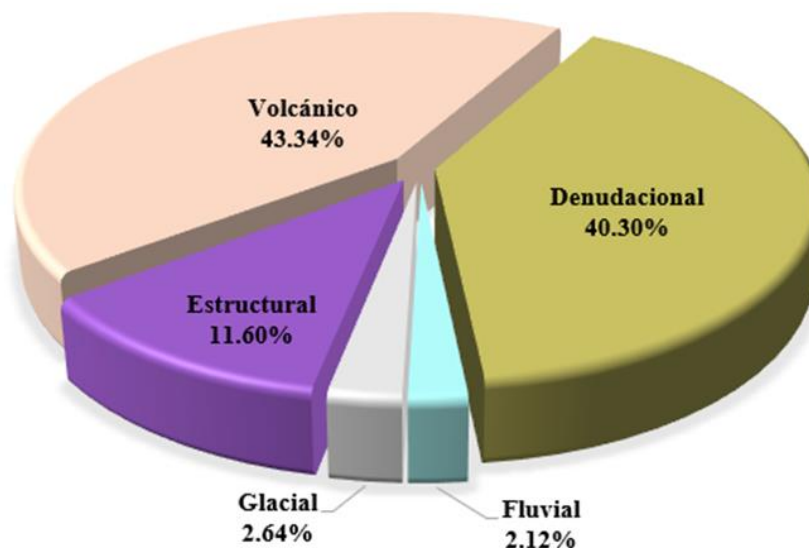
Tabla 3

Relación de ambientes morfogenéticos de la zona de estudio

AMBIENTE	ÁREA (ha)	ÁREA (%)
Denudacional	17975.61	40.30
Fluvial	946.95	2.12
Glacial	1179.10	2.64
Estructural	5174.53	11.60
Volcánico	19332.72	43.34
Área Zona de Estudio	44.609	100.00

Figura 7

Distribución porcentual de los ambientes morfogenéticos del área de estudio

**Tabla 4**

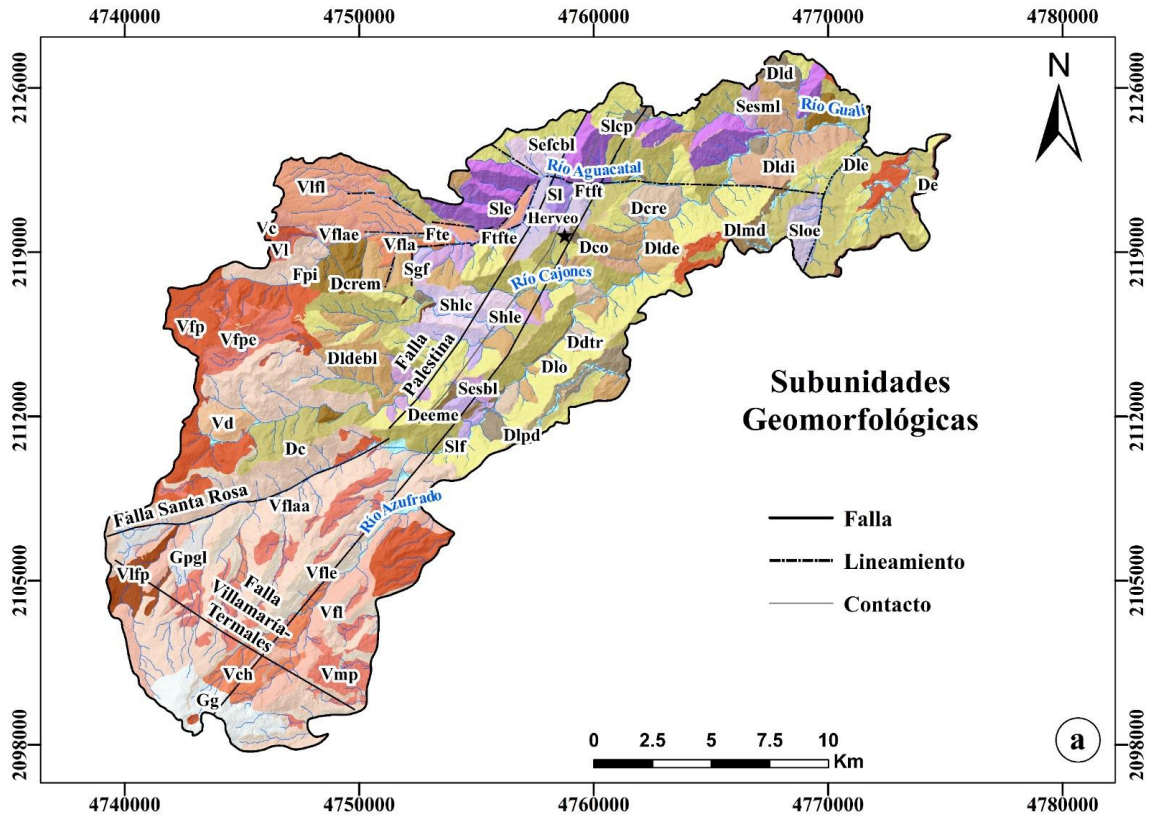
Áreas de las SGMF de la zona de estudio

AMBIENTE	SUBUNIDAD GEOMORFOLÓGICA	ÁREA (ha)	ÁREA (%)
Denudacional	Cima	467.3	1.05
	Lóbulo coluvial y de solifluxión	45.4	0.10
	Colina remanente	535.5	1.20
	Cerro remanente	633.0	1.42
	Lóbulo de deslizamiento indiferenciado	2.3	0.01
	Lóbulo de deslizamiento traslacional	1.3	0.00
	Escarpe	112.9	0.25
	Escarpe de erosión menor	179.2	0.40
	Loma denudada	674.2	1.51
	Lomo denudado	1045.9	2.34
	Lomo denudado alto de longitud larga	130.4	0.29
	Lomo denudado alto de longitud media	19.6	0.04
	Lomo denudado bajo de longitud corta	86.3	0.19
	Lomo denudado bajo de longitud larga	1255.3	2.81
	Lomo denudado moderado de longitud larga	261.0	0.59
	Lomeríos disectados	928.6	2.08
	Ladera erosiva	5939.4	13.31
	Lomeríos muy disectados	206.5	0.46
	Ladera ondulada	5335.3	11.96
	Lomeríos poco disectados	116.3	0.26
Fluvial	Plano o llanura de inundación	871.5	1.95
	Terraza de erosión	8.3	0.02

AMBIENTE	SUBUNIDAD GEOMORFOLÓGICA	ÁREA (ha)	ÁREA (%)
Estructural	Terraza fluviotorrencial	38.3	0.09
	Escarpe de terraza fluvio-torrencial	28.8	0.06
	Espolón facetado bajo de longitud larga	301.4	0.68
	Espolón bajo de longitud larga	519.0	1.16
	Espolón moderado de longitud larga	247.0	0.55
	Gancho de flexión	50.8	0.11
	Ladera contrapendiente homoclinal	453.7	1.02
	Ladera estructural homoclinal	346.7	0.78
	Lomo	167.2	0.37
	Ladera contrapendiente	1231.8	2.76
	Ladera estructural	732.2	1.64
	Lomo de falla	232.9	0.52
	Escarpe de línea de falla	77.5	0.17
	Lomeríos estructurales	814.3	1.83
	Glacial	Masa Glaciar	799.0
Plano Glaciolacustrino		380.1	0.85
Cráter Volcánico		73.8	0.17
Volcánico	Campo de hummocks	794.7	1.78
	Domo volcánico	290.2	0.65
	Flujo de lava	1463.4	3.28
	Flujo lahárico aterrazado	285.0	0.64
	Flujo de lava en bloque	7032.8	15.77
	Escarpe de flujo lahárico aterrazado	474.1	1.06
	Escarpe de flujo de lava	1534.6	3.44
	Flujo piroclástico aterrazado	3036.6	6.81
	Escarpe de flujo piroclástico aterrazado	204.4	0.46
	Ladera volcánica	128.3	0.29
	Lóbulo de flujo lahárico	1366.8	3.06
	Lóbulo de flujo piroclástico	388.8	0.87
Manto de piroclastos	2259.2	5.06	
ÁREA TOTAL ZONA DE ESTUDIO		44.609	100

Figura 8

a) Mapa de SGMF a escala 1:25.000, b) Leyenda



Dc	Cima	Sefcbl	Espolón faceteado bajo de longitud larga
Deo	Lobulo coluvial y de solifluxion	Sesbl	Espolón bajo de longitud larga
Dcre	Colina remanente	Sesml	Espolón moderado de longitud larga
Dcrem	Cerro remanente	Sgf	Gancho de flexión
Ddi	Lóbulo de deslizamiento indiferenciado	Shlc	Ladera contrapendiente homoclinal
Ddtr	Lóbulo de deslizamiento traslacional	Shle	Ladera estructural homoclinal
De	Escarpe	Sl	Lomo
Deeme	Escarpe de erosión menor	Slep	Ladera contrapendiente
Dld	Loma denudada	Sle	Ladera estructural
Dlde	Lomo denudado	Sif	Lomo de falla
Dldeal	Lomo denudado alto de longitud larga	Sife	Escarpe de línea de falla
Dldeam	Lomo denudado alto de longitud media	Sloe	Lomerios estructurales
Dldebc	Lomo denudado bajo de longitud corta	Vc	Cráter Volcánico
Dldebl	Lomo denudado bajo de longitud larga	Vch	Campo de hummocks
Dldeml	Lomo denudado moderado de longitud larga	Vd	Domo volcánico
Dldi	Lomerios disectados	Vfl	Flujo de lava
Dle	Ladera erosiva	Vfla	Flujo lahárico aterrazado
Dlmd	Lomerios muy disectados	Vflaa	Flujo de lava en bloque
Dlo	Ladera ondulada	Vflae	Escarpe de flujo lahárico aterrazado
Dlpd	Lomerios poco disectados	Vfle	Escarpe de flujo de lava
Fpi	Plano o llanura de inundación	Vfp	Flujo piroclástico aterrazado
Fte	Terraza de erosión	Vfpe	Escarpe de flujo piroclástico aterrazado
Ftft	Terraza fluviotorrencial	VI	Ladera volcánica
Ftfte	Escarpe de terraza fluvio-torrencial	Vfl	Lóbulo de flujo lahárico
Gg	Masa Glaciar	Vflp	Lóbulo de flujo piroclástico
Gpgl	Plano Glaciolacustrino	Vmp	Manto de piroclastos

9.4 Inventario de procesos morfodinámicos (IPM)

Los procesos morfodinámicos corresponden a los ocurridos superficialmente que afectan una geoforma a lo largo del tiempo. Dentro de estos procesos se incluyen los que están activos, así como los inactivos, y los que se pueden reactivar en un futuro (SGC, 2013). Este insumo es de gran importancia para entender la dinámica del paisaje y para la evaluar la amenaza por avenidas torrenciales en la cuenca de estudio.

Para generar el mapa de inventario de procesos morfodinámicos, se tuvo en cuenta el catálogo del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) (SGC, 2014) y el registro de puntos morfodinámicos del área de estudio. Estos últimos fueron tomados en campo como parte de la asignatura campo III y están registrados en la tesis “Análisis multitemporal de los movimientos en masa y descripción morfométrica para un sector del municipio de Herveo, Tolima a escala 1:25.000” de Castillo & Quintero (2023). Se denominan “AK” en el mapa de inventario de procesos morfodinámicos que se encuentra en el **Apéndice D**.

9.5 Modelamiento Hidrológico e Hidráulico

Para generar el modelo hidrológico e hidráulico en la parte alta de la cuenca del Rio Gualí se requirió de los softwares HEC-HMS, HEC-RAS Y QGIS v 3.16.0 diseñados para este tipo de análisis. De los anteriores, HEC-HMS se empleó para la modelación de los datos pluviométricos tomados de González y Padilla (2023), obteniendo como resultado los caudales máximos. Estos caudales se introdujeron en HEC-RAS, a partir del cual se generaron datos de isóbatas e isotacas para varios periodos de retorno dando lugar a las áreas propensas a inundaciones. Finalmente, para la realización del análisis morfométrico y la dinámica hidrológica de la cuenca, se utilizó el software QGIS v 3.16.0. El análisis hidrológico e hidráulico requiere de componentes primordiales

como la morfometría de la cuenca, para determinar el tipo de modelo hidrológico a utilizar; el cálculo de las curvas de intensidad-duración-frecuencia y hietogramas de diseño; y el cálculo del tiempo de concentración y número de curva necesarios para el cálculo de los caudales máximos.

Insumos de Drenajes y Subcuenca. Para generar la red de drenaje y delimitar la parte alta de la cuenca del Río Gualí, se realiza la extracción de los datos topográficos del MDE adquirido del portal ASF- ALOS PALSAR. Por medio del software QGIS v 3.16.0 se definieron los límites de la subcuenca y se aplicaron algoritmos hidrológicos para identificar el sistema de drenaje principal y sus afluentes.

Morfometría de la cuenca. La morfometría de la cuenca es crucial en el análisis hidrológico, ya que proporciona información sobre la forma, tamaño y características físicas del área de drenaje, lo cual es vital para evaluar la torrencialidad y tipos de flujo que puede generar (SGC, 2021). De acuerdo con Valencia Ortiz y Martínez (2023), la caracterización morfométrica cuantitativa incluye el análisis del relieve, sistema de drenaje y textura del cauce. Lo que permite evaluar la dinámica de la cuenca y su susceptibilidad a movimientos en masa como deslizamientos, caídas y flujos. Estos factores, junto con la pendiente y la red de drenajes, afectan la respuesta hidrológica durante precipitaciones intensas, pudiendo provocar avenidas torrenciales y erosión del suelo.

Posteriormente, se analizaron los parámetros morfométricos de la parte alta de la cuenca del Río Gualí usando ecuaciones ya establecidas internacionalmente para este enfoque y compiladas por Valencia Ortiz & Martínez (2023) en “Morphometric Evaluation and Its Incidence in the Mass Movements Present in the Chicamocha Canyon, Colombia” mostradas en la [Tabla 5](#).

Tabla 5*Métodos para calcular parámetros morfométricos*

Métodos de cálculo de parámetros morfométricos				
Parámetro morfométrico	Método	Referencia	Resultado cuenca	
Red de drenaje	Área (km ²) (A)	Software SIG	Procesamiento GIS	446.00
	Perímetro (km) (P)	Software SIG	Procesamiento GIS	139.02
	Perímetro Relativo (Pr)	Pr = A/P	Schumm (1956)	3.21
	Longitud de la cuenca (km) (Lb)	Software SIG	Schumm (1956)	40.00
	Relación Longitud-área (Lar)	Lar=1.4 x A ^{0.6}	Hack (1957)	54.42
	Orden de drenaje	Rango Jerárquico	Strahler (1952)	5
	Número de drenaje (Nu)	Nu=N1+N2...+Nn	Horton (1945)	639
	Orden de drenaje total	Suma Orden de drenaje	Procesamiento GIS	5
	Longitud total del drenaje (Lu) (km)	Lu=L1+L2...+Ln	Strahler (1964)	686.55
				1-2 4.36
				2-3 4.52
				3-4 4.80
			4-5 2	
			5-6 1	
	Factor de forma (Rf)	Rf=A/Lb ²	Horton (1932)	0.28
Textura y flujo del drenaje - Análisis de movilidad	Densidad de drenaje (Dd)	Dd=Lu/A	Horton (1932)	1.54
	Frecuencia de flujo (Fs)	Fs = Nu/A	Horton (1932)	1.43
	Textura de drenaje (T)	T=DdxFs	Smith (1950)	2.21
	Coefficiente de torrencialidad (Ct)	Ct=Drenajes de orden 1/A	Diaz (1987)	1.11
Caracterización del Relieve	Altura media de la cuenca (Hm)	Software SIG	Procesamiento GIS	2798.81
	Pendiente media (°)	Software SIG	Procesamiento GIS	25.08
	Pendiente media (%)	Software SIG	Procesamiento GIS	50.03
	Relieve total de la cuenca (H) (m)	H=Z-z	Strahler (1964)	4312.00
	Relación de relieve (Rhl) (m)	Rhl = H/Lb	Schumm (1956)	107.80
	Factor de asimetría (Af)	Af =100 x (Ar/A)	Keller y Pinter (1966)	44.17
	Coefficiente de Compacidad (Kc)	Kc = 0.28 x (P/√A)	Gravelius (1914)	1.84
	Coefficiente de masividad (Cm)	Cm = Hm/A	Martonne (1940)	6.28
	Coefficiente orografico (Co)	Co = ((Hm/1000) ²)/A	Fournier (1960)	0.02
	Relación de elongación (Re)	Re = (1.128 x √A)/L	Schumm (1956)	0.60
	Relación de circularidad (Rc)	Rc = 4pi x A/P ²	Miller (1953)	0.29
	Longitud total del frente montañoso (Lmf) (Km)	Software SIG	Procesamiento GIS	44.79

Métodos de cálculo de parámetros morfométricos			
Parámetro morfométrico	Método	Referencia	Resultado cuenca
Línea recta entre los extremos del frente montañoso (Ls) (Km)	Software SIG	Procesamiento GIS	36.57
Sinuosidad del frente montañoso (Smf)	$Smf = Lmf / Ls$	Bull y McFadden (1977)	1.22
Numero de rugosidad (Rn)	$Rn = Dd \times (H/1000)$	Patton y Baker (1976)	6.64
Numero de rugosidad de meltón (MRn)	$MRn = H/A^{0.5}$	Melton (1965)	3.11

A partir de la metodología y ecuaciones previamente descritas, se realiza el análisis morfométrico para la parte alta de la cuenca del Río Gualí, infiriéndose lo siguiente:

En cuanto a los parámetros de la red de drenaje, se menciona que el parámetro de Relación de Bifurcación (Rb) describe la relación de cambio entre los órdenes de los drenajes. Por lo tanto, el Río Gualí en su parte alta presenta una relación 3-4, lo cual representan un valor alto debido a un factor orográfico controlado por las condiciones geológicas asociadas al trazo de la falla de Santa Rosa. Según el parámetro Factor de Forma (Rf), se estableció que la parte alta de cuenca del Río Gualí presenta una geometría elongada con gran desnivel, lo que indica probabilidad moderada de ocurrencia de crecientes súbitas.

Por otro lado, con respecto a la textura del drenaje, se encuentra el parámetro de Densidad de Drenaje (Dd), que indica la relación entre la longitud total de los drenajes de la cuenca y el área total de esta. Los valores bajos de este parámetro indican la eficacia del drenaje al examinar la capacidad de desalojar un volumen de agua. El Río Gualí en la parte alta presenta una baja densidad de drenaje, lo cual indica que requiere más tiempo para desalojar el volumen de agua acumulado en su interior.

En cuanto a la caracterización del relieve, el Coeficiente de Compacidad (Kc) compara la forma de la cuenca con la de una circunferencia. Se define con el perímetro de la cuenca y el área

de la cuenca. El grado de aproximación de este índice a la unidad indicará la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de agua de escorrentía, siendo más acentuado cuanto más se aproxime al índice.

Según el resultado, la parte alta del Río Gualí tiene forma de cuenca oval oblonga a rectangular oblonga, lo que indica la tendencia de no concentrar fuertes volúmenes de agua por escorrentía desde su superficie. Además, el Coeficiente de Circularidad (R_c) también define la capacidad de la cuenca para evacuar el agua de escorrentía, basándose en la superficie de la cuenca. El coeficiente obtenido para la parte alta de la cuenca del Río Gualí muestra una tendencia hacia cuencas intermedias o ligeramente alargadas.

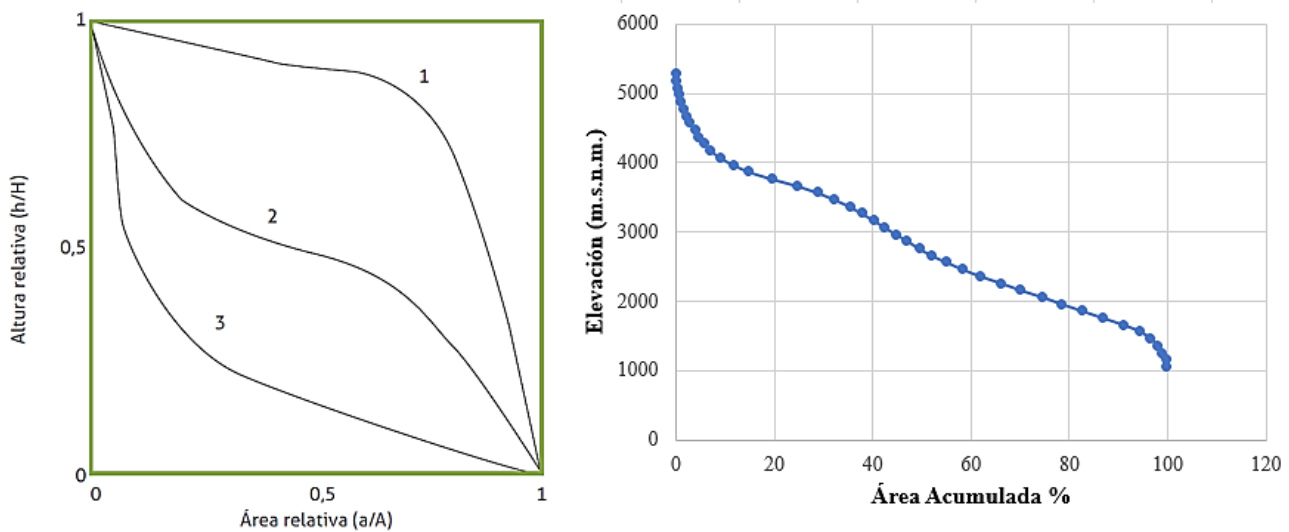
Curva hipsométrica. Es un parámetro importante en la evaluación morfométrica de las cuencas. Esta relaciona el área de la superficie de la cuenca, por encima de una elevación dada, con el estado de erosión del cauce (Strahler, 1952). Para la construcción de la curva hipsométrica, se recopilan datos de elevación para el área de estudio a partir del MDE. Estos se clasifican en intervalos y se calcula el área correspondiente a cada intervalo en una hoja de cálculo. Luego, se determina las fracciones acumuladas del área total para cada intervalo de elevación. Posteriormente, con las herramientas de gráfico, se crea un gráfico de dispersión, con la elevación en el eje Y y la fracción acumulada del área en el eje X. Esto permite visualizar la distribución de las elevaciones en el área de estudio y analizar la topografía del terreno.

A continuación, se describen tres condiciones como se muestra en la Figura 9a, la curva 1 define cuencas jóvenes, donde existe un gran potencial de erosión (socavación del fondo del cauce); la curva 2 define cuencas maduras, donde existe equilibrio (socavación del fondo y lateral) y la curva 3 cuencas seniles, donde ocurren condiciones de deposición lateral y socavación (Valencia Ortiz & Martínez, 2023). De acuerdo con estas condiciones, se observa, en la Figura 9b, que la parte alta de la Cuenca del Río Gualí presenta una curva en transición entre las curvas

1 y 2, esto significa que la cuenca ha experimentado procesos de erosión y desarrollo, en busca de una estabilización en su forma y relieve.

Figura 9

a) Esquema ilustrativo de la definición de curva hipsométrica (Quezada y Jensen, 2010 como se citó en (SGC, 2021). b) Curva hipsométrica para el área de estudio

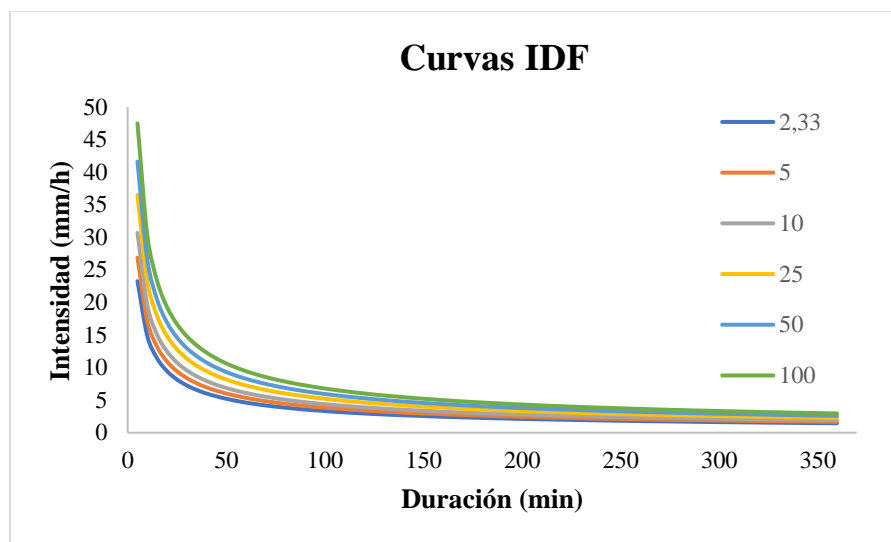


Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) e Hietogramas de diseño. Para evaluar el riesgo de inundación en Herveo, sería ideal contar con una estación limnimétrica para monitorear los niveles del río, pero debido a la falta de esta infraestructura, se usan datos de estaciones pluviométricas. Estas estaciones registran la cantidad de precipitación en la región, y con estos datos se elaboran curvas IDF e hietogramas de diseño para determinar la intensidad y duración de lluvias, así como la probabilidad de excedencia vinculada a un periodo de retorno. Aunque el IDEAM dispone de análisis de curvas para 110 estaciones en el país, no hay análisis disponibles para el área de estudio en Herveo, por lo que se recopilieron datos hidrometeorológicos de estaciones con al menos 30 años de registro diario. González y Padilla (2023) seleccionaron nueve estaciones pluviométricas con series de datos consistentes y considerables, abarcando 47

años (1975-2021): La Leonera, El Edén, Murillo, Alto del Oso, Manzanares, Marulanda, Santa Bárbara, Villahermosa 1 y Villahermosa 2. Para la construcción de las curvas IDF se organizan los datos en una hoja de cálculo, clasificando las precipitaciones por duración, de 5 a 360 min y por periodo de retorno (2,33; 5; 10; 25; 50 y 100 años). Se aplica el método simplificado de Vargas y Diaz-Granados (1998) para el cálculo de la intensidad de precipitación, el cual relaciona las variables de precipitación máxima promedio anual en 24h, la duración de la lluvia, el promedio multianual del número de días con lluvia al año y la precipitación media anual. Finalmente, se traza un gráfico de líneas que permite visualizar cómo varía la intensidad de la lluvia en función del tiempo y la frecuencia de ocurrencia (Figura 10). Este método es útil en zonas sin registros históricos de caudales, permitiendo estimar con precisión el riesgo de inundación en la región.

Figura 10

Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para el área de estudio



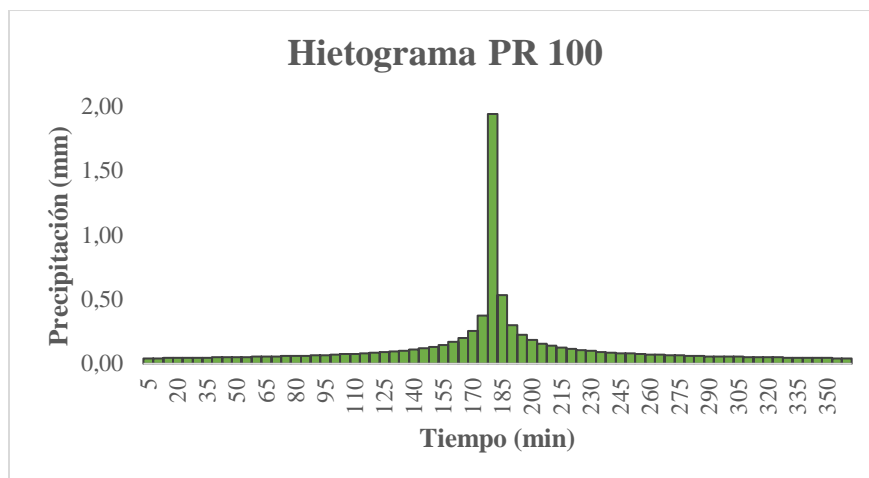
Nota. El gráfico relaciona la intensidad de lluvia en milímetros por hora (eje y) con la duración en minutos (eje x) para los periodos de retorno de 2,33;5,10,25,50 y 100 años.

Por otro lado, los hietogramas de diseño corresponden a una representación gráfica de la distribución de la intensidad de lluvia (mm/h) a lo largo del tiempo (min). Existen varios métodos para la generación de los hietogramas de diseño, en el presente, se emplea el de bloques alternos de Chow et al., (1994), el cual permite especificar la profundidad de precipitación que ocurre en los intervalos de tiempo sucesivos de una duración homogénea, a partir de las curvas IDF para cada periodo de retorno.

Para la construcción del hietograma de diseño, se utilizan los datos de precipitaciones máximas correspondientes a diferentes intervalos de tiempo. Estos se organizan en una hoja de cálculo donde se clasifican en orden descendente y se divide la duración total de la precipitación en intervalos de tiempo iguales. Finalmente, los valores de precipitación se distribuyen colocando el valor máximo en el centro, seguido por el segundo valor más alto y así sucesivamente como se observa en la Figura 11.

Figura 11

Hietograma de diseño para un PR de 100 años para el área de estudio



Tiempo de concentración (Tc). Este examina como los aspectos morfométricos y morfológicos interactúan con el comportamiento hidráulico de una cuenca. El tiempo de concentración se define como el periodo necesario para que una gota de lluvia, caída en el punto más distante hidráulicamente dentro de la cuenca, transcurra la superficie hasta llegar al punto de salida (Ochoa, 2011). Para hallar este parámetro se tuvo en cuenta las fórmulas utilizadas en Valencia Ortiz & Martínez (2023) y mostradas en la Tabla 6. A partir de estas fórmulas, se obtuvieron los resultados individuales para cada una y luego se realizó un promedio de estos valores. Este parámetro guarda relación directa con la longitud del cauce principal y se calcula con los parámetros de este.

Tabla 6

Métodos para calcular el tiempo de concentración (Tc)

Parámetro morfométrico: Tiempo de Concentración (Tc)		
Método	Referencia	Resultado (h)
$T_c = 0.97K^{0.385}$, $K=Lc^3/H$	SCS Ranser (1986)	1.78
$T_c = [0.87Lc^3/H]^{0.385}$	California Highways and Public Works (1955)	2.76
$T_c = 0.066[(L/\sqrt{So})^{0.77}]$	Kirpich (1940)	3.05
$T_c = 0.3[(Lc/So^{0.25})^{0.76}]$	Témez (1978)	3.36
$T_c = (4\sqrt{A} + 1.5Lc) / (25.3\sqrt{LcSo})$	Giandotti (1934)	3.18
$T_c = 0.3 [Lc/(So^{0.25})]^{0.75}$	Enderson y Wooding (1964)	3.25

Cálculo del Número de curva (CN). Este parámetro se utiliza para estimar la escorrentía directa producida por una tormenta de lluvia y relaciona el tipo, el uso del suelo y el respectivo grupo hidrológico, definido por la capacidad de infiltración superficial (Mishra & Singh, 2003). Para calcular el CN, se requieren varios insumos clave. Primero, se consideran las características de la cuenca, como el tipo y tratamiento de las coberturas vegetales, así como su grupo hidrológico. La información sobre las coberturas vegetales se extrajo del mapa de Coberturas de la Tierra de

Colombia del IDEAM (2018). Además, para la clasificación hidrológica de los suelos se tuvo en cuenta la clasificación descrita en Chow et al., (1994). Con el objetivo de simplificar el cálculo, se establece el valor del CN según la fórmula presentada por Mishra & Singh (2003), al cual se le asigna un número entero dentro del rango de 0 a 100. Para efectos de esta investigación, el valor del CN calculado para el área de estudio fue de 79. En estas condiciones, la escorrentía tiende a ser mayor a la infiltración con lo cual se favorecen los procesos erosivos, las inundaciones e incluso la desertificación del territorio.

9.5.1 Cálculo del caudal HEC-HMS

El caudal máximo hace referencia a la máxima cantidad de agua que puede pasar por un determinado punto de un río, canal u otro cuerpo de agua durante un periodo de tiempo específico. Este valor proporciona información sobre la capacidad de un sistema fluvial para transportar agua (World Meteorological Organization (WMO), 2012). Para el cálculo de caudales máximos para cada periodo de retorno en HEC-HMS, se importaron y procesaron los datos previamente obtenidos. Estos incluyen el MDE pre-procesado, los parámetros morfométricos, el análisis de los datos pluviométricos, las curvas IDF, el CN y el TC.

Posteriormente, se procede a configurar el modelo de la cuenca, identificando la subcuenca y estableciendo el aforo en el sentido de aguas arriba-aguas abajo. Se determinan los hidrogramas de caudales para diversos periodos de retorno, utilizando el método de pérdidas por infiltración propuesto por el Soil Conservation Service (SCS) del CN. Además, se especifica el hietograma de precipitaciones previamente calculado para una duración de 3 horas. Para el método de transformación, se ha elegido el SCS hidrograma único. Finalmente, para el método de flujo base, no se han seleccionado parámetros debido a la ausencia de valores que indiquen la existencia de una escorrentía previa. Luego de especificar la distribución de la precipitación y configurar los

parámetros de simulación, se procede a ejecutar la simulación hidrológica. Con estos parámetros establecidos, se ejecuta el programa, obteniendo como resultado los caudales (Tabla 7) para cada uno de los diferentes periodos de retorno.

Tabla 7

Caudales máximos para cada periodo de retorno

Periodo de Retorno	2,33	5	10	25	50	100
Caudal (m^3/s)	3.4	4	4.5	5.4	6.1	12.9

9.5.2 Cálculo de velocidad y nivel de inundación HEC-RAS

El modelado hidráulico requiere del mapa de rugosidades del área de estudio. Este posee valores del coeficiente de Manning, que es un índice que determina la resistencia del flujo en un canal (Araya et al., 2018). Para obtener esta información preliminar, se utilizaron el mapa de coberturas de suelo del IDEAM (2018) y la tabla de índices de rugosidades de Manning (Chow et al., 1994).

Posteriormente, se determina la geometría y la preparación del modelo para el análisis hidráulico. La creación de la geometría se llevó a cabo utilizando la extensión HEC-GeoRAS con uso de las imágenes satelitales de Google Earth y las sombras, con el fin de obtener información del cauce, incluyendo elementos longitudinales, transversales y estructurales. Se comenzó creando la línea central del drenaje, representada por el cauce principal en un tramo de 41.603 metros. Luego, se definieron las orillas, separadas entre 6 y 12 metros, seguidas de las líneas de flujo que representan las llanuras de inundación, con dimensiones entre 20 y 50 metros. Posteriormente, se establecieron las líneas transversales que representan el perfil del cauce (batimetría). Se trazaron un total de 6.872 líneas transversales, separadas entre sí por 6 metros y con longitudes que varían de 400 a 612 metros.

La geometría creada se exportó a HEC-RAS, donde se introdujeron los datos de caudal para un flujo permanente, dado que el flujo del Río Gualí es constante. Luego, se establecieron las condiciones de contorno, utilizando la profundidad normal, ya que el flujo es uniforme y la pendiente del fondo del cauce es homogénea. Además, se establecieron las condiciones de régimen de flujo, correspondientes a un régimen subcrítico debido a la lentitud del flujo.

Una vez completado el procesamiento en HEC-RAS, los resultados numéricos se exportan a QGIS v 3.16.0 y se genera un mapa de isóbatas (Figura 12) e isotacas (Figura 13) para diferentes periodos de retorno. El recuadro en los mapas es una visualización ampliada de cómo varían los niveles de inundación y velocidad respectivamente, debido a que el área de estudio es muy grande y a ese nivel de detalle no es visible. Como resultado de este análisis, se determina el porcentaje de área afectada por las inundaciones, como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8

Área de afectación de niveles y velocidades máximas de inundación

Periodo de Retorno	Área de afectación km²	% de Afectación	Isobatas (m)	Isotacas (m/s)
2,33	2.79	0.63	1.61	13.13
5	2.77	0.62	1.64	13.07
10	2.78	0.62	1.67	12.67
25	2.78	0.62	1.72	13.88
50	2.79	0.63	1.75	13.88
100	2.82	0.63	1.99	17.30

Figura 12

Mapa de niveles de inundación

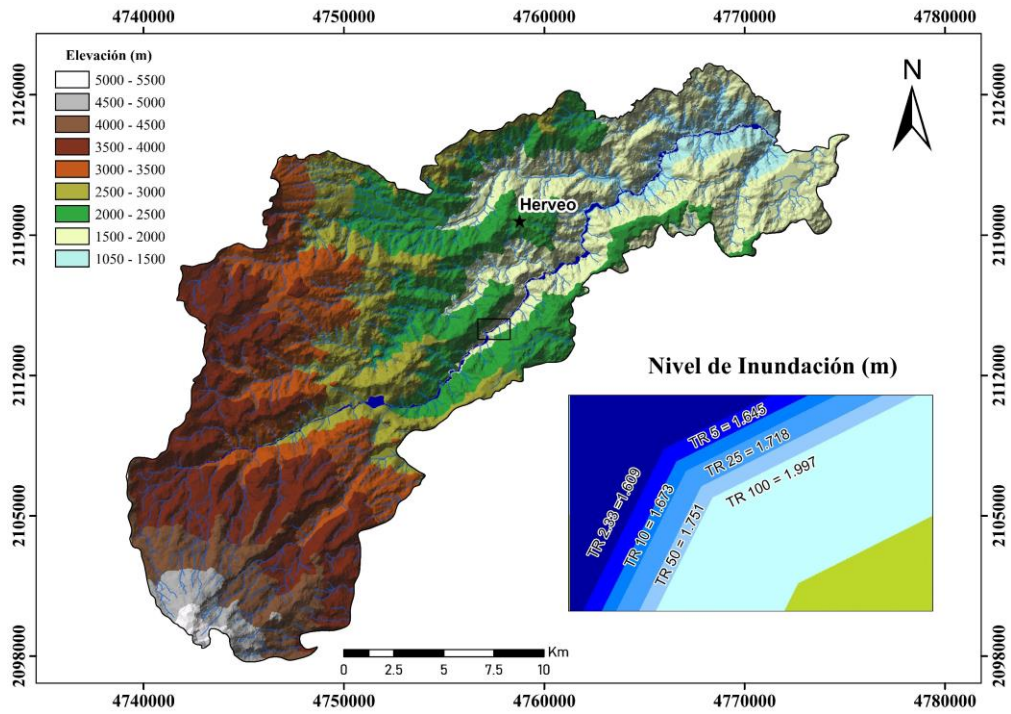
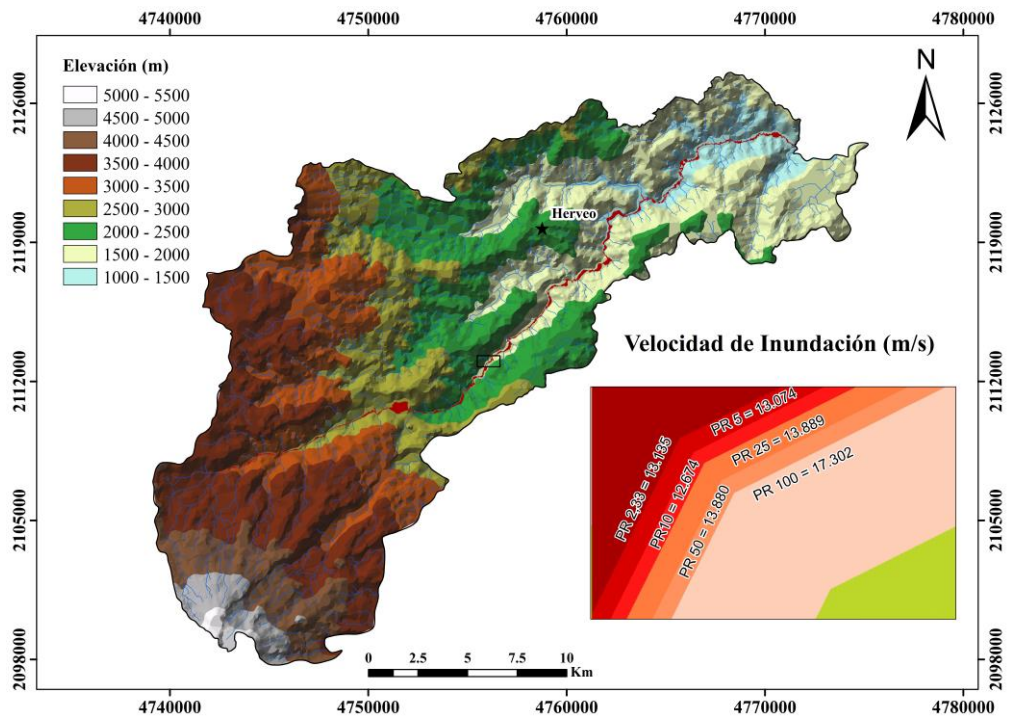


Figura 13

Mapa de velocidades de inundación



9.5.3 Amenaza por inundación

El cálculo de la amenaza por inundación se realiza teniendo en cuenta la clasificación por amenaza de inundación de la Agencia Federal de Gestión de Emergencias (FEMA). Esta se presenta en la Guía de Orientaciones para el Análisis y Cartografía de la Amenaza de Inundación (FEMA, 2018), y se obtiene a partir de la multiplicación del nivel de inundación por la velocidad (sección 9.5.2). Este resultado se expresa en cinco categorías de amenaza, bajo, medio, alto, muy alto y extremo como se observa en la [Tabla 9](#).

Tabla 9

Categorías de amenaza por inundación (FEMA, 2018) y áreas de afectación para cada PR

Categoría de Amenaza por Inundación	Nivel inundación* Velocidad (m ² /s)	Área de afectación (km ²)					
		PR 2.33	PR 5	PR 10	PR 25	PR 50	PR 100
Baja	< 0.2	2.56	2.05	2.49	2.41	2.39	1.91
Media	0.2 - 0.5	0.11	0.13	0.15	0.2	0.24	0.61
Alta	0.5 - 1.5	0.09	0.1	0.09	0.11	0.1	0.19
Muy Alta	1.5 - 2.5	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.05
Extrema	> 2.5	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04
Área de afectación total:		2.79	2.77	2.78	2.78	2.79	2.82

A lo largo del cauce del río Gualí varias veredas presentan zonas con amenaza extrema, muy alta y alta por inundación. Las veredas con mayor área de afectación se pueden visualizar en el mapa de amenaza por inundación, disponible en el **Apéndice D**. Para un periodo de retorno de 2,33 años las veredas con mayor amenaza son La Palma del municipio de Herveo y Potreros del municipio de Casabianca. Para un PR de 5 años las veredas Curubital del municipio de Herveo y La Joya del municipio de Casabianca. Para un PR de 10 años las veredas Gualí del municipio de Herveo y El Cardal del municipio de Casabianca. Para un PR de 25 años las veredas La Picota del municipio de Fresno y El Coral del municipio de Casabianca. Para un PR de 50 años las veredas

Holdown y Brisas del Gualí del municipio de Fresno. Para un PR de 50 años las veredas La Graciela y El Lembo del municipio de Casabianca y Holdown y Brisas del Gualí del municipio de Fresno. Para un PR de 100 años las veredas Playas del Gualí y El Nogal del municipio de Fresno y Yumba del municipio de Casabianca.

De la misma manera, se observa que, para todos los periodos de retorno, el área de afectación en amenaza por inundación baja es superior. Sin embargo, esto no garantiza que estas áreas catalogadas con baja probabilidad de inundación no se vean afectadas por un incremento en las precipitaciones máximas, como se ha evidenciado en periodos históricos afectados por el fenómeno de la Niña.

9.6 Control de Campo

El propósito del control de campo fue la caracterización de los depósitos de origen fluviotorrencial y la identificación de los elementos geomorfológicos, geológicos y morfodinámicos contribuyentes y resultantes de una avenida torrencial.

Durante la fase de reconocimiento y con el apoyo de los formatos para la caracterización de depósitos fluviotorrenciales de la guía metodológica (**Apéndice E**), se identificaron zonas de aporte, transporte y depósito a lo largo del cauce, así como tramos de erosión lateral y geoformas indicativas de avenidas torrenciales. A su vez, se hallaron evidencias de represamientos por acumulación de material vegetal y detrítico y se reconocieron puntos de interés, caracterizados por movimientos en masa de tipo deslizamiento y flujos de tierra que por su carga volumétrica pudieran llegar a contribuir al desarrollo de una avenida torrencial.

Para la adquisición de imágenes en campo se utilizaron tres mecanismos, un Dron DJI Phantom 4 RTK para imágenes 3D con el fin de generar un modelo digital de la superficie, un

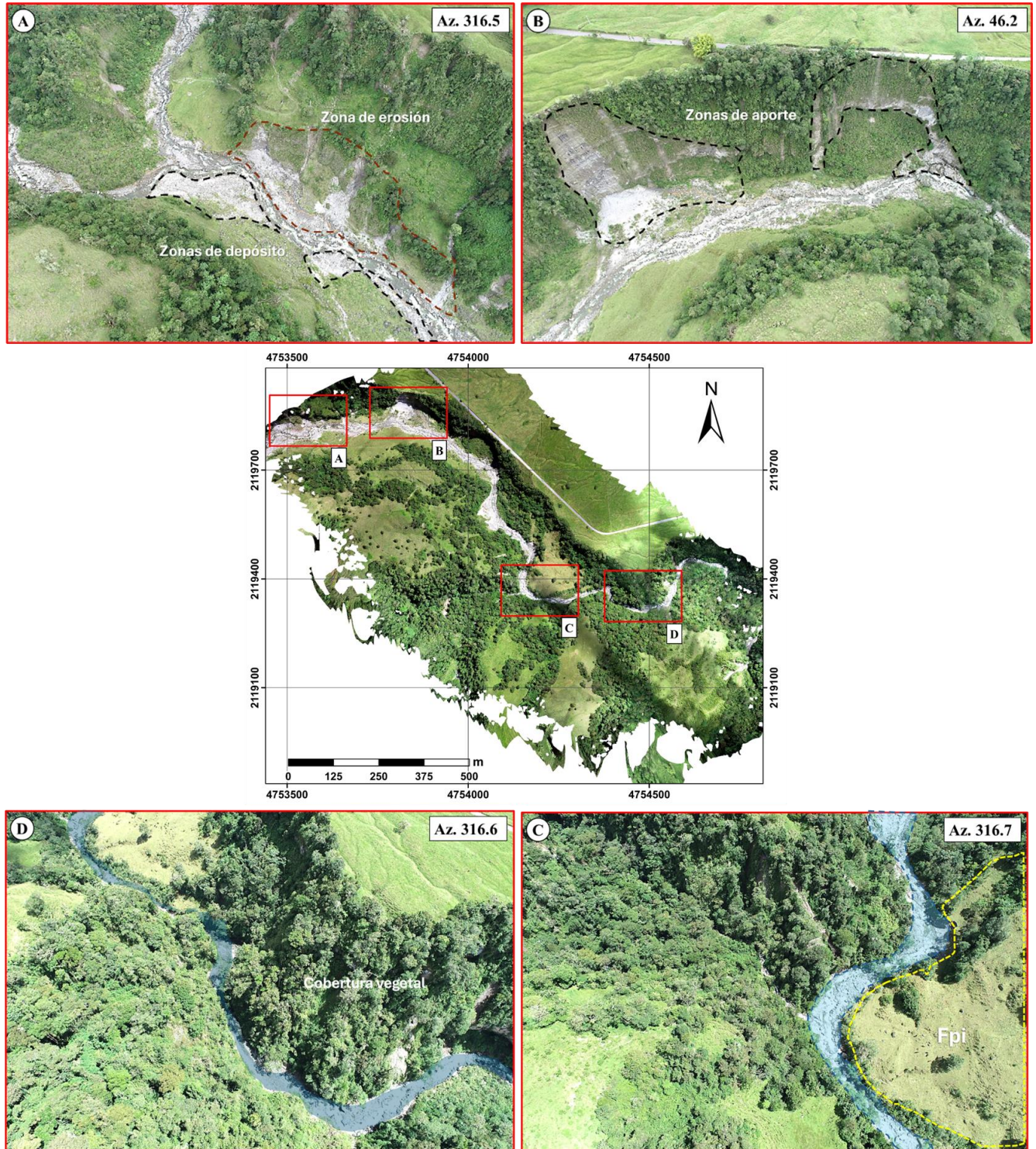
Dron DJI Mavic 2 Pro para toma de panorámicas y el aplicativo móvil Timestamp Camera para el registro fotográfico con coordenadas, obteniendo así tres tipos de imágenes denominadas RTK, MVC y SAJ, respectivamente. El tratamiento de las imágenes de dron se realizó con el software Agisoft Metashape Professional para la extracción de coordenadas y elaboración de un ortomosaico.

RTK-01: Vista en planta del Río Aguacatal, afluente del Río Gualí, en la que se analizan cuatro sectores del río en dirección aguas abajo, en la vía que conduce de la vereda El Plan a la vereda La Cristalina en el municipio de Herveo.

En la [Figura 14a](#) se identifican zonas de erosión lateral en el margen izquierdo y zonas de depósito de detritos en el margen derecho del río en dirección aguas abajo. En la [Figura 14b](#) se observa un escarpe de composición volcánica, pendiente pronunciada susceptible al desgaste y erosión del material rocoso, que a través de procesos hidrogravitacionales contribuye al aporte de sedimentos volcánicos de grano grueso retrabajados al drenaje. En la [Figura 14c](#) se identifica la geoforma (Fpi) llanura de inundación donde se observan clastos redondeados a subredondeados. En la [Figura 14d](#) se observa un bosque denso en ambos márgenes del río que, aunque retiene el suelo y disminuye la erosión, por la acción de lluvias intensas puede contribuir a la acumulación de detritos leñosos en el cauce que pueden represarse y actuar como diques naturales que obstruyan el flujo natural del agua y aumenten la intensidad de una avenida torrencial.

Figura 14

Ortomosaico del Río Aguacatal, afluente del Río Gualí a) E: 4753824 y N: 2119696, b) E: 4753824 y N: 2119696, c) E: 4754193 y N: 2119266 y d) E: 4754519 y N: 2119266



Nota. Fpi= Plano o llanura de inundación.

MVC-01-02: En la [Figura 15](#) y [Figura 16](#) se observan dos tipos de movimientos en masa que pueden generar represamientos en el cauce.

Según Cruden & Varnes (1996) en Castillo y Quintero (2023) en la [Figura 15](#) se observan flujos de tierra que presentan diversos movimientos con morfologías alargadas canalizadas compuestas por el material arrastrado. Por otro lado, en la [Figura 16](#) se observa un movimiento en masa de tipo compuesto y activo, con un estilo de deslizamiento traslacional en la parte superior de la corona, que termina como un flujo de detritos con una distribución confinada en la parte inferior. Estos movimientos son considerados fuente constante de sedimentos, que por su volumen y morfología del canal pudieran generar represamientos (SGC, 2017).

Figura 15

Flujos de tierra, a) E: 4752910 y N: 2119970

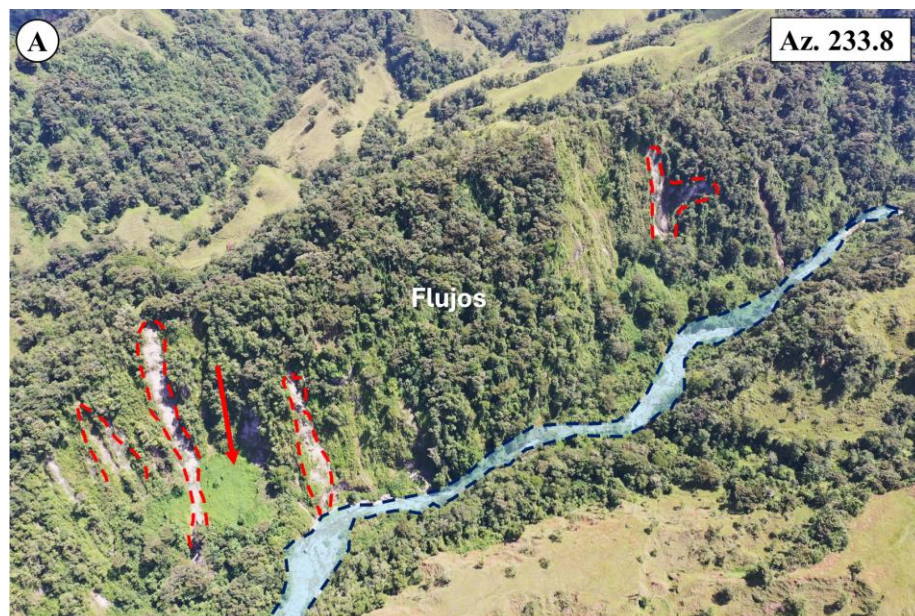
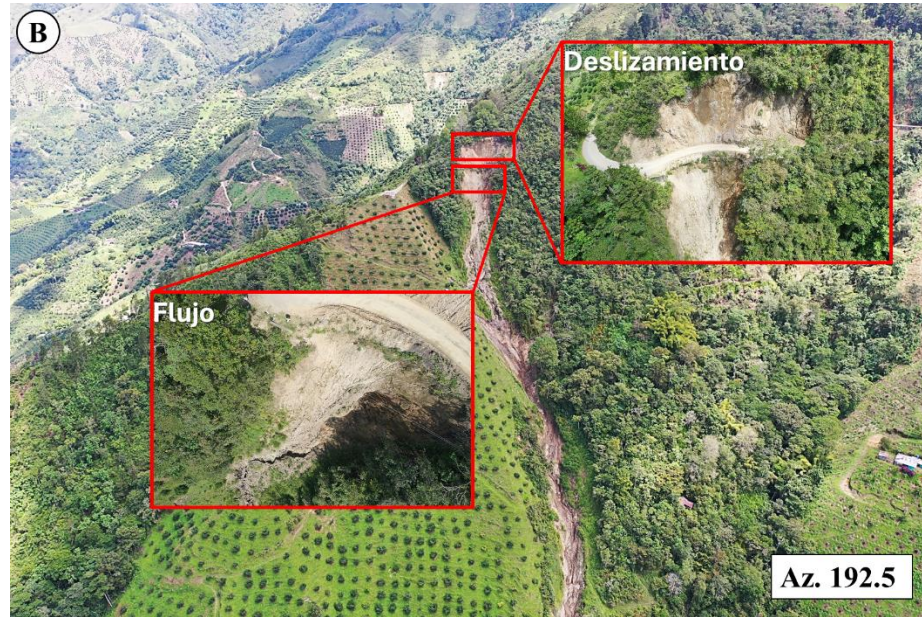


Figura 16

Movimiento en masa compuesto, E: 4751127 y N: 2120865



MVC-03: Panorámica de un tramo del río Aguacatal donde se observan las geoformas de llanura de inundación y terraza aluvial.

En este tramo del río Aguacatal (Figura 17) además de observarse las zonas de erosión y depósitos del cauce, pueden identificarse dos geoformas fluviotorrenciales, una terraza (Fte) sobre el margen derecho del canal (aguas abajo) y llanura de inundación (Fpi) con clastos redondeados a subredondeados. Asimismo, se identifican clastos más angulares en el margen izquierdo (aguas abajo) debido a la inestabilidad por erosión de la ladera.

Figura 17

Panorámica de un tramo del Río Aguacatal. a) E: 4753827 y N: 2119863



Nota. Fpi= Plano o llanura de inundación, Fte= Terraza de erosión.

SAJ-01: En las imágenes a y b de la Figura 18 se reconocen zonas de aporte de material detrítico provenientes de la erosión de una ladera y de un movimiento en masa, los dos eventos ubicados sobre la vía que conduce de la vereda Delgaditas a la vereda El Plan, en el municipio de Herveo.

En la Figura 18a se puede observar la erosión de una ladera incisada por un drenaje, a través del cual desciende el material erodado y posteriormente se canaliza. Además, se puede observar que el material proviene de un depósito aluvial reciente no diferenciado, el cual se define como un posible aporte a una avenida torrencial después de un evento desencadenante. En la Figura 18b, se aprecia un movimiento en masa proveniente de una ladera, que cae sobre la vía y continúa ladera abajo aportando material a un drenaje afluente del Río Aguacatal. En este evento se puede

evidenciar troncos de árboles cortados, ramas cortadas por la erosión y vegetación arrancada de raíz, material que posteriormente puede contribuir a la generación de una avenida torrencial. Este punto se puede considerar de interés, ya que pueden ocurrir represamientos debido a los volúmenes de los movimientos en masa que llegan hasta el canal.

Figura 18

Zonas de aporte. a) E: 4752348 y N: 2121639 y b) E: 4752545 y N: 2121460



SAJ-02: Avenida torrencial en el Río Aguacatal sobre la vía que conduce de la vereda La Cristalina a la cabecera municipal de Herveo.

En la Figura 19 se puede observar la ocurrencia de un evento de avenida torrencial que transitó por un cauce, dejando como elemento expuesto un puente vehicular y la vía que conduce a la zona urbana desde la vereda La Cristalina. Se evidencia un contenido significativo de sólidos en diferentes proporciones, cantos y bloques con gran angularidad, lo que indica el grado caótico

y torrencial del evento. Además, se puede notar el represamiento, árboles con madera astillada, gravas embebidas en la madera, troncos de árboles cortados, vegetación arrancada de raíz, hierba o pasto aplanado y material antrópico dispuesto en los detritos leñosos. Aunque se trata de una avenida torrencial, también puede funcionar como zona de aporte para un posible desencadenamiento torrencial en el Río Gualí, ya que el drenaje afectado es un afluente de este.

Figura 19

Avenida Torrencial. a) E: 4755597 y N: 2118864, b) E: 4755501 y N: 2118789 y c) E: 4755511 y N: 2118797



9.7 Susceptibilidad por avenidas torrenciales

La metodología propuesta para evaluar la susceptibilidad a avenidas torrenciales se basa en la integración de los criterios geomorfológicos y geológicos. Al delimitar las SGMF y las UGS, se consideran múltiples factores críticos que influyen en estos eventos, tales como la pendiente, el tipo de suelo, la cobertura vegetal y las estructuras geológicas. Posteriormente, al asignar ponderaciones basadas en la influencia relativa de cada factor, se obtiene una evaluación de la susceptibilidad. Esta metodología se lleva a cabo mediante herramientas SIG, lo que permite aprovechar los datos disponibles para la visualización y análisis de los resultados.

9.7.1 *Normalizar las variables*

El mapa de susceptibilidad combina exclusivamente las variables SGMF y UGS, teniendo en cuenta que, de acuerdo con la guía metodológica, la precipitación es el detonante más recurrente para el desencadenamiento de una avenida torrencial, ya sea una precipitación de carácter acumulado o instantáneo. Se realizó la normalización de insumos ya generados como lo son el mapa de UGS (**Apéndice A**) y el mapa de geomorfología (**Apéndice B**). Para esta normalización, las variables se clasifican de 1 a 5, donde 1 representa el valor que no favorece a la generación de la susceptibilidad y 5 representa el valor en el cual favorece a la generación de una avenida torrencial.

Para la reclasificación del mapa de subunidades geomorfológicas, se tuvo en cuenta las características de estas, a las geoformas de origen fluvial se les asignó una clasificación más alta, debido a el proceso fluvio-torrencial; la mayoría de las geoformas cartografiadas en la zona de estudio se reclasificaron con una categoría entre 2 y 4 por sus características en cuanto a pendiente y erosión principalmente. Así mismo, en las unidades geológicas superficiales se hizo énfasis en los depósitos, suelos residuales o transportados, encontrados a lo largo de la zona de tránsito y

aferentes al drenaje, donde mayor socavación y erosión lateral se presenta. A estas UGS se les asignó un valor de 5 ya que se consideran como fuente directa de sedimentos en una avenida torrencial, y a las otras UGS cartografiadas en la zona, se les asignó un valor de 1 a 4, de acuerdo con la incidencia de estas en el drenaje.

El mapa de susceptibilidad de avenidas torrenciales y las tablas con la calificación de cada UGS y SGMF se encuentran disponibles en el **Apéndice C**.

9.7.2 Asignación de pesos relativos y álgebra de mapas

Con el fin de desarrollar una evaluación equitativa de la susceptibilidad a avenidas torrenciales, se decidió asignar pesos iguales a las variables de SGMF y UGS, de acuerdo con el nivel de influencia, por lo tanto, se le asignó un peso de 50% a cada una. Esta decisión se basa en la importancia y complementariedad de cada una de estas variables, así como en su impacto igualitario demostrando la dinámica del terreno.

Una vez que cada variable fue reclasificada en cinco categorías, desde muy baja hasta muy alta (1 a 5), según su incidencia en la generación de avenidas torrenciales, se integraron en un único mapa utilizando la herramienta de álgebra de mapas en QGIS v. 3.16.0. Esto permitió obtener el mapa de susceptibilidad a avenidas torrenciales para la parte alta de la cuenca del Río Gualí, basado en los valores de peso previamente asignados.

9.7.3 Asignación de categorías de susceptibilidad

Una vez multiplicada cada variable por el porcentaje asignado, se obtiene la susceptibilidad de amenaza por avenida torrencial, en donde se muestran las zonas susceptibles conforme a cada categoría analizada dentro de la zona de estudio.

9.8 Cuantificación de amenaza por avenidas torrenciales

Con el fin de identificar las zonas de amenaza, se propone una matriz de integración que se muestra en la [Figura 20](#) donde se relaciona la susceptibilidad del macizo rocoso ([sección 9.7](#)) y el resultado del análisis de inundación o índice de intensidad de flujo ([sección 9.5.3](#)). Ambas variables se categorizaron de 1 a 5, siendo 1 la amenaza muy baja y 5 la amenaza muy alta. Sin embargo, de acuerdo con el Decreto 1807 del 2014, la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales se debe categorizar en alta, media y baja ([Decreto 1807, 2014](#)).

La matriz de integración establece que, para cada combinación de variables presentes, se asigna una clasificación de amenaza representada con colores en la [Figura 20](#). Las casillas de color rojo representan una amenaza muy alta y alta, las amarillas corresponden a una amenaza media, y las verdes señalan una amenaza baja y muy baja.

Figura 20

Matriz de integración

		Amenaza por Inundación				
		Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Susceptibilidad	Muy baja					
	Baja					
	Media					
	Alta					
	Muy alta					

Muy alta	Alta
Alta	
Media	Media
Baja	Baja
Muy Baja	

9.9 Zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales

A partir de la cuantificación se obtiene la zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales para los periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Los seis mapas de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:25.000 pueden ser consultados en el **Apéndice D**.

En los mapas de zonificación de amenaza por avenidas torrenciales (Figura 21 y Figura 22) se observa que las áreas del cauce confinadas entre laderas de alta pendiente corresponden a la amenaza alta, puesto que son puntos susceptibles a represamientos por inestabilidad de laderas, los cuales se evidencian en movimientos en masa. Asimismo, en la desembocadura de los principales afluentes, como los ríos Aguacatal y Cajones, se observa una amenaza alta debido al aumento de la carga de sedimentos, el caudal y la fuerza hidrostática, elementos que favorecen la ocurrencia de una avenida torrencial.

Por otro lado, la amenaza media se concentra en áreas donde el cauce presenta mayor amplitud, debido a la influencia de geoformas fluviales como llanuras de inundación (Fpi) que amortiguan la energía y capacidad destructiva del flujo. A su vez, estas áreas se caracterizan por pendientes moderadas y baja susceptibilidad a represamientos, teniendo una capacidad intermedia para generar flujos de agua rápidos.

Finalmente, la categoría de amenaza baja corresponde a las partes más distales de las zonas de depósito, con pendientes suaves donde aumenta el área y disminuyen la velocidad y carga de sedimentos en el cauce, factores que contribuyen a la baja probabilidad de desarrollar avenidas torrenciales.

Figura 21

Mapa de zonificación de amenaza por avt para un periodo de retorno de 25 años

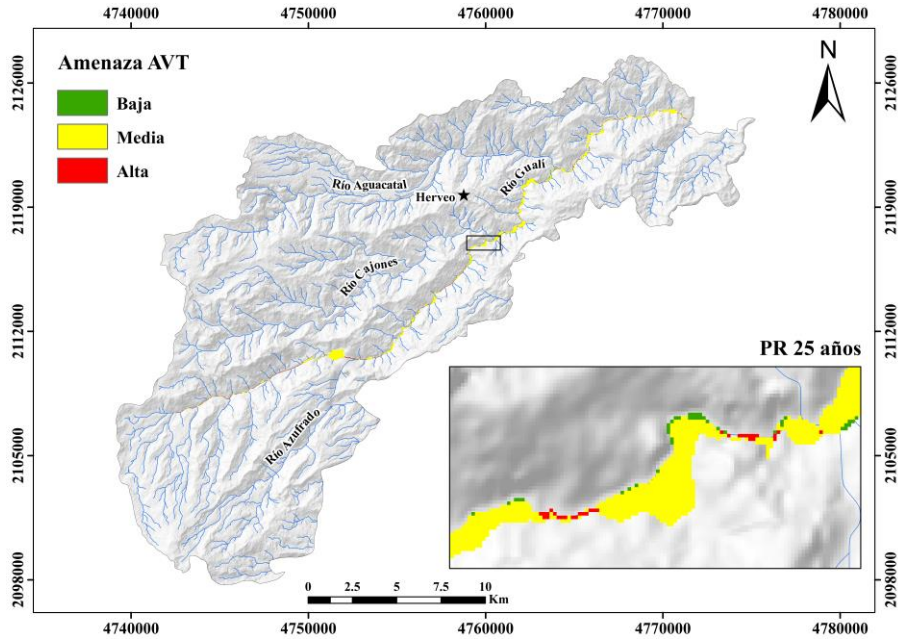
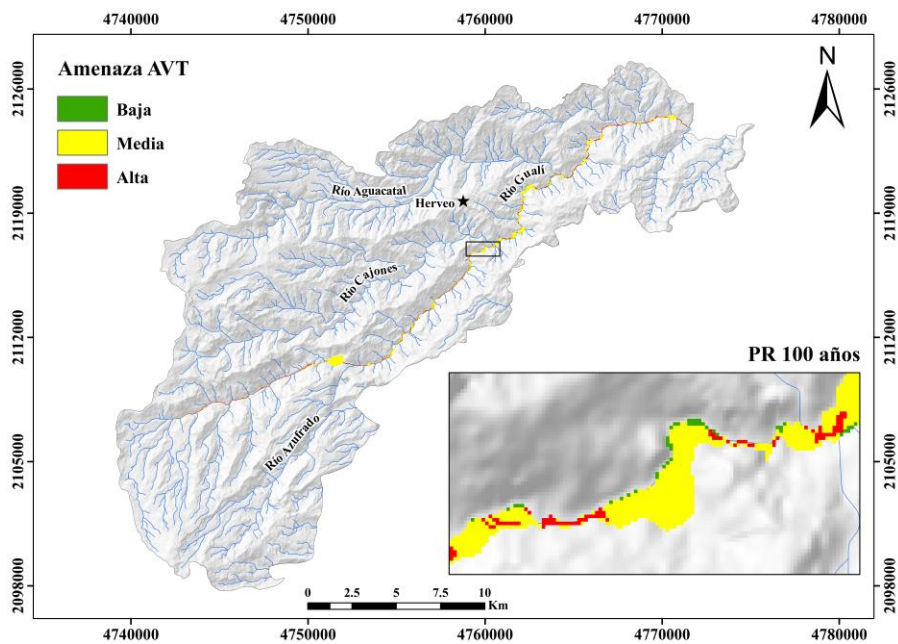


Figura 22

Mapa de zonificación de amenaza por avt para un periodo de retorno de 100 años



En la [Tabla 10](#) se muestra la relación porcentual del área zonificada en amenaza, para los periodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Tabla 10

Áreas de amenaza por periodo de retorno

Amenaza	Área											
	PR 2,33		PR 5		PR 10		PR 25		PR 50		PR 100	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Baja	10,61	3,8	10,69	3,86	10,56	3,8	10,64	3,83	10,44	3,74	10,59	3,76
Media	253,14	90,6	248,08	89,5	247,44	88,99	241,53	87,02	239,67	85,96	201,2	71,47
Alta	15,67	5,61	18,41	6,64	20,05	7,21	25,38	9,14	28,72	10,3	69,72	24,77
Total	279,42		277,18		278,05		277,55		278,83		281,51	

Se observa que la amenaza media ocupa entre el 70% al 90% del área de afectación total en los distintos periodos de retorno. A su vez, se aprecia que el área en amenaza alta aumenta conforme se incrementa el PR, mientras que el área en amenaza media disminuye. Por otro lado, la amenaza baja no presenta una variación uniforme y significativa en los diferentes periodos de retorno, correspondiendo en todos los casos a menos del 4% del área de afectación total.

Para un periodo de retorno de 2,33 años se obtuvo un área de afectación de 15,67 ha en amenaza alta, lo que representa el 5% del área de afectación total. Para el PR de 5 años, aumenta el área en amenaza alta al 6% y de la misma manera, aunque en menor extensión, el área en amenaza baja. Para los PR de 10 y 50 años, el área en amenaza media disminuye, evolucionando al 7% y 10% en amenaza alta respectivamente.

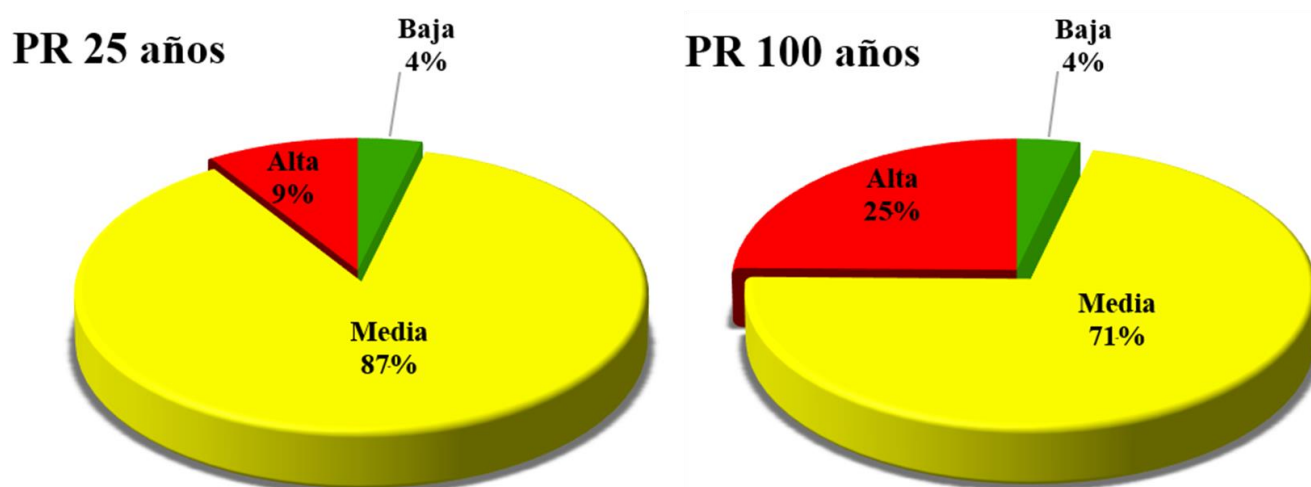
Finalmente, para efectos del presente estudio, se destacan los resultados del PR de 25 años por su relevancia en la gestión del riesgo, debido a la ocurrencia de eventos drásticos en cortos periodos de tiempo. Así como, los resultados del PR de 100 años, fundamentales para la planificación y manejo de infraestructuras con una vida útil prolongada.

En la Figura 23 se muestra la distribución porcentual de la amenaza por avenidas torrenciales para un periodo de 25 años. Se obtuvo un área de influencia del 4% (10,64 ha) en amenaza baja sobre suelo transportado aluvial (Sta) en la zona más distal de la llanura de inundación (Fpi). Un área del 87% (241,53 ha) en amenaza media en terrazas de erosión (Fte) sobre suelo transportado de terraza (Stt) y un área del 9% (25,83 ha) en amenaza alta sobre suelo transportado aluvial (Sta) en el cauce del rio Gualí.

Asimismo, en la Figura 23 se presenta la distribución porcentual para el periodo de retorno de 100 años, con un área de influencia del 4% (10,59 ha) en amenaza baja sobre suelo transportado aluvial (Sta) en la zona más distal de la llanura de inundación. Un área del 71% (201,2 ha) en amenaza media en terrazas (Ftft) y escarpe (Ftft) fluviotorrenciales sobre suelo transportado aluvial (Sta) y un área del 25% (69,72 ha) en amenaza alta sobre suelo transportado aluvial (Sta) en el cauce del rio Gualí.

Figura 23

Distribución porcentual de la amenaza para los periodos de retorno de 25 y 100 años



10. Conclusiones

Durante el trabajo de campo y la cartografía geomorfológica realizada en la parte alta de la cuenca del Río Gualí, se identificaron principalmente geoformas volcánicas (43.34%) asociadas a depósitos laháricos y piroclásticos. También se observaron geoformas denudacionales (40.30%) y movimientos en masa activos, que aportan sedimentos directamente al río y durante temporadas de precipitaciones intensas pueden desencadenar avenidas torrenciales. Asimismo, se identificó depósitos fluvio-torrenciales clastosoportados dispuestos caóticamente en las márgenes del cauce.

Estos depósitos evidencian la capacidad de transporte del río y representan diferentes comportamientos del drenaje en términos de caudal, velocidad y capacidad de transporte. Estas geoformas fluviales se asocian con las geoformas cartografiadas en el mapa de subunidades geomorfológicas, como terrazas y escarpes fluviotorrenciales.

La caracterización de unidades geológicas superficiales evidenció que la zona de estudio se encuentra fundamentalmente compuesta por rocas de calidad regular (42%) y mala (26%), así como suelos transportados de flujo piroclástico y lahárico (18%). Estas unidades están asociadas a los puntos de mayor concentración de movimientos en masa, tipo deslizamientos traslacionales y flujo de detritos, que podrían llegar a favorecer la ocurrencia de represamientos en el cauce del río Gualí.

El modelamiento hidrológico e hidráulico en compañía de los parámetros morfométricos de la cuenca, consintió el cálculo de los caudales máximos para los periodos de retorno de 2,33; 5, 10, 25, 50 y 100 años, donde se obtuvieron valores de 3.4, 4, 4.5, 5.4, 6.1 y 12.9 m³/s, respectivamente. Asimismo, reveló el porcentaje de área afectada por inundación a partir del cálculo de la velocidad y nivel de inundación máxima del flujo, donde se obtuvieron velocidades

máximas de 17.30 m/s y niveles de inundación máximos de 2m lámina de agua, para un periodo de retorno de 100 años.

Durante la caracterización de las avenidas torrenciales en campo, se registró una avenida torrencial en el Río Aguacatal (afluente del Río Gualí) sobre la vía que conduce de la vereda La Cristalina a la cabecera municipal de Herveo. Por otra parte, se identificaron varios movimientos en masa cercanos a los afluentes y al Río Gualí, los cuales fueron catalogados como puntos de aporte. Adicionalmente, se reconocieron flujos supercríticos en las quebradas, los cuales aumentan la ocurrencia de avenidas torrenciales. Sin embargo, estos no alcanzan las dimensiones para ser cartografiables a la escala de trabajo.

La matriz de integración propuesta facilitó la zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales, mediante la combinación de las variables de susceptibilidad del macizo rocoso y el análisis de la inundación en tres categorías de amenaza, baja, media y alta. En consecuencia, para el periodo de retorno de 25 años y un área de influencia de 277,55 ha, se obtuvo una amenaza baja del 4% (10,64 ha), amenaza media del 87% (241,53 ha) y amenaza alta del 9% (25,83 ha). Esto refleja la importancia del seguimiento de las zonas en amenaza media-alta para la prevención del riesgo, en especial las márgenes del cauce que se encuentran habitadas. Para el periodo de retorno de 100 años y un área de influencia de 281,51 ha, se obtuvo una amenaza baja del 3,76% (10,59 ha), amenaza media del 71,47% (201,2 ha) y amenaza alta del 24,77% (69,72 ha). Esto revela la necesidad de planificar e implementar medidas de control en obras de infraestructura a largo plazo, ubicadas en las zonas de amenaza media-alta.

11. Recomendaciones

Se recomienda a las entidades encargadas, la incorporación de los eventos de tipo avenidas torrenciales en los registros del inventario de movimientos en masa, dado que la información es limitada y el concepto no está claramente diferenciado.

Se recomienda a las entidades estatales instalar estaciones meteorológicas en la cuenca del Río Gualí, ya que la información de las estaciones cercanas presenta datos incompletos, lo que dificulta la precisión en el procesamiento de la información.

Se recomienda actualizar y mejorar las coberturas y usos del suelo, ya que pueden variar e influir directamente en el número de Manning y el número de curva, lo que, a su vez, afecta los cálculos del caudal y el modelo de inundación.

Se recomienda el uso de imágenes satelitales de amplio rango espectral y la actualización de la base de datos de este recurso, dado que, en zonas de difícil acceso en campo, no fue posible la visualización de afloramientos debido a la falta de este componente visual.

Se recomienda la evaluación a escala 1:2000 si los resultados de la zonificación a escala 1:25000 indicaron zonas en amenaza alta o media que involucren zonas de expansión urbana ocupadas por depósitos asociados a torrencialidades.

Referencias Bibliográficas

- Alcaldía Municipal de Herveo. (2005). *Informe Diagnóstico: Esquema de ordenamiento territorial, Herveo, Tolima.*
<https://repositoriocdim.esap.edu.co/handle/20.500.14471/12197>
- Arango, E., Chica, P., & Robayo, C. (2017). *Caracterización Geomorfológica y Morfométrica del Volcán Cerro Bravo, Tolima-Colombia [Tesis de Pregrado, Universidad de Manizales].*
<https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/3457>
- Araya, A., González C, V., & Jiménez, M. (2018). Análisis de la variación del coeficiente de rugosidad de Manning con respecto a la pendiente del canal en tubería de PVC de 315 mm de diámetro. *Revista INGENIERÍA UC*, 25(1), 43-49.
<https://www.redalyc.org/journal/707/70757668006/html/>
- Aristizábal, E., Arango Carmona, M. I., & García López, I. K. (2020). Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 242-258.
<https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.72612>
- Carvajal, J. H. (2011). *Propuesta de Estandarización de la Cartografía Geomorfológica en Colombia.* INGEOMINAS. https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=46357&shelfbrowse_itemnumber=45704
- Castañeda, P. M. (2014). *Zonificación climatológica según el modelo Caldas – Lang de la Cuenca Rio Negro mediante el uso del sistema de Información Geográfica SIG [Tesis Especialista en Geomática, Universidad Militar Nueva Granada].*
<https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/11701>

- Castillo, K. L., & Quintero, A. M. (2023). *Análisis multitemporal de los movimientos en masa y descripción morfométrica para un sector del municipio de Herveo, Tolima a escala 1:25.000 [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]*.
<https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/15362>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., & Saldarriaga, J. G. (1993). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill.
- Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres [CMGRD]. (2021). *Informe: Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres, Herveo, Tolima*.
<http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/38772?show=full>
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). *Landslide Types and Processes*. Washington D.C: Special Report, National Research Council.
- Decreto 1807 de 2014. *Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones*. Septiembre 19 de 2014, DO N° 49279.
- Disaster Information Management System [DesInventar]. (1 de agosto de 2022). *Statistics Composition of Disasters in Colombia*.
<https://www.desinventar.net/DesInventar/profiletab.jsp?countrycode=col&continue=y>
- El Tiempo. (5 de diciembre de 2011). *Así fue la avalancha que causó muerte de siete miembros de una familia*. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-10892196>
- Federal Emergency Management Agency [FEMA]. (febrero de 2018). *Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping*. <https://www.fema.gov/flood-maps/guidance-reports/guidelines-standards/archive>

González, A. G., & Padilla, A. F. (2023). *Cálculo de la probabilidad temporal de las precipitaciones y relación temporal-espacial de la actividad sísmica como detonantes de movimientos en masa en el municipio de Herveo, Tolima [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]*. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/15387>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2011). *Clasificaciones Climáticas de Colombia*. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/climas+%5BModo+de+compatibilidad%5D.pdf/d8c85704-a07a-4290-ba65-f2042ce99ff9>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2018). *Mapa de Cobertura de la Tierra. Adaptación Corine Land Cover. República de Colombia. Escala 1:100.000. Periodo 2018*. <https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e=-82.9487120410148,-4.442002701018571,-65.54636829101943,14.384385834849212,4686&b=igac&u=0&t=43&servicio=881>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2023). *Colombia en Mapas: Geoportal- Cartografía Básica*. <https://www.colombiaenmapas.gov.co/#>

Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química [INGEOMINAS]. (2001). *Geología de las planchas 206 Manizales y 225 Nevado del Ruíz*. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010020081/documento/pdf/0101200811101000.pdf>

Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química [INGEOMINAS]. (2012). *Zonificación de Amenaza Por Movimientos En Masa Tipo Flujo En La Cuenca Del Río Combeima-Ibagúe-Tolima*. <https://recordcenter.sgc.gov.co/B7/21003001024430/Documento/pdf/2105244301101000.pdf>

- Ley 1523 de 2012. *Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.* Abril 24 de 2012, DO N° 48411.
- Mejía, E. L., Velandia, F., Zuluaga, C. A., López, J. A., & Cramer, T. (2012). Análisis Estructural al Noreste del Volcán Nevado del Ruíz, Colombia- Aporte a la Exploración Geotérmica. *Boletín de Geología*, 34(1), 27-41.
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/2713>
- Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2003). SCS-CN Method. En W. S. Library, *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology* (págs. 84-146). Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-94-017-0147-1>
- Ochoa, T. R. (2011). *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos.* Ecoe Ediciones.
<https://www.ecoediciones.mx/wp-content/uploads/2015/08/Hidraulica-de-rios-y-procesos-morfologicos-1ra-edici%C3%B3n.pdf>
- Ondas de Ibagué. (19 de mayo de 2017). *Avalancha afectó la bocatoma del sistema de acueducto de Herveo hace dos semanas.* <https://www.ondasdeibague.com/noticias/tolima/7092-avalancha-afecto-la-bocatoma-del-sistema-de-acueducto-de-herveo-hace-dos-semanas>
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2015). *Informe: 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>
- Pinzón, C., Echeverri, J., Murcia, H., & Schonwalder, D. (2018). Petrogénesis y condiciones de cristalización del domo intracrático del volcán Cerro Bravo, Colombia. *Boletín de Geología*, 40(3), 67-84. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n3-2018004>

- Ramos, A. G. (26 de marzo de 2021). *Vías rurales de Herveo, Tolima, colapsadas por deslizamientos*. RCN radio: <https://www.rcnradio.com/colombia/region-central/vias-rurales-de-herveo-tolima-colapsadas-por-deslizamientos>
- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2012). *Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:100.000*. <https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=49081>
- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2013). *Memoria Explicativa Mapa de Geomorfología de la Plancha 207 departamento de Tolima, Caldas y Cundinamarca*. https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=49361&shelfbrowse_itemnumber=48708
- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2014). *Geoportal SIMMA*. Sistema de Información de Movimientos en Masa: <https://simma.sgc.gov.co/#/public/basic/>
- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa, escala 1:25.000*. Bogotá D.C, Colombia: Imprenta Nacional de Colombia. <https://doi.org/10.32685/9789585978225>
- Servicio Geológico Colombiano [SGC]. (2021). *Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano y Pontificia Universidad Jeveriana. <https://doi.org/10.32685/9789585313156>
- Strahler, A. (1952). Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography. *GSA Bulletin*, 63(11), 1117–1142. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)

- Valencia Ortiz, J. A., & Martínez, A. (2023). Morphometric Evaluation and Its Incidence in the Mass Movements Present in the Chicamocha Canyon, Colombia. *Sustainability*, 15(2), 1140. <https://doi.org/10.3390/su15021140>
- Van Zuidam, R. A. (1986). *Aerial Photointerpretation in Terrain Analysis and Geomorphological Mapping*. The Hague: Smiths Publishers.
- Vargas, R., & Díaz- Granados, M. (1998). Curvas sintéticas de intensidad-duración-frecuencia para Colombia. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de los Andes. <https://pdfcoffee.com/vargas-diaz-granados-curvasidf-1998-5-pdf-free.html>
- World Meteorological Organization [WMO]. (2012). *Glosario Hidrológico Internacional*. UNESCO. <https://library.wmo.int/idurl/4/35589>