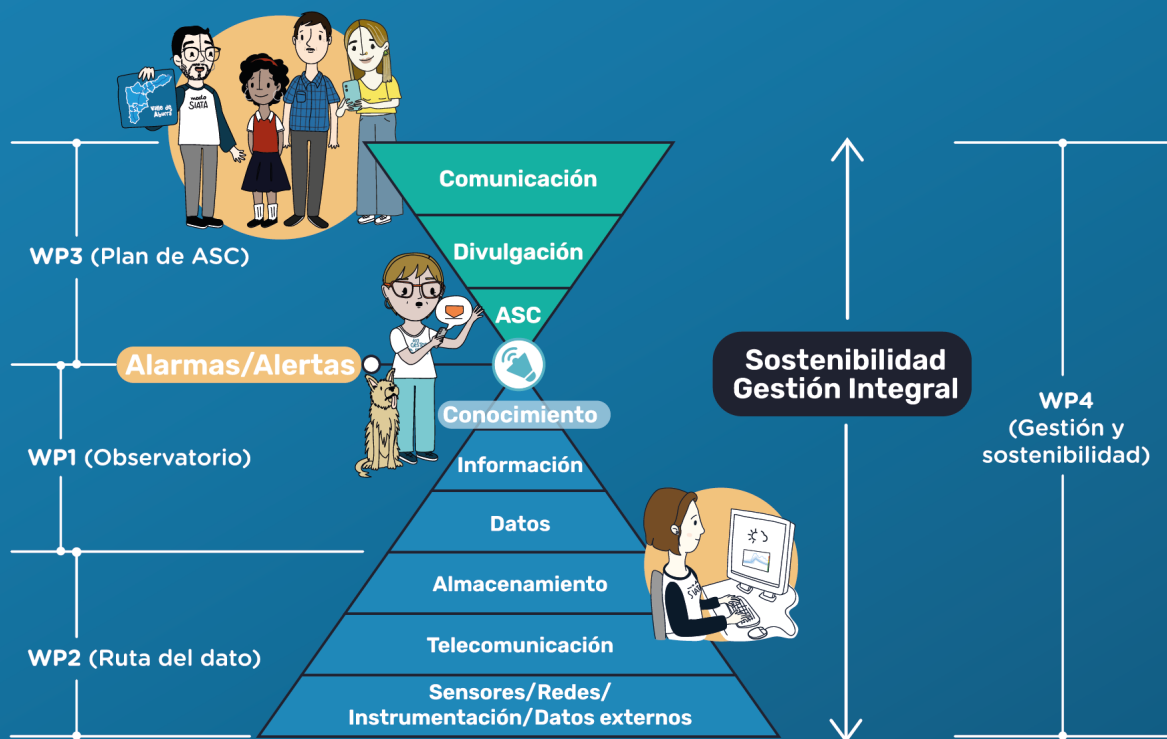


Elaborado por: Universidad EAFIT

Desarrollar actividades de **investigación aplicada, desarrollo tecnológico y apropiación social del conocimiento para la acción preventiva, la toma de decisiones oportuna para una gestión efectiva del riesgo** (incluyendo variabilidad y cambio climático), y el seguimiento y análisis integral de variables relacionadas con la calidad del aire en el territorio metropolitano, **apoyando el proceso de formulación de políticas públicas y el fortalecimiento de la gobernanza por parte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá**, garantizando el estricto cumplimiento de las actividades de carácter obligatorio reguladas por el marco legal vigente.





Contenido

Introducción 1

Área de estudio 1

 Evaluación regional 1

 Evaluación detallada 2

Datos y Metodología 10

 Susceptibilidad 11

 Modelación hidrológica 13

 Disponibilidad de sedimentos 14

 Modelación del tránsito de las avenidas torrenciales 14

Resultados 16

 Evaluación regional 16

 Evaluación detallada 23

Conclusiones y trabajo futuro 26

Referencias 27

Avenidas torrenciales

Investigadores: Federico Gómez y Mauricio Revelo

Introducción

Las avenidas torrenciales representan uno de los fenómenos naturales más devastadores y comunes en regiones montañosas, constituyendo una amenaza crítica para la vida humana, la infraestructura y el desarrollo socioeconómico. Estos eventos hidrogeomorfológicos se caracterizan por el rápido flujo de agua y sedimentos a través de cauces empinados, desencadenados por una compleja interacción entre precipitaciones intensas, movimientos en masa y condiciones geomorfológicas específicas.

En el contexto colombiano, particularmente en la región andina, la convergencia de una topografía accidentada, geología compleja y patrones climáticos variables crea condiciones ideales para la ocurrencia de estos eventos. La cuenca de la quebrada La Despensa, ubicada en el corregimiento de San Antonio de Prado, Medellín, emerge como un caso de estudio estratégico debido a sus características geomorfológicas distintivas, su historial de eventos y su proximidad a áreas pobladas, lo que la convierte en un laboratorio natural para el desarrollo de metodologías de evaluación y gestión del riesgo.

Este trabajo desarrolla una metodología integral para abordar la amenaza de avenidas torrenciales desde un enfoque que combina el análisis regional y el detallado. El análisis regional tiene como objetivo identificar y priorizar áreas susceptibles mediante herramientas pragmáticas como el modelo Flow-R, que utiliza datos fácilmente disponibles, como modelos digitales de elevación y ubicaciones de áreas fuente, para generar mapas de susceptibilidad espacial. A partir de esta priorización, el análisis detallado profundiza en las cuencas seleccionadas, integrando datos locales como coberturas del suelo, modelación hidrológica y dinámica de flujos, permitiendo caracterizar con mayor precisión los impactos y proponer medidas específicas de mitigación. Este enfoque jerárquico busca no solo entender los factores que influyen en la generación de estos eventos, sino también proporcionar herramientas para sistemas de alerta temprana y estrategias de gestión del riesgo orientadas a la protección de vidas humanas.

Área de estudio

Evaluación regional

El análisis de avenidas torrenciales se fundamenta en la capacidad de respuesta de una cuenca hidrográfica ante eventos de lluvia y el aporte de sedimentos, lo que hace crucial definir la unidad territorial que influye en los comportamientos hidrológicos de los cauces. Este estudio aborda un análisis regional exhaustivo de las cuencas tributarias del río Aburrá, considerando las que tienen influencia directa en los nueve municipios del Valle de Aburrá o el Distrito de Medellín. Con un enfoque en la priorización de las zonas con mayor riesgo potencial, se identifican las áreas que podrían estar más expuestas a avenidas torrenciales. Esta aproximación representa un análisis regional de las avenidas torrenciales.

Para profundizar en el comportamiento específico de una cuenca durante eventos de crecidas, se ha

seleccionado la cuenca de la quebrada La Despensa como un área de estudio representativa en un contexto local. Esta cuenca, tributaria de la quebrada Doña María, que a su vez es afluente del río Aburrá, permite realizar un análisis detallado y localizado dentro del contexto regional más amplio.

La cuenca de la quebrada La Despensa se encuentra ubicada en el corregimiento de San Antonio de Prado, el cual pertenece a la jurisdicción del distrito de Medellín, en la subregión del Valle de Aburrá. En la Figura 1 se presenta el área de estudio regional y la localización de la cuenca La Despensa.

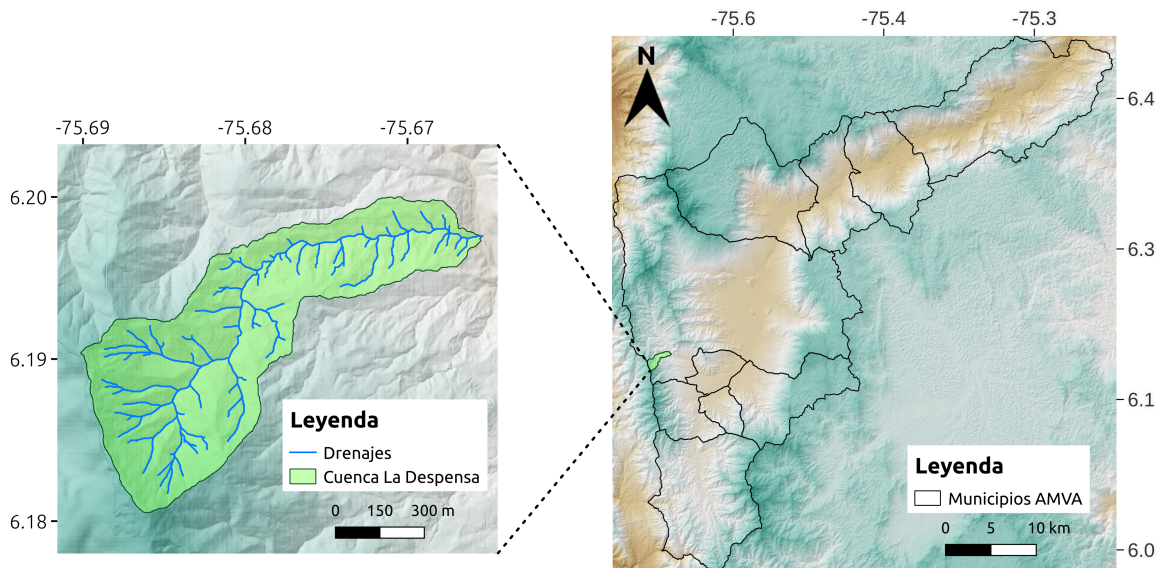


Figura 1: Mapa de localización de la división política del Valle de Aburrá (análisis regional) y de la cuenca piloto La Despensa (análisis local).

Evaluación detallada

Condiciones climáticas

La cuenca de la quebrada La Despensa ocupa una faja altimétrica entre 1811 y 2739 msnm de acuerdo al modelo de elevación digital del Valle de Aburrá con resolución de 1 m, como se observa en la Figura 2. Esto la ubica en un piso térmico correspondiente a frío con una temperatura promedio entre los 12°C y los 18°C (Corantioquia, 2006). De acuerdo con las mediciones de la estación pluviográfica 418, ubicada en la vereda Montañita, el promedio anual observado de precipitación desde 2019 hasta 2024 está alrededor de 1501 mm/año.

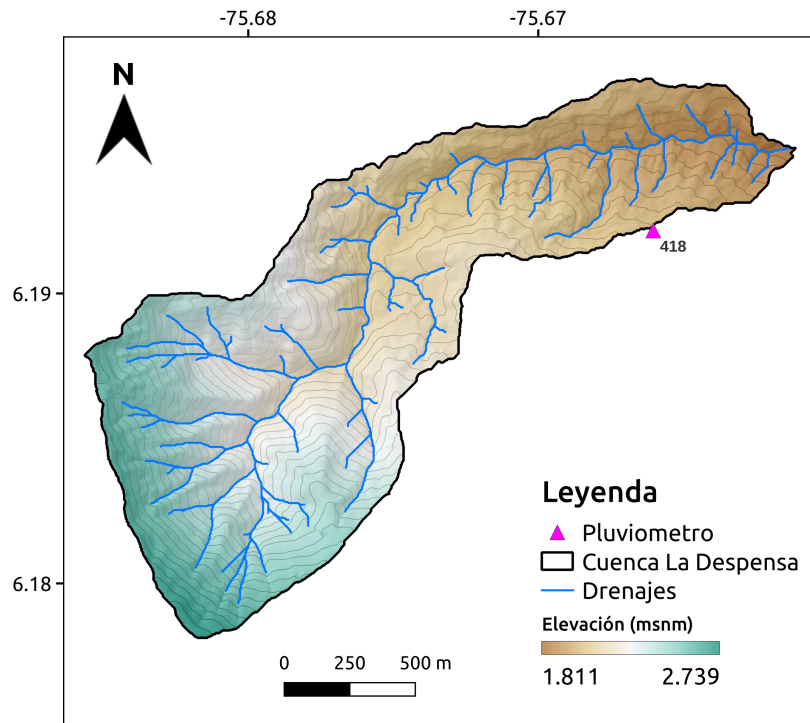


Figura 2: Modelo de elevación digital de la cuenca de la quebrada La Despensa.

En la Figura 3 se muestra el análisis para escala diaria y mensual. La precipitación diaria, con una media observada de 5.57 mm/día, muestra un patrón de eventos extremos esporádicos, mientras que la precipitación mensual con 166.85 mm/mes, con picos en mayo y octubre, muestra un patrón bimodal. La distribución de la precipitación diaria muestra una alta probabilidad de valores cercanos a 0 mm/día. Esto indica que la mayoría de los días tienen poca o nula precipitación; eso explica la cola larga hacia la derecha. En el caso de la precipitación mensual se encuentran altas probabilidades alrededor de 100-150 mm/mes y el otro cerca de 300-350 mm/mes. Este patrón sugiere que hay dos regímenes de precipitación predominantes: meses con precipitaciones moderadas y meses con precipitaciones mucho más altas.

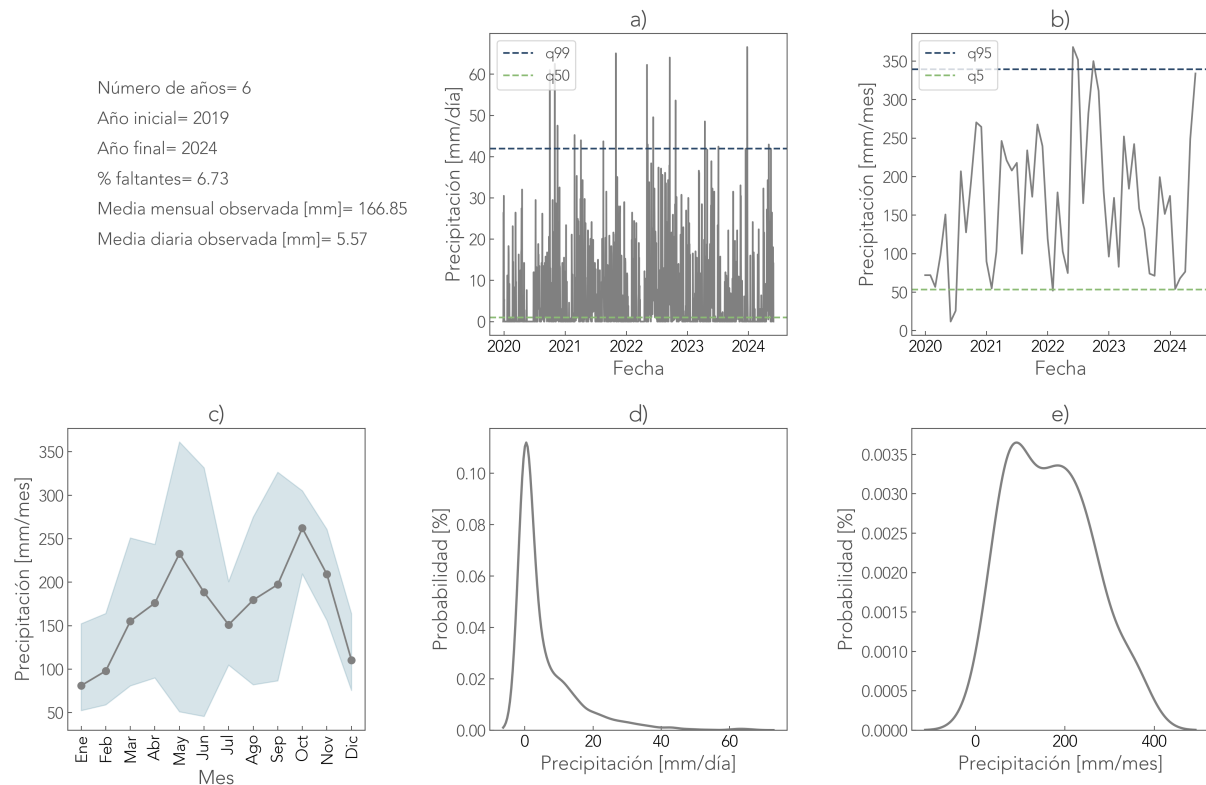


Figura 3: Análisis de precipitación de estación pluviográfica Montañita. a) Precipitación diaria, b) precipitación mensual, c) ciclo medio anual, d) función de probabilidad para escala diaria y e) función de probabilidad para escala mensual.

A partir del análisis de la precipitación histórica registrada por el radar meteorológico, se presenta en la Figura 4 la media mensual de la precipitación, calculada para el periodo comprendido entre 2014 y 2023. Esta figura ilustra la variabilidad intraanual de la precipitación, evidenciando claramente el ciclo bimodal característico de la región andina.

Los meses se presentan comenzando desde diciembre, inicio de una temporada de menor precipitación, para facilitar la apreciación del ciclo anual. De diciembre a febrero, las medias de precipitación son de aproximadamente 200 mm mensuales, con enero siendo el mes con menores acumulados, alcanzando hasta 120 mm. La temporada de mayor precipitación, de marzo a mayo, muestra acumulados medios mensuales de alrededor de 350 mm, registrándose los menores en abril con una media de aproximadamente 250 mm, y los máximos en mayo, con hasta 400 mm.

Durante la segunda temporada de menor precipitación del año, los acumulados son ligeramente superiores a los registrados de diciembre a febrero, con una media de 250 mm. Julio es el mes de menor acumulado, con 170 mm. En la segunda temporada de lluvias, los acumulados mensuales son inferiores a los reportados en la temporada de marzo a mayo, con medias mensuales de alrededor de 300 mm. Octubre es el mes de mayor acumulado, con hasta 350 mm, mientras que noviembre registra los menores acumulados, con hasta 200 mm.

Anualmente, la precipitación en la cuenca La Despensa tiene una media de aproximadamente 2800 mm, con valores máximos de 3200 mm en la parte más alta de la cuenca, al occidente, y valores mínimos de

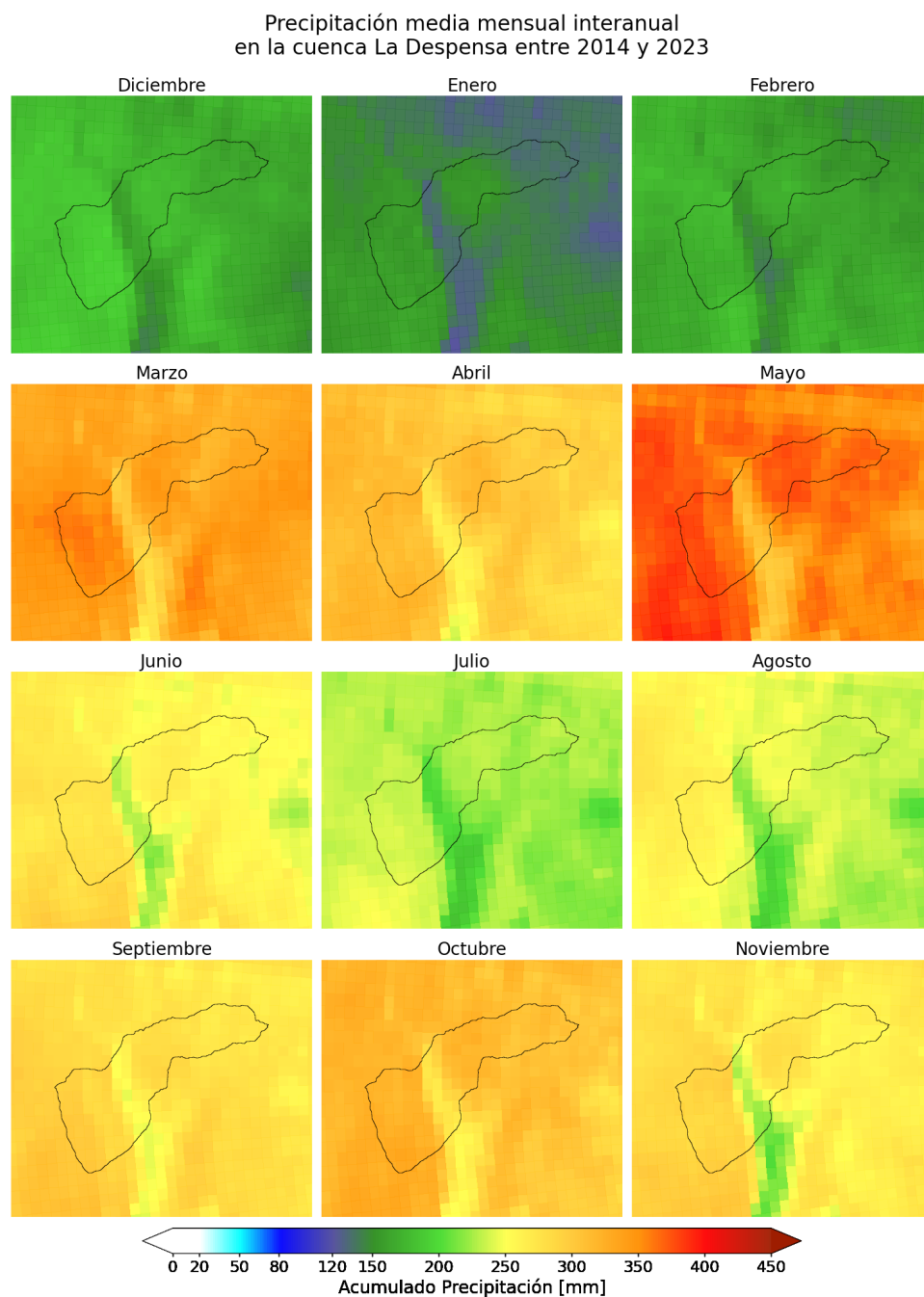


Figura 4: Precipitación media mensual interanual en la cuenca La Despensa entre 2014 y 2023.

2200 mm en la parte central. En la Figura ??, se presenta la media de la precipitación acumulada por año, calculada a partir de todos los años disponibles en el registro histórico, lo que representa la magnitud de la precipitación.

Pendientes

En la zona de estudio las pendientes presentan una variación que va desde 0° hasta 80° . Estos valores fueron reclasificados en zonas de planicie, vertientes moderadas, vertientes empinadas y vertientes muy empinadas o escarpes (Tabla 1).

Tabla 1: Pendientes en la cuenca de la quebrada La Despena.

Categoría	Pendiente [$^\circ$]	Área de la cuenca [km^2]
Planicies	≤ 15	7.5
Vertientes suaves	15 a 35	44.2
Vertientes moderadas	35 a 45	38.1
Escarpes	≥ 45	10.2

Es posible identificar que la cuenca tiene gran variación en sus pendientes siendo las más frecuentes las vertientes suaves, seguidas de vertientes moderadas y en menor frecuencia, escarpes y planicies. En la Figura 5 se muestra el mapa reclasificado.

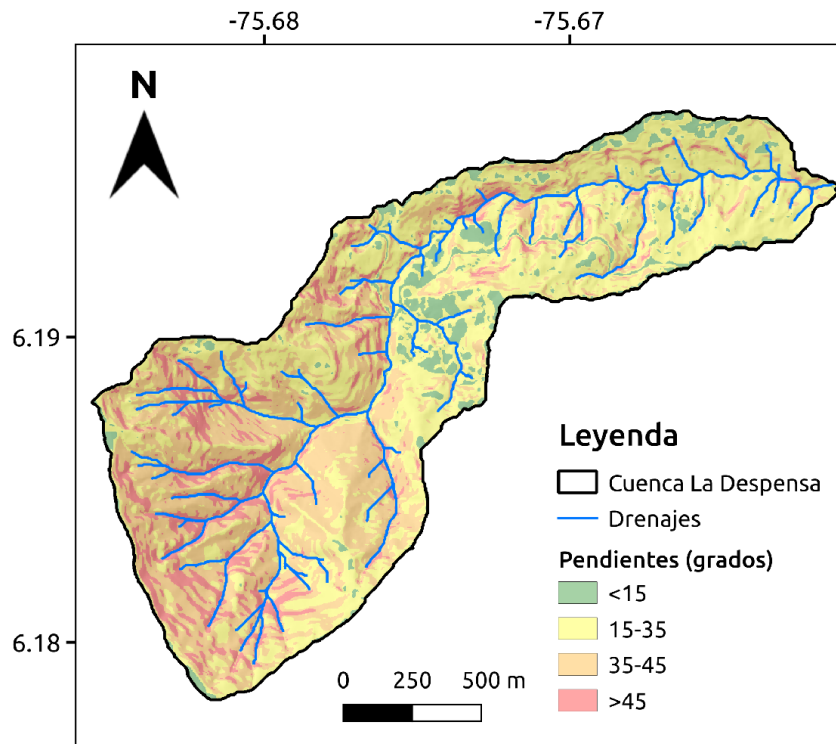


Figura 5: Pendientes de la cuenca de la quebrada La Despena.

Geología

De acuerdo a la cartografía geológica en escala 1:10.000 de la Microzonificación Sísmica del Valle de Aburrá (Universidad de los Andes, 2016), se identificaron cuatro unidades dentro de la cuenca de la quebrada La Despensa.

- **Complejo Quebrada Grande (KvQG y kvsQG):** se extiende desde la parte media hasta la parte alta de la cuenca. En esta unidad geológica, se distinguen dos miembros: uno volcánico y otro sedimentario. En la zona, predomina el miembro volcánico compuesto principalmente por rocas básicas como basaltos y diabasas. Estas unidades representan el 66.7 % del área de la cuenca.
- **Gabros de Romeral (JgR):** se presenta como una estrecha franja en la zona intermedia de la cuenca. Hace parte del Complejo Ofiolítico del Cauca y comúnmente se observan diques de feldespato que generan un suelo limo arcilloso de color blanco. Esta unidad representa el 1.7 % del área de la cuenca.
- **Flujos de escombros y/o lodos (NFprel y NQFII):** están presentes desde la parte media hasta la parte baja de la cuenca. Estos flujos se caracterizan por tener varias temporalidades y diferentes grados de meteorización. Según la granulometría de los materiales que conforman la fuente, pueden darse depósitos de flujo con predominio de bloques rocosos denominados flujos de escombros o de con fracción fina (en general arcilla o limo) en cuyo caso se llaman flujos de lodos. Estas unidades representan el 31 % del área de la cuenca.
- **Stock de Altavista (KdA):** se presenta como un pequeño fragmento hacia la desembocadura de la cuenca. Esta unidad es un cuerpo ígneo plutónico a subvolcánico, comprendiendo por dioritas hornbléndicas, cuarzodioríticas y gabros. En general, las rocas que lo constituyen están intensamente meteorizadas. Esta unidad representa menos del 1 % del área de la cuenca.

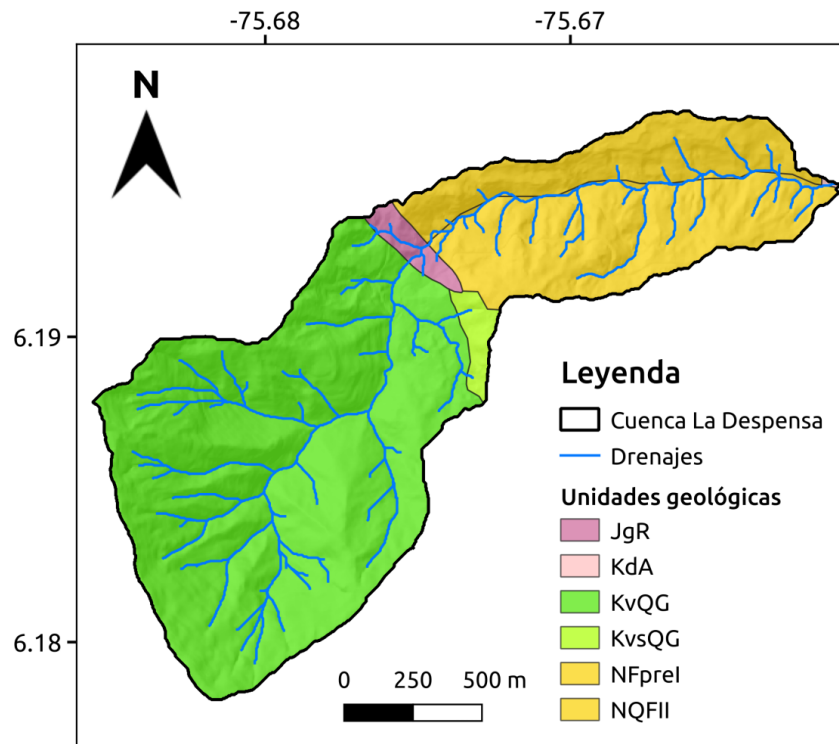


Figura 6: Geología de la cuenca de la quebrada La Despensa.

Procesos morfodinámicos

Para evaluar la amenaza de movimientos en masa en la cuenca de la quebrada La Despensa, se utilizó información secundaria de los estudios realizados por AMVA y UNAL (2018). De acuerdo al inventario de movimientos en masa basado en fotointerpretación, se identificaron en total 88 procesos. Además, de acuerdo a los mapas de amenaza y riesgo asociados al POT de Medellín, se determinó que la zona de amenaza alta por movimientos en masa abarca un área de 0.37 km^2 , equivalente al 17 % del área de la cuenca, como se puede observar en la Figura 7.

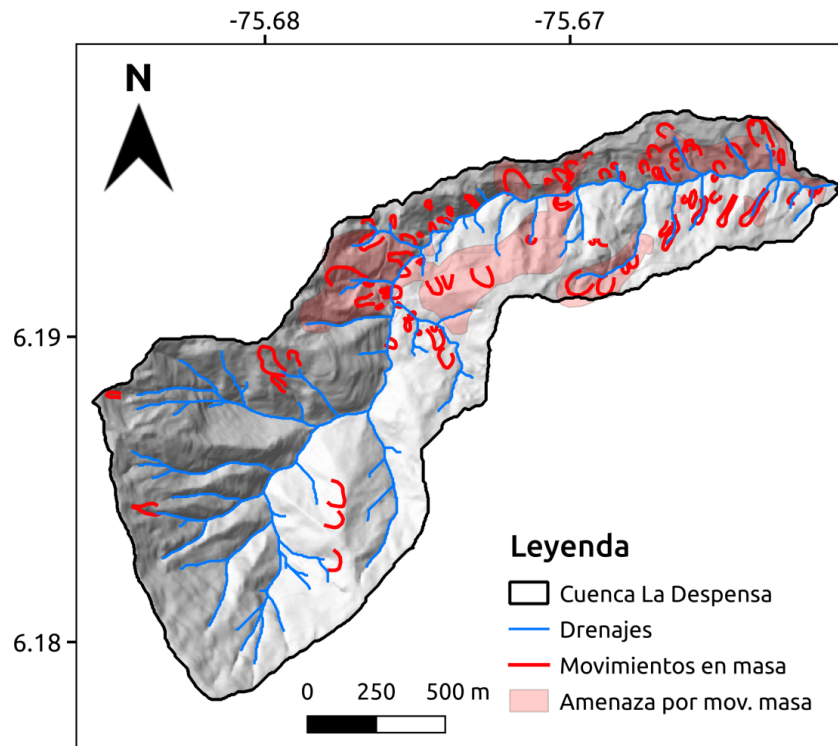


Figura 7: Inventario y zona de amenaza a movimientos en masa de la cuenca de la quebrada La Despensa.

De igual manera, la amenaza por avenidas torrenciales se evaluó utilizando información de los estudios realizados por AMVA y UNAL (2018). Se encontró que la totalidad del cauce principal presenta amenaza alta por avenidas torrenciales, como se ilustra en la Figura 8.

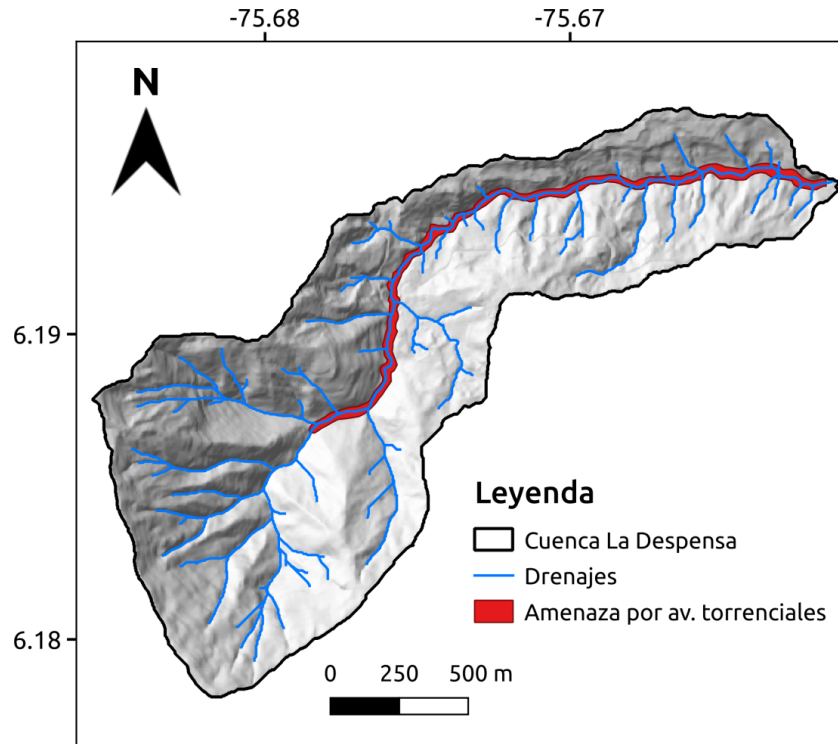


Figura 8: Zonas de amenaza a avenidas torrenciales de la cuenca de la quebrada La Despensa.

Datos y Metodología

Las avenidas torrenciales son flujos compuestos por una mezcla de agua y sedimentos en diferentes proporciones, que se desplazan a gran velocidad por cauces empinados. Estos procesos generalmente son el resultado de fenómenos concatenados, donde la lluvia juega un papel fundamental, aunque no siempre como factor desencadenante. Entre los mecanismos desencadenantes se incluyen eventos de lluvia intensa o incluso precipitación acumulada previa, movimientos en masa de gran magnitud o enjambres de movimientos en masa de pequeña magnitud, rotura de presas naturales o artificiales, y aporte de grandes volúmenes de agua por deshielo (Aristizábal et al., 2020). Las avenidas torrenciales se caracterizan por su alta capacidad destructiva y tiempos de respuesta muy cortos, lo que dificulta la toma de acciones preventivas por parte de la población expuesta (Borga et al., 2014).

En este contexto, los factores condicionantes que una cuenca necesita para generar avenidas torrenciales son tres: la morfometría de la cuenca, la disponibilidad de sedimentos y la disponibilidad de agua. La morfometría determina la susceptibilidad de la cuenca a generar avenidas torrenciales, la disponibilidad de sedimentos influye en la magnitud y el potencial destructivo del flujo al modificar su comportamiento reológico, y la disponibilidad de agua, principalmente proveniente de la lluvia, aporta los volúmenes necesarios para la formación del flujo. En conjunto, estos tres factores interactúan para determinar la amenaza de avenidas torrenciales en una cuenca.

Las avenidas torrenciales se clasifican según la reología del flujo, que depende de la proporción de agua y sedimentos (O'Brien and Julien, 1985; Pierson and Costa, 1987) y del tamaño de grano de los sedimentos (Coussot and Meunier, 1996; Iverson, 1997). Estos procesos incluyen flujos de escombros, que son

corrientes viscosas no newtonianas con altas concentraciones de sedimentos y capacidad para transportar grandes bloques de roca en suspensión, y las inundaciones de escombros, flujos newtonianos en los que el agua arrastra grandes bloques debido a su alta velocidad, sin pulsos definidos (Hungr et al., 2014, 2001).

La principal diferencia entre estos tipos de flujos radica en su densidad (Yang et al., 2019), que varía entre 1,2 y 2,3 g/cm^3 . Las concentraciones de sólidos también diferencian estos flujos: concentraciones menores al 20 % se consideran inundaciones súbitas; entre 20 % y 50 %, flujos hiperconcentrados; y hasta el 80 %, flujos de escombros (Costa, 1988; Gaume et al., 2009). Aunque teóricamente es posible distinguir entre estos procesos, en la práctica, existe un continuo entre deslizamientos de tierra, flujos de escombros, inundaciones de escombros y avenidas de agua clara, ya que sus fronteras son difusas y a menudo se combinan en la naturaleza (Borga et al., 2014; ?).

En muchos casos, los fenómenos torrenciales comienzan en cuencas pequeñas como flujos de escombros, caracterizados por su alta concentración de sedimentos y su comportamiento pulsante. Sin embargo, a medida que estos flujos avanzan y se desplazan hacia áreas de mayor extensión, suelen incorporar más agua y perder parte de su carga sólida. Este aumento en el caudal líquido, combinado con la disminución de la concentración de sedimentos, puede transformar gradualmente el flujo de escombros en una inundación de escombros. En esta transición, el flujo se vuelve más fluido y adquiere características propias de un flujo newtoniano, donde la alta velocidad del agua permite el arrastre de bloques grandes sin los pulsos característicos de los flujos de escombros iniciales. Este proceso de transformación es común en cuencas donde la topografía y las condiciones hidrológicas favorecen la incorporación de agua a medida que el flujo se propaga cuesta abajo, lo que resulta en una complejidad adicional en la gestión y mitigación del riesgo asociado a estos eventos.

Susceptibilidad

Para determinar la susceptibilidad de una cuenca a avenidas torrenciales, se evalúan los parámetros morfométricos que, según autores como Arango et al. (2020) e Ilinca (2021), son los más efectivos para discriminar el comportamiento torrencial en una cuenca. Estos parámetros, vinculados al relieve, la forma de la cuenca y el orden de Strahler, son cruciales para determinar su carácter torrencial. A continuación, se describen los parámetros utilizados:

- Orden del drenaje principal (Su): corresponde al máximo orden que hayan alcanzado los drenajes, usando el método de Strahler (1957), además, este será el orden de la cuenca. El orden de la cuenca permite hacer una aproximación de que tantos contribuyentes tiene el cauce principal.
- Área (A): Área en kilómetros cuadrados de la cuenca.
- Longitud de la cuenca (Lb): representa la longitud entre el punto de desembocadura y el punto más distante del perímetro de la cuenca.
- Diferencia de Relieve (H): corresponde a la diferencia entre el punto de mayor altura (z) y el punto de menor altura (Z) en la cuenca.

$$H = Z - z$$

- Relación de relieve (Rh): este parámetro mide la inclinación general de la cuenca, representa la intensidad de los procesos erosivos presentes en esta. La relación de relieve es menor cuando se tiene una cuenca de gran área y pendientes bajas, siendo los valores más altos característicos de zonas montañosas (Schumm, 1956). Se calcula usando la diferencia de relieve de la cuenca y su longitud.

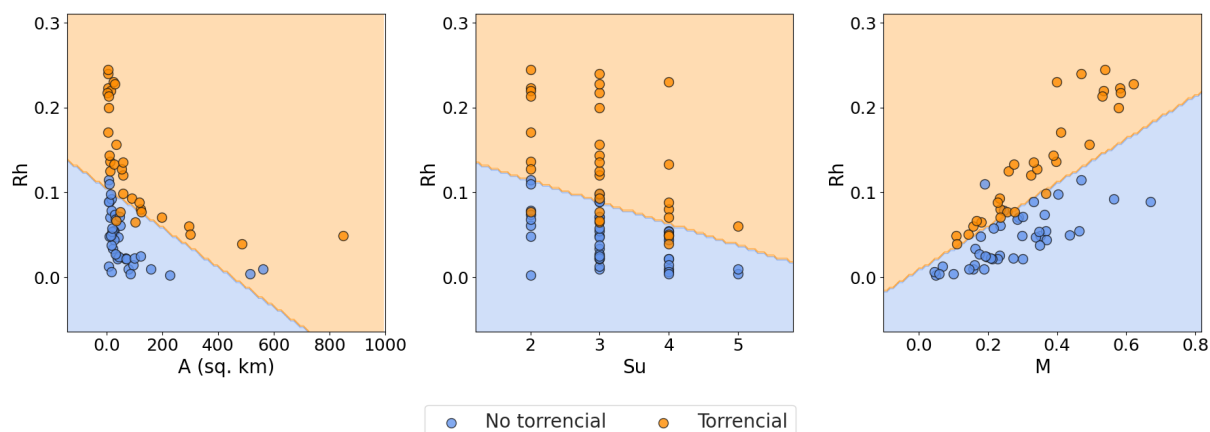


Figura 9: Comparación de índices morfométricos para evaluar la respuesta torrencial de una cuenca según Arango et al. (2020).

$$Rh = \frac{H}{Lb}$$

- Índice de Melton (M): se considera uno de los parámetros de mayor importancia para definir la torrencialidad de una cuenca. Mediante su análisis, es posible identificar la susceptibilidad de la cuenca a presentar flujos, ya que incluye la influencia de la geomorfología como el grado de resistencia del relieve a presentar dichos flujos (Melton, 1957). Se calcula usando la diferencia de relieve de la cuenca y su área.

$$M = \frac{H}{\sqrt{A}}$$

Arango et al. (2020) identificó tres combinaciones de parámetros basadas en la comparación entre cuencas torrenciales y no torrenciales en los Andes colombianos.

Por otra parte, Ilinca (2021) define el tipo de avenida torrencial que puede presentarse en una cuenca a partir de los valores de estos parámetros. Según este análisis, la clasificación entre flujos de escombros, inundaciones de escombros e inundaciones se da a partir de los valores de 4 parámetros morfométricos: el área (A), la longitud de la cuenca (Lb), relieve relativo (Rh) y el índice de Melton (M), de la siguiente manera:

Parámetro	Flujo de escombros	Inundación de escombros	Inundación
M	> 0.55	0.3 < M < 0.55	< 0.3
Rh	> 0.4	0.2 < Rh < 0.4	< 0.2
Lb (km)	< 1.7	1.7 < Lb < 5.1	> 5.1
A (km ²)	< 1.1	1.1 < A < 8.2	> 8.2

Tabla 2: Parámetros morfométricos para caracterizar cuencas en función del tipo de avenida torrencial según Ilinca (2021).

Modelación hidrológica

Clasificación de coberturas

En esta sección se describe la metodología y los resultados de la clasificación de coberturas para el área de estudio. Utilizando una imagen multispectral de alta resolución, se identificaron y clasificaron diversas coberturas del suelo mediante un modelo de aprendizaje supervisado. A continuación, se detallan los datos utilizados y las clases de cobertura definidas.

- I. **Imagen Multispectral:** se utilizó una imagen del 03 de marzo de 2024 de la misión PlanetScope para el área de estudio. Esta plataforma proporciona una frecuencia diaria de adquisición y alta resolución espacial, con un tamaño de píxel de 3.7 m. Los satélites SuperDove, están equipados con el instrumento PSB.SD, que captura ocho bandas espectrales con una resolución radiométrica de 16 bits (Zagajewski et al., 2024).
- II. **Definición de clases:** A partir de la imagen de satélite, se definieron las clases con las cuales se construyó una muestra total de 212 puntos para el entrenamiento del modelo supervisado con las siguientes categorías:
 - **Bosque denso:** bosques ubicados en áreas montañosas, tanto en las partes altas como en las partes bajas. Incluye zonas nativas sin influencia humana en las elevaciones superiores y áreas fragmentadas en las elevaciones inferiores.
 - **Plantación forestal:** bosques que siguen los cursos de agua en áreas montañosas, aun así logran extendiéndose más allá del cauce principal. Están compuestos por diversas especies vegetales adaptadas a condiciones de galería y/o de montaña y pueden o no presentar influencia humana.
 - **Pasto denso:** áreas abiertas con cobertura de pasto verde y frondoso, indicativo de una buena salud y densidad de la vegetación herbácea.
 - **Pasto disperso:** áreas abiertas con pasto menos denso, presentando zonas pálidas y partes con suelo expuesto.
 - **Vegetación en transición:** áreas abiertas con una combinación de pasto y árboles dispersos. Esta cobertura muestra un uso mixto de la tierra, donde la vegetación arbórea o herbácea está intercalada con una cobertura de pasto.
 - **Suelo desnudo:** estos son terrenos sin cobertura vegetal significativa, donde el suelo está completamente expuesto. Estas áreas pueden incluir tierras agrícolas, áreas erosionadas y movimientos en masa.
 - **Urbano:** superficies desarrolladas que incluyen edificaciones, infraestructuras y otras estructuras construidas por el hombre. Estas áreas están altamente modificadas y tienen poca o ninguna vegetación natural.

En la Figura 10 se muestra la firma espectral para cada una de las clases definidas, en función de la longitud de onda para cada banda y la reflectancia.

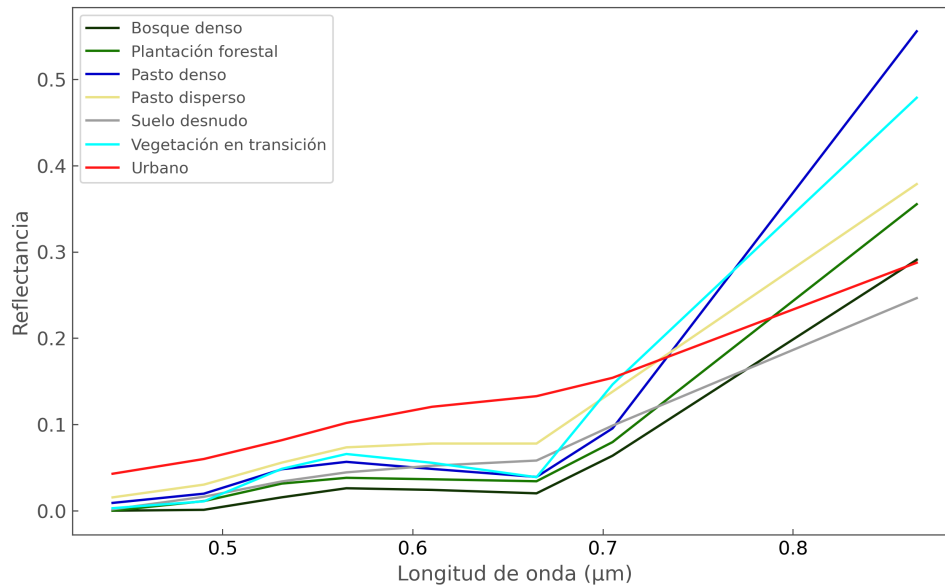


Figura 10: Firma espectral para clases definidas

III. **Clasificación supervisada:** se realiza la clasificación a través del modelo de aprendizaje *Random Forest*. Este es un modelo supervisado que funciona a través de la creación de múltiples árboles de decisión durante el proceso de entrenamiento y produce la salida basada en el modo de las clasificaciones de los árboles individuales. Random Forest fue escogido para la clasificación de uso y cobertura de la tierra debido a su alta precisión y robustez (Jaiswal and Samikannu, 2017; You et al., 2010).

La naturaleza de ensamblaje de este algoritmo lo hace menos propenso al sobre ajuste comparado con otros modelos de un solo árbol. Estas características hacen que sea especialmente adecuado para análisis complejos donde la precisión y la generalización son críticas. En la mayoría de casos de estudio es el modelo con el mejor resultado y rendimiento para este tipo de aplicaciones de clasificación (You et al., 2010).

Disponibilidad de sedimentos

Un aspecto crucial, aunque no indispensable, en el desarrollo de avenidas torrenciales es el aporte de sedimentos al flujo, ya que este factor puede determinar si un flujo de escombros se desarrolla en una cuenca. Según Cañón et al. (2021), los sedimentos pueden originarse de deslizamientos en las laderas o vertientes de los drenajes, de la erosión de las laderas, o de la erosión del lecho y las márgenes del drenaje. Para estimar los sedimentos generados por procesos de inestabilidad asociados a movimientos en masa, se incorpora la investigación sobre Estabilidad de Laderas, cuyos resultados serán integrados en la presente investigación.

Modelación del tránsito de las avenidas torrenciales

Existen diversos enfoques metodológicos para la evaluación de las trayectorias o tránsitos de las avenidas torrenciales, cada uno con características particulares que los hacen adecuados para diferentes tipos de

análisis. A continuación, se presentan tres enfoques destacados junto con ejemplos representativos de modelos que los implementan:

- **Enfoque empírico:** Este enfoque se basa en leyes empíricas y utiliza algoritmos para modelar la propagación de agentes adimensionales sobre la topografía. Estos algoritmos controlan tanto la dispersión como el alcance del flujo, permitiendo una representación simplificada de los procesos asociados. Un ejemplo destacado de este enfoque es *Flow-R*, que ha sido ampliamente utilizado para evaluar la susceptibilidad de flujos gravitacionales. Este modelo aplica reglas de propagación sencillas, ideales para análisis preliminares o de escala regional, y proporciona resultados rápidos y fácilmente interpretables.
- **Enfoque hidrodinámico:** Este enfoque utiliza modelos matemáticos que representan fenómenos hidrodinámicos, como el movimiento de masas de agua, pero que también pueden extenderse para simular procesos similares a las avenidas torrenciales. Un ejemplo representativo es el modelo *Iber*, originalmente diseñado para la simulación de inundaciones. Iber emplea ecuaciones de aguas poco profundas para describir el comportamiento del flujo, lo que permite modelar tanto flujos líquidos como procesos más complejos adaptándose a diferentes condiciones hidrológicas y geomorfológicas.
- **Enfoque de flujo de masa:** Este enfoque se basa en modelos matemáticos avanzados que consideran interacciones físicas entre las fases del flujo (como sólidos y líquidos), fuerzas de arrastre y procesos distribuidos de erosión y deposición. Un ejemplo destacado es *r.avaflow*, un modelo integral que incorpora una representación detallada de los procesos dinámicos del flujo de masas. Este modelo es particularmente útil para estudios que requieren un análisis detallado de las interacciones entre el flujo y el terreno, proporcionando información clave sobre la distribución espacial del material movilizado y las áreas afectadas por la deposición.

Modelación empírica

En el análisis de susceptibilidad, se identifican los tipos potenciales de avenidas torrenciales que podrían presentarse en cada cuenca. Aunque las avenidas torrenciales son fenómenos complejos que resultan de múltiples procesos a nivel de cuenca, sus impactos suelen concentrarse en el cauce principal y las zonas aledañas. Por ello, al determinar si una cuenca tiene el potencial de generar este tipo de eventos, es posible estimar las áreas que podrían verse afectadas mediante el análisis del tránsito del flujo. Para una priorización inicial de las áreas susceptibles, se recurre a modelos pragmáticos que no requieren una caracterización detallada de los insumos, pero que permiten realizar estimaciones útiles y rápidas. En este contexto, se emplea el modelo *Flow-R*, que utiliza como datos de entrada las áreas fuente y el modelo digital de elevación, proporcionando una aproximación eficiente para identificar las zonas potencialmente afectadas por estos fenómenos.

Flow-R, acrónimo de *Flow path assessment of gravitational hazards at a Regional scale*, es una herramienta diseñada para evaluar la susceptibilidad espacial a procesos gravitacionales. Combina algoritmos de dirección de flujo con funciones de persistencia para generar mapas de susceptibilidad espacial y estimar la distancia máxima de recorrido de los flujos, basándose en leyes de fricción simplificadas (Horton et al., 2013). Esta metodología permite realizar análisis precisos y adaptables en función de las condiciones específicas del terreno.

El modelo utiliza como base el algoritmo de dirección de flujo de Holmgren (Holmgren, 1994) y su versión modificada (Horton et al., 2013), que ajusta la altura de la celda central mediante un factor dh . Para este análisis, se adopta un valor de $dh = 0,5$, lo que permite ajustar la propagación del flujo en función de las características locales. Este enfoque mejora la precisión en la representación de la divergencia del flujo, controlada mediante el exponente x del modelo, que en este caso se fija en $x = 1$. Ambos parámetros, x y

dh , han sido calibrados específicamente para las condiciones topográficas y geomorfológicas del Valle de Aburrá, asegurando que los resultados reflejen con mayor exactitud la dinámica del flujo en esta región.

Las funciones de persistencia utilizadas en Flow-R asignan pesos diferenciados a las celdas vecinas para modelar la propagación del flujo (Gamma, 2000). Estas funciones priorizan la celda frontal con el peso más alto, mientras que asignan valores decrecientes a las celdas ubicadas a 45, 90 y 135°, y excluyen completamente a las celdas opuestas a 180° para evitar propagaciones hacia atrás. Entre las opciones disponibles, la función Gamma se emplea de manera predominante, ya que es la más utilizada y recomendada por los autores debido a su balance entre simplicidad y precisión. Por último, el control del alcance y distancia máxima recorrida por el flujo en el modelo se basa en el ángulo máximo de viaje o ángulo de alcance (Corominas, 1996; Heim, 1932). Para este análisis se usa un ángulo de 0,5°.

Resultados

Evaluación regional

Susceptibilidad

A partir del modelo de elevación digital (DEM) del Valle de Aburrá, se llevó a cabo la división hidrológica del territorio en cuencas. En la primera etapa, se identificaron las cuencas principales que vierten directamente en el río Aburrá, resultando en un total de 303 cuencas. Posteriormente, las cuencas más grandes se subdividieron para evitar que el área fuera un factor de sesgo para el análisis. Así, se encontraron las cuencas en el Valle de Aburrá en donde se pueden originar avenidas torrenciales. Para cada una de estas cuencas, se calcularon los parámetros morfométricos relevantes. Posteriormente, se evaluó el rendimiento del modelo de clasificación propuesto por Arango et al. (2020). Los resultados de esta evaluación se ilustran en la Figura 11, que muestra cómo las características morfométricas de las cuencas se distribuyen y correlacionan con las categorías de clasificación establecidas en el modelo.

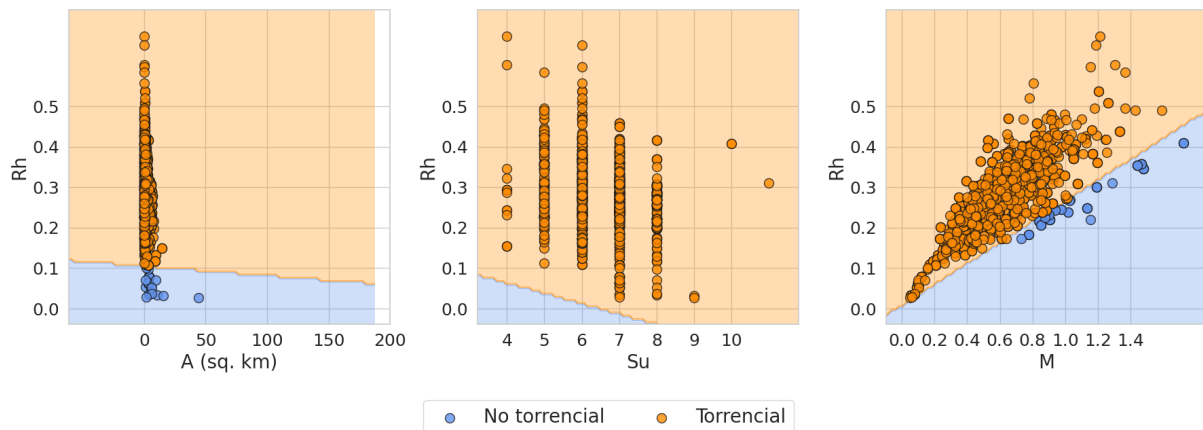


Figura 11: Comparación de índices morfométricos de las cuencas del Valle de Aburrá según Arango et al. (2020).

Estos resultados muestran que las características morfométricas propias de las cuencas torrenciales dominan en las cuencas del Valle de Aburrá. Según el modelo propuesto por Arango et al. (2020), se tienen

16 cuencas aluviales y 638 cuencas torrenciales. Estas cuencas aluviales se encuentran por fuera del valle geomorfológico y corresponden a los altiplanos en área de menor relieve y menor pendiente.

Adicionalmente, se presentan los resultados de las Figuras 12 a 15 para los parámetros morfométricos que Ilinca (2021) establece como discriminantes del comportamiento de una cuenca según la Tabla 2.

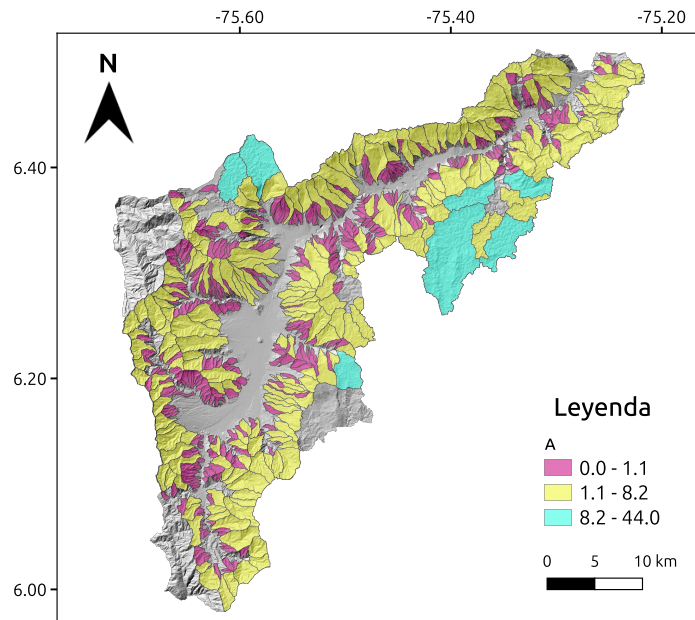


Figura 12: Área para las cuencas del Valle de Aburrá.

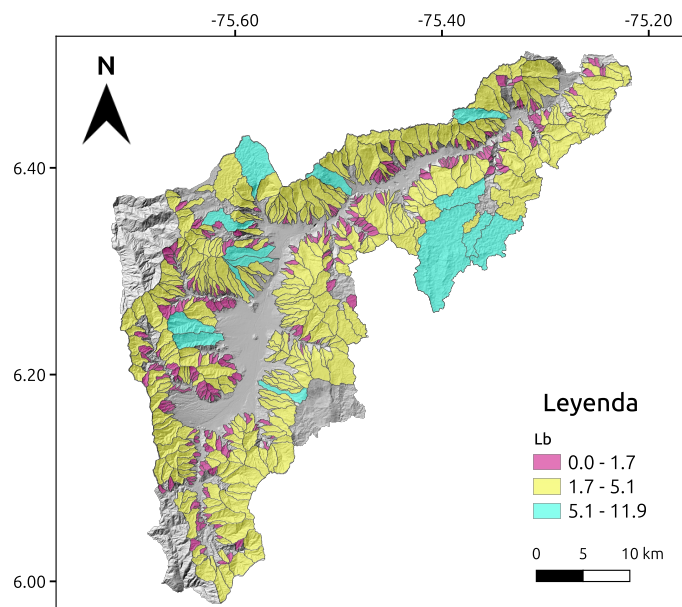


Figura 13: Longitud de Cuenca para las cuencas del Valle de Aburrá.

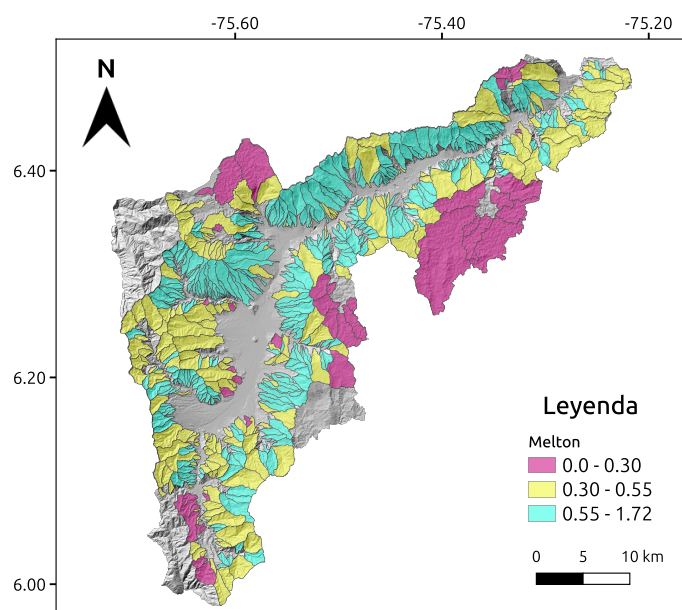


Figura 14: Índice de Melton para las cuencas del Valle de Aburrá.

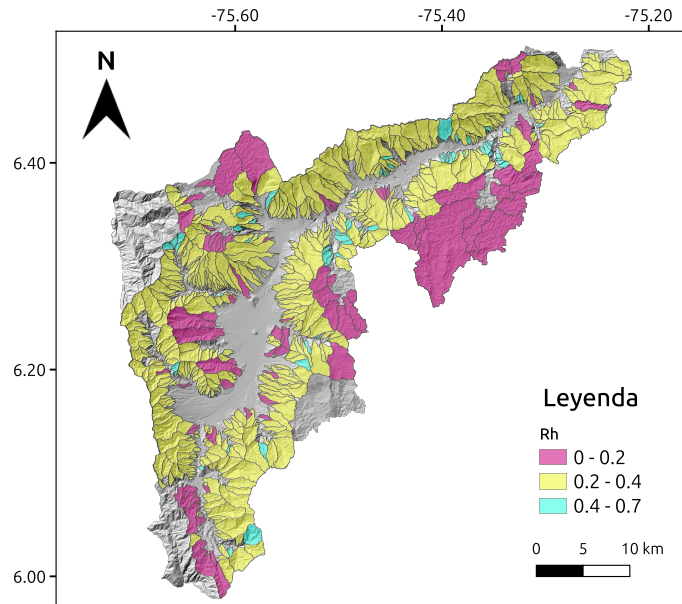


Figura 15: Relieve Relativo para las cuencas del Valle de Aburrá.

Estos índices ofrecen una aproximación al comportamiento y al potencial de generar flujos torrenciales, como flujos de escombros o inundaciones de escombros. Es común observar que las cuencas más grandes tienden a ser clasificadas como propensas a inundaciones, mientras que las cuencas más pequeñas se clasifican como susceptibles a flujos de escombros. Este patrón refleja el comportamiento natural de estos eventos, donde los flujos más concentrados y destructivos se presentan en cuencas pequeñas y de mayor relieve. A medida que estos flujos transitan e incorporan más agua al ingresar a áreas de acumulación mayores, se transforman en inundaciones de escombros, caracterizadas por una menor capacidad destructiva y menor concentración de sedimentos.

Si el flujo continúa avanzando hacia áreas de acumulación aún mayores, la cuenca pierde la capacidad de sostener la velocidad y concentración de sedimentos, lo que provoca que el flujo disminuya y evolucione hacia procesos de inundación. Este comportamiento natural es reflejado con precisión por los índices morfométricos. Sin embargo, también introduce un sesgo debido a la escala en la que se evalúa cada cuenca; es decir, el sesgo por área muestra diferentes estados de las avenidas torrenciales que podrían ocurrir en cada caso.

Para determinar la viabilidad en la generación de un flujo de escombros, se evalúa la disponibilidad de suelos grueso-granulares en cada cuenca. Estos suelos se toman de la caracterización geotécnica de las unidades geológicas superficiales explicadas en la línea de investigación de Estabilidad de Laderas. A partir de la granulometría de los suelos en cada unidad se establece la predominancia de los suelos granulares o finos y su área de influencia en cada cuenca.

Según Ilinca (2021), se establece un umbral del 5%, por encima del cual las cuencas tienen mayor potencial de generar flujos de escombros no-newtonianos, caracterizados por un alto poder destructivo. En contraste, las cuencas que no contienen materiales granulares en esa proporción están más inclinadas a generar flujos de escombros con características de inundaciones, las cuales, si bien pueden ser peligrosas, no poseen la misma capacidad destructiva que los flujos no-newtonianos. En la Figura 16 se presentan las cuencas del Valle de Aburrá discriminadas por esta métrica.

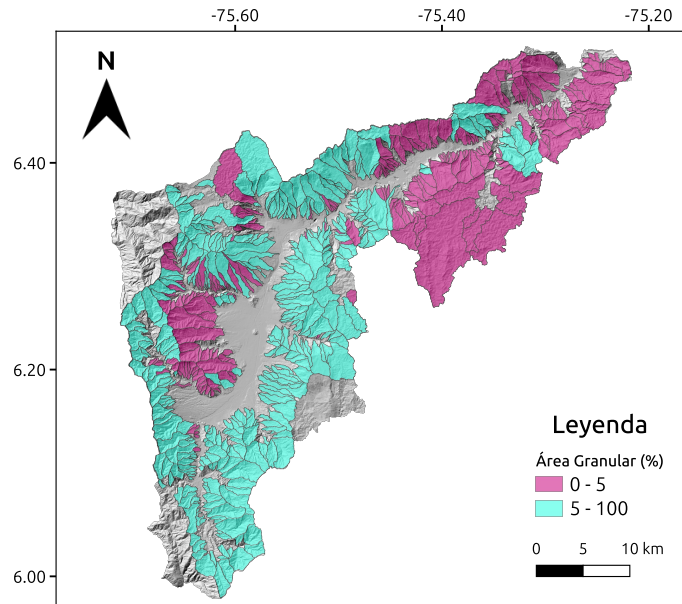


Figura 16: Porcentaje de área en suelos granulares para las cuencas del Valle de Aburrá.

Finalmente, se determina el tipo de evento más peligroso que puede generarse en cada cuenca de la siguiente manera:

- Inundaciones (F): estas cuencas tienen posibilidad únicamente de presentar inundaciones, ya que su relieve y pendiente son bajos. Las inundaciones se caracterizan por ser eventos de lenta respuesta hidrológica. No se consideran torrenciales.
- Inundación de Escombros (IE): estas cuencas tienen características que permiten la generación de flujos hiperconcentrados o inundaciones de escombros. Estos eventos se caracterizan por ser flujos bifásicos de rápida respuesta hidrológica en la que predomina el transporte de sedimentos por arrastre.
- Flujos de escombros (FE): estas cuencas representan los flujos de mayor poder destructivo. También pueden presentar inundaciones de escombros. Se subdividen según la granulometría presente en sus suelos ya que los sedimentos que componen el flujo determinan su reología y, por ende, su potencial destructivo.
 - Flujos de escombros Granulares (FE-G): estos flujos son monofásicos de reología no-newtoniana y el mayor potencial destructivo.
 - Flujos de escombros No Granulares (FE-NG): estos flujos al no contener sedimentos gruesos no tienen reología y características de una sola fase.

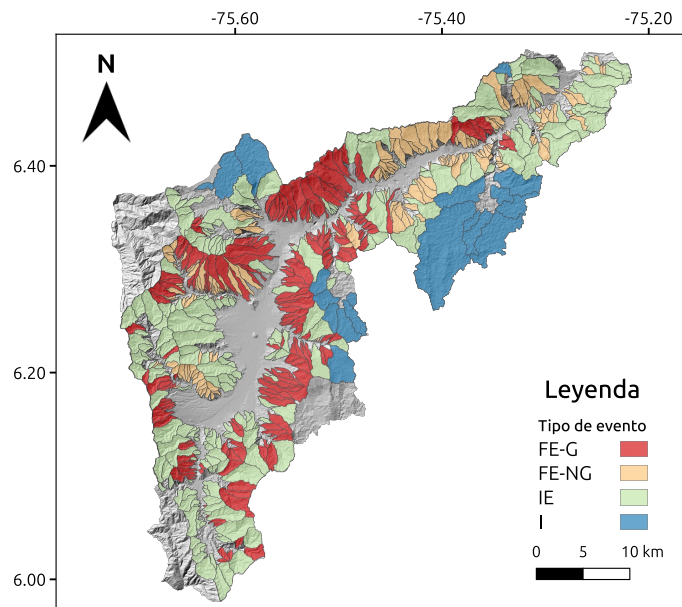


Figura 17: Caracterización de los tipos de eventos torrenciales que se pueden presentar en las cuencas del Valle de Aburrá.

Modelación del tránsito de las avenidas torrenciales

Para estimar las posibles afectaciones a las edificaciones dentro de una cuenca ante la ocurrencia de una avenida torrencial, se implementó el modelo Flow-R como herramienta de simulación. Para validar la aplicabilidad de esta metodología, se seleccionaron dos casos de estudio en cuencas donde se han registrado avenidas torrenciales en los últimos años.

El primer caso corresponde a la cuenca de la quebrada La Manguala, ubicada en el corregimiento de San Antonio de Prado, en el Distrito de Medellín. Esta cuenca fue escenario de una avenida torrencial el 7 de septiembre de 2022. Las Figuras 18 y 19 muestran los resultados de la simulación realizada, así como la distribución de las edificaciones mapeadas a partir del catastro distrital.

El modelo Flow-R presenta los resultados en términos de probabilidad, que representa la posibilidad de que el flujo transite por cada celda del terreno. Las probabilidades más altas se concentran en el cauce principal y en las áreas inmediatamente adyacentes, mientras que las probabilidades más bajas se ubican en las zonas periféricas potencialmente inundables.

Al cruzar los resultados del modelo con la ubicación de las edificaciones, se identificaron 647 construcciones en condición de exposición o potencialmente afectadas. Estas edificaciones se clasificaron de acuerdo con su altura: 292 corresponden a edificaciones de un piso, 206 de dos pisos, 116 de tres pisos, 15 de cuatro pisos, 4 de cinco pisos y 8 de siete pisos. En términos de área construida, la superficie afectada asciende a 25,955 m^2 . El segundo caso de estudio corresponde a la cuenca de la quebrada El Chocho, ubicada en el municipio de Barbosa. En este drenaje se registró una avenida torrencial el 10 de octubre de 2016. La Figura 20 presenta los resultados de la simulación realizada, junto con la distribución de las edificaciones mapeadas a partir del catastro municipal de Barbosa.

Los resultados muestran que las probabilidades más altas de tránsito del flujo se concentran en el cau-

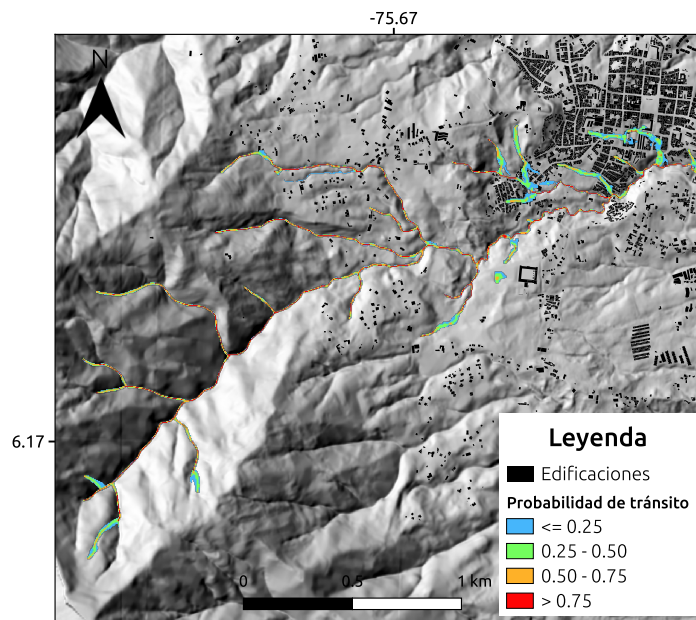


Figura 18: Modelación de las trayectorias probables de una avenida torrencial en la quebrada Manguala parte inicial.

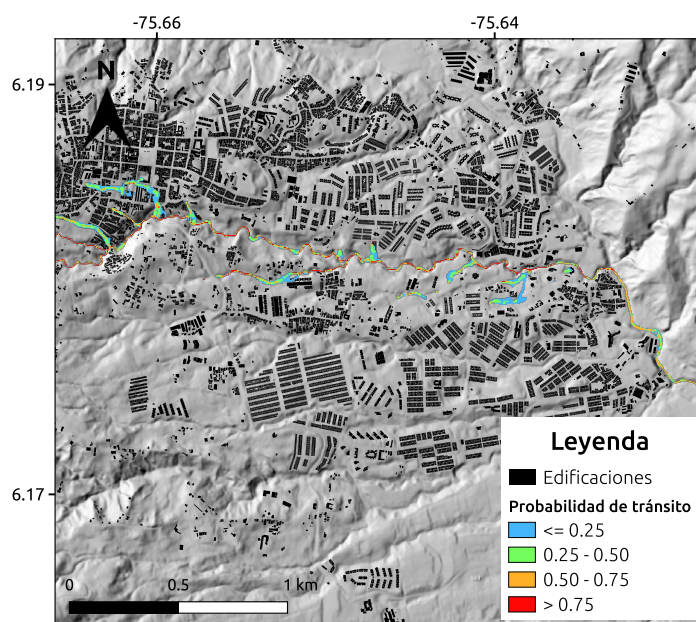


Figura 19: Modelación de las trayectorias probables de una avenida torrencial en la quebrada Manguala parte final.

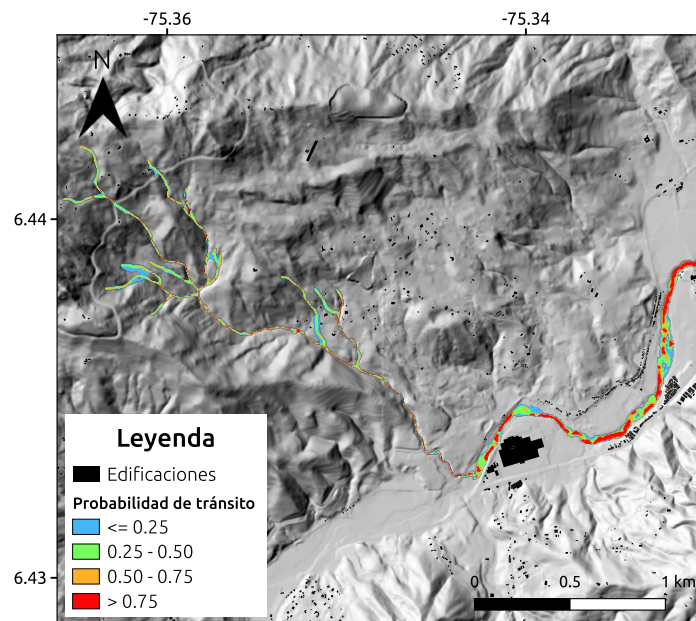


Figura 20: Modelación de las trayectorias probables de una avenida torrencial en la quebrada Chocho.

ce principal y en las áreas inmediatamente adyacentes, mientras que las probabilidades más bajas se distribuyen en las zonas periféricas, especialmente en los tributarios potencialmente inundables.

Al superponer los resultados del modelo con la ubicación de las edificaciones, se identificaron tres construcciones en condición de exposición o potencialmente afectadas. Estas edificaciones tienen tres pisos de altura cada una. En términos de área construida, la superficie afectada asciende a 200 m^2 , lo que resalta la necesidad de priorizar la gestión del riesgo en estas áreas específicas.

Evaluación detallada

Susceptibilidad

La Tabla 3 detalla los principales parámetros morfométricos de la cuenca.

Tabla 3: Parámetros morfométricos de la cuenca La Despensa.

Parámetro	Valor	Tipo de flujo
Área de la cuenca (km^2)	2.17	Inundación de Escombros
Perímetro (km)	10.1	n/a
Longitud de la cuenca (km)	2.96	Inundación de Escombros
Orden Strahler (Su)	4	n/a
Relación de relieve (Rh)	0.32	Inundación de Escombros
Índice de Melton (M)	0.63	Flujo de Escombros

La Figura 21 presenta los resultados del análisis morfométrico de la cuenca La Despensa, utilizando la combinación de variables propuesta por Arango et al. (2020). Los valores obtenidos para cada parámetro morfométrico permiten clasificar a La Despensa como una cuenca torrencial.

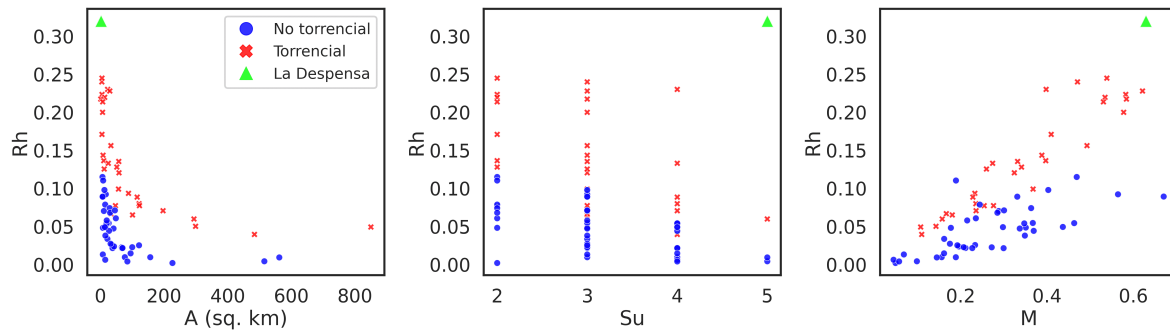


Figura 21: Variables morfométricas de la cuenca de la quebrada La Despensa.

Modelación hidrológica

Clasificación de coberturas

La metodología empleada para la selección del modelo de clasificación se sustentó en la aplicación de técnicas de optimización de hiperparámetros mediante un enfoque de búsqueda sistemática. Se procedió a la exploración de diversas configuraciones del algoritmo *Random Forest*, ajustando los siguientes parámetros:

- *nestimators*: Número de árboles en el bosque.
- *maxfeatures*: Máximo número de características consideradas para dividir un nodo.
- *maxdepth*: Profundidad máxima de los árboles.
- *minsamplesplit*: Mínimo número de muestras requeridas para dividir un nodo interno.
- *minsamplesleaf*: Mínimo número de muestras requeridas para estar en un nodo hoja.
- *bootstrap*: Método de selección de muestras para entrenar cada árbol.

Adicionalmente, se aplicó una división estratificada de los datos en conjuntos de entrenamiento y prueba, asegurando una representación equilibrada de todas las clases en ambos conjuntos. En la Figura 22 se puede ver el mapa final de coberturas para la cuenca de la quebrada La Despensa. En la Tabla 4 se presentan las descripciones de las clases y sus áreas:

Tabla 4: Descripción de las clases de coberturas y sus áreas en la cuenca La Despensa.

Categoría	Descripción	Área [%]
Bosque denso	Bosque de alta densidad	16
Plantación forestal	Bosque de baja densidad	47
Pasto denso	Pastos sanos y densos	5.8
Pasto disperso	Pastos con menor densidad y exposición de suelo	20.3
Suelo desnudo	Zonas totalmente expuestas sin vegetación	5.2
Veg. en transición	Zonas arbustivas y pastosas	4.4
Urbano	Zonas urbanas y carreteras pavimentadas	1.3

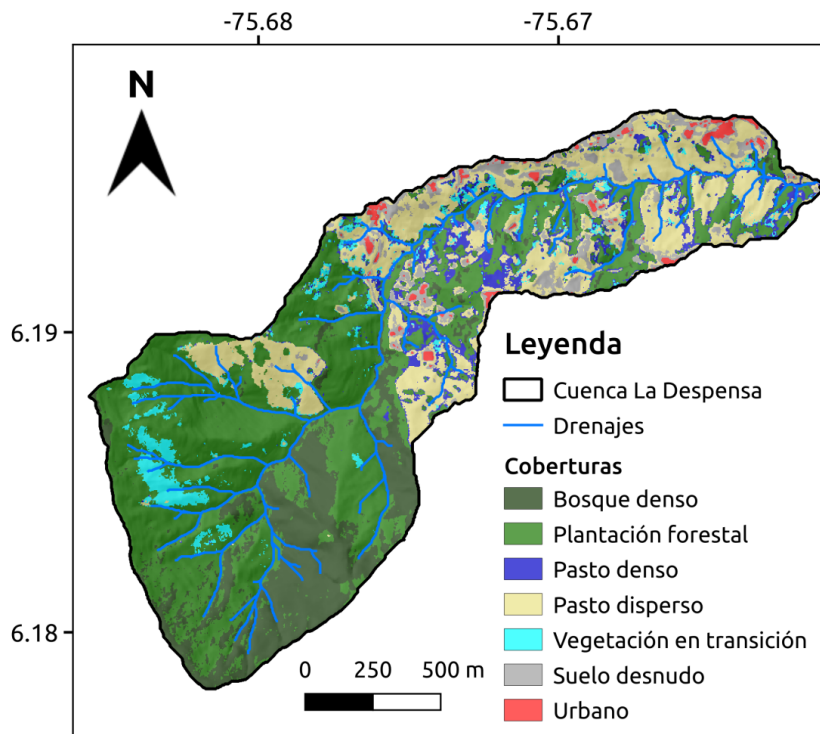


Figura 22: Mapa de coberturas para cuenca La Despensa.

En la Figura 23, se puede ver la curva ROC (Receiver Operating Characteristic) para el rendimiento general del modelo, obteniendo un área bajo la curva (AUC) de 0.99. La mejor combinación de parámetros fue la siguiente: n estimator: 150, min samples split: 15, min samples leaf: 8, max features: sqrt, max depth: 5, bootstrap: True. En la Tabla 5, se ven las métricas generales de rendimiento del modelo en los conjuntos de entrenamiento y prueba.

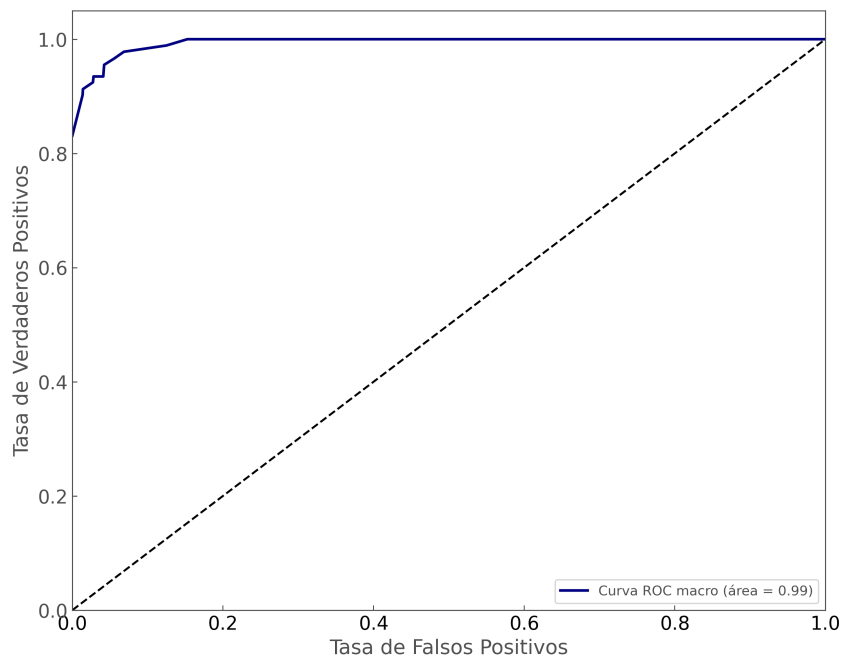


Figura 23: Curva ROC para modelo de clasificación.

Métrica	Entrenamiento[%]	Prueba[%]
Accuracy	89	88
F1 Score	89	88
Kappa Cohen	88	86

Tabla 5: Métricas para modelo de aprendizaje.

Conclusiones y trabajo futuro

El análisis regional y el detallado se complementan para abordar de manera integral la evaluación del riesgo por avenidas torrenciales. El análisis regional permite identificar de manera rápida y eficiente las cuencas con mayor susceptibilidad utilizando modelos pragmáticos como Flow-R. Este enfoque, aunque simplificado, genera una primera clasificación de las cuencas basado en factores topográficos y geomorfológicos, lo que es crucial para priorizar recursos en un territorio extenso como el Valle de Aburrá, que cuenta con más de 600 cuencas torrenciales identificadas. Por su parte, el análisis detallado se enfoca en cuencas específicas seleccionadas a partir de la priorización regional, utilizando información más precisa y modelos complejos que integran variables hidrológicas, disponibilidad de sedimentos y caracterización del uso del suelo. Esto permite obtener resultados más fiables y adaptados a las condiciones locales, como se evidenció en los estudios de las quebradas La Manguala y El Chocho.

El uso del modelo morfométrico en el análisis regional permitió identificar las cuencas susceptibles a avenidas torrenciales en el Valle de Aburrá. Los resultados muestran que el 95 % de las cuencas tienen características morfométricas que las clasifican como torrenciales. Factores como el índice de Melton y la relación de relieve fueron determinantes para esta clasificación, revelando patrones de comportamiento

típicos en cuencas pequeñas y escarpadas, donde los flujos tienden a ser más concentrados y destructivos. Adicionalmente, el modelo demostró ser una herramienta valiosa para priorizar cuencas con mayor riesgo potencial, facilitando la selección de áreas de estudio para el análisis detallado.

De esta caracterización inicial se realizó un análisis particular de las quebradas La Manguala y El Chocho, donde se implementaron modelos que integraron información local como datos catastrales y las potenciales trayectorias de los flujos torrenciales. En La Manguala, el modelo identificó 647 edificaciones potencialmente afectadas, distribuidas en diferentes alturas y con un área construida total de $25,955 m^2$. En El Chocho, aunque el número de edificaciones afectadas fue menor (3 construcciones con un área total de $200 m^2$), el impacto en las áreas adyacentes al cauce sigue siendo relevante para la planificación territorial. Estos resultados reflejan la efectividad del análisis detallado para evaluar impactos específicos y proponer medidas de mitigación adaptadas a las condiciones particulares de cada cuenca.

En el análisis detallado realizado en la cuenca de la quebrada La Despensa, se evaluó su susceptibilidad mediante parámetros morfométricos como el índice de Melton y la relación de relieve, que revelaron una alta predisposición a flujos torrenciales. Además, se analizó la disponibilidad de sedimentos, cuyos resultados están disponibles en la investigación de Modelación Física de Movimientos en Masa, identificando áreas fuente que pueden contribuir significativamente a la magnitud del flujo. Para obtener una visión más realista del tránsito y la mancha de una avenida torrencial, se plantea la modelación hidrológica que permite estimar la respuesta de la cuenca a eventos de precipitación intensa, identificando las zonas más vulnerables dentro del cauce y sus alrededores; así como la aplicación de modelos de tránsito de masas, lo cual proporcionará información más precisa sobre el alcance del flujo y su potencial afectación en infraestructura y población.

La investigación futura se estructurará en cuatro líneas principales de desarrollo:

- Expansión y validación regional: extender la aplicación del modelo Flow-R a la totalidad del Valle de Aburrá para estimar la infraestructura y población expuesta a este fenómeno a través de este análisis empírico regional.
- Modelación hidrodinámica avanzada: implementar modelos de tránsito de masas que incorporen la relación entre precipitaciones y alcance de los flujos torrenciales.
- Desarrollo de sistemas de alerta temprana: diseñar e implementar estrategias para un sistema integrado de monitoreo y alerta que combine datos en tiempo real de precipitación. Este sistema podrá incorporar umbrales de activación basados en los resultados de la modelación hidrodinámica y las características específicas de cada cuenca.

Esta propuesta de trabajo futuro busca no solo profundizar el conocimiento científico sobre las avenidas torrenciales, sino también fortalecer la resiliencia comunitaria para la gestión del riesgo en el Valle de Aburrá.

Referencias

- AMVA y UNAL (2018). Estudios básicos de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en los municipios de caldas, la estrella, envigado, itagüí, bello, copacabana y barbosa, para la incorporación de la gestión del riesgo en la planificación territorial. Informe técnico.
- Arango, M., Aristizábal, E., and Gómez, F. (2020). *Morphometrical analysis of torrential flows-prone catchments in tropical and mountainous terrain of the Colombian Andes by machine learning techniques.*

- Aristizábal, E., Carmona, M. I. A., and López, I. K. G. (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.
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., and Jakob, M. (2014). Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518(PB):194–205.
- Cañón, A. M. R., Reyes, A. A., Alejandra, M. M., Lucía, M. P. G., Viviana, R. P. S., Steve, M. C. M., Felipe, R. F. L., Ángel, P. S. M., Eduardo, C. C., Nicolás, R. P., et al. (2021). Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales.
- Corantioquia (2006). Estudio para la reglamentación del aprovechamiento, uso y administración de las aguas de la quebrada doña maría, incluidas todas las subcuencas o microcuencas de sus quebradas afluentes, hasta su desembocadura en el río aburrá, localizada entre los municipios de medellín e itagüí. Informe técnico.
- Corominas, J. (1996). The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. <https://doi.org/10.1139/t96-005>, 33(2):260–271.
- Costa, J. E. (1988). Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows. *Flood geomorphology*, pages 113–122.
- Coussot, P. and Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, 40(3-4):209–227.
- Gamma, P. (2000). *dfwalk-Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung*. Geographisches Institut der Universität Bern, Bern, Switzerland.
- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaškovičová, L., Blöschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., Daliakopoulos, I., Garcia, J., Irimescu, A., Kohnova, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., Sempere-Torres, D., Stancalie, G., Szolgay, J., Tsanis, I., Velasco, D., and Viglione, A. (2009). A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology*, 367(1-2):70–78.
- Heim, A. (1932). *Bergsturz und menschenleben*. Number 20. Fretz & Wasmuth.
- Holmgren, P. (1994). Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: An empirical evaluation. *Hydrological Processes*, 8(4):327–334.
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B., and Zimmermann, M. (2013). Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(4):869–885.
- Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. J., and Hutchinson, J. N. (2001). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, 7(3):221–238.
- Hungr, O., Leroueil, S., and Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2):167–194.
- Ilinca, V. (2021). Using morphometrics to distinguish between debris flow, debris flood and flood (southern carpathians, romania). *CATENA*, 197:104982.
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3):245–296.
- Jaiswal, J. K. and Samikannu, R. (2017). Application of Random Forest Algorithm on Feature Subset Selection and Classification and Regression. In *2017 World Congress on Computing and Communication Technologies (WCCCT)*, pages 65–68, Tiruchirappalli, Tamil Nadu, India. IEEE.

- Melton, M. A. (1957). *An Analysis of the Relations Among Elements of Climate, Surface Properties, and Geomorphology*.
- O'Brien, J. and Julien, P. (1985). Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. *Proc. ASCE HD Delineation of landslides, flash flood and debris flow hazards*, pages 260–279.
- Pierson, T. C. and Costa, J. E. (1987). A rhéologie classification of subaerial sediment-water flows. *GSA Reviews in Engineering Geology*, 7:1–12.
- Schumm, S. A. (1956). EVOLUTION OF DRAINAGE SYSTEMS AND SLOPES IN BADLANDS AT PERTH AMBOY, NEW JERSEY. *BULLETIN OF THE GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA*., 67(1):56.
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union*, 38(6):913–920.
- Universidad de los Andes (2016). Estudio de microzonificación sísmica del valle de aburrá. Informe técnico.
- Yang, T., Li, Y., Zhang, Q., and Jiang, Y. (2019). Calculating debris flow density based on grain-size distribution. *Landslides*, 16(3):515–522.
- You, J., Hubbard, K. G., Mahmood, R., Sridhar, V., and Todey, D. (2010). Quality Control of Soil Water Data in Applied Climate Information System—Case Study in Nebraska. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(3):200–209.
- Zagajewski, B., Kluczek, M., Zdunek, K. B., and Holland, D. (2024). Sentinel-2 versus PlanetScope Images for Goldenrod Invasive Plant Species Mapping. *Remote Sensing*, 16(4):636.