ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD POR DESLIZAMIENTOS EN LA COMUNA 8 DEL DISTRITO DE MEDELLÍN

Daniela Zapata Agudelo

Proyecto de prácticas para optar al título de Ingeniera Civil

Modalidad de Práctica

Semestre de Industria

Derly Estefanny Gómez García, PhD en Ingeniería Ambiental

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

Cita	(Zapata Agudelo, 2025)
Referencia **Estilo APA 7 (2020)**	Zapata Agudelo D. (2025). *Análisis de susceptibilidad por deslizamientos en la comuna 8 del distrito de Medellín [*Trabajo de prácticas]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

creative commons BY NC SA

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Vicerrectoría de Docencia

Sistema de Bibliotecas

Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedico este trabajo, con profunda gratitud y amor, a Dios, por darme la fuerza y la sabiduría para seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Sin su presencia, este camino no habría sido posible.

A mis padres, Fabio y María, quienes, aunque alguna vez vieron muy lejana la posibilidad de que su hija se convirtiera en ingeniera, nunca dejaron de creer en mí. Gracias por su amor incondicional, por sus sacrificios silenciosos y por enseñarme, con su ejemplo, a soñar con los pies en la tierra.

A mi hermano Juan, por su apoyo constante, por acompañarme en las dificultades y por brindarme siempre su confianza y cariño.

A toda mi familia, a mi pareja, mis amigos y quienes estuvieron en el proceso, por su compañía sincera, por los ánimos en los momentos duros y por compartir conmigo risas, consejos y momentos especiales, en mi corazón siempre.

Este logro es tan mío como de ustedes. Gracias por creer en mí, incluso cuando yo dudaba.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi familia, por estar presente en cada paso de este camino. Su amor, apoyo y confianza han sido el pilar que me sostuvo en los momentos de mayor desafío.

A los profesores Edwin, Derly y Alba, por ser no solo excelentes docentes, sino también seres humanos maravillosos y comprometidos. Gracias por compartir su conocimiento con pasión y por acompañarme con respeto durante este proceso académico, los admiro mucho.

A Ferney Darío Fernández, con especial gratitud, por haberme obsequiado el primer computador que marcó el inicio de este sueño de convertirme en ingeniera. Gracias por todas las oportunidades, por su inmenso apoyo y por creer en mí cuando apenas comenzaba a construir mi camino.

A Manuela y Camilo, por abrirme las puertas, por acompañarme con cariño y por brindarme su apoyo para culminar este proceso. Gracias por ayudarme a seguir adelante.

A la Alcaldía de Medellín, por el espacio de crecimiento y aprendizaje que me brindaron durante mi práctica profesional. Y en especial, a William Castrillón, Camila y Laura por su cariño, profesionalismo, paciencia y por todo lo que me enseñaron. Su acompañamiento ha dejado una huella valiosa en mi formación.

A todos, gracias por creer, por acompañar y por aportar a este logro que no es solo mío, sino también de quienes caminaron conmigo.

Tabla de Contenido

Resumen 8

Abstract 8

1. Introducción 9

2. Objetivos 10

2.1 Objetivo general 10

2.2 Objetivos específicos 10

3. Planteamiento del problema 10

4. Revisión Literaria 11

4.1 Metodologías Para la Determinación de la Susceptibilidad a Deslizamientos 12

4.1.1 Métodos Estadísticos 12

4.1.2 Métodos empíricos 13

4.1.3 Métodos Multicriterio: 13

4.1.4 Métodos de Aprendizaje Automático (Machine Learning) 15

5. Descripción de la zona de estudio 15

5.1 Comuna 8 Villa Hermosa 15

5.2 Distribución Poblacional 17

6. Materiales y métodos 19

6.1 Definición del objetivo y unidades de análisis 19

6.2 Selección, recolección y procesamiento de datos 20

6.4 Calculo de índice ponderado de susceptibilidad 27

7. Resultados y análisis 29

7.1 Pendientes 29

7.2 Precipitación 32

7.3 Distancia entre drenajes 35

7.4 Geología 37
7.6 Mapa de Susceptibilidad final 43
7.7 Validación del modelo de susceptibilidad con eventos históricos de deslizamientos 44
8. Conclusiones y recomendaciones 48
Referencias 49
Anexos 52

Lista de tablas

Tabla 1. Variables seleccionadas para el análisis multicriterio 21
Tabla 2. Asignación de ponderaciones empíricas. 22
Tabla 3. Clasificación de pendiente 23
Tabla 4. Clasificación de precipitación 24
Tabla 5. Clasificación de Geología 24
Tabla 6. Clasificación de distancia entre drenajes 25
Tabla 7. Clasificación de cobertura vegetal 25
Tabla 8. Umbrales finales para cada clase de susceptibilidad 28

Lista de figuras

Figura 1. Localización zona estudio 17
Figura 2. Distribución de población en zona de estudio 18
Figura 3. Flujo de trabajo realizado para calcular la susceptibilidad. 21
Figura 4. Mapa de pendientes de la zona de estudio 30
Figura 5. Mapa de pendientes reclasificado de la zona de estudio 32
Figura 6. Mapa de precipitación de la zona de estudio 33
Figura 7. Mapa de precipitación reclasificado de la zona de estudio 34

Figura 8. Mapa de distancia entre drenajes de la zona de estudio 36

Figura 9. Mapa de distancia entre drenajes de la zona de estudio 37

Figura 10. Mapa de geología de la zona de estudio 38

Figura 11. Mapa de geología reclasificado de la zona de estudio.....40

Figura 12. Mapa de cobertura vegetal nivel 3 de la zona de estudio 41

Figura 13. Mapa de cobertura vegetal nivel 3 de la zona de estudio 42

Figura 14. Mapa de Susceptibilidad de la zona de estudio 44

Figura 15. Inventario de deslizamientos de la zona de estudio.....45

Figura 16. Distribución porcentual de la susceptibilidad por categoría en la Comuna 8.....46

Siglas, acrónimos y abreviaturas

APA	American Psychological Association
mm	Milimetros
PhD	Philosophiae Doctor
SIG	Sistema de Información geográfica
POT	Plan de Ordenamiento territorial
UdeA	Universidad de Antioquia

Resumen

El presente estudio evalúa la susceptibilidad a deslizamientos en la Comuna 8 de Medellín mediante un análisis multicriterio basado en superposición ponderada, utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se integraron cinco variables condicionantes: pendiente, precipitación, distancia a drenajes, cobertura vegetal y geología, reclasificadas y ponderadas con base en criterios empíricos, revisión bibliográfica y juicio experto. El modelo generó una zonificación de susceptibilidad en cinco niveles, revelando que el 38 % del área presenta susceptibilidad media, el 25,2 % alta y el 8,8 % muy alta. Estas zonas críticas se localizan principalmente en el borde oriental de la comuna, donde confluyen pendientes pronunciadas, coberturas vegetales degradadas y suelos inestables. La validación con eventos históricos evidenció una alta correspondencia espacial entre los deslizamientos registrados y las zonas clasificadas como de alta y muy alta susceptibilidad. Se concluye que la metodología propuesta es útil para la planificación urbana y la gestión del riesgo.

Palabras clave: Deslizamientos, Susceptibilidad, Análisis multicriterio, SIG, Comuna 8

Abstract

This study assesses landslide susceptibility in Comuna 8 of Medellín through a multicriteria analysis based on weighted overlay, using Geographic Information System (GIS) tools. Five conditioning variables were integrated: slope, precipitation, distance to drainage networks, vegetation cover, and geology. These were reclassified and weighted according to empirical criteria, literature review, and expert judgment. The resulting model produced a five-level susceptibility zoning, indicating that 38% of the area shows medium susceptibility, 25.2% high, and 8.8% very high. The most critical zones are located primarily along the eastern edge of the comuna, where steep slopes, degraded vegetation cover, and unstable soils converge. Validation with historical landslide events revealed a strong spatial correlation between past occurrences and areas classified as having high or very high susceptibility. The findings suggest that the proposed methodology is a valuable tool for urban planning and risk management in vulnerable urban settings.

Keywords: Landslides, Susceptibility, Multicriteria Analysis, GIS, Comuna 8

1. Introducción

El crecimiento urbano acelerado y la ocupación desordenada del suelo en las laderas de Medellín han intensificado los riesgos asociados a fenómenos geodinámicos, especialmente en sectores con condiciones geológicas y topográficas desfavorables. La Comuna 8, situada al oriente del Distrito de Medellín, representa un caso emblemático de vulnerabilidad territorial debido a su marcada pendiente, procesos de urbanización informal y concentración de población en zonas de alto riesgo. Esta problemática ha sido objeto de atención tanto en planes institucionales como en estudios académicos, pero persiste la necesidad de enfoques rigurosos que permitan identificar y priorizar zonas críticas para la gestión del riesgo.

La evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos constituye una herramienta clave en este contexto, al permitir determinar qué zonas tienen mayor predisposición física a este tipo de fenómenos, independientemente de su frecuencia o impacto. Diversas metodologías han sido desarrolladas para este fin, incluyendo enfoques empíricos, estadísticos y multicriterio. En este contexto, el uso de técnicas de análisis multicriterio constituye una herramienta eficaz para la evaluación espacial del área de estudio, ya que posibilita la ponderación de variables relevantes según su influencia en la ocurrencia de eventos naturales. Por otro lado, el análisis multicriterio permite mayor flexibilidad y adaptabilidad en la asignación de pesos y el tratamiento de capas, ajustándose a contextos locales.

De acuerdo con Velásquez (2022), en el Valle de Aburrá, han demostrado la pertinencia de modelos multicriterio para mapear zonas susceptibles a movimientos en masa, integrando variables como pendiente, geología, cobertura vegetal, precipitación y cercanía a drenajes. En este sentido, este trabajo tiene como propósito analizar y caracterizar espacialmente las zonas de mayor susceptibilidad a deslizamientos en la Comuna 8 de Medellín, mediante la aplicación de un análisis multicriterio empírico. El modelo desarrollado integra variables físicas, ponderadas a través de criterios de expertos y evidencia científica, y se valida mediante la comparación espacial con registros históricos de eventos registrados en la base de datos DesInventar y SIMMA, así como también, con inventarios recientes sistematizados en estudios de Gómez et al. (2023) y Aristizábal et al. (2025), los cuales incluyen registros filtrados y georreferenciados de eventos previos.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar y caracterizar espacialmente las zonas de mayor susceptibilidad en el Distrito de Medellín, con énfasis en la Comuna 8, mediante la aplicación de SIG y análisis multicriterio. Este proceso incluirá la evaluación de variables físicas que permita identificar áreas con mayor predisposición a fenómenos geodinámicos.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar un modelo de evaluación multicriterio para integrar y ponderar variables físicas en la Comuna 8 y generar mapas temáticos que clasifiquen las zonas según el nivel de susceptibilidad y proponer lineamientos para su gestión integral.
- Contrastar las zonas clasificadas como alta susceptibilidad con la ubicación de eventos históricos de deslizamientos registrados en el inventario de DesInventar, SIMMA y en estudios recientes desarrollados por Aristizábal et al. (2025) y Gómez et al. (2023). con el fin de verificar su coincidencia espacial y evaluar la correspondencia del modelo con la realidad observada

3. Planteamiento del problema

La ciudad de Medellín enfrenta una creciente exposición a fenómenos naturales como inundaciones, movimientos en masa, avenidas torrenciales, entre otros. producto de una expansión urbana desordenada que ha invadido zonas de alta ladera, cauces naturales y suelos inestables. En particular, la Comuna 8 presenta una combinación crítica de factores geomorfológicos, sociales y ambientales, lo que la convierte en un área de alta susceptibilidad. La carencia de una caracterización actualizada dificulta la toma de decisiones en el ordenamiento territorial. Es por ello que se hace necesario aplicar metodologías geoespaciales que permitan zonificar las zonas susceptibles en esta comuna y, de manera más amplia, sentar las bases para una planificación más

resiliente en el Distrito de Medellín, de modo que se provean insumos técnicos para la revisión del Plan de Ordenamiento Territorial.

4. Revisión Literaria

El POT de Medellín constituye el marco estratégico fundamental para el desarrollo urbano de la ciudad, funcionando como un plan que trasciende administraciones y establece directrices a largo plazo para la ocupación y transformación del territorio. En el caso de Medellín, el POT vigente reconoce la necesidad de actualizar sus lineamientos para responder adecuadamente a la expansión urbana, la presión sobre las zonas de alta ladera y la exposición creciente a fenómenos naturales como inundaciones y deslizamientos (Alcaldía De Medellín, 2022). Esta visión se complementa con el marco normativo que respalda dichas directrices, el cual se encuentra detallado en los anexos del documento (ver Anexo 1), donde se recopila la normativa relevante aplicable al contexto urbano y de riesgo del municipio.

En este contexto, la identificación y caracterización de zonas de alta susceptibilidad se convierte en una herramienta estratégica para la toma de decisiones territoriales. De acuerdo con el DAGRD (2015), la incorporación de análisis técnicos, como el que se propone en este trabajo, permite evidenciar la interacción entre el territorio y sus amenazas, facilitando la formulación de políticas públicas más precisas y eficaces. Esta información también es fundamental para evitar nuevas ocupaciones en áreas no aptas, reubicar asentamientos existentes y priorizar intervenciones de mitigación (Alcaldía de Medellín, 2014).

En los modelos de análisis multicriterio aplicados a la evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos (Leonardi et al., 2022); se integran diversas variables condicionantes y detonantes que influyen en la estabilidad del terreno (Guzzeti et al., 1999). Entre las más comunes se encuentra la pendiente, por su relación directa con la probabilidad de deslizamientos (Carvajal, 2012); la proximidad a drenajes o cuerpos hídricos, asociada tanto a procesos de socavación como a saturación del suelo (Bahrami et al., 2020); y la geología y tipo de suelo, que determinan la resistencia estructural y el comportamiento geomecánico de los materiales (Universidad EAFIT et al., 2006). Asimismo, la precipitación, especialmente su intensidad y acumulación que actúa como

un detonante clave en la ocurrencia de deslizamientos. (Aristizábal et al., 2011; Vieira et al., 2018). A estas variables se suelen incorporar otras como la orientación y forma de las laderas (aspecto y curvatura), la cobertura vegetal, que influye en la infiltración y cohesión del suelo, el uso del suelo y cobertura del terreno, el índice de humedad del suelo, y en algunos casos, la actividad antrópica, expresada a través de cercanía a vías, edificaciones o intervenciones en la ladera (Reichenbach at el., 2018). Es decir que, la inclusión y ponderación de estas variables depende del contexto geográfico, la disponibilidad de datos y el objetivo específico del modelo.

Por lo tanto, esta investigación no solo se enmarca en los principios de ordenamiento territorial, sino que aporta a la toma de decisiones basadas en evidencia para la actualización del POT de Medellín, con un enfoque diferencial en el borde urbano-rural de la Comuna 8, zona que presenta una mezcla de condiciones de susceptibilidad ambiental y presión urbana significativa.

Es importante aclarar que el presente estudio se enfoca exclusivamente en el análisis de susceptibilidad territorial, entendido como el grado de predisposición física del terreno ante la ocurrencia de fenómenos naturales, como deslizamientos o inundaciones. En este sentido, no se aborda el concepto de riesgo en su integralidad, ya que no se consideran las dimensiones de vulnerabilidad (condiciones sociales, económicas o estructurales que incrementan la probabilidad de afectación) ni exposición (presencia de personas, infraestructura o bienes en zonas susceptibles). El análisis desarrollado se limita a la identificación de zonas potencialmente susceptibles a deslizamientos, mediante la evaluación de variables físicas del entorno.

4.1 Metodologías Para la Determinación de la Susceptibilidad a Deslizamientos

4.1.1 Métodos Estadísticos: Los métodos estadísticos establecen relaciones entre la ocurrencia histórica de deslizamientos y un conjunto de variables condicionantes mediante modelos cuantitativos: Los métodos estadísticos emplean técnicas cuantitativas para establecer relaciones entre la ocurrencia de deslizamientos y variables condicionantes (como pendiente, litología, precipitación, entre otros). Según Constantin et al. (2011) y Felicísimo et al. (2013). Estos métodos pueden ser bivariados (como el índice de frecuencia o el Weight of Evidence) o

multivariados (como la regresión logística o el análisis discriminante). A su vez, Shano, et al. (2020) menciona que para áreas muy extensas los métodos estadísticos son los más utilizados

Por ejemplo, la regresión logística ha sido ampliamente utilizada en estudios de susceptibilidad debido a su capacidad de modelar una variable binaria (presencia o ausencia de deslizamiento) en función de múltiples variables independientes (Mousavi et al., 2011). Estos métodos requieren bases de datos robustas y bien georreferenciadas, pero ofrecen una mayor precisión y capacidad de generalización frente a los métodos empíricos (Shahabi & Hashim, 2015)

4.1.2 Métodos empíricos: Los métodos empíricos se basan en la observación directa del comportamiento histórico de los deslizamientos. Son especialmente útiles en regiones donde se dispone de inventarios detallados de movimientos en masa. La metodología consiste en identificar las características comunes en las zonas donde han ocurrido deslizamientos (por ejemplo, pendientes pronunciadas, suelos arcillosos o cobertura vegetal reducida) y extrapolar estas condiciones a otras áreas similares (Cao et al., 2021)

- Selección de variables relevantes (pendiente, litología, cobertura vegetal, precipitación, distancia a fallas, densidad de drenaje).
- Clasificación de rangos: Cada variable se divide en clases (e.g., pendientes de 0–10°, 10–20°, >20°) y se asigna un puntaje de susceptibilidad (1–5) a cada clase.
- Agregación: Se suman o ponderan los puntajes para obtener un índice compuesto de susceptibilidad.

Si bien los métodos empíricos son fáciles de aplicar y entender, su principal limitación radica en su baja capacidad de predicción en áreas con poca o nula información histórica, además de su subjetividad al depender de la interpretación del experto (Cao et al., 2021)

4.1.3 Métodos Multicriterio: Los métodos multicriterio combinan datos cuantitativos con conocimiento experto, permitiendo integrar múltiples variables geoespaciales con participación técnica o comunitaria:

- **AHP (Proceso Analítico Jerárquico):** Según Saaty (1980), Descompone el problema en niveles jerárquicos. Por ejemplo, un estudio en la Comuna 8 de Medellín empleó AHP con expertos locales para ponderar criterios como pendiente, cobertura vegetal y cercanía a drenajes

  El **Proceso Analítico Jerárquico (AHP)** es una metodología ampliamente utilizada para resolver problemas complejos en los que intervienen múltiples criterios de evaluación. Este enfoque permite descomponer un problema en una jerarquía estructurada de objetivos, criterios, subcriterios y alternativas, facilitando la comparación par a par entre los elementos a través de una escala de juicio cualitativa o cuantitativa. (Saaty T, 1980). El AHP traduce estas comparaciones en valores numéricos que representan las prioridades relativas de cada elemento, lo que permite la obtención de ponderaciones objetivas para la toma de decisiones. Su aplicación en el análisis de susceptibilidad a deslizamientos ha demostrado ser efectiva, ya que permite incorporar el juicio experto en la ponderación de variables geográficas como pendiente, litología, cobertura vegetal y otros factores condicionantes del terreno (Saaty T, 1980).
- **Lógica difusa:** La lógica difusa es especialmente adecuada cuando los datos contienen incertidumbre o cuando las transiciones entre niveles de susceptibilidad no son categóricas, permitiendo una representación gradual que refleja mejor la realidad del terreno. Su uso en SIG posibilita asignar grados de pertenencia continuo en el intervalo $[0, 1]$ y emplear operadores o la función gamma para combinar variables condicionantes (pendiente, cobertura, precipitación, etc.) de forma más realista, aunque esto puede resultar menos intuitivo para actores sin formación técnica (Zhang et al., 2022).
- **Método Delphi:** El Método Delphi es una técnica estructurada de consulta a expertos que busca alcanzar consenso mediante rondas sucesivas de evaluaciones anónimas. Es especialmente útil en contextos de gestión del riesgo y planificación urbana, ya que permite priorizar zonas de intervención y reducir sesgos individuales gracias a un proceso iterativo con retroalimentación (Socarrás et al., 2022).

Estos enfoques son particularmente valiosos cuando no existe una base de datos sólida, ya que permiten tomar decisiones integradoras e informadas, facilitando la planificación territorial (Socarrás et al., 2022).

Una comparación entre AHP y otros métodos multicriterio como la lógica difusa o el método Delphi permite evidenciar sus ventajas y limitaciones relativas. El AHP destaca por su estructura jerárquica y la capacidad de verificar la consistencia en los juicios expertos, lo cual aporta transparencia, trazabilidad y mayor aceptación institucional (Saaty, 1980). Además, su compatibilidad con herramientas SIG permite una implementación eficiente y replicable en contextos urbanos.

En contraste, la lógica difusa es más adecuada cuando existe incertidumbre en los datos o se requiere representar gradualidad en las transiciones entre clases de susceptibilidad. Aunque ofrece flexibilidad en la modelación, su interpretación puede ser menos intuitiva para actores no técnicos.

El método Delphi, por su parte, es útil para alcanzar consensos entre expertos en contextos donde la información técnica es escasa, pero su aplicación puede ser más demorada debido a las múltiples rondas de consulta requeridas. A diferencia del AHP, no siempre permite cuantificar pesos precisos, lo que limita su integración directa con herramientas SIG

4.1.4 Métodos de Aprendizaje Automático (Machine Learning)

Los métodos de aprendizaje automático se han consolidado como herramientas potentes en la generación de mapas de susceptibilidad a deslizamientos, gracias a su capacidad para modelar relaciones no lineales y complejas entre múltiples variables condicionantes del terreno y factores ambientales. Algoritmos como Random Forest, Support Vector Machines (SVM), redes neuronales y árboles de decisión se han implementado exitosamente en diversas regiones del mundo. (Merghadi et al., 2020)

5. Descripción de la zona de estudio

5.1 Comuna 8 Villa Hermosa

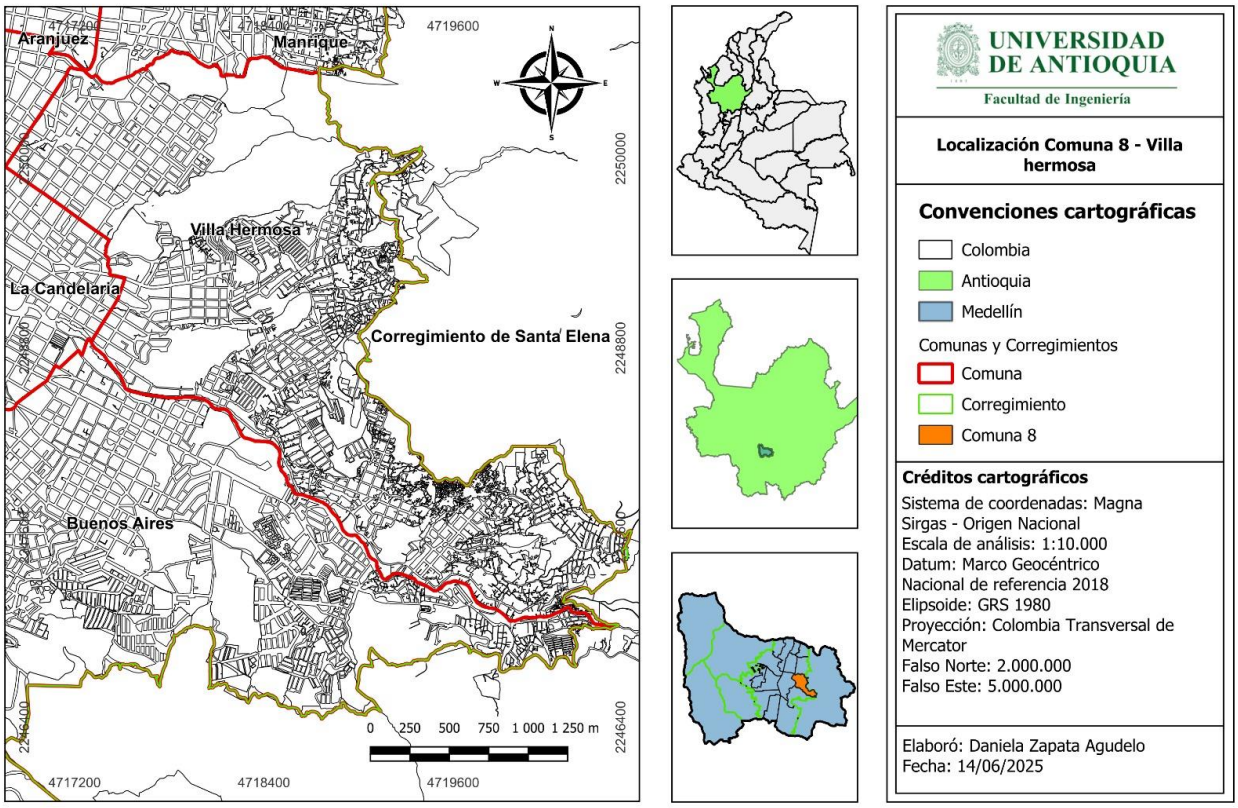
La Comuna 8 (Figura 1) - Villa Hermosa limita al norte con las Comunas 3 Manrique y 10 La Candelaria, por el sur limita con la Comuna 9 Buenos Aires y la quebrada Santa Elena, al occidente sus límites son con las Comunas 9 Buenos Aires y 10 La Candelaria, y al oriente con el corregimiento de Santa Elena. Está conformada por 18 barrios: Villa Hermosa, La Mansión, San

Miguel, La Ladera, Batallón Girardot, Llanaditas, Los Mangos, Enciso, Sucre, El Pinal, 13 de Noviembre, La Libertad, Villatina, San Antonio, Las Estancias, Villa Turbay, La Sierra y Villa Liliam. Los cuales, que se distribuyen en un área total de 577,74 hectáreas, de acuerdo con lo establecido en el Decreto 346 de 2000 sobre límites y organización barrial. En términos socioeconómicos, según el DANE (2025), la mayoría de las viviendas pertenecen a los estratos bajos: un 33,4 % al estrato bajo y un 38,9 % al bajo medio, seguidos por un 24,8 % en el medio bajo y apenas un 2,8 % en el estrato medio. Esta comuna hace parte de la Zona Centro Oriental de Medellín y limita al norte con la Comuna 3 – Manrique, al oeste con la Comuna 10 – La Candelaria, al sur con la Comuna 9 – Buenos Aires y al oriente con el Corregimiento de Santa Elena.

La Comuna 8 a lo largo del tiempo ha atravesado diversos procesos poblacionales, los cuales han influido en la forma como se ha conformado su territorio. En este sentido, si bien algunos de sus barrios actuales surgieron como parte de planes urbanísticos alineados con políticas oficiales, muchos otros se originaron de manera informal como resultado de necesidades urgentes de vivienda. Además, en los últimos años, la comuna recibió un gran flujo de población desplazada que se asentó en las laderas periféricas, lo que dio lugar a un crecimiento urbano espontáneo motivado por la violencia que afectaba no solo a la ciudad, sino también al departamento y al país (Personería Distrital de Medellín, 2022).

Como resultado, la Comuna 8 se ha convertido en una de las zonas más impactadas por el desplazamiento forzado en Medellín, lo que ha generado dinámicas territoriales particulares y distintas frente a otras comunas de la ciudad (Alcaldía de Medellín, 2020). A partir de esta caracterización, en la **Figura 1**, se presenta la localización geográfica y división barrial de la comuna, lo que permite contextualizar espacialmente el área de estudio en el marco del análisis de susceptibilidad.

Figura 1. *Localización zona estudio*



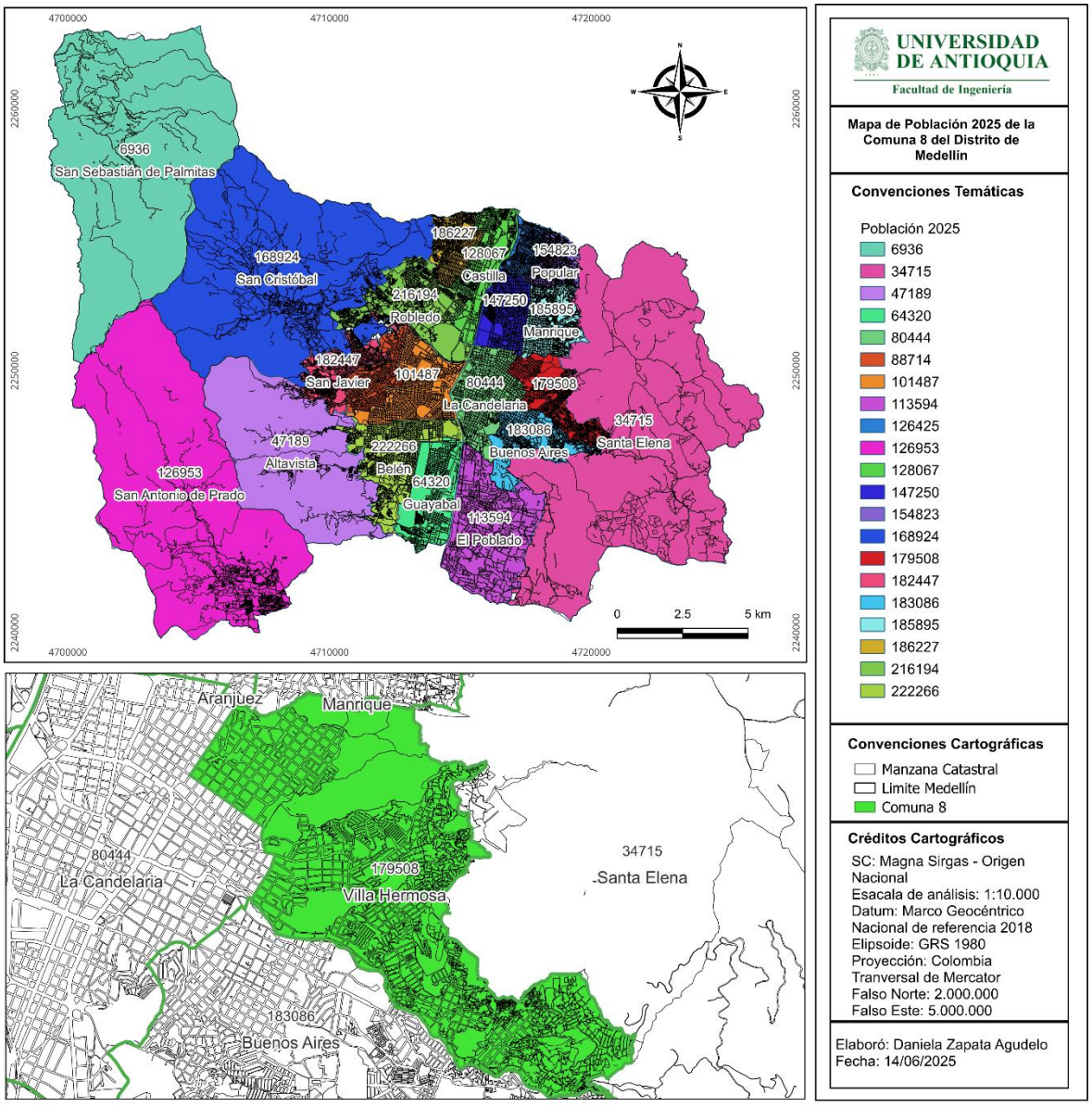
5.2 Distribución Poblacional

La Comuna 8 – Villa Hermosa cuenta con una población total de 179.508 habitantes aproximadamente. Los grupos etarios más numerosos corresponden a las edades de 30 a 34 años (12.487 personas), 25 a 29 años (11.966 personas) y 20 a 24 años (11.520 personas) aproximadamente. Cabe destacar que esta comuna ha sido un importante destino para personas en situación de desplazamiento forzado, acogiendo a más de 11.000 individuos provenientes de diferentes regiones del departamento y del país (Alcaldía de Medellín, 2022).

La **Figura 2** muestra la distribución de la población en la Comuna 8, lo cual permite contextualizar espacialmente los patrones de asentamiento humano en el área de estudio y comprender mejor su densidad y ocupación del territorio. Asimismo, la proyección poblacional es un insumo fundamental en modelos multicriterio de riesgo, ya que la densidad de población se asocia directamente con el grado de exposición ante amenazas naturales como movimientos en

masa o inundaciones. Así, áreas como Villa Hermosa, con alta concentración de habitantes en zonas de ladera, deben ser objeto prioritario de intervención por parte de la gestión del riesgo y la planificación urbana sostenible.

Figura 2. *Distribución de población en zona de estudio*



6. Materiales y métodos

Se adopto un enfoque mixto que integra técnicas cuantitativas y cualitativas, permitiendo abordar de forma específica cada uno de los objetivos planteados. En este sentido, el desarrollo metodológico de este estudio responde a un enfoque geoespacial basado en el análisis multicriterio, que busca integrar diferentes variables físicas mediante herramientas SIG. Esta estrategia permite cuantificar y mapear la susceptibilidad del territorio frente a fenómenos de deslizamientos, ofreciendo insumos técnicos para la toma de decisiones en la planificación territorial.

A lo largo del proceso se ejecutan etapas interdependientes que abarcan desde la recolección y procesamiento de datos hasta la combinación ponderada de variables mediante técnicas de análisis multicriterio. Además, se incorpora una etapa de validación y clasificación para facilitar la interpretación y aplicación de los resultados en contextos de gestión del riesgo y planificación urbana.

6.1 Definición del objetivo y unidades de análisis

El objetivo central consiste en zonificar la susceptibilidad a deslizamientos en la Comuna 8, para lo cual se estableció como unidad mínima de análisis una celda ráster de 5 × 5 metros. Esta resolución espacial se definió como un equilibrio técnico entre la precisión geográfica requerida para identificar zonas de susceptibilidad a escala de comuna y la eficiencia computacional necesaria para el procesamiento multivariable. Las decisiones metodológicas en las etapas siguientes se alinean con esta escala operativa.

Si bien todas las capas fueron homogeneizadas a 5 × 5 m mediante un downscaling en Qgis es importante aclarar que la escala de análisis no depende exclusivamente de la resolución de la malla ráster utilizada, sino también de la escala de captura original de cada fuente de datos. En este caso, se emplearon capas con escalas de origen variadas: por ejemplo, la pendiente y la altitud derivadas de un DEM de 2 m del Municipio de Medellín permiten análisis confiables a escala 1:5.000–1:10.000. Por su parte, las capas de geología, drenajes y cobertura vegetal fueron suministradas por la Alcaldía de Medellín, y presentan una resolución espacial compatible con

dicha escala. Mientras que, la precipitación mensual y anual proviene de la base de datos CHELSA (Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas), la cual ofrece datos con alta resolución espacial (30 arc-segundos, aproximadamente 1 km²) lo cual la sitúa en una escala más general (1:250.000). En este sentido, es importante considerar que CHELSA no capta datos directamente, sino que interpola registros climáticos de estaciones meteorológicas usando modelos de regresión espacial (Karger et al., 2017). Por lo tanto, la escala real de captura depende de la densidad y calidad de las estaciones meteorológicas disponibles en cada región. Por esta razón, los criterios con menor escala de captura fueron incorporados con pesos ponderados más bajos y utilizados de manera referencial, mientras que los criterios locales con alta precisión geográfica sostienen el análisis espacial principal.

6.2 Selección, recolección y procesamiento de datos

Todo el análisis se realizó a una escala operativa de 1:10.000, adecuada para estudios de susceptibilidad en contextos urbanos a nivel comunal. Esta escala se justifica por la resolución espacial de 5 × 5 m adoptada para los datos ráster, y por el nivel de detalle de las capas base, particularmente el DEM de 2 m y las coberturas de geología y vegetación, todos ellos provenientes del geoportal oficial del Municipio de Medellín. Si bien algunas variables, como la precipitación, fueron originalmente generadas a escalas más generales, su integración en el modelo se realizó con propósitos contextuales, asignándoles menor peso relativo y evitando forzar su interpretación a escalas más finas. Por tanto, se considera que 1:10.000 es una escala adecuada y técnicamente fundamentada para la interpretación de resultados y la elaboración de mapas temáticos en esta investigación.

Se definieron los criterios más relevantes para identificar zonas con alta susceptibilidad a fenómenos naturales, tomando en cuenta variables como la pendiente, la distancia a cauces, cobertura vegetal, la geología y la precipitación. (Velásquez C., 2022; Guzzetti, et al., 1999) Así mismo, la elección de estos factores se basó en su influencia comprobada sobre la ocurrencia de deslizamientos e inundaciones, así como en la disponibilidad de datos en formato geoespacial, La justificación técnica correspondiente a cada uno de los criterios seleccionados se presenta en la **Tabla 1**.

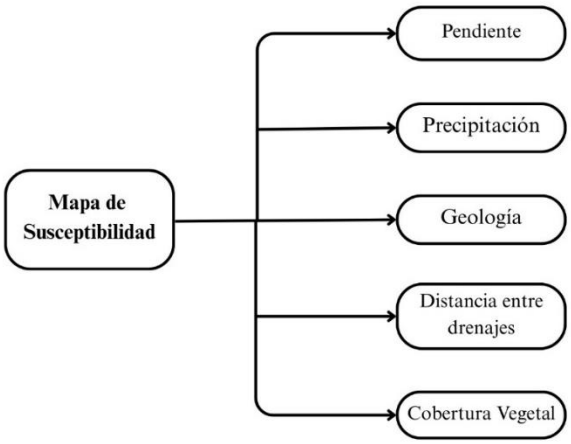
Tabla 1. *Variables seleccionadas para el análisis multicriterio*

Criterio	Justificación
Pendiente	Controla la componente gravitacional de los deslizamientos
Precipitación	Dispara la saturación de suelos y la escorrentía.
Cobertura vegetal	Modula la infiltración y cohesión superficial.
Unidades geológicas	Determina resistencia y permeabilidad del subsuelo.
Distancia a cauces	Proximidad a vías de concentración de flujos hídricos.

Nota. Adaptado de (Velásquez C., 2022)

Con el fin de sintetizar de forma visual el procedimiento metodológico implementado, en la **Figura 3** se presenta un mapa conceptual del flujo de trabajo, el cual representa las variables para calcular la susceptibilidad a movimientos en masa en la Comuna 8 del Distrito de Medellín.

Figura 3*. Flujo de trabajo realizado para calcular la susceptibilidad.*



A cada uno de los criterios seleccionados se le asignó un peso porcentual con base en un enfoque multicriterio de carácter empírico. Este proceso combinó la revisión de literatura especializada, el análisis de estudios previos realizados en contextos similares, (Alcaldía de Medellín & Universidad EAFIT, 2013; DAGRD, 2015; Velásquez, 2022) y la consulta del juicio experto en gestión del riesgo. Adicionalmente, se consideró la relevancia contextual específica de cada variable en el territorio de la Comuna 8 de Medellín, caracterizado por una topografía accidentada, alta densidad urbana y presencia de sectores en condición de vulnerabilidad.

La ponderación de cada criterio obedeció a su grado de influencia en la generación de procesos de remoción en masa e inundaciones, siendo ajustada para reflejar su importancia relativa dentro del modelo de evaluación espacial. Este procedimiento permitió construir una matriz de pesos que sirvió como base para la superposición ponderada de capas ráster en el entorno SIG. Los valores asignados a cada uno de los factores considerados en el análisis se resumen en la **Tabla 2**.

Tabla 2. *Asignación de ponderaciones empíricas.*

Factor	Peso (%)	Justificación
Pendiente	30%	La pendiente controla la componente gravitacional de los deslizamientos y flujos de detrito. Ayalew y Yamagishi hallaron que, en un modelo AHP, la pendiente explica el 31,8 % de la variabilidad espacial de la susceptibilidad (CI = 0,072) La pendiente tiene una fuerte influencia en la estabilidad de los terrenos, ya que mayores ángulos implican mayor probabilidad de movimientos en masa, escorrentía rápida y erosión. (Ayalew, H., & Yamagishi, H., 2005) Estudios en Medellín y otras zonas montañosas de Colombia han resaltado su peso dominante en modelos de susceptibilidad. (Carvajal, 2012)
Precipitación	20%	Es el principal agente detonante de movimientos en masa y eventos torrenciales, al incrementar la saturación del suelo y reducir su resistencia al corte. Estudios locales indican que precipitaciones >2.200 mm/año incrementan significativamente el riesgo. (Aristizábal, E., et al 2011) (Vieira, A. G. R., et al., 2018).
Geología	20%	La naturaleza del material geológico define la resistencia al corte y la permeabilidad. Litologías coluviales o suelos residuales sueltos aumentan la susceptibilidad (DAGRD, 2015; Universidad EAFIT., et al, 2006). Las variaciones en las unidades geológicas aportan entre 20–30 % al índice de susceptibilidad en zonas montañosas similares (Vakhshoori, V., & Zare, M., 2016). Su peso se considera intermedio debido a que no actúa como detonante directo, pero sí como condicionante estructural.
Distancia a cauces	15%	Las áreas cercanas a drenajes están más expuestas a erosión fluvial, socavación y acumulación de humedad, lo que puede inducir inestabilidad. (Bahrami, Y., et al., 2020) Se asigna un peso menor porque su influencia es más localizada. El DAGRD Medellín lo considera un criterio de riesgo hidrometeorológico específico, pero menos relevante a escala regional.

Cobertura vegetal	15%	La vegetación actúa como estabilizador superficial, pero su efecto depende de su densidad, tipo y profundidad radicular. En zonas urbanas, su peso es limitado por la fragmentación del ecosistema (DAGRD, 2015; CORINE Land Cover, 2018)

Luego de la incorporación en el análisis multicriterio, las variables vectoriales como la geología y la cobertura vegetal fueron convertidas a formato ráster mediante un proceso de rasterización, utilizando una resolución de 5 × 5 metros para mantener la consistencia con las demás capas del modelo. Esta transformación fue indispensable para permitir su tratamiento homogéneo con las demás variables cuantitativas en el entorno ráster.

Una vez estandarizado el formato y la resolución de todas las capas, se procedió a su normalización a través de técnicas de reclasificación, transformando cada variable a una escala ordinal común de 1 a 5. Este paso fue importante para lograr la comparabilidad entre variables de distinta naturaleza, permitiendo integrar información cuantitativa continua y categórica bajo un mismo esquema de valoración relativa de susceptibilidad. Así mismo, La pendiente se reclasificó asignando mayores valores a las zonas con inclinaciones más pronunciadas, dado que representan una mayor propensión a la inestabilidad del terreno; esta clasificación se presenta en la **Tabla 3**

Tabla 3. *Clasificación de pendiente*

Porcentaje de pendiente	Clasificación	Valor de clase (1–5)
0–5%	Plano	1
5–10%	Inclinado	2
10–20%	Muy inclinado	3
20–45%	Abrupta	4
>45%	Escarpado	5

Nota. Adaptado de (Carvajal, 2012)

En cuanto a la precipitación, se asignaron valores más altos a las áreas con mayores acumulados anuales, considerando que la lluvia es uno de los principales factores detonantes de deslizamiento; la reclasificación correspondiente se muestra en la **Tabla 4**

Tabla 4. *Clasificación de precipitación*

Precipitación (mm)	Clasificación	Justificación técnica
0 – 800	1	Muy baja susceptibilidad. Baja saturación del suelo, escasa escorrentía.
800 – 1500	2	Baja susceptibilidad. Lluvias moderadas, pero sin alta frecuencia de eventos extremos.
1500– 1700	3	Media susceptibilidad. Riesgo latente de escorrentía y saturación temporal del suelo.
1700-1900	4	Alta susceptibilidad. Eventos intensos o prolongados favorecen la inestabilidad.
1900– 2500	5	Muy alta susceptibilidad. Condiciones críticas de saturación e incremento en eventos extremos.

Nota. Adaptado de (Aristizábal, E., et al 2011; Vieira, A. G. R., et al., 2018).

La geología, por su parte, se reclasificó con base en la resistencia y permeabilidad relativa de cada unidad litológica de acuerdo con **(**Universidad EAFIT., et al, 2006; DAGRD, 2015) lo cual influye directamente en la susceptibilidad del terreno a procesos erosivos o de remoción en masa; esta categorización se resume en la **Tabla 5**.

Tabla 5. *Clasificación de Geología*

Código	Descripción	Valor	Justificación
Qd	Depósitos de deslizamiento	5	Materiales sueltos y no consolidados, alta susceptibilidad a movimientos en masa.
QFIII, QFIV, QFa, NQFII, NFI	Depósitos de flujos de escombros y/o lodos	5	Alta movilidad y saturación hídrica, propensos a flujos y deslizamientos.
Qll	Llenos antrópicos	5	Rellenos artificiales, baja compactación, alta inestabilidad.
Qat	Depósitos aluviotorrenciales	4	Materiales heterogéneos, susceptibilidad moderada a alta.
JKuM	Dunitas de Medellín	3	Rocas ultramáficas, pueden ser estables pero susceptibles a meteorización.
TRaM	Anfibolita de Medellín	2	Rocas metamórficas, generalmente estables.
KcdA	Batolito Antioqueño	1	Rocas ígneas intrusivas, alta resistencia y estabilidad.
KcdE	Stock de Las Estancias	1	Rocas ígneas intrusivas, alta resistencia y estabilidad.
KcdML	Stock de Medialuna	1	Rocas ígneas intrusivas, alta resistencia y estabilidad.

Nota. Adaptado de **(**Universidad EAFIT., et al, 2006; DAGRD, 2015)

Para la distancia a cauces, se otorgaron valores más altos a las zonas más cercanas a las corrientes hídricas, por ser áreas más expuestas a procesos de socavación, inundación o acumulación de humedad; esta reclasificación se ilustra en la **Tabla 6**.

Tabla 6*. Clasificación de distancia entre drenajes*

Rango de distancia (m)	Valor reclasificado	Justificación
0 – 50	5	Muy alta susceptibilidad: zonas de influencia directa, posibles inundaciones.
50– 200	4	Alta susceptibilidad: afectadas por escorrentía e infiltración superficial.
200– 300	3	Media susceptibilidad.
300– 800	2	Baja susceptibilidad.
800 – 1800	1	Muy baja susceptibilidad: alejado de cauces activos.

Nota. Adaptado de (DAGRD, 2015; Bahrami, et al., 2020)

Finalmente, en la **Tabla 7**, la cobertura vegetal fue reclasificada según el tipo de cobertura y su capacidad para estabilizar el suelo y reducir la escorrentía superficial.

Tabla 7*. Clasificación de cobertura vegetal*

Cobertura Vegetal N3	Valor	Justificación
1.1.1. Tejido urbano continuo	4	Alta impermeabilización + posible modificación de taludes; riesgo de escorrentía e inestabilidad.
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	4	Similar al continuo, aunque puede haber más vegetación; alta vulnerabilidad en laderas.
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	4	Suelos compactados, pérdida de permeabilidad, alta exposición a inundaciones.
1.4.1. Zonas verdes urbanas	2	Vegetación amortigua escorrentía y estabiliza suelos, pero limitada por urbanización cercana.
1.4.2. Instalaciones recreativas	3	Suelos semi-compactados, riesgo moderado dependiendo del mantenimiento y ubicación.

2.3.1. Pastos limpios	4	Alta susceptibilidad a erosión superficial y movimientos en masa por baja cobertura arbórea.
2.3.3. Pastos enmelazados	3	Cobertura media, algo mejor que pastos limpios, pero no previene erosión en pendientes fuertes.
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	4	Cambios frecuentes en cobertura; escasa estabilidad de suelos, especialmente en pendientes.
3.1.3. Bosque fragmentado	3	Disminución de la cobertura vegetal densa reduce la protección natural contra deslizamientos.
3.1.5. Plantación forestal	1	Aunque no es bosque natural, ayuda a estabilizar suelos si está bien manejada.
3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	2	Suelo en recuperación con cobertura vegetal creciente; moderada estabilización.

Nota. Adaptado de (DAGRD, 2015; CORINE Land Cover, 2018)

Este procedimiento se llevó a cabo utilizando la herramienta Reclassify del software QGIS, lo que permitió transformar todos los criterios a una escala uniforme donde 1 representa muy baja susceptibilidad y 5 una susceptibilidad muy alta. Esta homogeneidad en la escala fue esencial para la etapa siguiente de integración y análisis ponderado de las variables.

Una vez todas las capas se encontraban en formato ráster con igual resolución y sistema de referencia espacial, se procedió a su normalización, transformando cada variable a una escala común de 1 a 5. Esta etapa fue fundamental para garantizar la comparabilidad entre capas de naturaleza heterogénea, asegurando la coherencia entre sus escalas de medición. La reclasificación se realizó con base en umbrales definidos según la literatura especializada, estudios previos y la relación teórica entre cada criterio y su influencia sobre los procesos de amenaza natural.

Por ejemplo, a zonas con mayores pendientes se les asignaron valores más altos (hasta 5), dado que presentan un mayor potencial de inestabilidad, mientras que a las mayores distancias a cauces se les asignaron valores más bajos (hasta 1), al representar menor exposición al flujo hídrico. En el caso de variables categóricas como geología o cobertura vegetal, los valores fueron reclasificados en función de su susceptibilidad relativa

6.4 Calculo de índice ponderado de susceptibilidad

Una vez normalizadas todas las capas, se procedió a la integración de los criterios mediante una combinación ponderada que permite reflejar la contribución relativa de cada variable según la Tabla 2 de asignación de porcentaje de ponderación, en la generación de susceptibilidad. Para ello, se utilizó la herramienta Raster Calculator de QGIS, la cual permite realizar operaciones matemáticas entre capas ráster.

Cada una de las capas reclasificadas fue multiplicada por su respectivo peso porcentual, previamente definido con base en revisión de literatura, criterios técnicos y experticia contextual sobre la Comuna 8. Esta operación genera un nuevo ráster donde cada celda representa un valor compuesto de susceptibilidad, resultante de la suma ponderada de todos los factores considerados. La Ecuación 1 describe este proceso se presenta a continuación:

$$\text{Susceptibilidad} = (\boldsymbol{P} \cdot \mathbf{0.30}) + (\boldsymbol{R} \cdot \mathbf{0.20}) + (\boldsymbol{G} \cdot \mathbf{0.20}) + (\boldsymbol{D} \cdot \mathbf{0.15}) + (\boldsymbol{C} \cdot \mathbf{0.15})$$

Ecuación 1. Cálculo de susceptibilidad.

Donde:

- P = capa de pendiente reclasificada
- R = precipitación reclasificada
- G = geología reclasificada
- D = distancia a cauces reclasificada
- C = cobertura vegetal reclasificada

Este enfoque metodológico se sustenta en el principio de superposición lineal ponderada, ampliamente utilizado en estudios de análisis espacial multicriterio (Guzzeti et al., 1999), el cual permite incorporar simultáneamente distintos factores de susceptibilidad mediante una estructura matemática simple, pero robusta. De este modo, el resultado no solo refleja las condiciones físicas del territorio, sino también la importancia relativa atribuida a cada factor según el contexto específico de estudio.

El producto final de esta operación es un mapa ráster continuo que representa, en cada celda, un valor agregado de susceptibilidad, el cual será posteriormente clasificado en rangos

interpretables (por ejemplo, de muy baja a muy alta susceptibilidad), permitiendo generar mapas temáticos útiles para la toma de decisiones en planificación territorial y gestión del riesgo.

El índice de susceptibilidad obtenido en el paso anterior fue clasificado en cinco categorías ordinales: muy baja, baja, media, alta y muy alta susceptibilidad, con el objetivo de facilitar su interpretación y aplicación en procesos de planificación territorial y gestión del riesgo. Para garantizar una segmentación objetiva y replicable, se utilizó la técnica de intervalos iguales, la cual divide el rango total de valores del índice en segmentos de igual amplitud.

Este método fue seleccionado por su simplicidad, además, la clasificación resultante permite identificar zonas críticas con base en sus características físicas acumuladas y sugiere diferentes niveles de intervención según el grado de susceptibilidad identificado. En la **Tabla 8** se presentan los umbrales definidos para cada clase de susceptibilidad de acuerdo con el criterio de expertos y (Velásquez, 2022; Guzzetti et al., 1999), así como una breve descripción orientada a la toma de decisiones.

Tabla 8. *Umbrales finales para cada clase de susceptibilidad*

Clase	Rango	Descripción
Muy baja	1	Área con mínima predisposición a procesos geodinámicos; condiciones físicas más seguras.
Baja	2	Poca susceptibilidad; se recomienda seguimiento periódico.
Media	3	Susceptibilidad moderada; posible activación bajo condiciones extremas de precipitación.
Alta	4	Alta predisposición; requiere medidas preventivas y restricciones en uso del suelo.
Muy alta	5	Máxima predisposición; prioritaria para intervenciones estructurales o posible evacuación.

Elaboración propia con base en (Velásquez, 2022; Guzzetti et al., 1999)

Esta clasificación final se aplicó al mapa ráster generado, dando lugar a un mapa temático de susceptibilidad zonificada, el cual constituye el insumo clave del análisis espacial desarrollado. Las categorías establecidas no solo permiten visualizar con claridad la distribución espacial del riesgo, sino que también sirven como referencia técnica para establecer acciones diferenciadas de

mitigación, monitoreo o intervención, en función del grado de amenaza potencial identificado en cada zona del territorio estudiado.

7. Resultados y análisis

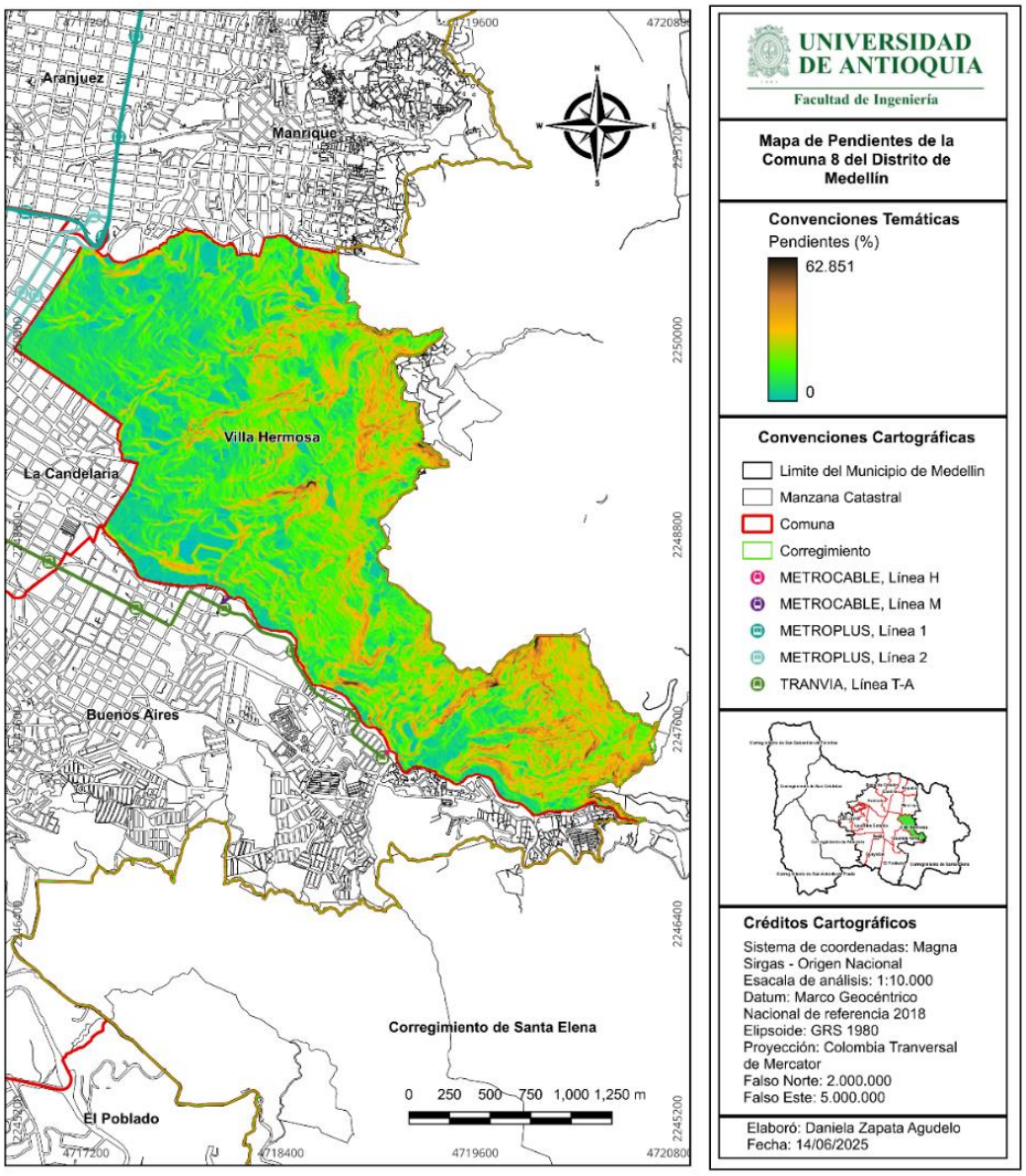
Con el fin de facilitar la comprensión del proceso metodológico, el análisis de resultados se estructurará inicialmente en torno a la presentación individual de cada una de las variables utilizadas en el modelo multicriterio. Para cada factor, precipitación, pendiente, distancia a drenajes, geología y cobertura vegetal se mostrará primero su condición original en forma de mapas temáticos derivados de fuentes oficiales y científicas, lo que permitirá evidenciar las características espaciales naturales del territorio en su estado bruto.

Posteriormente, se presentará la transformación de dichas capas mediante procesos de reclasificación presentada en la metodología orientados a homogeneizar las escalas y facilitar su integración en un modelo ponderado de susceptibilidad

7.1 Pendientes

La **Figura 4** muestra la variación topográfica de la zona de estudio utilizando una escala de colores que va del azul (pendientes suaves) al rojo (pendientes extremas, hasta 62.851%). Esta cartografía fue generada a partir de curvas de nivel con equidistancia de 2 metros, facilitadas por la Alcaldía de Medellín, lo que garantiza un alto nivel de detalle en el análisis.

Figura 4. *Mapa de pendientes de la zona de estudio*



Se observa que las zonas centrales y del noroeste de la comuna presentan pendientes moderadas, mientras que las áreas del suroriente, especialmente hacia el corregimiento de Santa Elena, presentan fuertes inclinaciones. Esta información es clave, ya que permite identificar sectores de riesgo geotécnico, donde no se recomienda la urbanización sin estudios previos de estabilidad de taludes.

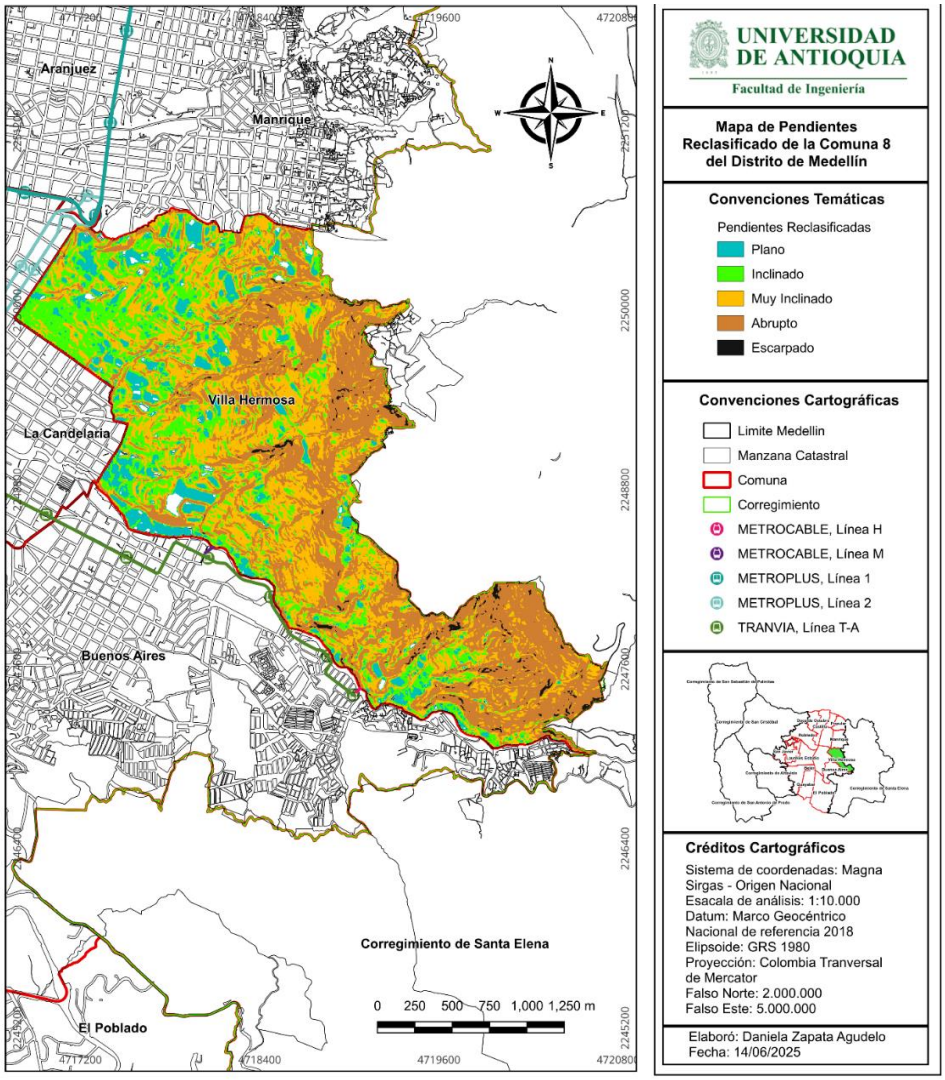
El mapa presentado en la **Figura 5** corresponde a la reclasificación del modelo de pendientes de la Comuna 8, procesado bajo la metodología propuesta en la **Tabla 3**, que categoriza las pendientes en cinco clases según su rango porcentual, donde, las zonas planas (0–5%) y ligeramente inclinadas (5–10%), representadas en tonos azules y verde claro, se ubican principalmente en el extremo noroccidental.

Estas áreas presentan condiciones más favorables en términos de estabilidad del terreno y accesibilidad, lo que las convierte en espacios con alto potencial para el desarrollo urbano planificado y sostenible. Por otro lado, las zonas con pendientes muy inclinadas a abruptas (10–45%) y escarpadas (>45%) abarcan gran parte del territorio, especialmente hacia el centro y el borde suroriental de la comuna.

Las primeras, identificadas en amarillos y naranjas, corresponden a laderas intermedias donde se ha producido urbanización informal, aumentando la exposición a riesgos como deslizamientos. Las zonas escarpadas, en marrón oscuro, se concentran en los límites con el corregimiento de Santa Elena, estas áreas no solo presentan restricciones naturales para el desarrollo urbano, sino que también coinciden con zonas de alta susceptibilidad a movimientos en masa, como ha sido evidenciado en numerosos estudios del DAGRD.

A diferencia del modelo de pendientes continuo, donde la información se presenta en valores porcentuales precisos, el mapa reclasificado simplifica la lectura al transformar los datos en categorías discretas. Esta transformación no representa una pérdida de precisión, sino más bien una ganancia metodológica que posibilita análisis cualitativos y promueve la comparación espacial y respalda la toma de decisiones fundamentadas en la heterogeneidad del relieve.

***Figura 5**. Mapa de pendientes reclasificado de la zona de estudio*

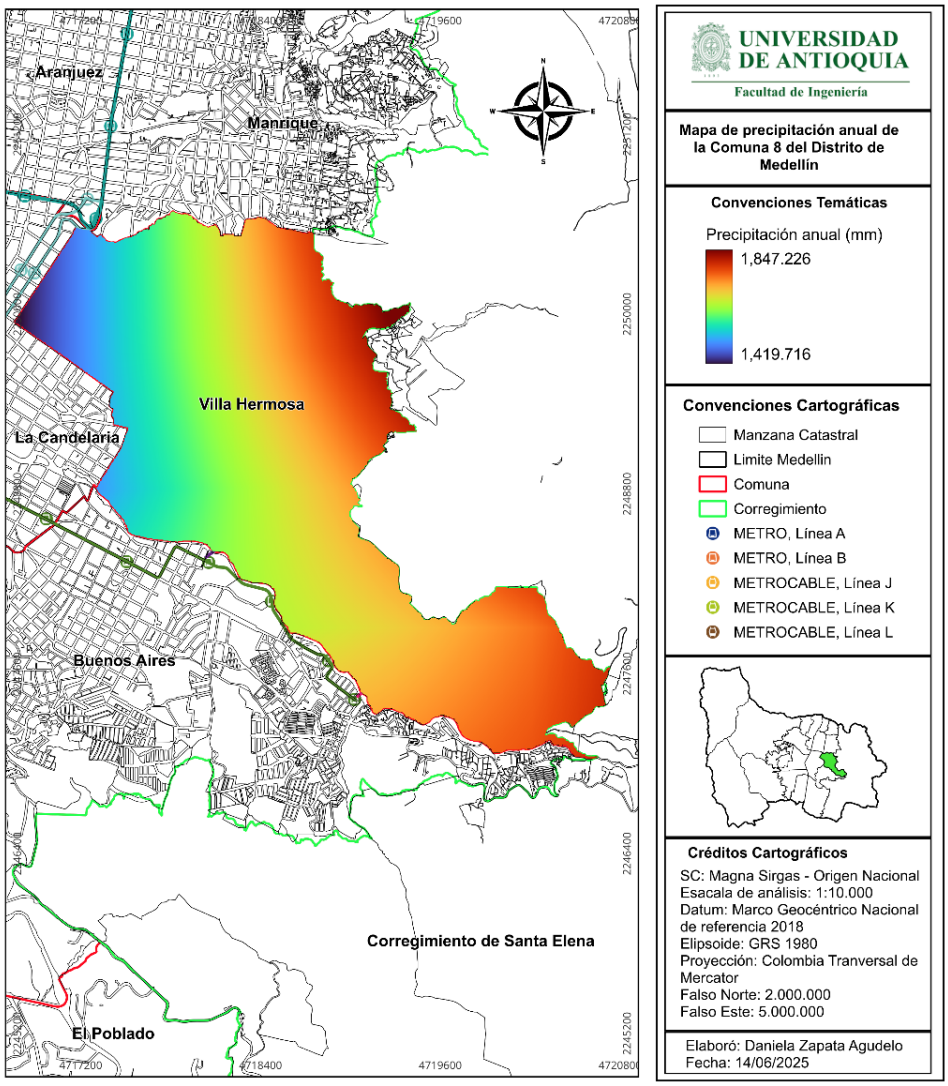


7.2 Precipitación

El mapa ilustra la distribución espacial de la precipitación media anual en la Comuna 8 del Distrito de Medellín, expresada en milímetros (mm), con un rango que va desde 1.419,716 mm hasta 1.847,226 mm, como se ilustra en la **Figura 6**. Esta información fue procesada a partir de datos climáticos de la base de datos CHELSA (Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas), la cual ofrece datos con alta resolución espacial (30 arc-segundos, aproximadamente 1 km²) y es ampliamente utilizada en estudios de modelación ecológica, hidrológica y de riesgo.

Se observa un gradiente creciente de precipitación en dirección oriente, siendo las zonas más húmedas las ubicadas hacia el extremo oriental de la comuna, colindantes con el corregimiento de Santa Elena. Este patrón se relaciona con factores topográficos, como la elevación y la exposición orográfica de las laderas, que favorecen la condensación y precipitación orográfica en las zonas altas del borde oriental, donde predominan las pendientes fuertes y coberturas vegetales más densas.

Figura 6. *Mapa de precipitación de la zona de estudio*

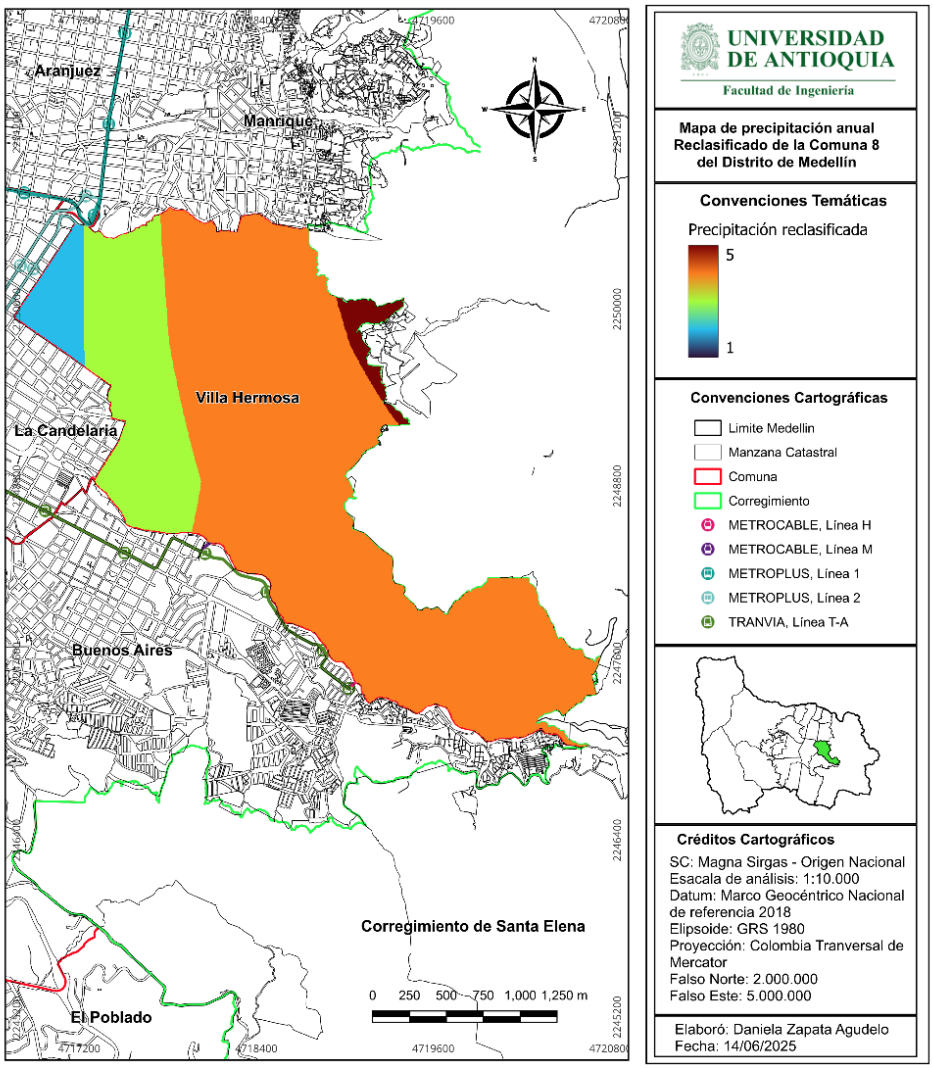


Sin embargo, es necesario tener en cuenta que, al igual que otras bases globales, los datos de CHELSA son el resultado de modelos de interpolación geoestadística y dinámica atmosférica,

calibrados con estaciones meteorológicas. Por tanto, los valores no corresponden a mediciones directas in situ, sino a estimaciones derivadas, por lo que deben interpretarse como aproximaciones útiles para análisis espaciales, pero con cierto grado de incertidumbre, especialmente en áreas urbanas densas con variabilidad microclimática significativa.

La **Figura 7** muestra la reclasificación de la precipitación anual, con base en los rangos obtenidos a partir de los datos climáticos de WorldClim. La precipitación original, expresada en milímetros por año, fue transformada en una escala de valores de 1 a 5 como se definió en la **Tabla 4**, esto con el propósito de facilitar su incorporación en el modelo.

Figura 7. *Mapa de precipitación reclasificado de la zona de estudio*



En consecuencia, dentro del modelo multicriterio desarrollado, no se le asignó un peso elevado a la variable de precipitación, precisamente por no ser un valor exacto. Esta decisión metodológica se fundamenta en la necesidad de mantener la fiabilidad del modelo final, evitando que una variable con menor precisión influya desproporcionadamente en la clasificación de la susceptibilidad. Así, se mantuvo un equilibrio ponderado entre todas las variables, atendiendo no solo a su relevancia conceptual, sino también a la calidad y certeza de los datos disponibles.

En sectores donde confluyen altas precipitaciones y pendientes pronunciadas, como las laderas que limitan con Santa Elena, se mantiene una mayor susceptibilidad a deslizamientos y fenómenos de remoción de tierra. La relación entre la precipitación como factor detonante y la pendiente como factor condicionante exige un análisis conjunto que debe ser incorporado en modelos multicriterio de evaluación de amenazas, que no tiene como alcance este trabajo. A su vez, en zonas densamente urbanizadas con alta pluviometría, el riesgo de inundaciones urbanas, colapsos de drenaje y escorrentía superficial acelerada se convierte en una preocupación crítica, especialmente en contextos de cambio climático donde se espera un aumento en la intensidad de los eventos extremos.

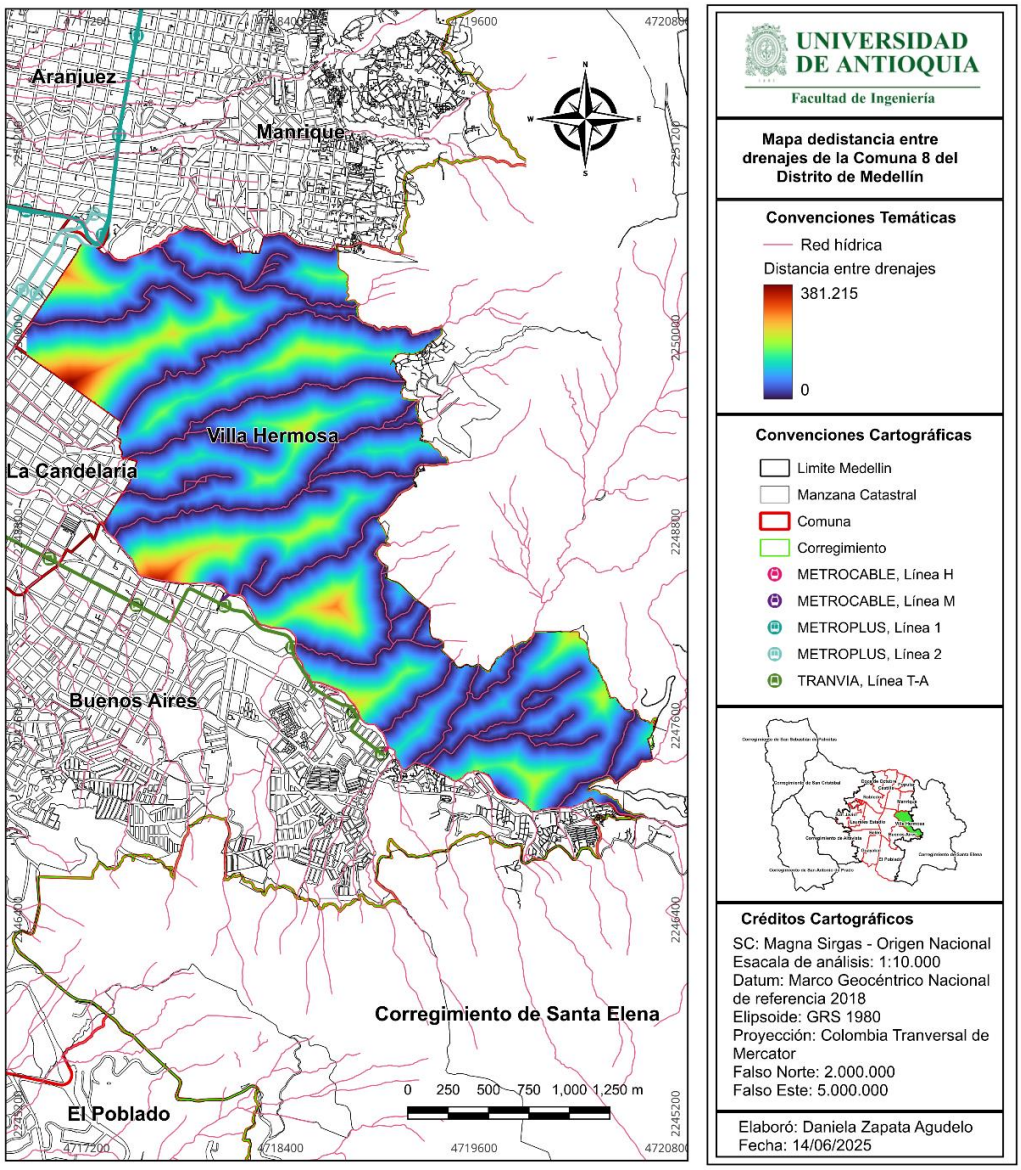
7.3 Distancia entre drenajes

La **Figura 8** representa la distancia entre drenajes naturales, esta variable fue calculada mediante herramientas SIG que generan una superficie continua de valores desde cada celda del ráster hasta el drenaje más cercano, expresada en metros. Como puede observarse, los valores más bajos indicados en azul oscuro corresponden a zonas cercanas a los cauces principales, mientras que los valores más altos representados en tonos cálidos como el rojo se localizan en las áreas más alejadas de la red hídrica.

Este tipo de variables resulta relevante para el estudio de susceptibilidad, en efecto, la proximidad a los drenajes naturales suele estar asociada a una mayor exposición a deslizamientos y erosión hídrica, todos ellos condicionados por la dinámica del escurrimiento superficial. Por tanto, zonas muy próximas a los drenajes tienden a presentar condiciones más críticas en términos

de estabilidad del terreno, sobre todo cuando coinciden con pendientes pronunciadas y coberturas vegetales degradadas.

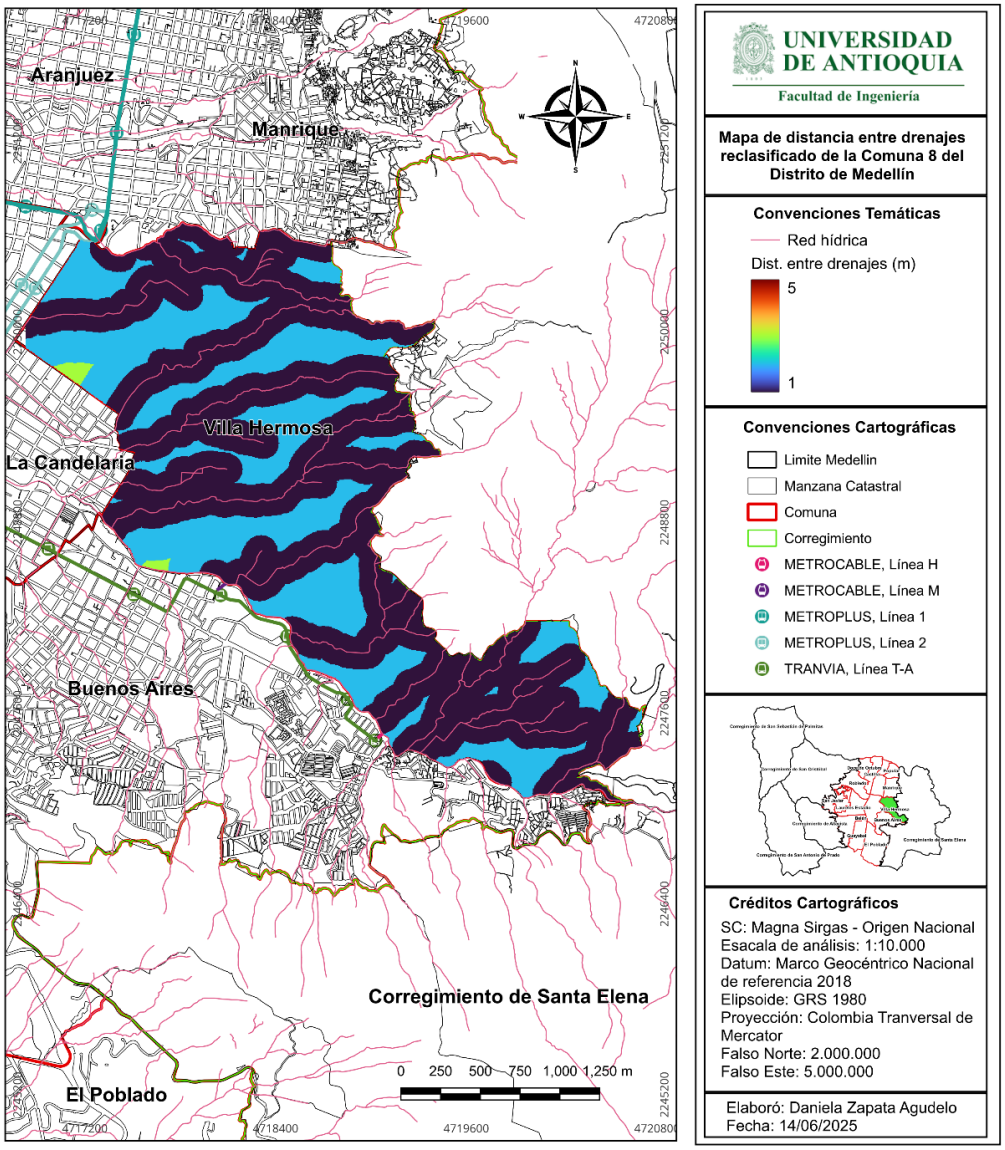
Figura 8. *Mapa de distancia entre drenajes de la zona de estudio*



En términos de integración al modelo, esta variable fue reclasificada en categorías ordinales como se definió en la **Tabla 6** para su ponderación conjunta con otras capas temáticas, tales como pendiente, geología, cobertura vegetal y precipitación. En la **Figura 9** se ilustra el mapa generado luego de hacer dicha reclasificación, a la cual se le asignó un peso 0.15% en la ponderación final.

Asimismo, reconociendo su relevancia física en la generación de amenazas como la precisión del insumo, obtenido a partir de fuentes vectoriales oficiales de la Alcaldía de Medellín red hidrográfica y tratado mediante procesos de distancia euclidiana en QGIS.

Figura 9. *Mapa de distancia entre drenajes de la zona de estudio*

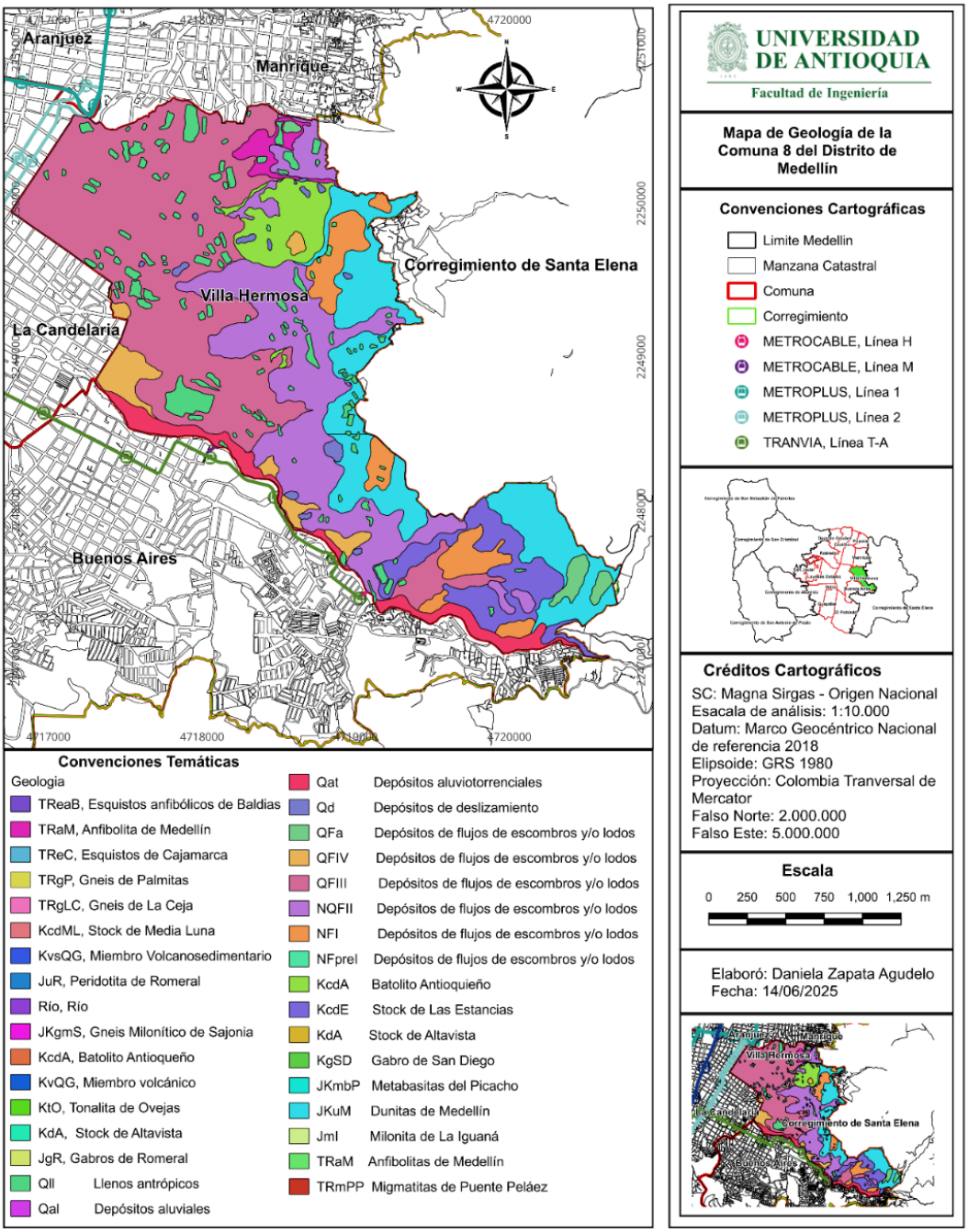


7.4 Geología

El mapa geológico de la Comuna 8, ilustrado en la **Figura 10** presenta una heterogeneidad litológica marcada, que refleja la complejidad y geomorfológica de esta zona del borde oriental del

Valle de Aburrá. A través de una simbología diferenciada, se evidencian tanto unidades geológicas consolidadas de origen ígneo y metamórfico, como depósitos recientes de tipo coluvial y aluvional, cada uno con implicaciones distintas para la estabilidad del terreno y la gestión del riesgo.

Figura 10. *Mapa de geología de la zona de estudio*

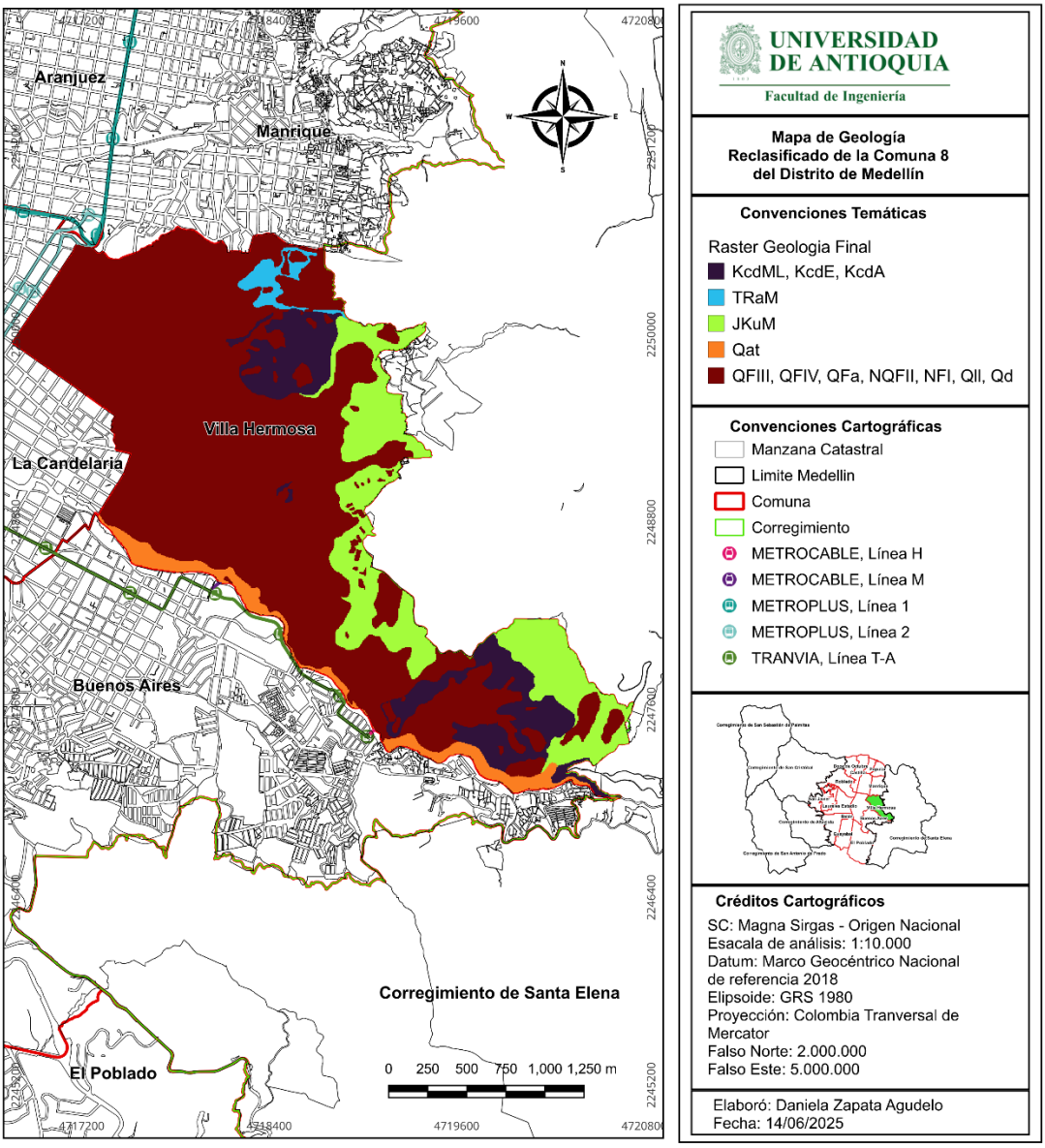


El mapa de geología reclasificada **Figura 11** permite identificar espacialmente las unidades geológicas agrupadas según su grado de susceptibilidad a movimientos en masa, lo cual es esencial en la construcción del modelo multicriterio. Esta reclasificación se fundamentó en las características litológicas y mecánicas de cada formación. Las unidades con mayor susceptibilidad (categoría 5, en rojo oscuro) incluyen depósitos de deslizamiento, flujos de escombros y llenos antrópicos (Qd, QFIII, QFIV, QFa, NQFII, NFI, Qll), ampliamente distribuidos en la parte oriental y sudoriental de la comuna, coincidiendo con áreas de fuerte pendiente y expansión urbana informal. Estas unidades se caracterizan por su baja cohesión, alta porosidad y susceptibilidad a la saturación hídrica, condiciones que facilitan el desencadenamiento de procesos de remoción en masa, especialmente durante eventos de lluvia intensa (Universidad EAFIT., et al, 2006)

En contraste, las unidades asignadas a categorías de baja susceptibilidad (categoría 1, en marrón oscuro), como los stocks ígneos intrusivos del Batolito Antioqueño y sus derivados (KcdML, KcdE, KcdA), predominan en el sector noroccidental de la comuna. Estas formaciones están compuestas por rocas resistentes y masivas que, aunque pueden presentar fracturamientos, en general ofrecen una alta estabilidad geotécnica.

Las Dunitas de Medellín (JKuM) y la Anfibolita de Medellín (TRaM), clasificadas como moderadamente susceptibles (categorías 3 y 2), ocupan zonas transicionales y pueden volverse inestables en presencia de meteorización intensa o alteraciones estructurales. Finalmente, los depósitos aluviales y aluviotorrenciales (Qat), categorizados con susceptibilidad 4, se distribuyen de manera puntual en la franja media oriental, representando zonas de riesgo moderado donde los materiales no consolidados interactúan con procesos fluviales. Este análisis facilita la comprensión espacial del riesgo geológico y constituye una base sólida para integrarlo con otras variables del modelo de susceptibilidad.

Figura 11. *Mapa de geología reclasificado de la zona de estudio*

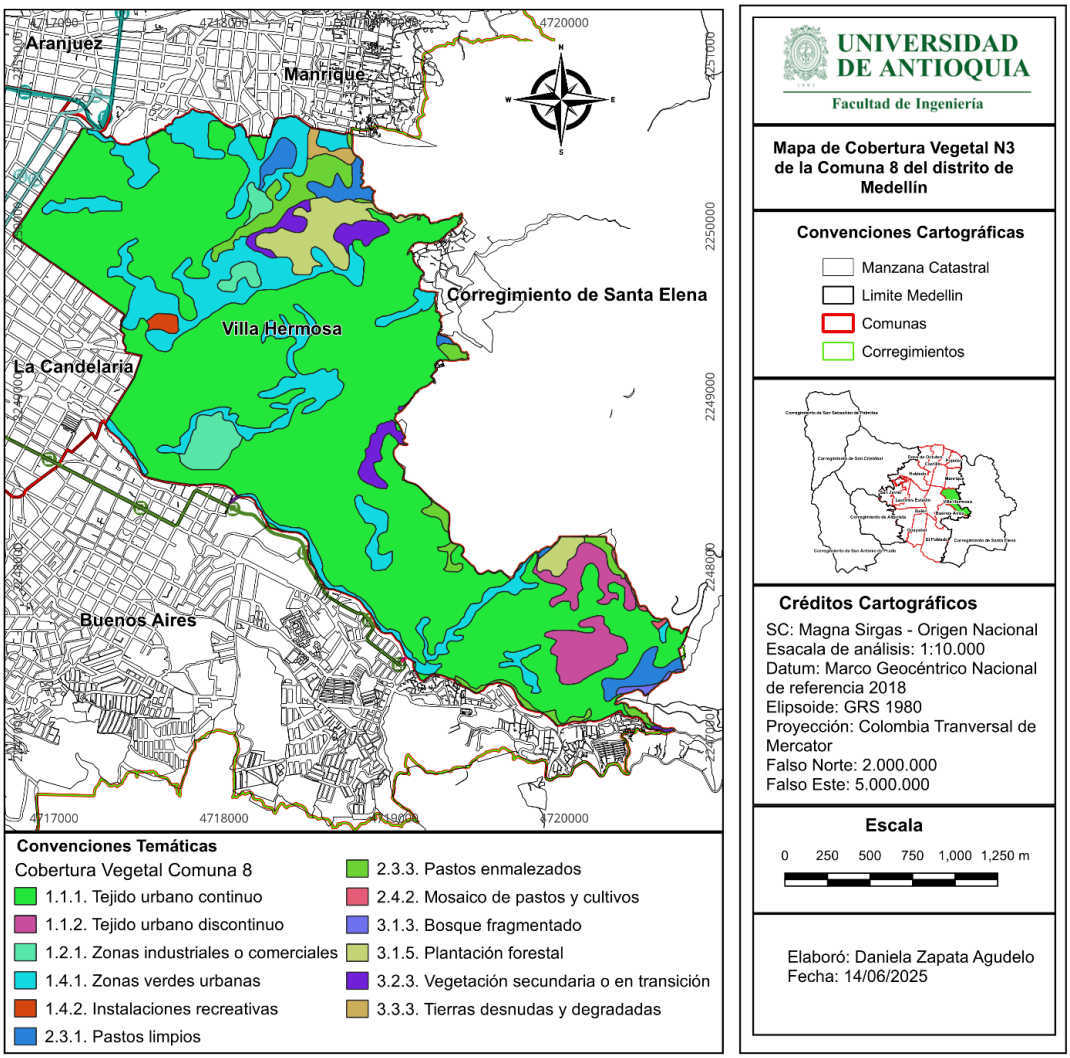


7.5 Cobertura Vegetal

El mapa de cobertura vegetal N3 de la Comuna 8 **Figura 12**, elaborado a partir de la clasificación Corine Land Cover adaptada para Colombia, muestra poca presencia de pastos limpios (2.3.1) y vegetación secundaria o en transición (3.2.3). Estas coberturas son indicativas de procesos de intervención antrópica sobre ecosistemas naturales, ya sea por actividades agropecuarias, expansión urbana informal o procesos de recuperación secundaria. Su relevancia en el análisis de susceptibilidad radica en que estas coberturas, aunque ofrecen cierta protección del

suelo, no presentan raíces profundas ni estructuras de retención tan efectivas como las coberturas arbóreas maduras, lo que las vuelve vulnerables a procesos de remoción en masa, particularmente en terrenos con pendientes pronunciadas (Alcaldía de Medellín, 2017).

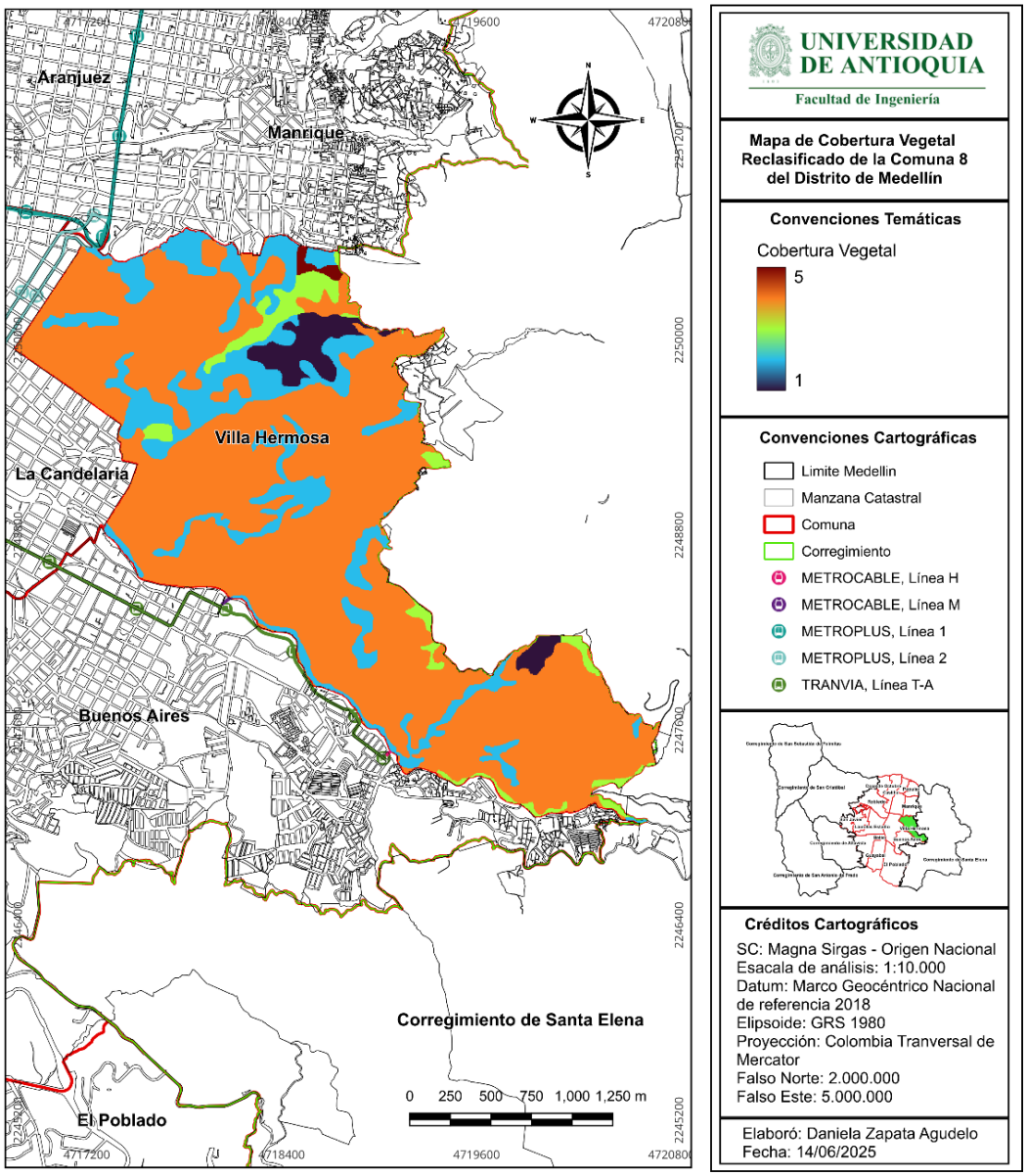
Figura 12. *Mapa de cobertura vegetal nivel 3 de la zona de estudio*



Además, se aprecia una considerable superficie cubierta por tejido urbano continuo y discontinuo (1.1.1 y 1.1.2), así como zonas industriales (1.2.1) las cuales al impermeabilizar el suelo incrementan la escorrentía superficial y reducen la infiltración, potenciando la saturación en zonas bajas y laderas adyacentes. Esta mezcla de usos del suelo evidencia una fragmentación del paisaje, que compromete el equilibrio ecológico y reduce la resiliencia frente a eventos de lluvia intensa.

En la **Figura 13** se muestra la reclasificación, se basó en criterios técnicos que consideran el grado de impermeabilización del suelo, la presencia o ausencia de cobertura arbórea, el tipo de uso del suelo (urbano, industrial, agrícola, forestal), y su implicación en la estabilidad del terreno frente a procesos erosivos y de remoción en masa. Los valores asignados van de 1 (menor susceptibilidad) a 5 (mayor susceptibilidad).

Figura 13. *Mapa de cobertura vegetal nivel 3 de la zona de estudio*



La cartografía evidencia que la categoría más extendida corresponde a las áreas urbanas (valor 4), representadas en naranja, que dominan el territorio. Estas zonas, principalmente de tejido urbano continuo y discontinuo, así como áreas industriales y de pastos limpios, presentan alta susceptibilidad por su escasa vegetación protectora y suelos modificados, compactados o expuestos. Las áreas con vegetación secundaria o plantaciones forestales (valores 2 y 1, en verde claro y azul), representan zonas con menor susceptibilidad relativa, al ofrecer cierto grado de protección contra la escorrentía superficial y la inestabilidad del terreno. Por otro lado, las tierras degradadas y sin cobertura (valor 5, en rojo oscuro), aunque menos extendidas, marcan focos de alta vulnerabilidad que merecen especial atención en la planificación territorial y la gestión del riesgo.

7.6 Mapa de Susceptibilidad final

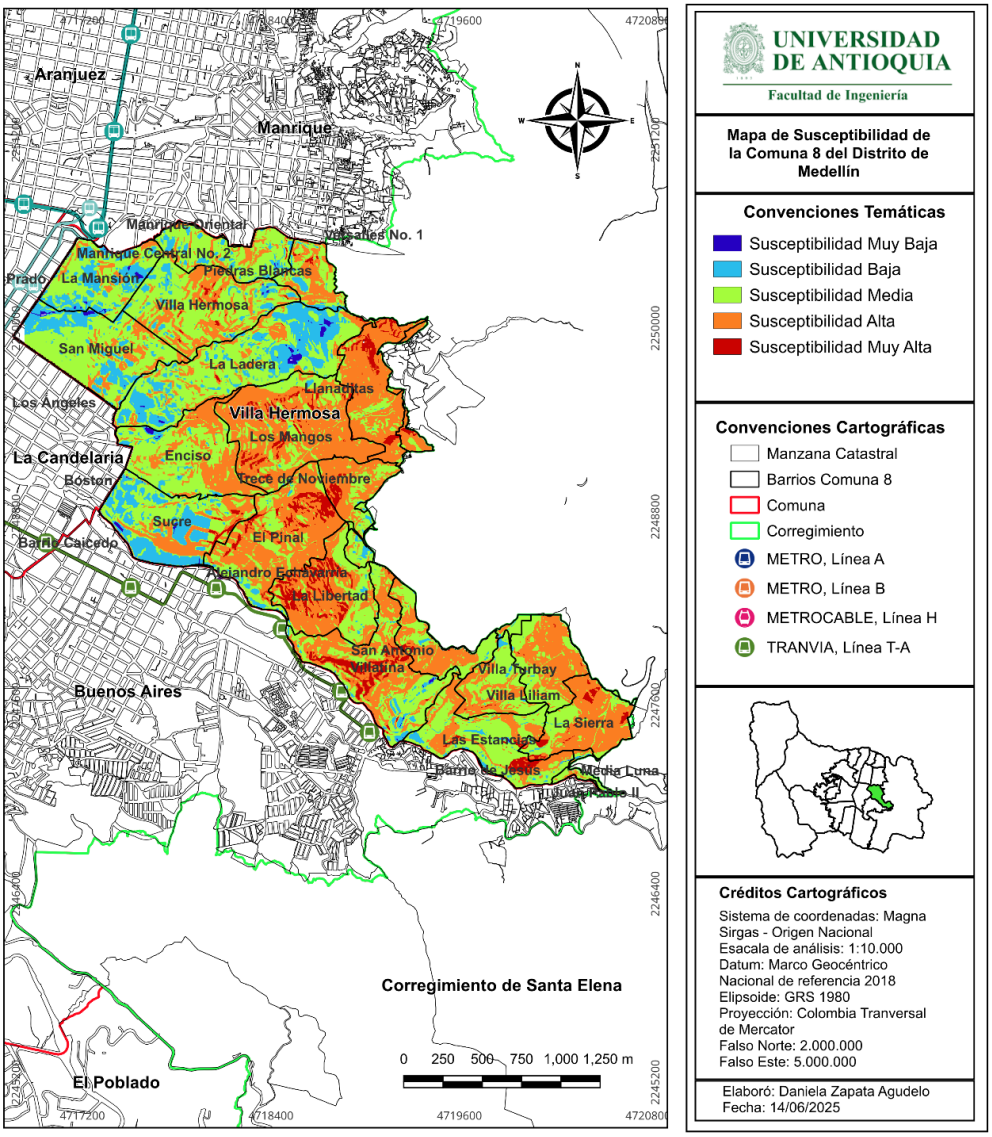
El mapa de susceptibilidad final **Figura 14** integra las variables previamente reclasificadas (pendiente, precipitación, geología, cobertura vegetal y distancia a drenajes) mediante una superposición ponderada, siguiendo un enfoque de análisis multicriterio explicado en la metodología. La cual, permitió obtener una zonificación espacial de los niveles de susceptibilidad a movimientos en masa, clasificados en cinco categorías: muy baja, baja, media, alta y muy alta. La clasificación facilita la identificación de áreas prioritarias para la gestión del riesgo y la planificación territorial, conforme a lo establecido en el PMGRD y los lineamientos del POT de Medellín.

Los resultados muestran que las zonas con susceptibilidad alta y muy alta (colores naranja y rojo) se localizan predominantemente en el centro-oriente y suroriente de la Comuna 8, en áreas que coinciden con pendientes pronunciadas, suelos geológicamente inestables (como depósitos y tierras degradadas), y coberturas de baja vegetación o uso antrópico intenso. Estas zonas requieren especial atención por su alta exposición a fenómenos de remoción en masa.

En contraste, los sectores con susceptibilidad baja y muy baja (azul y morado) se concentran hacia el norte y oeste de la comuna, donde predominan pendientes suaves, coberturas vegetales estabilizadoras y unidades geológicas más competentes. La categoría de susceptibilidad media

(verde) ocupa una proporción intermedia, actuando como una zona de transición que puede evolucionar hacia niveles de mayor riesgo si se intensifica el uso del suelo o se degradan las coberturas vegetales

Figura 14. *Mapa de Susceptibilidad de la zona de estudio*

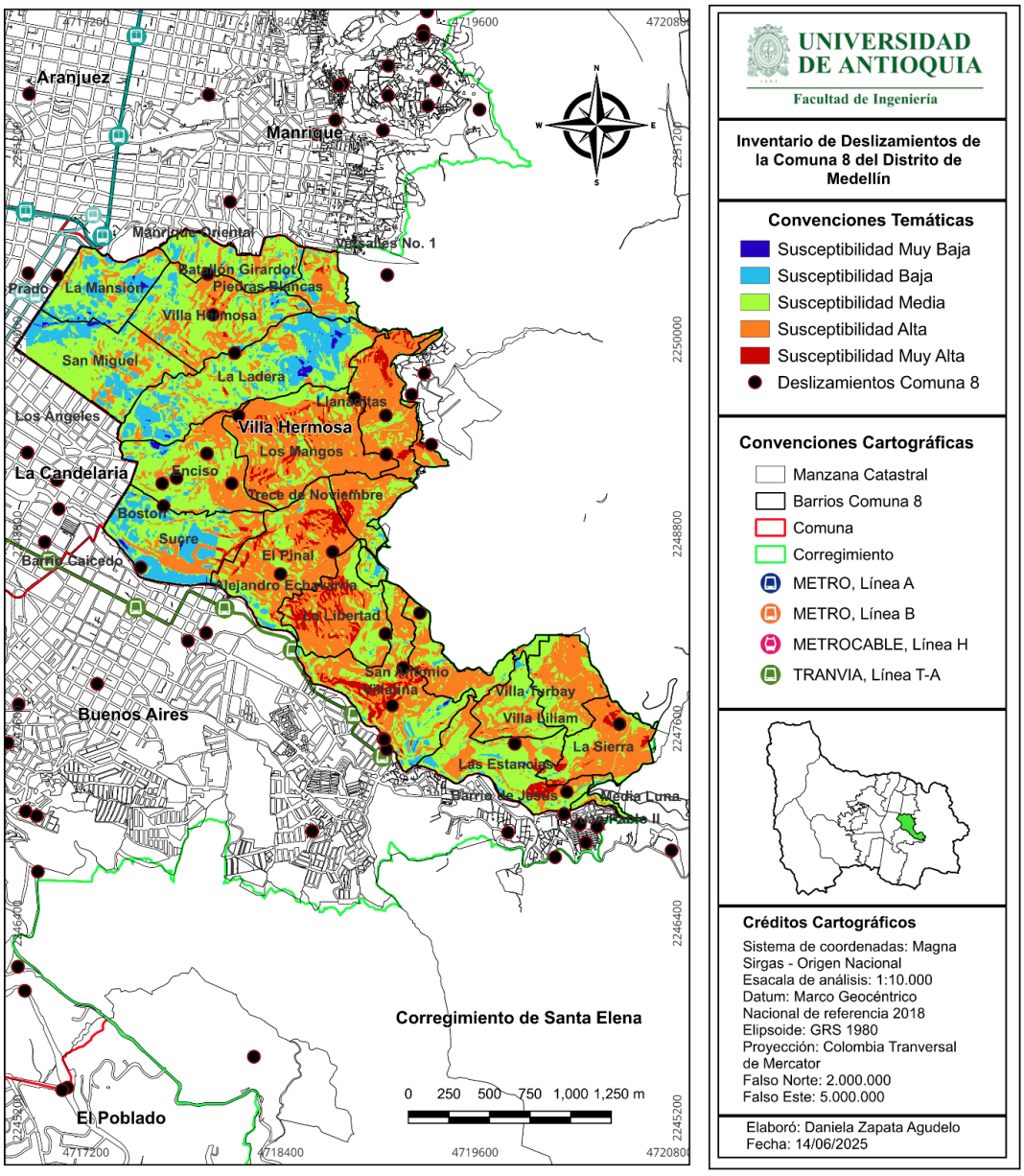


7.7 Validación del modelo de susceptibilidad con eventos históricos de deslizamientos

La validación del modelo de susceptibilidad constituye una etapa fundamental en la evaluación de su confiabilidad del modelo. Para este propósito, se realizó una superposición

espacial entre los niveles de susceptibilidad generados por el análisis multicriterio y los puntos de deslizamientos históricos registrados en la Comuna 8 del Distrito de Medellín. Esta información fue recopilada a partir de inventarios oficiales y georreferenciada como eventos puntuales de deslizamientos. El resultado se presenta en la **Figura 15**.

Figura 15. *Inventario de deslizamientos de la zona de estudio*

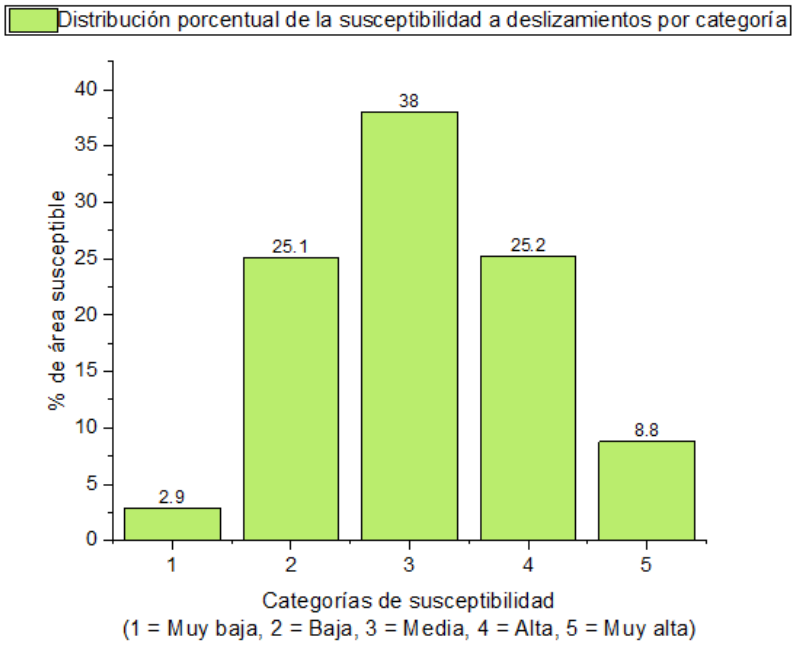


Como puede observarse en la **Figura 15**, existe una alta coincidencia espacial entre los eventos de deslizamientos y las zonas clasificadas como de susceptibilidad alta y muy alta (colores

naranja y rojo) especialmente barrios como Villatina, La Sierra, Villa Liliam, Villa Turbay, San Antonio, La libertad, El Pinal, Trece de Noviembre, Lo Mangos y Las Estancias los cuales presentan niveles altos y muy altos de susceptibilidad, lo que coincide con zonas de ladera, topografía escarpada y alta intervención antrópica, lo que indica una alta probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en caso de precipitaciones intensas o alteración del terreno. Este hallazgo evidencia una buena capacidad predictiva del modelo, lo que indica que los criterios y pesos asignados durante el análisis multicriterio (pendiente, precipitación, distancia a drenajes, geología y cobertura vegetal) fueron apropiadamente seleccionados y ponderados, Asimismo, se observa una superposición significativa entre la ubicación de deslizamientos históricos (puntos negros) y las zonas clasificadas con susceptibilidad alta y muy alta

La **Figura *16*** ilustra que el 38 % del área total corresponde a zonas con susceptibilidad media, lo que implica que más de un tercio del territorio requiere atención preventiva, dado que ante cambios en las condiciones (urbanización informal, lluvias extremas), estas zonas podrían evolucionar hacia una mayor susceptibilidad. Asimismo, un 25.2 % presenta susceptibilidad alta, y un 8.8 % muy alta, lo que representa un 34 % del territorio en situación crítica o prioritaria para intervenciones de mitigación.

Figura 16. *Distribución porcentual de la susceptibilidad por categoría en la Comuna 8*



El 25.1 % se encuentra en categoría baja y solo el 2.9 % en muy baja, lo cual indica que menos del 30 % del territorio presenta condiciones de estabilidad relativa, una proporción muy baja frente al riesgo general del área. Adicionalmente, se observa que las zonas clasificadas como susceptibilidad muy baja o baja como La Mansión, Los Ángeles, Villa Hermosa, La Ladera, San Miguel (tonalidades azul y verde) presentan una menor presencia de eventos registrados lo cual se puede atribuir a su relativa estabilidad geomorfológica y urbanización consolidada. Cabe destacar que muchos de los eventos ocurren en áreas ubicadas hacia el sur de la comuna y hacia el corregimiento de Santa Elena, una zona caracterizada por elevadas pendientes, coberturas vegetales modificadas y urbanización informal, lo que coincide con condiciones típicas de alta susceptibilidad. Asimismo, se evidencian eventos en sectores con tejido urbano discontinuo, pastos limpios y zonas degradadas, cuyas coberturas fueron reclasificadas con valores altos de susceptibilidad debido a su escasa capacidad de retención de agua y poca estabilidad superficial del suelo.

Este proceso de validación demuestra que el modelo no solo responde a condiciones físico-naturales, sino también a factores antrópicos y de ocupación del territorio, alineándose con los principios metodológicos recomendados por el PMGRD (Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres) y el POT de Medellín

8. Conclusiones y recomendaciones

Este estudio desarrolló un modelo de análisis de susceptibilidad a deslizamientos en la Comuna 8 del Distrito de Medellín, empleando una metodología multicriterio de tipo empírico, sustentada en una revisión bibliográfica rigurosa y el uso de herramientas SIG. Los factores analizados fueron seleccionados por su relevancia técnica y validados con fuentes oficiales y académicas, permitiendo una representación espacial precisa del riesgo relativo.

El modelo identificó una mayor concentración de áreas con alta y muy alta susceptibilidad en la franja oriental de la comuna, especialmente hacia el corregimiento de Santa Elena, donde confluyen condiciones críticas como fuertes pendientes, degradación de la cobertura vegetal, cercanía a drenajes naturales y procesos de urbanización informal. En total, más del 70 % del área evaluada presenta niveles significativos de susceptibilidad (media, alta o muy alta), lo que evidencia una marcada exposición del territorio a deslizamientos.

La validación del modelo mediante la superposición con registros históricos de deslizamientos confirmó una alta correspondencia entre las zonas identificadas con alta susceptibilidad y la ocurrencia real de eventos, lo que respalda la confiabilidad del análisis. En consecuencia, este modelo constituye una herramienta útil para la gestión del riesgo, la planificación del territorio y la formulación de estrategias de intervención, siendo además replicable en otros contextos similares del Valle de Aburrá.

Referencias

Ayalew, H., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda–Yahiko Mountains, Central Japan. Geomorphology, 65(1–2), 15–31. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010

Aristizábal, E., González, T., Montoya, J., Vélez, J., Martínez, H., & Guerra, A. (julio de 2011). Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, Colombia. Revista EIA, 8(15).

Cao, Y., Wei, X., Fan, W., Nan, Y., Xiong, W., & Zhang, S. (2021). Evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos de tierra mediante el método de ponderación de la evidencia: un estudio de caso en la zona de Xunyang, China. PLoS ONE, 16(1), e0245668. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245668

Carvajal, P. (2012). Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia [PDF]. Libros del Servicio Geológico Colombiano. https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/view/52/44/438

Comisión Nacional Asesora para la Investigación en Gestión del Riesgo de Desastres. (2014). Resolución 795 del 29 de julio de 2014: Creación de la Comisión Nacional Asesora para la Investigación en Gestión del Riesgo de Desastres [PDF]. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. Recuperado de https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/...

Constantin, M., Bednarik, M., Jurchescu, M. C., et al. (2011). Evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos mediante análisis estadístico bivariado e índice de entropía en la cuenca de Sibiciu (Rumania). Environmental Earth Sciences, 63, 397–406. https://doi.org/10.1007/s12665-010-0724-y

Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE. (2025). Proyecciones de población por área y sexo 2018–2035: Total municipal. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla/ProyeccionesMunicipales2018_2035.xls

Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres – DAGRD. (2015). Plan municipal de gestión del riesgo de desastres de Medellín 2015–2030 [Síntesis]. Repositorio Gestión del Riesgo. https://bit.ly/3HFhbFE

El Jazouli, A., Barakat, A., & Khellouk, R. (2019). GIS-multicriteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco). Geoenvironmental Disasters, 6, 3. https://doi.org/10.1186/s40677-019-0119-7

European Environment Agency. (2020). CORINE Land Cover (CLC) 2018, Version 2020_20u1 — Copernicus Land Monitoring Service. https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover

Felicísimo, Á. M., Cuartero, A., Remondo, J., et al. (2013). Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees,

and maximum entropy methods: a comparative study. Landslides, 10, 175–189. https://doi.org/10.1007/s10346-012-0320-1

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. Geomorphology, 31(1–4), 181–216. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1

Gómez, D., Aristizábal, E., García, E., & Marín Palacio, B. (2023). Pronóstico de deslizamientos mediante estimaciones de lluvia satelital y aprendizaje automático en la región Andina colombiana. Revista de Ciencias de la Tierra Sudamericanas. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104293

Karger, D., Conrad, O., Böhner, J., et al. (2017). Climatologías de alta resolución para la superficie terrestre. Scientific Data, 4, 170122. https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122

Leonardi, G., Palamara, R., Manti, F., & Tufano, A. (2022). Análisis multicriterio SIG mediante AHP para evaluar el riesgo de deslizamientos en líneas vitales viales. Applied Sciences, 12(9), 4707. https://doi.org/10.3390/app12094707

Merghadi, A., Yunus, A. P., Dou, J., Whiteley, J., Pham, B. T., Bui, D. T., Avtar, R., & Boumezbeur, A. (2020). Métodos de aprendizaje automático para estudios de susceptibilidad a deslizamientos de tierra: una descripción comparativa del rendimiento de los algoritmos. Engineering Geology, 275, 105750. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105750

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). Decreto 1640 de 2012: Reglamentación de instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de cuencas hidrográficas [PDF]. Diario Oficial No. 48 510. Recuperado de https://archivo.minambiente.gov.co/...

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2015). Decreto 1077 de 2015: Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio [PDF]. Recuperado de https://minvivienda.gov.co/...

Mousavi, S. Z., Kavian, A., Soleimani, K., Mousavi, S. R., & Shirzadi, A. (2011). GIS-based spatial prediction of landslide susceptibility using logistic regression model. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2(1), 33–50. https://doi.org/10.1080/19475705.2010.532975

Oñate Valdivieso, F., Álvarez, M., Esparza, C., & Oñate Paladines, A. (2020). Evaluación multicriterio aplicada al análisis de movimientos en masa en carreteras de montaña: un caso de estudio en los Andes del sur del Ecuador. Avances: Investigación en Ingeniería, 17(2). https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.6633

Personería Distrital de Medellín. (2022, 2 de noviembre). Más de 65 000 personas han sufrido desplazamiento forzado intraurbano en Medellín durante los últimos 10 años [Boletín de prensa 90]. Personería de Medellín. https://www.personeriamedellin.gov.co/mas-de-65-mil-personas-han-sufrido-de-desplazamiento-forzado-intraurbano-en-los-ultimos-10-anos-en-medellin/

Plan de Ordenamiento Territorial de Medellín – Alcaldía de Medellín. (2022, octubre 25). Plan de Ordenamiento Territorial de Medellín. Alcaldía de Medellín. https://www.medellin.gov.co/...

Reichenbach, P., Humair, F., Malamud, B. D., Glade, T., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. Earth-Science Reviews, 180, 60–91. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001

Salcedo, Y. C., Álvarez, E. R., & González, L. (2022). Validación con el método Delphi de ítems para evaluar daños sísmicos potenciales. https://doi.org/10.5281/zenodo.7348271

Servicio Geológico Colombiano. (2011). Guía metodológica para la zonificación de susceptibilidad y amenaza relativa por movimientos en masa, escala 1:100 000. https://www.researchgate.net/...

Shahabi, H., & Hashim, M. (2015). Landslide susceptibility mapping using GIS-based statistical models and remote sensing data in tropical environment. Scientific Reports, 5, 9899. https://doi.org/10.1038/srep09899

Shano, L., Raghuvanshi, T. K., & Meten, M. (2020). Evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos y técnicas de zonificación de riesgos. Geoenvironmental Disasters. https://geoenvironmental-disasters.springeropen.com/...

Universidad EAFIT, Integral S.A., Universidad Nacional de Colombia, Inteinsa S.A., & Solingral S.A. (2006). Microzonificación sísmica detallada de los municipios del Valle de Aburrá e inclusión de los corregimientos de Medellín (Informe técnico). Repositorio de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/...

Vakhshoori, V., & Zare, M. (2016, febrero). Landslide susceptibility mapping by comparing weight of evidence, fuzzy logic, and frequency ratio methods. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 7(5), 1731–1752. https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1144655

Velásquez, C. (2022). Escenario de riesgo del borde urbano rural de la Comuna 8 de Medellín [Risk scenario of the urban rural border of Commune 8 in Medellín]. Revista Kavilando, 14(2). Recuperado de https://portal.amelica.org/...

Vieira, A. G. R., et al. (2018). Empirical rainfall thresholds for landslide occurrence in Serra do Mar, Angra dos Reis, Brazil. Landslides, 15, 211–226.

Zhang, Y., Chen, J., Wang, Q., Tan, C., Li, Y., Sun, X., & Li, Y. (2022). Geographic information system models with fuzzy logic for susceptibility maps of debris flow using multiple types of parameters: a case study in Pinggu District of Beijing, China. Natural Hazards and Earth System Sciences, 22, 2239–2255. https://doi.org/10.5194/nhess-22-2239-2022

.

Anexos

1. Sección Marco normativo de ordenamiento territorial

- **Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD) de Medellín 2015-2030**

El propósito del plan es establecer una gobernanza del riesgo robusta, que incluya la activación de actores institucionales, comunitarios y técnicos (como el DAGRD, Comités municipales y sectoriales, y académicos), para garantizar una gestión del riesgo sostenible en el largo plazo. A su vez, busca promover políticas, proyectos y acciones específicas que incluyen la articulación de alertas tempranas, educación, monitoreo, y medidas estructurales y no estructurales, con la finalidad de reducir la vulnerabilidad, proteger a la población y mitigar los impactos de futuras emergencias (DAGRD, 2015).

- **Comisión Nacional Asesora para la investigación en Gestión del Riesgo de Desastres**

La Comisión Nacional Asesora para la Investigación en Gestión del Riesgo de Desastres fue establecida mediante la Resolución 795 del 29 de julio de 2014. Su finalidad principal es guiar la formulación de lineamientos y fomentar actividades investigativas en el ámbito de la gestión del riesgo de desastres. Esto con el propósito de fortalecer el conocimiento del riesgo y promover una cultura de investigación a nivel nacional, dentro del marco del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (CNIGRD, 2015).

- **Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas**

Los POMCA, regulados por el Decreto 1640 de 2012, constituyen determinantes ambientales fundamentales para la formulación y actualización de los Planes de Ordenamiento Territorial (MinAmbiente, 2014). Según lo dispuesto en el Decreto 1077 de 2015, si en el momento de revisar o formular un POT se cuenta con un POMCA aprobado que incluya análisis de amenazas naturales, dichos estudios deben ser utilizados como insumo para la elaboración de los estudios básicos, especialmente en el suelo rural. Esta articulación permite

una planificación más precisa y preventiva del territorio frente a riesgos asociados al agua y al medio ambiente.

- **Planes de Ordenamiento Territorial POT**

Los Planes de Ordenamiento Territorial (POT), definidos en el Decreto 1640 de 2012 y desarrollados como herramientas técnicas y normativas, orientan el desarrollo físico y funcional de los municipios en el largo plazo. Su objetivo es regular el uso, ocupación y transformación del suelo, tanto en zonas urbanas como rurales, mediante políticas de planificación y gestión territorial (MinVivienda, 2012).

En este contexto, el POT de Medellín, adoptado mediante el Acuerdo Municipal 048 de 2014, incorpora de manera explícita la gestión del riesgo como un eje estructurante del ordenamiento territorial. Este plan reconoce la necesidad de identificar, zonificar y gestionar áreas con condiciones de amenaza y vulnerabilidad, particularmente frente a fenómenos como los deslizamientos. Así mismo, establece lineamientos para la intervención, mitigación y uso del suelo en zonas de riesgo, con el fin de garantizar un desarrollo urbano sostenible y seguro.

2. Poster

Escuela Ambiental

ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD POR DESLIZAMIENTOS EN LA COMUNA 8 DEL DISTRITO DE MEDELLÍN

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1803

Daniela Zapata Agudelo [1-2] Derly Estefanny Gómez García [1] William Alberto Castrillón Vasquez [2]

1 Universidad de Antioquia *2 Departamento Administrativo de Planeación*

Ingeniería Civil, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, 050010, Colombia. *2025 - 1*

Introducción

El acelerado crecimiento urbano y la ocupación informal en laderas de Medellín han incrementado la vulnerabilidad ante deslizamientos, especialmente en la Comuna 8. Esta zona presenta condiciones geológicas y topográficas críticas, con alta densidad poblacional en áreas de riesgo. Este trabajo aplica un análisis multicriterio empírico para identificar zonas con mayor susceptibilidad a deslizamientos, integrando variables como pendiente, geología, cobertura vegetal, precipitación y proximidad a drenajes. Las variables fueron ponderadas con criterios expertos y validadas con registros históricos y recientes de eventos. El modelo busca apoyar la gestión territorial y la priorización de intervenciones.



Figura 1. Deslizamiento Villatina, Comuna 8. El Colombiano (1987, Sep 19).



Figura 2. Localización de la zona de estudio

Metodología

Mapa de susceptibilidad

- Pendiente (30%)
- Precipitación (20%)
- Geología (20%)
- Distancia entre drenajes (15%)
- Cobertura vegetal (15%)

Figura 3. Flujo de trabajo para calcular la susceptibilidad

Objetivo

Analizar y caracterizar espacialmente la susceptibilidad a deslizamientos en la Comuna 8 de Medellín mediante un análisis multicriterio en SIG, integrando variables físicas, generando mapas temáticos y validando los resultados con registros históricos registrados en el inventario de DesInventar, SIMMA y en estudios recientes desarrollados por Aristizábal et al. (2025) y Gómez et al. (2023).

Resultados y análisis

Pendiente

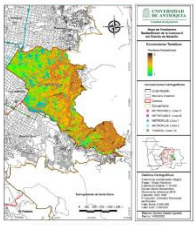


Figura 4. Mapa de pendientes reclasificado

Cobertura vegetal

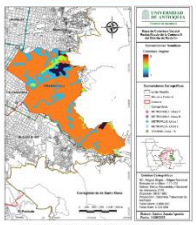


Figura 5. Mapa de cobertura vegetal reclasificado

Geología

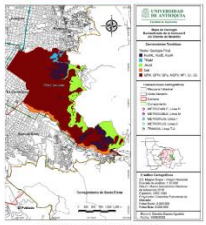


Figura 6. Mapa de geología reclasificado

Distancia entre drenajes

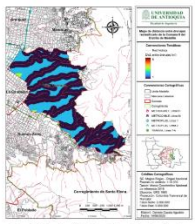


Figura 7. Mapa de distancia entre drenajes reclasificado

Precipitación

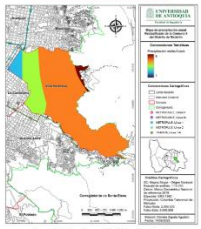


Figura 8. Mapa de precipitación reclasificado

Distribución porcentual de deslizamientos

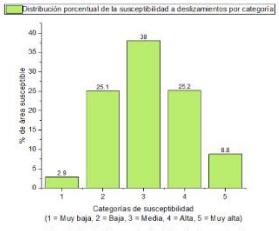


Figura 9. Distribución porcentual de deslizamientos por categoría

Conclusiones

Más del 70 % del área evaluada presenta un nivel significativo de susceptibilidad a deslizamientos, distribuyéndose en un 38 % con susceptibilidad media, un 25.2 % alta y un 8.8 % muy alta. En contraste, únicamente el 25.1 % del territorio muestra susceptibilidad baja y apenas el 2.9 % muy baja, lo que evidencia una alta exposición del territorio a deslizamientos.

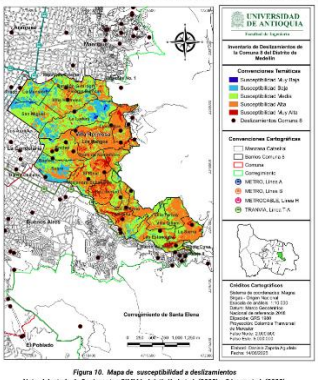


Figura 10. Mapa de susceptibilidad a deslizamientos
Nota. Adaptado de Desinventar, SIMMA, Aristizábal et al. (2025) y Gómez et al. (2023).

DATOS DE CONTACTO DEL AUTOR

Daniela.zapataa1@udea.edu.co

https://co.linkedin.com/in/daniela-zapata-agudelo-3951a7327

Escanea este QR para conocer más sobre el proyecto

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Facultad de Ingeniería