

## Zonificación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa en el municipio de Medina, Cundinamarca

Adrián Nicolás Barajas Fonseca

Especialización en Sistemas de Información Geográfica, Universidad Antonio Nariño. Sede Bogotá, Colombia [abarajas231@uan.edu.co](mailto:abarajas231@uan.edu.co)

### Resumen

El siguiente artículo expone el análisis realizado sobre el municipio de Medina Cundinamarca, para el desarrollo de la zonificación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, donde se utilizan métodos de análisis espacial con herramientas SIG, en conjunto con el método estadístico bivariado. Allí se evaluaron distintas variables geoespaciales como la topografía, geología, geomorfología y uso del suelo, y se generó un inventario de 53 movimientos en masa a partir de datos del SGC, Google Earth y World Imagery de ESRI. La metodología incluyó la recopilación de cartografía temática de diversas entidades gubernamentales y la utilización de un Modelo Digital de Elevación (DEM) de alta resolución. Los resultados del análisis Weight of Evidence (WoE) mostraron la influencia de factores como la pendiente, las unidades geomorfológicas y la litología en la ocurrencia de estos fenómenos, lo cual fue validado mediante el área la curva (AUC) que arrojó un valor de 86,15%, indicando una alta precisión en la predicción de áreas susceptibles.

*Palabras clave:* Zonificación; Remoción en masa; Susceptibilidad; Método Bivariado.

### Abstract

The following article presents the analysis conducted on the zone of Medina, Cundinamarca, for the development of landslide susceptibility zoning, employing spatial analysis methods with GIS tools, in conjunction with the bivariate statistical method. Different geospatial variables such as topography, geology, geomorphology, and land use were evaluated, and an inventory of 53 mass movements was generated from data provided by the SGC, Google Earth and ESRI's World Imagery. The methodology included the compilation of thematic cartography from several government entities and the use of a high-resolution Digital Elevation Model (DEM). The results of the Weight of Evidence method (WoE) proved the influence of factors such as slope, geomorphological units and lithology on the occurrence of these phenomena, which was validated by the Area Under the Curve (AUC) showing a value of 86.15%, indicating a high degree of accuracy in the prediction of susceptible areas.

*Keywords:* Mapping; Landslides; Susceptibility; Bivariate method.

## 1. Introducción

Los movimientos en masa de acuerdo a (Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático [IDIGER], 2024; Varnes, 1978) se definen como el desplazamiento de suelo, roca o escombros a lo largo de una ladera por la acción de la gravedad, los cuales representan un fenómeno geológico de gran relevancia a nivel mundial y en regiones montañosas como las existentes en el territorio colombiano, donde la complejidad del relieve, caracterizado por la presencia de cadenas montañosas que dividen el país en dos regiones (una montañosa al occidente y una plana al oriente), junto con las tres cordilleras (Central, Oriental, Occidental), la Sierra Nevada de Santa Marta y la Serranía de La Macarena, configuran un territorio altamente susceptible a la ocurrencia de movimientos en masa. Estos eventos, que pueden ser desencadenados por factores naturales o antrópicos, generan impactos significativos en infraestructuras y comunidades, por lo cual existe la necesidad de desarrollar estudios que permitan comprender y mitigar sus efectos.

A lo largo del tiempo, los movimientos en masa han sido reconocidos como un desafío en la ingeniería geotécnica y la geología (Day, 2009), debido a sus impactos en la infraestructura y los costos asociados a su mitigación, por lo cual, a nivel mundial se ha impulsado la investigación y desarrollo de modelos de zonificación y mapeos de deslizamientos como medidas de prevención y mitigación, generando que la zonificación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa se posiciona como una herramienta crucial en la gestión del riesgo (Morgenstern, 1997; Servicio Geológico Colombiano [SGC], 2017; Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital [UAECD], 2019), el cual implica la división del territorio en áreas con diferentes niveles de propensión a estos eventos, basándose principalmente en la evaluación de factores geoambientales como la topografía, geología, geomorfología y uso del suelo (Ayala-Carcedo & Corominas, 2002; Valdiya, 2013).

La investigación científica en este campo ha experimentado avances significativos en las últimas décadas con el desarrollo de distintas metodologías para la zonificación de susceptibilidad. Desde los primeros mapas elaborados por Brabb en 1978 hasta las técnicas actuales que integran Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Suárez, 2009) y distintos métodos, como: 1. los métodos Heurísticos que se basan en la ponderación de factores causantes de inestabilidad (Brabb et al., 1972; Nilsen et al., 1979), 2. los métodos Estadísticos que combinan factores condicionantes en la ocurrencia histórica de movimientos en masa (Servicio Geológico Colombiano [SGC], 2013), 3. los métodos Determinísticos que analizan la estabilidad de laderas con la aplicación del talud infinito propuesto por (Graham, 1984), 4. los métodos Estocásticos que involucran la aplicación de funciones probabilísticas (SGC, 2013) y, por último, 5. los modelos de

aprendizaje automático (Machine Learning) que recientemente han arrojado resultados de mayor precisión en la identificación de áreas de riesgo.

Estudios recientes han destacado la importancia de la calidad de los datos base (cartografía temática), la resolución espacial de los modelos digitales de elevación (DEM) y la selección adecuada de los factores condicionantes en la precisión de los mapas de susceptibilidad (Chang et al., 2019; Gaidzik & Ramírez-Herrera, 2021; Yu & Chen, 2024), además, de la utilización de nuevas metodologías como el aprendizaje por transferencia, aplicada por (Singh et al., 2024) y la metodología de eliminación de características recursivas utilizada por (Halder et al., 2025) con el que se busca mejorar la predicción de eventos de movimientos en masa en áreas con datos limitados.

Así mismo, existen investigaciones de diversos autores quienes aplican métodos estadísticos en un entorno GIS para la zonificación de susceptibilidad, como es el caso de (Basofi et al., 2015; Shahabi & Hashim, 2015) quienes utilizan información extraída de diferentes fuentes y las aplican en el Analytic Hierarchy Process (AHP), Weighted Linear Combination (WLC) y Modelos Spatial Multi-Criteria Evaluation (SMCE) y métodos estadísticos basados en rupturas naturales y rupturas de cabeza-cola. También, (Calderón-Guevara et al., 2022; Herrera-Coy et al., 2023; Martin & Chai, 2022; Zhou et al., 2021) complementan su investigación agregando el factor lluvia que es determinante en la ocurrencia de movimientos en masa; con esto desarrollan una metodología que involucra la caracterización ambiental, Weight of Evidence (WoE) y modelos Machine Learning (ML) como el Random Forest (RF) y el Extreme Gradient Boosting (XGBoost). Por su parte, (Zhu & Wang, 2009) utilizan un método similar denominado ponderación de evidencias junto con el método de información con herramientas SIG para el mapeo de susceptibilidad, evaluando factores como la geología, la pendiente, la estructura de la pendiente, la distancia a fuentes hídricas y vías de acceso.

En Colombia, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha liderado el proceso de producción de mapas de amenaza por movimientos en masa a escala nacional, así como el desarrollo de guías y manuales para la gestión del riesgo (IDIGER, 2024), sin embargo, es necesario profundizar en estudios a una escala local que permitan una mejor comprensión de la dinámica de estos fenómenos y aplicar modelos de zonificación a susceptibilidad más precisos. A partir de lo anterior, en los últimos años han aparecido investigadores colombianos que se han dedicado a la aplicación de modelos de zonificación, logrando adaptar las condiciones físicas y geográficas del país para la generación de mapeos de susceptibilidad de movimientos en masa en áreas locales como subcuencas, municipios, corredores viales y/o proyectos de infraestructura lineal, un ejemplo de esto, se ve reflejado en los estudios realizados por (Sandoval et al., 2012) y (Aristizábal

& Mendoza, 2017), quienes propusieron la zonificación de susceptibilidad y amenaza haciendo uso del análisis bivariado y el método heurístico; en el primer caso se aplicaron los métodos mencionados sobre el área de la cuenca del Río Combeima, donde se identificaron cuatro zonas de amenaza que pueden presentar procesos de remoción en masa, causando el represamiento del río Combeima y sus drenajes secundarios, amenazando la integridad de la población e infraestructura ubicada aguas abajo; el modelo arrojó una validez del 84%. En segunda instancia, Aristizábal & Mendoza se centraron en modelos de susceptibilidad aplicados a obras lineales en el municipio de Fredonia, Antioquia utilizando, de igual manera, el método estadístico bivariado y el método heurístico, apoyados en un mapa de Unidades de Morfodinámica Independiente (UMI) y validado mediante Área Bajo la Curva (AUC), donde se obtuvo un valor de efectividad de 81%.

Por otro lado, (Osorio, 2019) realizó la zonificación de susceptibilidad sobre el corredor vial Cano-Mojarra, el cual comprende un tramo de 89 km de longitud aproximadamente y conecta a los municipios de Cauca y Nariño; allí propuso el uso de la metodología de corredor hidrogeomorfológico para la delimitación del área de influencia, basándose en puntos de acumulación para la generación de áreas de microcuencas y así, sobre un zona específica determinar el valor de Landslides Susceptibility Index (LSI) que propone (Van Westen, 2000), donde se usa el 80% del inventario de procesos en la aplicación del método estadístico bivariado, para luego ser validados los resultados con el 20% restante, obteniendo un total de 45 km del corredor en zonas de susceptibilidad alta y muy alta y 44 km en zonas de susceptibilidad media, baja y muy baja. Así mismo, (Gómez, 2020) realiza la zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa a escala 1:100.000 sobre el municipio de Villamaría, Caldas que tuvo como base de información el inventario de deslizamientos, el DEM (Modelo de Elevación Digital) obtenido del sistema ALOS-PALSAR cuya resolución espacial es de 12.5 m y con el cual fue posible obtener los valores del grado de inclinación de las pendientes, sentido de las pendientes y elevación, además, se utilizó cartografía temática con información de la litología, geomorfología, tipo de suelo, tipo de cobertura, distancia a los drenajes y distancia a fallas; con esa información se aplicó el análisis heurístico con la ponderación de valores a partir de la densidad de movimientos en masa presente en cada factor condicionante, para luego aplicar el método bivariado de combinación lineal ponderada (WLC) que resultó en el mapa de susceptibilidad.

Otros autores como (Cortés & Grajales, 2018) realizaron la comparación entre los métodos estadísticos bivariado y multivariado en la generación de mapas de susceptibilidad para la planificación y desarrollo del territorio, tomando como área de estudio el municipio de La Estrella, localizado en el departamento de Antioquia. Para la aplicación del método bivariado utilizaron distintos factores condicionantes que, junto al inventario de procesos, sustentan la metodología propuesta por (Chen et al., 2016), donde se aplica el

teorema bayesiano para la evaluación de la relación existente entre la zona de influencia, las zonas de afectación y los factores condicionantes (Pendiente, Geomorfología, Litología, Uso del Suelo, entre otros); como resultado se obtuvo que el 40% del área analizada tiene una susceptibilidad alta, para un valor de efectividad del 72% en la comprobación de AUC. Por su parte, con el método multivariado se hizo el cálculo de probabilidad sobre la variable binaria dependiente (Procesos de Remoción en Masa) en función de las variables independientes, es decir, los factores condicionantes, lo anterior, con el fin de implementar un modelo matemático corrido en MATLAB que relacione la ocurrencia de movimientos en masa con el conjunto de variables predictoras, obteniendo que el 56% del municipio se encuentra en zonas de susceptibilidad alta, pero con un valor de efectividad del 61% en validación con AUC.

(Combariza, 2022) por su parte hace la zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa a escala 1:25.000, de acuerdo con la guía metodológica presentada por (SGC, 2017) enfocando la investigación en los suelos de expansión urbana. Dentro de las metodologías desarrolladas aplica el análisis espacial y álgebra de mapas sobre las distintas variables condicionantes para luego, utilizar el método bivariado de peso-evidencia (WoE) que da como resultado que el 68% del área de influencia se encuentra en un nivel de susceptibilidad medio y, donde la curva de éxito arroja un valor del 87.97%, indicando que la expansión urbana debe realizarse hacia la zona del valle aluvial.

Tomando en cuenta los antecedentes presentados anteriormente, este artículo presenta el análisis realizado al municipio de Medina en el departamento de Cundinamarca, acerca de la relación existente entre los distintos factores condicionantes a procesos de remoción en masa (topografía, geología, geomorfología, uso del suelo, coberturas de tierra, fallas geológicas) y el inventario de procesos de remoción en masa, mediante el uso del análisis espacial y el método estadístico bivariado; allí se busca identificar los factores que condicionan la ocurrencia de movimientos en masa y los puntos donde históricamente han tenido lugar estos fenómenos naturales dentro del municipio de Medina, para luego, establecer, por medio del análisis espacial y el método estadístico bivariado, la correlación existente entre las variables seleccionadas y el inventario de procesos que, al ser validadas, se obtienen las zonas de interés, las cuales son analizadas para la clasificación de los niveles de susceptibilidad (bajo, medio, alto, muy alto).

## 2. Materiales y Metodología

### 2.1 Caracterización de la Zona de Estudio

#### 2.1.1 Localización

De acuerdo con (Alcaldía de Medina, 2020) en su Plan de Desarrollo 2020-2023, el municipio de Medina se encuentra ubicado en el noreste del departamento de Cundinamarca, limitando con los departamentos de Boyacá y el Meta. Cuenta con una extensión aproximada de 1915 km<sup>2</sup> lo que lo convierte en el municipio más extenso de Cundinamarca; está limitado al norte con el municipio de Ubalá, al sur con los municipios de Restrepo, Cumaral y San Juanito del departamento del Meta, al occidente limita con el municipio de Gachalá y finalmente, al oriente limita con el municipio de Paratebueno (Figura 1).

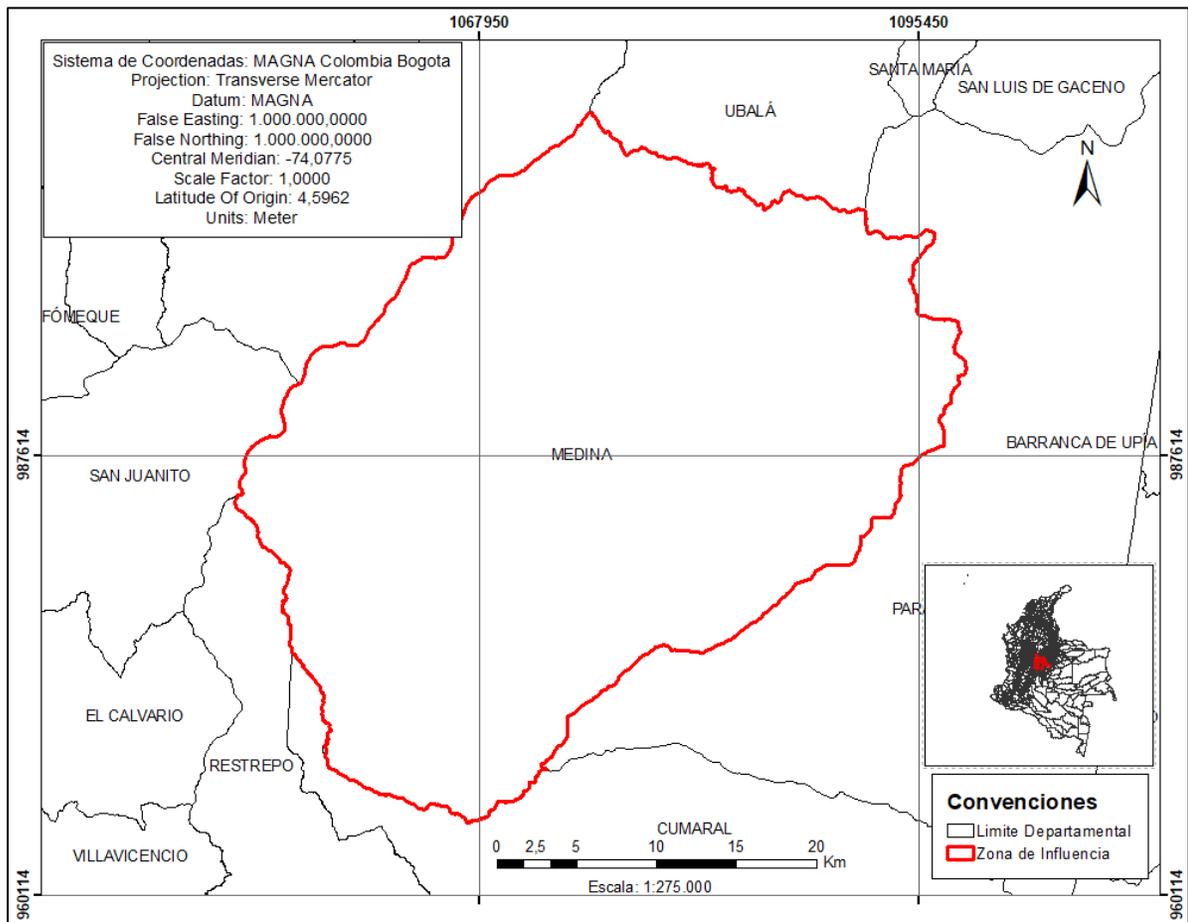


Figura 1. Localización General Medina, Cundinamarca  
Fuente: (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2024)

### 2.1.2 División Política

Se conforma por ocho inspecciones dentro de las cuales se distribuyen un total de 54 veredas, como se muestra en la tabla 1:

Tabla 1. División Política de Medina

Inspección	Veredas
Medina-centro	El Tablón, Mesa Negra, San Isidro, Chorrerano, Choapal, Miralindo, Toquiza, Las Caídas, Gzaire, Gramalote, Humea y La Zarza.
Gazaduje	Alto Quemado, Jagua, La Guarupaya, El Maduro, San Francisco, Buena Vista, San Antonio, San Miguel y Fátima.
Mesa de Reyes	Santa Rita, Alto Redondo, Brisas de Jagua, San Luis de Palomas, San Fernando, Palomas de Villanueva, Bellavista, Buenos Aires y San Juan de los Reyes.
Gazatavena	Palmichal, Varital, San Juanito, Periquito, San Luis del Retiro, San Luis del Retiro sector La Bodega.
Santa Teresa	San Cristóbal, San Antonio, Los Andes.
Los Alpes	Santa Isabel, Los Medios del Humea, San José del Palmar, Carmen de la Serranía, El Vainillo
Arenales	La Argentina, San Marcos, San Juanito de Guacavía, Santa Ana.
La Esmeralda	La Esmeralda
San Pedro de Guajaray	Santa Helena, Santa Maria del Pirí.

Fuente: (Alcaldía de Medina, 2020)

### 2.1.3 Población

Para el año 2020 el municipio contaba con un total de 10.225 habitantes, equivalente a una densidad poblacional de 5,34 habitantes por km<sup>2</sup>, donde el 52,83% son hombres y 47,17% mujeres. Así mismo, el 61,05% de la población se asentaba en suelos rurales llevando a cabo actividades agrícolas y ganaderas, mientras que el 38,95% vive en el casco urbano del municipio. En cuanto a la demografía, la tasa de natalidad en Medina es moderada, mostrando señales de descenso en los últimos años, similar a otras regiones rurales de la región. A pesar de su carácter rural, Medina cuenta con una infraestructura

básica de servicios, como agua potable, electricidad y atención médica, lo que ha sido un factor importante en la mejora de las condiciones de vida en el municipio (Alcaldía de Medina, 2020).

#### 2.1.4 Orografía

El municipio de Medina está localizado sobre la región montañosa de la zona andina colombiana, marcada por pertenecer a la vertiente oriental de la cordillera de los Andes, lo que resulta en paisajes variados entre valles profundos y montañas escarpadas, los cuales dan espacio a la presencia de climas que varían con respecto a la altura sobre el nivel del mar, con zonas de clima cálido en las partes bajas y climas templados y fríos en las partes altas; en las zonas bajas del territorio, se encuentran los valles que se caracterizan por suelos fértiles que permiten desarrollar la actividad de la agricultura. Por otro lado, las montañas que rodean a Medina son parte de un sistema montañoso que conecta con otras zonas del departamento de Cundinamarca, lo que genera un paisaje agreste, características que influyen en la comunicación y el acceso entre veredas y otros municipios aledaños dependen de caminos sinuosos (Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres [CMGRD], 2017).

#### 2.1.5 Hidrografía

Para el año 2024 la Alcaldía de Medina definió en el Plan de Desarrollo que el municipio cuenta con una gran disponibilidad de recursos hídricos y gran variedad de flora y fauna, convirtiéndolo en un territorio de protección de la biodiversidad, esto ligado a los farallones de Medina que fueron incluidos en la zona del Parque Natural Chingaza. Estas características hacen que el municipio cuente con tres áreas protegidas; una es el mencionado Parque Natural Chingaza y las otras dos zonas corresponden a reservas naturales que son la Reserva Forestal Protectora Regional (RFPR) El Manantial de Jagua y la Reserva Forestal Protectora Regional (RFPR) Laureles, Maracaibo y Las Delicias. Adicionalmente, el municipio está dentro del Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas del río Humea (POMCA), el cual fue aprobado en el año 2019. A continuación, en la tabla 2 se listan las microcuencas a las que el municipio pertenece:

Tabla 2. Microcuencas del Municipio de Medina

Microcuenca	Área Ha	Afluentes
Río Gazaunta	44.365	Gazaduje
		La Sucia
		La Jagua
Río Gazamumo	25.530	Gazaguan
		Gazatavena

Microcuenca	Área Ha	Afluentes
Río Humea	20.774	Río Chorrerano
		El Salitre
		Caño Blanco
		Caño Negro
		Gazapi
Río Guacavía	29.126	Caño Sucio
		Caño Romerano
		El Borrachero
Total. Ha	119.795	Guajaray
		Nipore

Fuente: (Alcaldía de Medina, 2024)

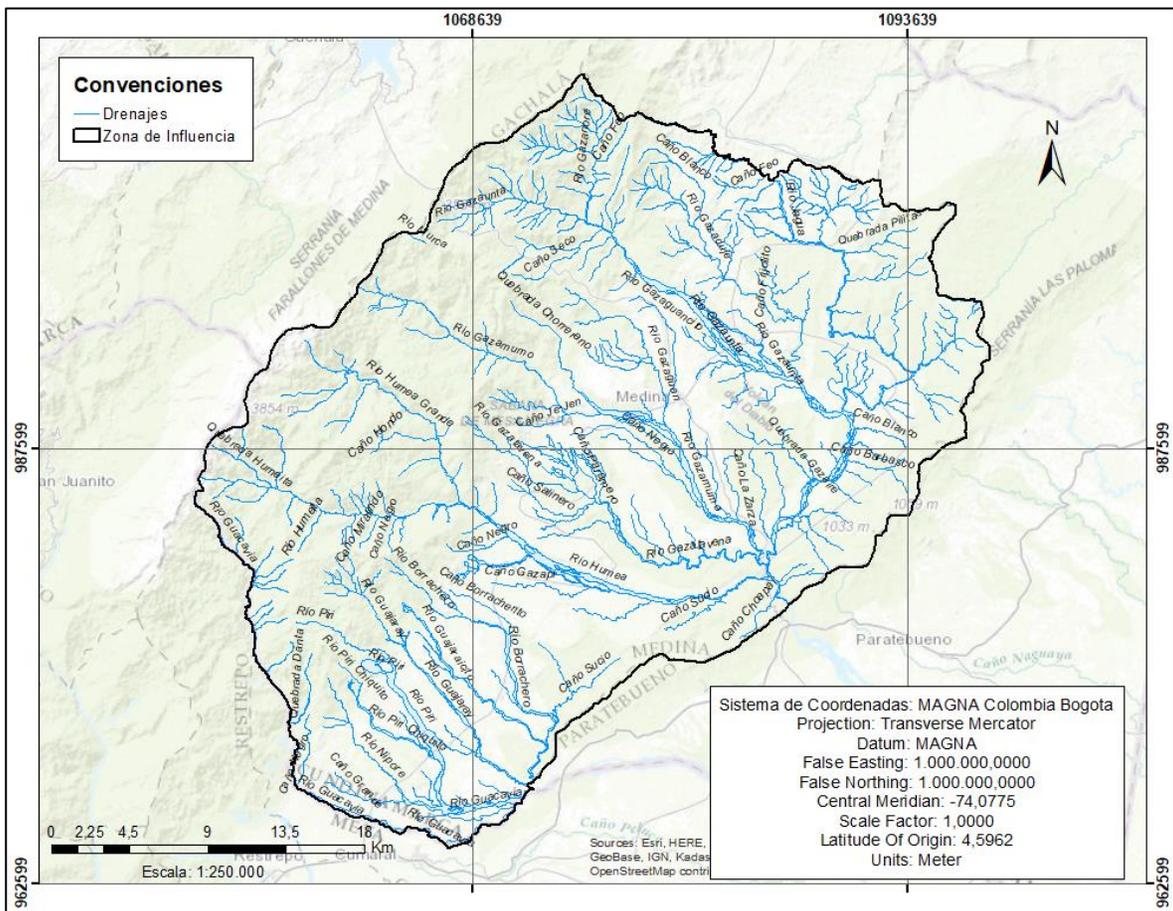


Figura 2. Afluentes Medina, Cundinamarca  
Fuente: (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2025)

### *2.1.6 Geología Local*

La geología del municipio de Medina se caracteriza por formaciones rocosas características de la cordillera Oriental, lo cual hace que predominen las rocas ígneas, como los basaltos y andesitas, producto de la actividad volcánica de épocas pasadas. Estas formaciones rocosas al sufrir procesos de erosión han dado lugar a una serie de valles y quebradas predominantes en la región; así mismo existen depósitos aluviales en las zonas bajas, principalmente en las zonas aledañas a los ríos, los cuales aportan nutrientes a los suelos agrícolas. De igual manera, el municipio es atravesado por las fallas geológicas de Villavicencio, Santa María y Tesalia lo convierten al municipio en una zona de alta sismicidad, sumado al hecho de que se encuentra adyacente a las zonas sismogénicas del Piedemonte Llanero, donde la mayor actividad sísmica se presenta en los sistemas Servitá-Santa María hacia el occidente y hacia el oriente, los sistemas Yopal y Guaicáramo, esta última sin actividad por al menos 200 años, lo cual indica que podría estar acumulando energía. Cada una de las fallas y/o sistemas mencionados anteriormente tienen un buzamiento que va entre los 35-50° hacia el occidente, permitiendo suponer que en caso de actividad sísmica en el sistema Guaicáramo, se generaría un epicentro cerca a la cabecera municipal de Medina (CMGRD, 2017).

### *2.1.7 Usos del Suelo*

Dentro del EOT propuesto por Alcaldía Municipal de Medina en el año 2001, los usos del suelo del municipio de Medina estaban clasificados principalmente en dos categorías: Suelo Rural y Suelo Urbano. Dentro de estos se hicieron subdivisiones de acuerdo con las necesidades y características de la región. Los suelos rurales son definidos a partir de la vocación de uso de los ecosistemas y sus componentes, estado, procesos de intervención, ocupación, aprovechamiento y deterioro, así como con las necesidades de protección y conservación de los ecosistemas estratégicos. De conformidad con lo mencionado anteriormente, los suelos rurales del municipio fueron clasificados de la siguiente manera:

- Zonas de Protección y Recuperación; donde se incluyen zonas de conservación de cauces, zonas de manejo especial, zonas de aptitud forestal, zonas de conservación de bosques naturales.
- Zonas de Producción Agraria; incluye zonas aptas para el desarrollo agropecuario extensivo e intensivo.
- Zonas de los Sistemas de Aprovechamiento de Servicios Públicos y Disposición de Residuos Sólidos y Vertimientos Líquidos
- Zonas de Amenazas y Riesgos

En cuanto a los suelos urbanos, el EOT establece deben contar con infraestructura vial y redes primarias de servicios, permitiendo la expansión urbana. Este tipo de suelos se clasifican por uso principal, permitido, complementario y compatible:

- Principal; determina el carácter de las zonas, pudiendo aparecer sin restricciones en cuanto a intensidad o variación.
- Permitido; se establece por medio de reglamentaciones urbanísticas
- Complementario; indispensables como soporte y consolidación de las actividades relacionadas con el uso predominante. Contribuyen al mejoramiento en el funcionamiento de los usos principales de un área, supliendo las demandas funcionales o económicas generadas.
- Compatible; no requeridos para el buen funcionamiento de los usos principales y pueden desarrollarse, siempre y cuando controlen sus impactos.

Adicionalmente, el EOT establece el uso restringido, el cual debe contar con un permiso expedido por la oficina de planeación del municipio, con el cual se busca tener control de los posibles impactos que se generen de la actividad a desarrollar en la zona con este tipo de uso; finalmente, la Alcaldía Municipal de Medina define en su EOT los usos de suelo de efecto normativo, clasificados en: Uso Residencial, Comercial, Industrial e Institucional.

## 2.2 Datos

### 2.2.1 Inventario de Procesos de Remoción en Masa

(Highland & Bobrowsky, 2008) Para el desarrollo de la zonificación de susceptibilidad es necesario contar, en principio, con el inventario de movimientos en masa del área de influencia que, en este caso, corresponde al municipio de Medina; para esto se hace la consulta en el Sistema de Información de Movimientos en Masa-SIMMA del SGC donde se obtuvieron en total 23 procesos; así mismo, por medio de las imágenes multitemporales del software Google Earth y el World Imagery de ESRI se identificaron 30 procesos de remoción en masa adicionales en el municipio, para un total de 53 movimientos en masa (Figura 1), los cuales fueron agrupados en seis clases y 8 subclases en la tabla 3, lo anterior, de acuerdo a lo planteado por (Highland & Bobrowsky, 2008):

Tabla 3. Procesos de Remoción en Masa en Medina, Cundinamarca

Tipo	Subtipo	Cantidad
Deslizamiento	Traslacional	18
	Rotacional	11

Caída	De Detritos	9
	De Roca	6
Flujo	De Lodo	5
	De Detritos	1
	De Tierra	2
Volcamiento	Flexural de Roca	1
Total		53

Fuente: (Servicio Geológico Colombiano [SGC], 2025)

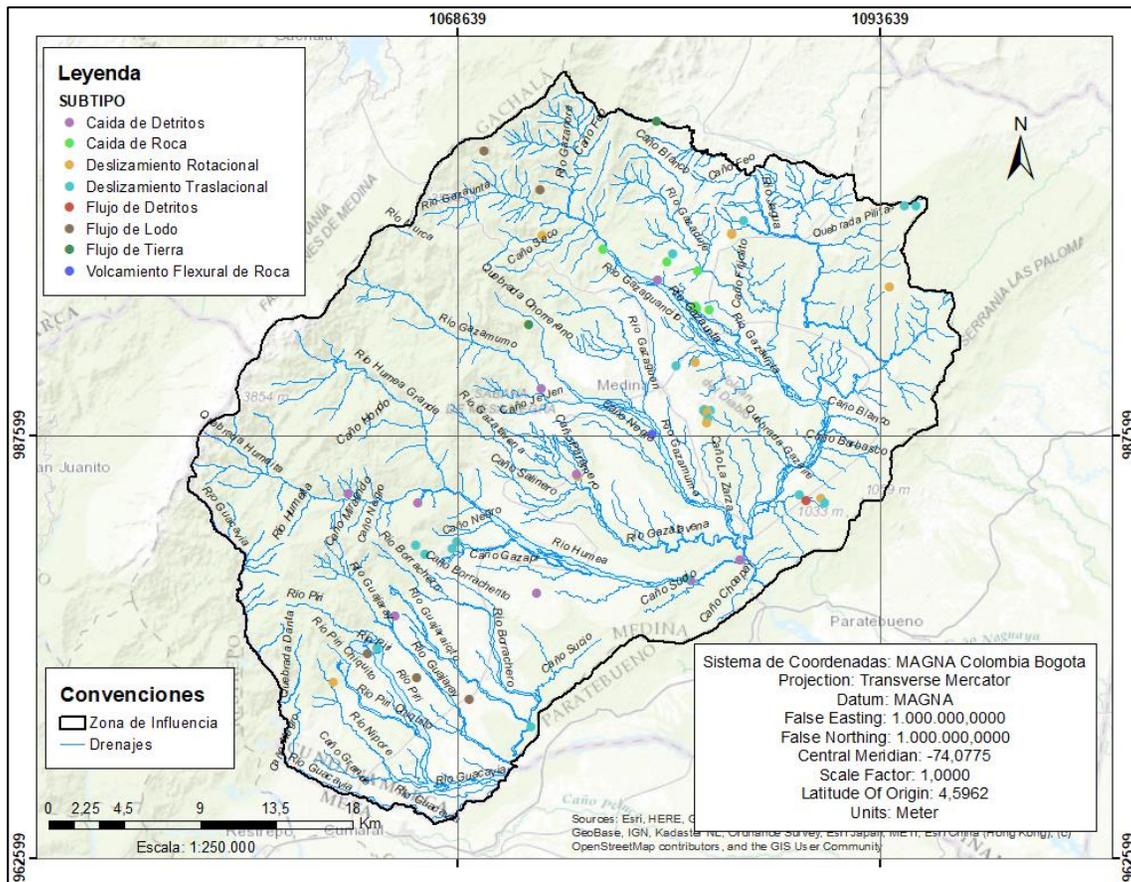


Figura 3. Localización Movimientos en Masa Medina, Cundinamarca  
Fuente: (IGAC, 2025; SGC, 2025; Autor)

### 2.2.2 Factores Condicionantes

De acuerdo con la metodología presentada por (SGC, 2017) hay un grupo de factores que supeditan la ocurrencia de movimientos de masa sobre un área específica, los cuales están representados en la cartografía temática de Geomorfología, Geología, Cobertura de Tierra y Usos de Suelo; dichos elementos se consideran intrínsecos al ser poco variables en el tiempo. Partiendo de esa base, se utilizaron diferentes

recursos cartográficos de entidades gubernamentales como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC, la Gobernación de Cundinamarca y Corporaciones Autónomas Regionales-CARs, donde se encontró información vectorial a escala 1:100.000 de la litología, unidades geomorfológicas, coberturas de tierra, usos de suelo y como información adicional, la cartografía de las Fallas Geológicas presentes en la zona, esto considerando que es un factor que toma importancia en la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa.

Por otro lado, se obtuvo el Modelo Digital de Elevación-DEM de la plataforma Earthdata de la NASA (<https://search.asf.alaska.edu/#/>), específicamente del proyecto ALOS PALSAR que cuenta con distintos recursos cartográficos derivados de los satélites ALOS. Según (EarthData, 2025) los DEM cuentan con una alta resolución espacial de 12,5 m que, comparados con los proporcionados por el IGAC de resolución de 30 m, presentan una información mucha más precisa. Cabe aclarar que, dentro del factor de geomorfología, se agrupan las variables de pendiente del terreno y las unidades geomorfológicas, de allí que tome relevancia la utilización del DEM para la obtención de valores de pendiente sobre la zona de influencia. A continuación, en la figura 2 se muestra un esquema que resume los factores utilizados en el proceso de mapeo de zonificación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa:

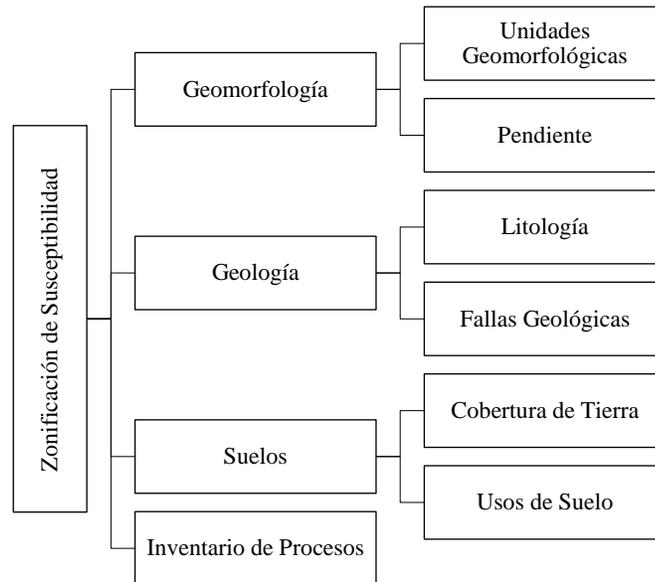


Figura 4. Esquema de Factores Condicionantes en Zonificación de Susceptibilidad  
Fuente: (SGC, 2017)

**Pendiente:**

Como se menciona antes se utilizó la información del DEM de ALOS PALSAR para la obtención de información de pendiente del terreno, para lo cual se empleó la herramienta de Geoprocamiento SLOPE del software ArcGIS Pro, donde se obtuvieron valores en grados dentro del área del municipio (Figura 3), los cuales fueron clasificados en la tabla 4, según lo propuesto por (Van Zuidam, 1986):

Tabla 4. Rangos de Pendiente en Grados para la Zonificación de Susceptibilidad

Pendiente °	Características del Terreno
0-2	Plano o Casi Plano
2-4	Ligeramente Inclinado
4-8	Inclinado
8-16	Moderadamente Abrupto
16-35	Abrupto
35-55	Muy Abrupto
> 55	Extremadamente Abrupto

Fuente: (Van Zuidam, 1986)

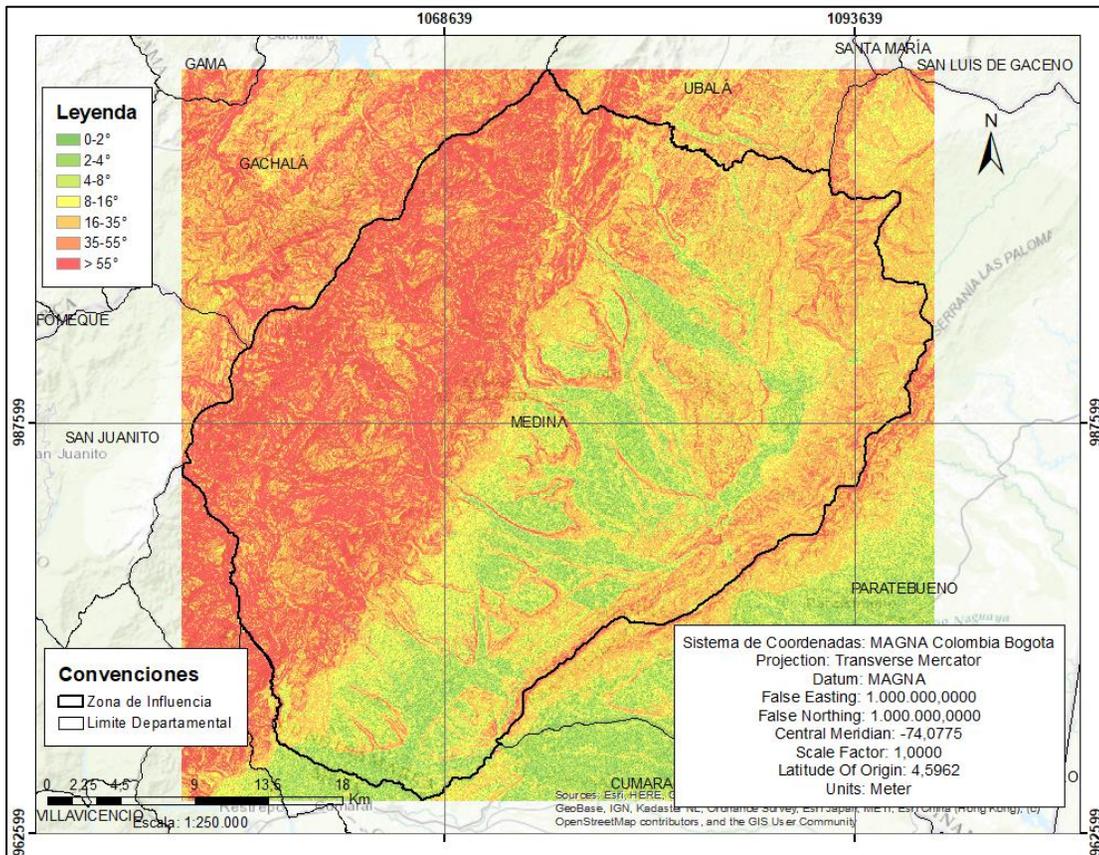


Figura 5. Mapa de Pendientes Medina, Cundinamarca

Fuente: (EarthData, 2025; Autor)

*Unidades Geomorfológicas:*

La información geomorfológica de Medina se obtuvo cartografía temática suministrada por la Gobernación de Cundinamarca. Esta información de tipo vectorial clasifica el municipio de Medina en cinco modelos, basado en el sistema taxonómico – geomorfológico jerarquizado de (Zinck, 1987) que se ajusta a las características de territorio nacional; este se puede ver en la Figura 4.

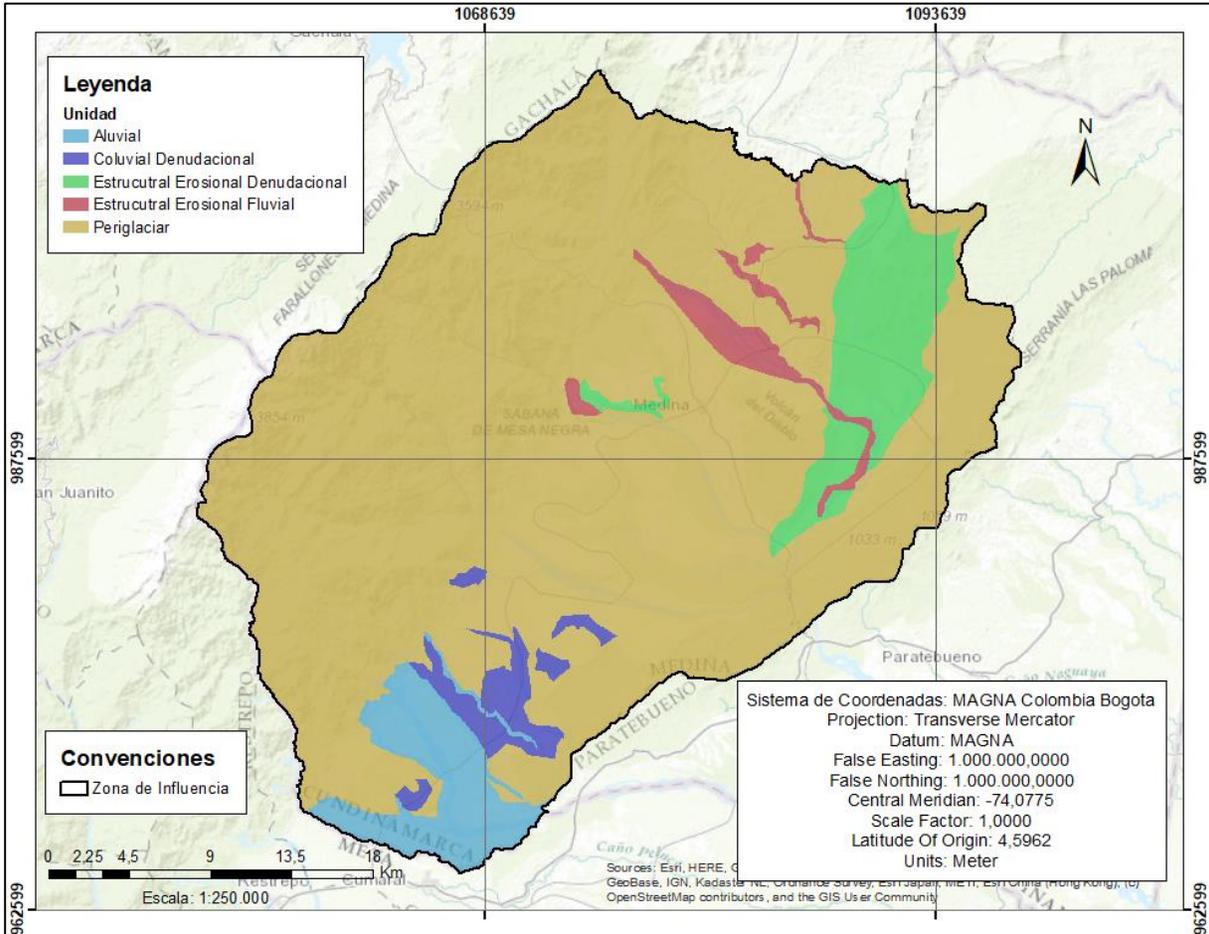


Figura 6. Mapa de Unidades Geomorfológicas  
Fuente:(Gobernación de Cundinamarca, 2015)

*Litología:*

La información litológica del municipio se extrajo de la cartografía temática de la (Gobernación de Cundinamarca, 2015), el cual integra distintos mapas geológicos a escala 1:100.000 publicados por el SGC y, fueron complementados con metodologías de teledetección aplicadas sobre imágenes de satélite Landsat TM y la utilización de un DEM de 30 m de resolución espacial de la NASA–SRTM para la definición de unidades definidas de acuerdo a un sistema clasificatorio cronolitoestratigráfico. En la tabla 5 se relaciona

cada una de las unidades litográficas con su descripción, así como en la figura 5 se puede observar la distribución espacial de las unidades litográficas en el municipio.

Tabla 5. Unidades Litológicas Medina, Cundinamarca

Unidad	Descripción
DECG	Depósitos Semiconsolidado Conglomerados
DEGR	Depósitos Semiconsolidado Gravas Arenas
DILA	Depósitos Inconsolidados Aluviales Lacustres
RCLA	Roca Sedimentaria Lutita Silicio Clásticas Lodo Arcillosa
RICG	Roca Sedimentaria Intercalaciones Calcárea Clásticas Arenisca Conglomerado Lutita
RIIA	Roca Ígnea Intrusiva
ROME	Roca Metamórfica Metasedimentaria
RSAR	Roca Sedimentaria Areniscas
RSCG	Roca Sedimentaria Intercalaciones Sílice Clástica Caliza Conglomerado Lutita
RSIG	Roca Sedimentaria Intercalaciones Sílice Clástica Arenisca Lutita Conglomerado
RSLC	Roca Sedimentaria Intercalaciones Calcárea Clástica Arenisca Lutita

Fuente: (Gobernación de Cundinamarca, 2015)

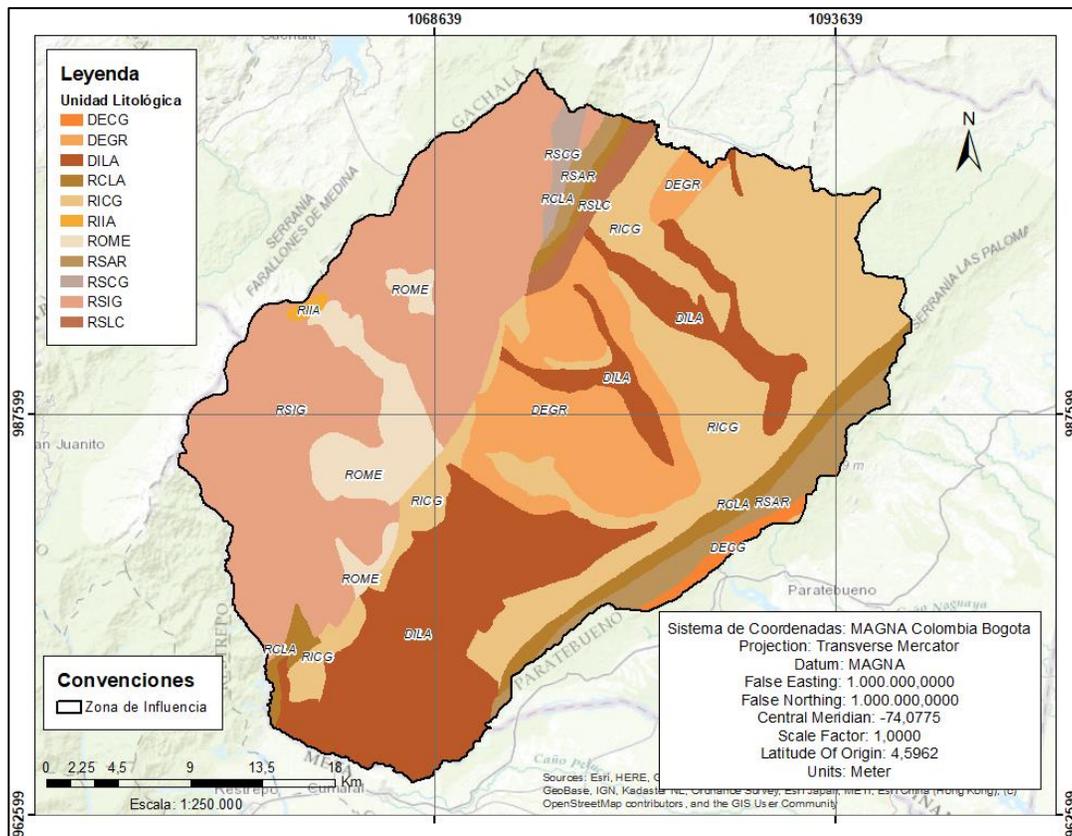


Figura 7. Mapa de Unidades Litológicas Medina, Cundinamarca

Fuente: (Gobernación de Cundinamarca, 2015)

*Fallas Geológicas:*

Como se mencionó antes, se optó por utilizar la cartografía de Fallas Geológicas como factor condicionante en la ocurrencia de movimientos en masa, teniendo en cuenta que la zona de análisis cuenta con tres fallas geológicas de tipo inversa (Villavicencio, Santa María, Tesalia), donde una de estas hace parte del sistema de fallas activas del piedemonte llanero (Falla de Santa María) (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2000). Para la utilización de la información se definieron cuatro rangos de distancia (Figura 6) a la que las fallas geológicas pueden tener influencia sobre los movimientos en masa existentes en el municipio.

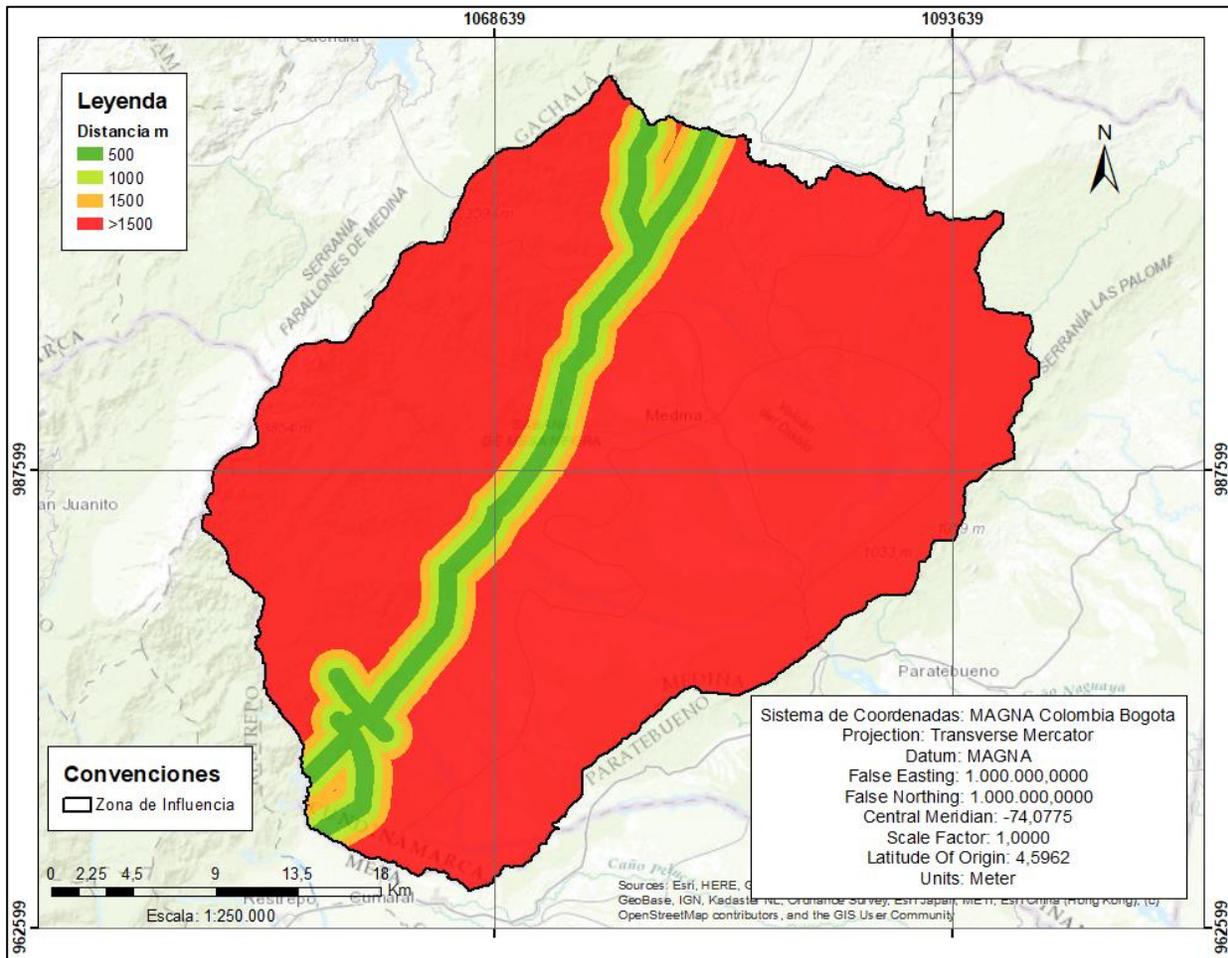


Figura 8. Distancia de Influencia de Fallas Geológicas  
Fuente: (IGAC, 2025)

### Coberturas de Tierra:

La información cartográfica de coberturas se obtuvo de la base de datos de la CAR Cundinamarca, cuyos datos fueron plasmados a partir de mosaicos realizados con imágenes satelitales Landsat y Sentinel; adicionalmente, las capas identificadas fueron clasificadas a partir de la metodología CORINE Land Cover (CLC) adoptada por el (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2024) para la elaboración de cartografía en Colombia. Para el municipio de Medina se definieron 20 coberturas de tierra, agrupadas en la Figura 7.

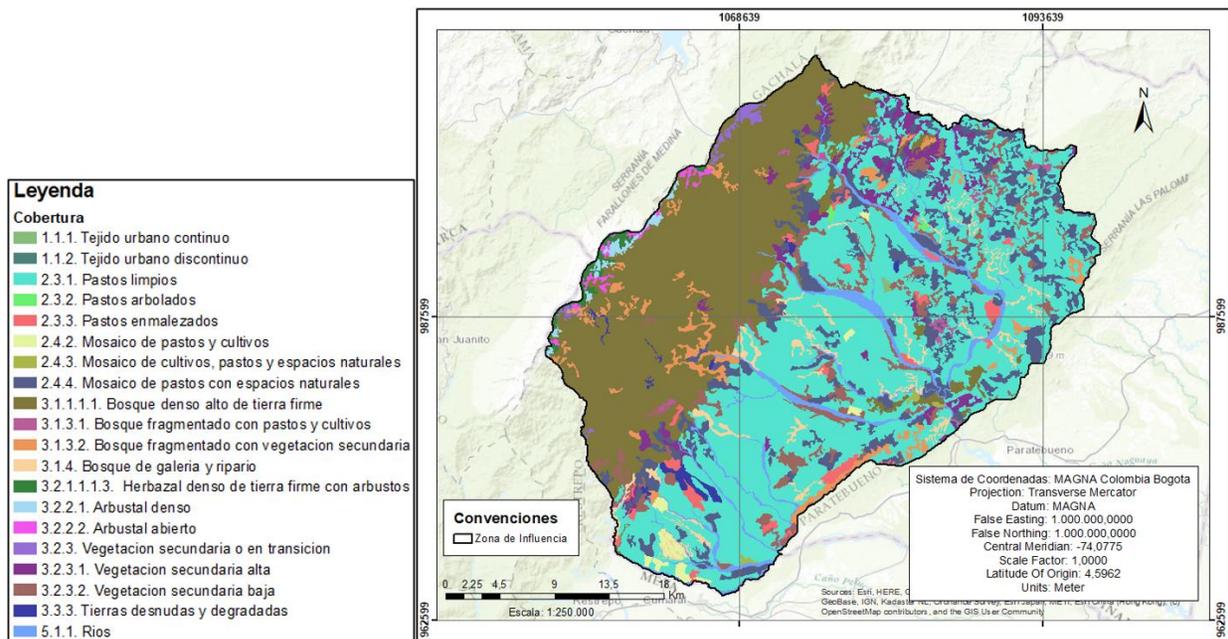


Figura 9. Coberturas de Tierra Medina, Cundinamarca  
Fuente: (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca [CAR], 2023)

### Usos del Suelo:

La cartografía de Usos del Suelo se obtuvo de la Gobernación de Cundinamarca. Estos datos se basan en los planes de ordenamiento territorial de cada municipio y, en el caso puntual de Medina, representa los usos del suelo establecidos en su EOT, los cuales se representan en la Figura 8:

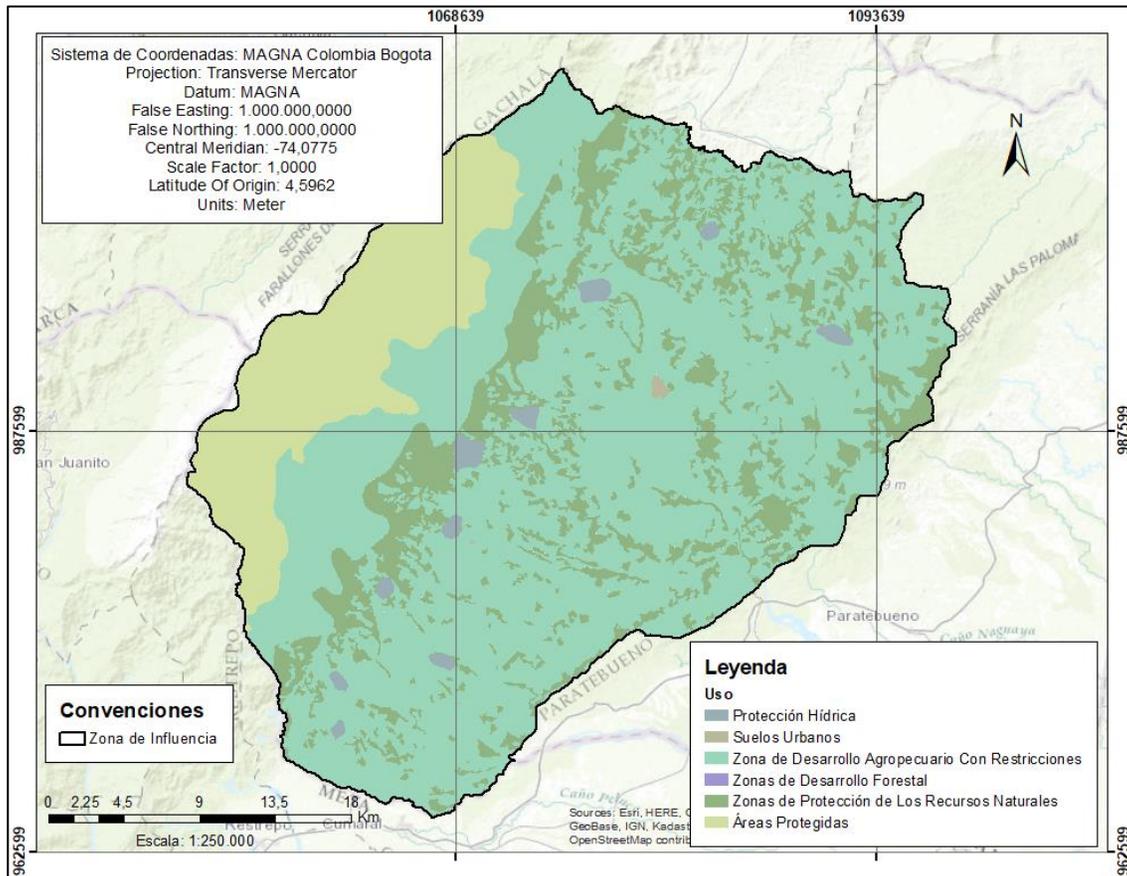


Figura 10. Usos del Suelo Medina, Cundinamarca  
 Fuente: (Gobernación de Cundinamarca, 2015)

### 2.2.3 Integración de Factores Condicionantes

Con el fin de realizar la distribución espacial de los niveles de susceptibilidad por procesos de remoción en masa dentro del municipio de Medina, se aplica el método estadístico bivariado para determinar los pesos de evidencia (WoE) de movimientos en masa en cada de las clases de los factores condicionantes y posteriormente, obtener el valor del Índice de Susceptibilidad (LSI); en este caso se aplica el método expuesto por (Van Westen, 2000) plasmado en la Ecuación 1, donde se hace el cálculo de los Pesos de Evidencia a partir de la relación existente entre la densidad de cada clase de un factor y la densidad de la zona de análisis. Cabe aclarar que el término clase hace referencia a cada uno de los tipos y/o subtipos resultantes de la clasificación de cada factor condicionante, por ejemplo, las clases de factor Pendiente serán los valores 0-2°, 2-4°, 4-8°, 8-16°, 16-35°, 35-55° y > 55°.

$$W = \ln \frac{DenClase}{DenZona} = \ln \left( \frac{\frac{ADi}{AT}}{\frac{\sum ADi}{\sum AT}} \right) \quad (1)$$

Donde:

W: Peso calculado en cada clase de los factores condicionantes

Ln: Logaritmo Natural

DenClase: Densidad de movimientos en masa por clase

DenZona: Densidad de movimientos en masa en toda la zona

ADi: Área del movimiento en masa existente en una clase

AT: Área total de la clase

Cuando el valor resultante es positivo indica que la clase incide en la ocurrencia de movimientos en masa, es decir, hay una relación directa; cuando el valor del Peso es negativo hay una relación inversa, lo que indica que la clase contribuye en la ausencia de movimientos en masa y, si el valor obtenido es igual a cero se entiende que la clase no es relevante en el análisis (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

Una vez calculados los valores de Pesos en cada una de las clases se hace el cálculo de índice de susceptibilidad utilizando la Ecuación 2 propuesta por (El-Fengour, 2016), donde se realiza la sumatoria de cada uno de los factores condicionante mediante el Álgebra de Mapas para tener como resultado la zonificación preliminar de susceptibilidad:

$$I = \sum_{j=1}^n X_{ij} \quad (2)$$

Donde:

I: Índice de Susceptibilidad

Xij: Peso de la Clase i del factor j

n: Número de Factores

Con el resultado anterior se aplica la metodología que expone (Dahal et al., 2008; SGC, 2017) para la aplicación de la curva de éxito del modelo y su validación, la cual consiste en ordenar los valores de LSI de manera descendente y dividirlos en percentiles de 100 categorías; esto se realiza en el software ArcGIS Pro clasificando los valores con la opción de Cuantiles. Una vez clasificados los valores, se traza en un eje X los grupos de percentiles del LSI de menor a mayor cada 1%, de forma que a la izquierda se ubique el percentil 1 (susceptible) y a la derecha el percentil 100 (no susceptible), mientras que en un eje Y se ubican los valores porcentuales cada 1% de los movimientos en masa existentes en el percentil del LSI, esto con el fin de elaborar la curva de éxito, la cual se construye utilizando el porcentaje acumulado del área total de la zona de influencia y el porcentaje acumulado del área total de los procesos de remoción en masa identificados; a la curva resultante se le calcula el valor de AUC, el cual debe ser mayor a 70% para dar

validez al modelo. Finalmente, con ayuda de la curva se hace la categorización de susceptibilidad en cuatro rangos (Baja, Media, Alta, Muy Alta).

### **3. Resultados y Discusión**

#### ***3.1 Identificación de los Factores Condicionantes***

A partir de la metodología desarrollada se identifican en primera instancia los factores condicionantes de mayor influencia en la zona de estudio y, de la misma manera, se descartan otras variables, las cuales al presentan datos homogéneos, impidiendo determinar alguna tendencia y/o efecto asociado a la ocurrencia de movimientos en masa. Las variables o factores seleccionados en la etapa de caracterización ambiental y utilizados posteriormente en el análisis de susceptibilidad son:

- Pendientes (°): Clasificados en 7 grupos Plano/Casi Plano, Ligeramente Inclinado, Inclinado, Moderadamente Abrupto, Abrupto, Muy Abrupto y Extremadamente Abrupto.
- Unidades Geomorfológicas: Clasificados en las unidades Aluvial, Coluvial Denudacional, Estructural Erosional Denudacional, Estructural Erosional Fluvial y Periglaciario.
- Unidades Litológicas: se clasifican en 11 unidades litológicas Depósitos Semiconsolidado Conglomerados, Depósitos Semiconsolidado Gravas Arenas, Depósitos Inconsolidados Aluviales Lacustres, Roca Sedimentaria Lutita Silicio Clásticas Lodo Arcillosa, Roca Sedimentaria Intercalaciones Calcárea Clásticas Arenisca Conglomerado Lutita, Roca Ígnea Intrusiva, Roca Metamórfica Metasedimentaria, Roca Sedimentaria Areniscas, Roca Sedimentaria Intercalaciones Sílice Clástica Caliza Conglomerado Lutita, Roca Sedimentaria Intercalaciones Sílice Clástica Arenisca Lutita Conglomerado y Roca Sedimentaria Intercalaciones Calcárea Clástica Arenisca Lutita.
- Distancia de Influencia a Fallas Geológicas (m): divididos en la influencia que tienen a 500 m, 1000 m, 1500 m y más de 1500 m de distancia.
- Coberturas de Tierra: Clasificados en nueve niveles de la metodología Corine Land Cover; se encuentran Tejidos Urbanos, Pastos, Mosaico de Pastos y Cultivos, Bosques, Herbazales, Arbustales, Vegetación Secundaria, Tierras Desnudas y Ríos.
- Usos del Suelo: Clasificados en seis usos como lo son la Protección Hídrica, Suelos Urbanos, Desarrollo Agropecuario con Restricciones, Desarrollo Forestal, Protección de Recursos Naturales y Áreas Protegidas.

### 3.2 Cálculo de Pesos de Evidencia (WoE)

De acuerdo a los factores condicionantes identificados anteriormente (Unidades Geomorfológicas, Unidades Litológicas, Usos del Suelo, Coberturas de Tierra, Influencia de Fallas Geológicas, Pendientes) se hace el cálculo de los pesos de evidencia W, donde se identifican las clases de cada variable que mayor influencia tienen en la ocurrencia de movimientos en masa, así como también se identifican aquellas clases cuya influencia en la ocurrencia de estos fenómenos naturales es baja o nula.

En el caso del factor Pendientes (Tabla 6) se evidencia que hay presencia de procesos de remoción en masa en cada una de sus clases, siendo la clase de pendientes de 35-55° de inclinación (Muy Abrupto) donde se registra uno de los de mayor cubrimiento de área de movimientos en masa con un valor W positivo, indicando una relación directa en la ocurrencia de movimientos en masa.

Tabla 6. Valores Utilizados para la Aplicación del LSI en el Factor Pendientes

Clase	Área Clase Ha	Área Deslizamiento Ha	Densidad Clase	Densidad Mapa	W
0-2°	4202,96	9,82	0,002	0,005	-0,67
2-4°	4865,88	13,26	0,003	0,005	-0,52
4-8°	13564,67	59,71	0,004	0,005	-0,04
8-16°	16284,69	89,30	0,005	0,005	0,18
16-35°	32920,50	145,38	0,004	0,005	-0,04
35-55°	21492,29	119,22	0,006	0,005	0,19
>55°	26363,78	112,45	0,004	0,005	-0,07
Total	119694,77	549,14			

Fuente: Autor

Para el factor Unidades Geomorfológicas (Tabla 7) también se identifican procesos de remoción en masa en cada una de las clases, donde la unidad Aluvial está cubierta por un área de 217,21 Ha de movimientos en masa y un valor de peso W de 2,04, indicando una relación directa fuerte en la ocurrencia de movimientos en masa.

Tabla 7. Valores Utilizados para la Aplicación del LSI en el Factor Unidades Geomorfológicas

Clase	Área Clase Ha	Área Deslizamiento Ha	Densidad Clase	Densidad Mapa	W
Unidad Coluvial Denudacional	2989,81	16,25	0,005	0,005	0,17
Unidad Estructural Erosional Denudacional	8608,04	12,71	0,001	0,005	-1,13
Unidad Periglaciaria	99182,19	285,69	0,003	0,005	-0,47

Clase	Área Clase Ha	Área Deslizamiento Ha	Densidad Clase	Densidad Mapa	W
Unidad Aluvial	6146,90	217,21	0,035	0,005	2,04
Unidad Estructural Erosional Fluvial	2767,82	17,28	0,006	0,005	0,31
Total	119694,77	549,14			

Fuente: Autor

Por otro lado, en el factor Litología se encuentra que las clases de Depósitos Semiconsolidados Conglomerados, Roca Ígnea Intrusiva y Roca Sedimentaria Intercalaciones Silice Clástica Caliza Conglomerado Lutita no presentan procesos de remoción en masa, por ende, el valor de peso de evidencia W es 0, mostrando que dichas clases tienen una influencia inexistente en la ocurrencia de movimientos en masa. Así mismo, se tiene que la clase con mayor peso en la ocurrencia de movimientos es masa es la Roca Sedimentaria con Intercalaciones de Calcárea Clástica Arenisca Conglomerado Lutita, donde se tiene un cubrimiento de movimientos en masa de 207,85 Ha y una relación directa en ocurrencia representada por un valor W de 0,42.

Tabla 8. Valores Utilizados para la Aplicación del LSI en el Factor Litología

Clase	Área Clase Ha	Área Deslizamiento Ha	Densidad Clase	Densidad Mapa	W
Depósitos Semiconsolidado Conglomerados	967,40	0,00	0,000	0,005	0,00
Depósitos Semiconsolidado Gravias Arenas	13524,69	15,57	0,001	0,005	-1,38
Depósitos Inconsolidados Aluviales Lacustres	23715,40	146,11	0,006	0,005	0,29
Roca Sedimentaria Lutita Silicio Clásticas Lodo Arcillosa	4553,86	12,00	0,003	0,005	-0,55
Roca Sedimentaria Intercalaciones Calcárea Clásticas Arenisca Conglomerado Lutita	29843,80	207,85	0,007	0,005	0,42
Roca Ígnea Intrusiva	258,61	0,00	0,000	0,005	0,00
Roca Metamórfica Metasedimentaria	5878,19	13,93	0,002	0,005	-0,66
Roca Sedimentaria Areniscas	4553,70	0,41	0,000	0,005	-3,92

Clase	Área Clase Ha	Área Deslizamiento Ha	Densidad Clase	Densidad Mapa	W
Roca Sedimentaria Intercalaciones Silice Clástica Caliza Conglomerado Lutita	971,81	0,00	0,000	0,005	0,00
Roca Sedimentaria Intercalaciones Silice Clástica Arenisca Lutita Conglomerado	33885,26	149,81	0,004	0,005	-0,04
Roca Sedimentaria Intercalaciones Calcárea Clástica Arenisca Lutita	1542,04	3,45	0,002	0,005	-0,72
Total	119694,77	549,14			

Fuente: Autor

En el caso del factor Distancia a Fallas Geológicas existen procesos de remoción de masa en cada una de las clases, siendo la clase de 500 m la de mayor área de cubrimiento con 73,51 Ha, aunque la relación directa más fuerte se encuentra en la clase de 1500 m, donde se tiene un valor de peso W de 1,07. La clase de mayor cubrimiento de área corresponde a >1500 m con un valor de 337,37 Ha, sin embargo, se tiene que la relación es indirecta ya que el valor de W es igual a -0,33, es decir que, para este caso, esta clase influye en la no ocurrencia de movimientos en masa, por ende, el área de los procesos relacionados en esta clase, se deben a otro factor condicionante.

Tabla 9. Valores Utilizados para la Aplicación del LSI en el Factor Distancia a Fallas Geológicas

Clase	Área Clase Ha	Área Deslizamiento Ha	Densidad Clase	Densidad Mapa	W
500	6070,04	73,51	0,012	0,005	0,97
1000	5728,460	68,46	0,012	0,005	0,96
1500	5230,359	69,79	0,013	0,005	1,07
>1500	102665,904	337,37	0,003	0,005	-0,33
Total	119694,77	549,14			

Fuente: Autor

En cuanto a los valores obtenidos para el factor Coberturas del Suelo se tienen siete clases y/o coberturas (Tejido urbano continuo, Tejido urbano discontinuo, Mosaico de pastos y cultivos, Bosque fragmentado con pastos y cultivos, Herbazal denso de tierra firme con arbustos, Arbustal denso, Arbustal abierto) cuyo valor W es igual 0, es decir que no tienen influencia alguna en la ocurrencia de movimientos en masa dentro de la zona de influencia. En contraste, la clase con mayor área de cubrimiento de movimientos en

masa corresponde a Tierras desnudas y degradadas cuya extensión es 324,11 Ha, además de ser la clase con mayor valor de peso con un valor de 4,51 y una fuerte relación directa en la ocurrencia de movimientos en masa.

Tabla 10. Valores Utilizados para la Aplicación del LSI en el Factor Coberturas de Tierra

Clase	Área Clase Ha	Área Deslizamiento Ha	Densidad Clase	Densidad Mapa	W
Tejido urbano continuo	66,08	0,00	0,000	0,005	0,00
Tejido urbano discontinuo	12,02	0,00	0,000	0,005	0,00
Pastos limpios	48093,97	87,45	0,002	0,005	-0,93
Pastos arbolados	93,98	7,07	0,075	0,005	2,80
Pastos enmalezados	1722,91	32,82	0,019	0,005	1,42
Mosaico de pastos y cultivos	799,77	0,00	0,000	0,005	0,00
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	151,16	0,17	0,001	0,005	-1,42
Mosaico de pastos con espacios naturales	11348,96	15,52	0,001	0,005	-1,21
Bosque denso alto de tierra firme	33618,97	25,43	0,001	0,005	-1,80
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	518,66	0,00	0,000	0,005	0,00
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	3192,37	0,17	0,000	0,005	-4,46
Bosque de galería y ripario	2629,43	1,11	0,000	0,005	-2,39
Herbazal denso de tierra firme con arbustos	663,95	0,00	0,000	0,005	0,00
Arbustal denso	535,27	0,00	0,000	0,005	0,00
Arbustal abierto	482,32	0,00	0,000	0,005	0,00
Vegetación secundaria o en transición	531,43	8,21	0,015	0,005	1,21
Vegetación secundaria alta	3645,09	8,76	0,002	0,005	-0,65
Vegetación secundaria baja	6439,39	19,30	0,003	0,005	-0,43
Tierras desnudas y degradadas	773,25	324,11	0,419	0,005	4,51
Ríos	4375,78	19,01	0,004	0,005	-0,05
Total	119694,77	549,14			

Fuente: Autor

Finalmente, para el factor de Uso del Suelo se obtiene una única clase sin presencia de movimientos en masa que corresponde a las Zonas de Desarrollo Forestal, por lo tanto, no hay influencia de esta clase en la ocurrencia de los mismos. Por otro lado, la clase con mayor área de cubrimiento de movimientos en masa

es la Zona de Desarrollo Agropecuario con Restricciones con un valor de 413,52 Ha y, la clase con mayor peso de influencia W es Protección Hídrica con un valor de 0,42.

Tabla 11. Valores Utilizados para la Aplicación del LSI en el Factor Usos del Suelo

Clase	Área Clase Ha	Área Deslizamiento Ha	Densidad Clase	Densidad Mapa	W
Áreas Protegidas	17733,11	10,88	0,001	0,005	-2,01
Protección Hídrica	1458,528	10,23	0,007	0,005	0,42
Suelos Urbanos	110,859	0,00	0,000	0,005	0,00
Zona de Desarrollo Agropecuario Con Restricciones	78673,686	413,52	0,005	0,005	0,14
Zonas de Desarrollo Forestal	0,021	0,00	0,000	0,005	0,00
Zonas de Protección de Los Recursos Naturales	21718,559	114,50	0,005	0,005	0,14
Total	119694,77	549,14			

Fuente: Autor

### 3.3 Curva de Éxito y Validación por AUC

A partir de los valores presentados anteriormente, se aplica la metodología para el cálculo del LSI que propone (El-Fengour, 2016), y así se realiza la curva de éxito del modelo aplicado (Figura 11), la cual permite hacer la validación del mismo, a partir del valor obtenido en el AUC. En este caso, se obtiene un valor de AUC igual 86,15%, el cual está por encima del valor mínimo aceptado que, de acuerdo con los lineamientos del (Servicio Geológico Colombiano, 2017) debe ser mayor a 70%.

De igual manera, en la curva de éxito se hace la clasificación de susceptibilidad, donde se hace la división en 4 clases (Baja, Media, Alta, Muy Alta) que se obtienen por la clasificación de cortes naturales de Jenks (tabla 13) (ESRI, 2025) y la clasificación propuesta por el (SGC, 2017) plasmada en la tabla 12, donde se consideran algunas de las características geoambientales establecidas inicialmente, esto se hace con el fin de realizar correcciones a errores que se pueden generar en la clasificación por Cuantiles, donde los valores similares pueden llegar a ubicarse en clases adyacentes.

Tabla 12. Clasificación para Mapa de Susceptibilidad

Categoría	Tipos y Subtipos de Movimiento	Características Geoambientales – Factores Condicionantes
Muy Alta	Movimientos en masa activos del inventario de procesos morfodinámicos	
	Deslizamientos	
Alta	Caídas	UGS - Subunidades geomorfológicas - Cobertura de la tierra y Uso del suelo
	Flujos	
	Deslizamientos	
Media	Caídas	UGS - Subunidades geomorfológicas - Cobertura de la tierra y Uso del suelo
	Flujos	
Baja	UGS - Subunidades geomorfológicas - Cobertura de la tierra y Uso del suelo	

Fuente: (SGC, 2017)

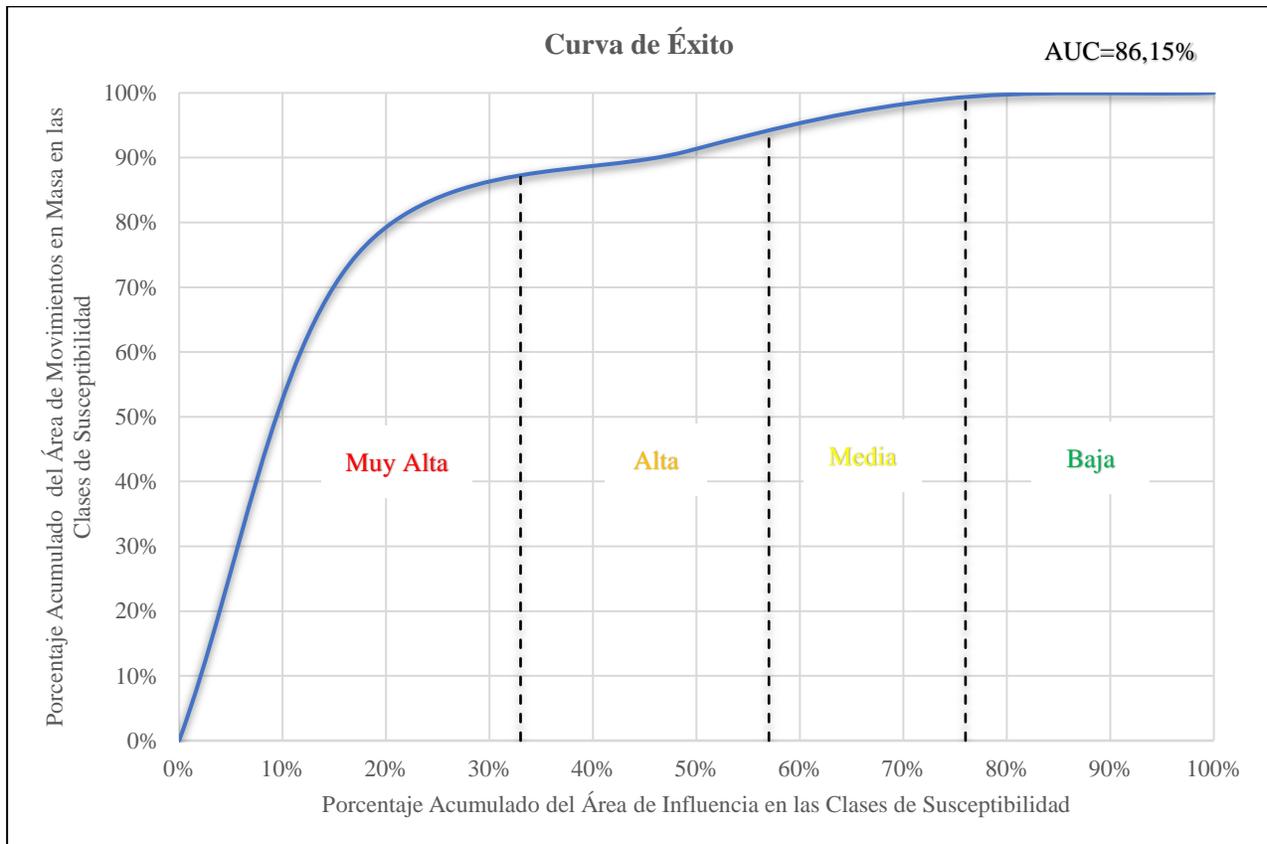


Figura 11. Curva de Éxito (AUC=86,15%)

Fuente: Autor

### 3.4 Mapa de Zonificación de Susceptibilidad por Procesos de Remoción en Masa

Finalmente, con la aplicación de los métodos de clasificación de datos y el ajuste de los mismo, se obtiene el mapa de zonificación por procesos de remoción en masa del municipio de Medina; esta se puede observar en la figura 12. En los datos obtenidos y plasmados en la tabla 13 se observa que el nivel con mayor extensión en el municipio es de susceptibilidad Alta, así como el nivel con mayor área de movimientos en masa es el nivel de susceptibilidad Muy Alto.

Tabla 13. Clasificación de Susceptibilidad a Procesos de Remoción en Masa

Nivel de Susceptibilidad	Rango %	Área Ha	Área de Deslizamientos Ha
Baja	77-100	31411,72	5,32
Media	58-76	29441,59	44,01
Alta	34-57	38265,45	87,88
Muy Alta	0-33	20576,00	411,92
<b>Total</b>		<b>119694,77</b>	<b>549,14</b>

Fuente: Autor

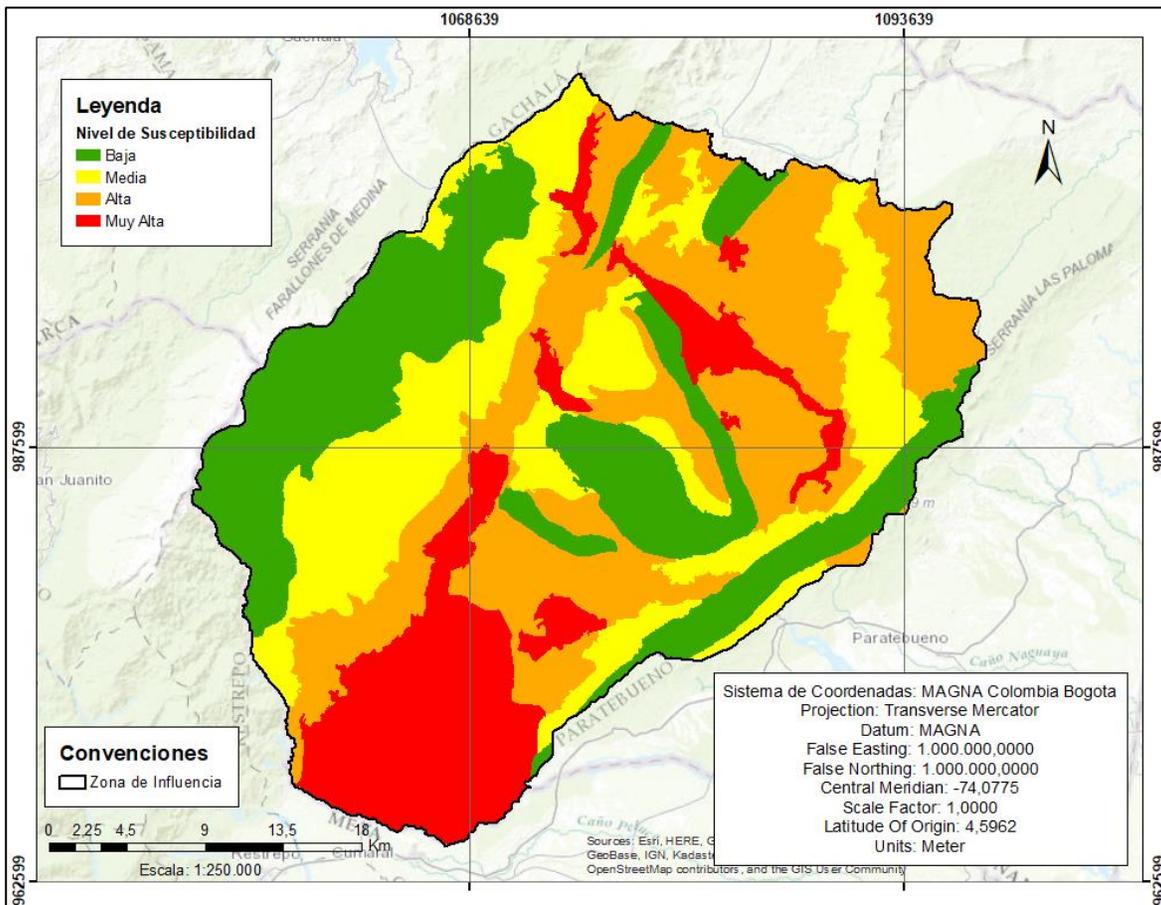


Figura 12. Zonificación de Susceptibilidad por Movimientos en Masa - Medina, Cundinamarca

Fuente: Autor

#### 4. Conclusiones

De acuerdo con la metodología planteada para la zonificación de susceptibilidad a procesos de remoción en masa y, teniendo en cuenta los resultados obtenidos con la aplicación del modelo estadístico, se logró coincidir con autores como (Aristizábal & Mendoza, 2017; Chen et al., 2016; Gómez, 2020; Osorio, 2019; Sandoval et al., 2012), quienes también basaron sus investigaciones en el uso de metodologías de análisis estadísticos con el uso de herramientas SIG para el procesamiento y análisis de datos geoespaciales que facilitarían la generación de mapas detallados e información precisa. Así mismo, se encontró que la efectividad de los resultados obtenidos se debe en gran medida a los datos utilizados, evidenciando lo señalado por (Chang et al., 2019; Gaidzik & Ramírez-Herrera, 2021; Yu & Chen, 2024) respecto a la importancia de la calidad de la información que se utiliza en los procesos de mapeo y zonificación, donde en este caso, se procuró utilizar datos con las mejores resoluciones espaciales posibles y generados sobre escalas adecuadas, producto de la identificación de los factores condicionantes de mayor influencia en la zona de estudio y la cuantificación de los procesos de remoción existentes.

Por otro lado, la aplicación del método Weight of Evidence (WoE) permitió establecer de forma clara aquellas clases dentro de los factores condicionantes (pendiente, unidades geomorfológicas, la litología, pendientes, coberturas, usos de suelo) que juegan tienen un papel influyente en la ocurrencia de movimientos en masa sobre el municipio de Medina; en este caso se encontró que las zonas con pendientes muy abruptas ( $35-55^\circ$ ), localizadas a una distancia de 1,5 km de las fallas geológicas activas, con presencia de formaciones litológicas de Roca Sedimentaria con Intercalaciones de Calcárea Clástica Arenisca Conglomerado Lutita, sobre área de unidades geomorfológicas aluviales, en presencia de tierras desnudas y degradadas y con presencia en zonas de suelos de protección hídrica presentan una mayor susceptibilidad a estos fenómenos.

En cuanto a la validación del modelo mediante el área bajo la curva AUC se obtuvo un valor de 86,15%, lo cual al ser analizado, indica una alta precisión en la predicción de zonas susceptibles a procesos de remoción en masa; este resultado sugiere, en un principio que el modelo puede ser de utilidad en el desarrollo de planes de ordenamiento territorial y la gestión del riesgo del municipio, donde se pueden implementar medidas de mitigación en las zonas de susceptibilidad alta y muy alta y, así mismo, hacer una evaluación que permita la implementación de obras de estabilización de taludes y sistemas de alerta temprana que contribuyan en la reducción del riesgos y la protección de la población. No obstante, se debe tener claro que, a pesar de los resultados logrados, es posible llegar a calibrar y/o mejorar el modelo, por ejemplo, sumando la influencia que pudieran tener las variaciones climáticas y los valores de precipitación en la

zonificación susceptibilidad a movimientos en masa sobre el municipio de Medina, tal como lo sugieren (Calderón-Guevara et al., 2022; Herrera-Coy et al., 2023; Martin & Chai, 2022; Zhou et al., 2021) con la integración de datos meteorológicos y modelos predictivos, los cuales proporcionarían una aprehensión significativa de la dinámica de estos fenómenos.

## 5. Declaraciones

El autor declara que los resultados presentados en este artículo son originales, buscando realizar contribuciones significativas en la concepción, la ejecución y la interpretación de este trabajo. Así mismo, declara que esta investigación ha sido posible gracias al apoyo de la Universidad Antonio Nariño, quien proporcionó la respectiva licencia del software GIS utilizado en la realización del trabajo.

Por otro lado, el autor desea expresar su agradecimiento a la Universidad Antonio Nariño por proporcionar las instalaciones y los recursos necesarios para llevar a cabo el desarrollo de este trabajo. De igual forma, agradece la colaboración y orientación del ingeniero Raúl Echeverry durante el proceso de investigación y elaboración del estudio realizado.

Finalmente, el autor declara que no existe ningún conflicto de interés que pueda influir en la objetividad de este trabajo o en la interpretación de sus resultados.

## 6. Referencias bibliográficas

- Alcaldía de Medina. (2020). *Plan de Desarrollo Municipio de Medina (Cund.) 2020-2023*. <http://www.medina-cundinamarca.gov.co/planes/plan-de-desarrollo-municipal-siempre-con-la-gente-20202023>
- Alcaldía de Medina. (2024). *Plan de Desarrollo Municipal 2024-2027*. <https://mapas.cundinamarca.gov.co/documents/cundinamarca-map::plan-de-desarrollo-2024-2027-municipio-de-medina/about>
- Alcaldía Municipal de Medina. (2001). *Esquema de Ordenamiento Territorial*. <https://repositoriocdim.esap.edu.co/handle/20.500.14471/12425>
- Aristizábal, E. V., & Mendoza, J. (2017). Metodología para la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa en proyectos lineales. Estudio de caso en el acueducto del municipio de Fredonia, Antioquia. *Ingeniería y Ciencia*, 13(26). <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/ingciencia/article/view/4668>
- Ayala-Carcedo, F. J., & Corominas, J. (2002). Mapas de Susceptibilidad a los Movimientos de Ladera con Técnicas SIG. *Medio Ambiente, Riesgos Geológicos*, 4, 7–20. <https://info.igme.es/ielig/documentacion/ci/ci156/documentos/d-ci156-02.pdf>
- Basofi, A., Fariza, A., Syauqi Ahsan, A., & Kamal, I. M. (2015). A comparison between natural and Head/tail breaks in LSI (Landslide Susceptibility Index) classification for landslide susceptibility mapping: A case study in Ponorogo, East Java, Indonesia. *2015 International Conference on Science in Information Technology (ICSITech)*.

- Brabb, E. E., Pampeyan, E. H., & Bonilla, M. G. (1972). Landslide susceptibility in San Mateo County, California. *Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map*, 360.
- Calderón-Guevara, W., Sánchez-Silva, M., Nitescu, B., & Villarraga, D. (2022). Comparative review of data-driven landslide susceptibility models: case study in the Eastern Andes mountain range of Colombia. *Natural Hazards*, 113.
- Chang, K.-T., Merghadi, A., Yunus, A. P., Pham, B. T., & Dou, J. (2019). Evaluating scale effects of topographic variables in landslide susceptibility models using GIS-based machine learning techniques. *Scientific Reports*, 9(12296).
- Chen, T., Niu, R., & Jia, X. (2016). A comparison of information value and logistic regression models in landslide susceptibility mapping by using GIS. *Environmental Earth Sciences*, 75(10). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5317-y>
- Combariza, D. F. (2022). *Determinación de la Susceptibilidad a Procesos de Remoción en Masa en el Municipio de Sogamoso a partir del Uso de Análisis Espacial* [Universidad Antonio Nariño]. [http://repositorio.uan.edu.co:8080/bitstream/123456789/7268/1/2022\\_T.G\\_DanielCombariza.pdf](http://repositorio.uan.edu.co:8080/bitstream/123456789/7268/1/2022_T.G_DanielCombariza.pdf)
- Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2017). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres*. [https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co:8443/bitstream/handle/20.500.11762/28925/PMGRD\\_MedinaCmarca\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co:8443/bitstream/handle/20.500.11762/28925/PMGRD_MedinaCmarca_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2023). *3.11 Coberturas y Usos de la Tierra*. Coberturas de Tierra. <https://www.car.gov.co/vercontenido/4652>
- Cortés, P. A., & Grajales, S. (2018). *Comparación entre los Métodos Estadísticos Bivariado y Multivariado para la Zonificación de la Susceptibilidad por Movimientos en Masa en escala 1:100.000 en el Municipio de La Estrella-Antioquia* [Universidad EAFIT]. <https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/70bf855c-4b89-4822-bc88-89e6d30c2362/content>
- Dahal, R. K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Dhakal, S., & Paudyal, P. (2008). Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. *Geomorphology*, 102(3–4). <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.041>
- Day, R. W. (2009). *Foudation Engineering Handbook (Design and Construction with the 2009 International Building Code)*. 2<sup>nd</sup> Edition McGraw-Hill Companies, Inc.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2024). *Geoportal DANE*. Cartografía. <https://geoportal.dane.gov.co/servicios/descarga-y-metadatos/datos-geoestadisticos/?cod=111>
- EarthData. (2025). *ALOS PALSAR RTC Project*. <https://www.earthdata.nasa.gov/data/projects/alos-palsar-rtc-project>
- El-Fengour, A. (2016). *Landslide susceptibility assessment in the Amzaz Valley, Central Rif, Morocco*. University of Oporto.
- ESRI. (2025). *Métodos de Clasificación de Datos*. Simbología.
- Gaidzik, K., & Ramírez-Herrera, M. T. (2021). The importance of input data on landslide susceptibility mapping. *Scientific Reports*, 11(19334). <https://www-nature-com.ezproxy.uan.edu.co/articles/s41598-021-98830-y#citeas>
- Gobernación de Cundinamarca. (2015). *Mapas y Estadísticas*. Cartografía Temática. <https://mapas.cundinamarca.gov.co/datasets/cundinamarca-map::mapa-geol%C3%B3gico-de-cundinamarca-escala-1100-000-2015-feature-layer/explore?layer=5&location=4.644594%2C-73.794962%2C8.39>
- Gómez, D. (2020). *ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA PARA EL MUNICIPIO DE VILLAMARÍA EN LA ZONA URBANA Y RURAL* [Universidad de Manizales]. [https://ridum.umanizales.edu.co/bitstream/handle/20.500.12746/6592/Gomez\\_Daniel\\_2020.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://ridum.umanizales.edu.co/bitstream/handle/20.500.12746/6592/Gomez_Daniel_2020.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

- Graham, J. (1984). Methods of Stability Analysis. *Slope Instability, Department of Civil Engineering, University of Manitoba*, 171–215.
- Halder, K., Srivastava, A. K., Ghosh, A., Das, S., Banerjee, S., Pal, S. C., Chatterjee, U., Bisai, D., Ewert, F., & Gaiser, T. (2025). Improving landslide susceptibility prediction through ensemble recursive feature elimination and meta-learning framework. *Scientific Reports*, 15(5170).
- Herrera-Coy, M. C., Calderón, L. P., Herrera-Pérez, I. L., Bravo-López, P. E., Conoscenti, C., Delgado, J., Sánchez-Gómez, M., & Fernández, T. (2023). Landslide Susceptibility Analysis on the Vicinity of Bogotá-Villavicencio Road (Eastern Cordillera of the Colombian Andes). *Remote Sens*, 15(15).
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). The landslide Handbook - A guide to understanding landslides. *US Geological Survey Circular*, 1325.
- Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático. (2024, septiembre 18). *Caracterización General del Escenario de Riesgo por Movimientos en Masa en Bogotá*. Escenarios de Riesgo. <https://www.idiger.gov.co/rmovmasa>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2000). *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca* (Vol. 1).
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2024). *Procedimiento Elaboración del Mapa de Cobertura de la Tierra*. [https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/PC-AGR-06%20Elaboraci%C3%B3n%20del%20Mapa%20de%20Coberturas\\_0.pdf](https://www.igac.gov.co/sites/default/files/listadomaestro/PC-AGR-06%20Elaboraci%C3%B3n%20del%20Mapa%20de%20Coberturas_0.pdf)
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2025). *Colombia en Mapas*. Cartografía. <https://www.colombiaenmapas.gov.co/>
- Martin, D., & Chai, S. S. (2022). A Study on Development of Landslide Susceptibility Map in Malaysia Landslide Prone Areas by Using Geographic Information System (GIS) and Machine Learning. *2022 IEEE 18th International Colloquium on Signal Processing & Applications (CSPA)*.
- Morgenstern, N. R. (1997). Toward landslide risk assessment in practice. En *Landslide Risk Assessment* (pp. 15–23). <https://doi.org/10.1201/9780203749524-2>
- Nilsen, T. H., Wright, R. H., Vlastic, T. C., & Spangle, W. (1979). Relative slope stability and land-use planning. Selected examples from the San Francisco Bay region, California. *US Geological Survey Professional Paper*, 944.
- Osorio, L. F. (2019). *Zonificación de la Susceptibilidad del Terreno a los Deslizamientos. Caso de Estudio: Nariño - Colombia* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/69829/1030564924.2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sandoval, J. H., Alvarado-Flórez, C., Medina-Bello, E., & García Núñez, J. (2012). ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA APLICANDO UN MÉTODO BIVARIADO Y UN PROCESO HEURÍSTICO. CASO APLICADO A LA CUENCA DEL RÍO COMBEIMA, IBAGUÉ-TOLIMA-COLOMBIA. *Conferencia: IV Simposio Panamericano de Deslizamientos: Vulnerabilidad y Gestión del Riesgo en la región Tropical de Centro y Sur América*. [https://www.researchgate.net/publication/308926844\\_ZONIFICACION\\_DE\\_AMENAZA\\_POR\\_MOVIMIENTOS\\_EN\\_MASA\\_APLICANDO\\_UN\\_METODO\\_BIVARIADO\\_Y\\_UN\\_PROCESO\\_HEURISTICO\\_CASO\\_APLICADO\\_A\\_LA\\_CUENCA\\_DEL\\_RIO\\_COMBEIMA\\_IBAGUE-TOLIMA-COLOMBIA](https://www.researchgate.net/publication/308926844_ZONIFICACION_DE_AMENAZA_POR_MOVIMIENTOS_EN_MASA_APLICANDO_UN_METODO_BIVARIADO_Y_UN_PROCESO_HEURISTICO_CASO_APLICADO_A_LA_CUENCA_DEL_RIO_COMBEIMA_IBAGUE-TOLIMA-COLOMBIA)
- Servicio Geológico Colombiano. (2013). Documento Metodológico De La Zonificación De Susceptibilidad Y Amenaza Por Movimientos En Masa Escala 1:100.000. *Servicio Geológico Colombiano*, 2. [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/45719124/MetodologiaDeLaZonificacionDeSusceptibilidadYAmenazaPorMovimientosEnMasa\\_100.000\\_Ago2013-libre.pdf?1463510964=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DDOCUMENTO\\_METODOLOGICO\\_DE\\_LA\\_ZONIFICACION\\_O.pdf&Expires=1740168669&Signature=CzMU8F6LDxeKhCa~CmRZYIH7RBZoFWDZC4~dfjcW-fXnESKE7xd57tkQnAIOjvVKKd9sMgROyvh4kToBZ76e2xbeTWkj2iGFYisXlv5FD3MsJLVn81Z](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/45719124/MetodologiaDeLaZonificacionDeSusceptibilidadYAmenazaPorMovimientosEnMasa_100.000_Ago2013-libre.pdf?1463510964=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DDOCUMENTO_METODOLOGICO_DE_LA_ZONIFICACION_O.pdf&Expires=1740168669&Signature=CzMU8F6LDxeKhCa~CmRZYIH7RBZoFWDZC4~dfjcW-fXnESKE7xd57tkQnAIOjvVKKd9sMgROyvh4kToBZ76e2xbeTWkj2iGFYisXlv5FD3MsJLVn81Z)

5qCQsdZau2Wi1WLTK7ebMMdr1SKtHnk-pACfA~rD83IoKApHV3oeZ902Kq1vX-tZXRWtKf3bpNNmTyXkwTjXI--UtpXomIagmTEHDOWr-CY8Ozc2oZ34s6ygiyL9Xsxn9miVv~557H5rSnOZ3MzqMCUzIv62SWhvytda1znPEebRmda0lnI830sBbDqmukz29PoDChnjmvaq3fQN9pSHVPiGN~r5aA4oFg\_\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

- Servicio Geológico Colombiano. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. En *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000*. <https://doi.org/10.32685/9789585978225>
- Servicio Geológico Colombiano. (2025). *Sistema de Información de Movimientos en Masa*. <https://simma.sgc.gov.co/#/>
- Shahabi, H., & Hashim, M. (2015). Landslide susceptibility mapping using GIS-based statistical models and Remote sensing data in tropical environment. *Scientific Report*, 5(9899).
- Singh, A., Dhiman, N., Niraj, K. C., & Praise Shukla, D. (2024). Ensembled transfer learning approach for error reduction in landslide susceptibility mapping of the data scare region. *Scientific Reports*, 14(29060). <https://www-nature-com.ezproxy.uan.edu.co/articles/s41598-024-76541-4>
- Suárez, J. (2009). Zonificación de Susceptibilidad, Amenaza y Riesgo. En *Deslizamientos: Análisis Geotécnico* (Vol. 1, pp. 527–582). Universidad Industrial de Santander.
- Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital. (2019). *Zonificación*. Glosario Catastral. <https://www.catastrobogota.gov.co/glosario-catastral/zonificacion>
- Valdiya, K. S. (2013). *ENVIRONMENTAL GEOLOGY: Ecology, Resource and Hazard Management* (2dn ed.). McGraw Hill Education (India) Private Limited.
- Van Westen, C. J. (2000). The modeling of landslide hazards using GIS. *Surveys in Geophysics*, 21(2–3). <https://doi.org/10.1023/A:1006794127521>
- Van Zuidam, R. A. (1986). *Aerial Photointerpretation in Terrain Analysis and Geomorphological Mapping*. Smits Publisher.
- Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes. *Special report*, 176, 11–33.
- Yu, X., & Chen, H. (2024). Research on the influence of different sampling resolution and spatial resolution in sampling strategy on landslide susceptibility mapping results. *Scientific Reports*, 14(1549).
- Zhou, X., Wu, W., Qin, Y., & Fu, X. (2021). Geoinformation-based landslide susceptibility mapping in subtropical area. *Scientific Reports*, 11(24325).
- Zhu, C., & Wang, X. (2009, julio 4). Landslide Susceptibility Mapping: A Comparison of Information and Weights-of-Evidence Methods in Three Gorges Area. *International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*.
- Zinck, J. A. (1987). *Aplicación de la Geomorfología de Levantamiento de Suelos en Zonas aluviales y Definición del Ambiente Geomorfológico con fines de Descripción de Suelos*. IGAC.