



# **Zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa y su relación con pérdida de cobertura vegetal en Sumapaz, Bogotá**

Germán Darío Galvis Bedoya, José Manuel Agredo Collazos

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Asesor: Juan Sebastián Grisales Noreña, Especialista (Esp) en Sistemas de Información Geográfica y Geomática

Universidad de Manizales  
Facultad de Ciencias e Ingeniería  
Especialización en Sistemas de Información Geográfica  
Manizales, Caldas, Colombia

2025

---

<b>Cita</b>	(Galvis Bedoya & Agredo Collazos, 2025)
<b>Referencia</b>	Galvis Bedoya, G. D., Agredo Collazos, J. M. (2025). <i>Zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa y su relación con pérdida de cobertura vegetal en Sumapaz, Bogotá</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.

---



Especialización en Sistemas de Información Geográfica , XXXI

Centro de Investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo

Línea de Investigación Análisis y Modelamiento Espacial.

**Declaración de inteligencia artificial:** el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como ChatGPT, Grammarly, Turnitin, Copilot, Gemini, entre otras, de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

**Biblioteca y Centro de Recursos:** <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

**Repositorio Institucional:** <http://ridum.umanizales.edu.co/>

**Universidad de Manizales:** [www.umanizales.edu.co](http://www.umanizales.edu.co)

**Revistas:** <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

**Fondo Editorial:** <https://editorialum.umanizales.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 Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

Dedicamos el presente trabajo de grado a nuestras familias. Este logro no solo nos pertenece, sino que es también el fruto de su amor incondicional, de su esfuerzo silencioso y de los sacrificios que hicieron para brindarnos la oportunidad de crecer y aprender. Queremos rendir un tributo a la colaboración, paciencia y comprensión que nos han brindado a lo largo de este viaje académico.

Gracias por ser nuestro refugio en los momentos difíciles, nuestra inspiración constante y el ejemplo que guía cada paso de nuestro camino.

## **Agradecimientos**

Deseamos manifestar nuestros más sinceros agradecimientos a la Universidad de Manizales por ser un centro de excelencia académica y un espacio que inspira a la búsqueda constante del conocimiento. Nuestro especial agradecimiento al geólogo Juan Sebastián Grisales por su conocimiento, disposición y compromiso que fueron fundamentales para la culminación exitosa de este proyecto. Finalmente, a nuestras familias por su apoyo, paciencia y fe incondicional en nosotros. Su compañía fue la fuerza que nos impulsó a seguir adelante en este camino de aprendizaje, esfuerzo y crecimiento profesional y personal

## Tabla de contenido

Resumen .....	10
Abstract .....	11
Introducción .....	12
1 Planteamiento del problema .....	13
1.1 Antecedentes .....	13
2 Justificación.....	17
3 Objetivos .....	19
3.1 Objetivo general .....	19
3.2 Objetivos específicos.....	19
4 Hipótesis.....	20
4.1 Hipótesis de trabajo.....	20
4.1.1 Hipótesis nula.....	20
5 Marco teórico .....	21
5.1 Suelo.....	21
5.2 Cobertura vegetal .....	22
5.3 Movimientos en masa.....	22
5.4 Índice de susceptibilidad a deslizamientos.....	25
5.5 Desarrollo sostenible .....	26
5.6 Gestión del riesgo de desastres.....	26
5.7 Emergencia.....	27
5.8 Desastre .....	27
5.9 Amenaza.....	29
5.10 Susceptibilidad .....	29
5.11 Vulnerabilidad.....	30

---

5.12 Riesgo.....	30
5.13 Ordenamiento territorial.....	31
5.14 Plan de manejo ambiental.....	31
6 Metodología.....	33
6.1 Procedimiento.....	33
6.1.1 Fase I: Obtención de Información.....	33
6.1.2 Fase II: Análisis del terreno.....	35
6.1.3 Fase III: Cálculo del índice de susceptibilidad.....	37
6.1.4 Fase IV: Sintetización de resultados.....	37
7 Resultados.....	39
7.1 Descripción de la zona de estudio.....	39
7.1 Pendiente.....	40
7.2 Curvatura.....	42
7.3 Aspecto.....	44
7.5 Geología del terreno.....	45
7.6 Geomorfología del terreno.....	48
7.7 Coberturas de la tierra.....	51
7.8 Inventario de movimientos en masa.....	53
7.9 Zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa.....	54
7.10 Validación del resultado.....	58
7.11 Coberturas de la tierra para el 2024.....	59
8 Discusión.....	65
9 Conclusiones.....	70
10 Recomendaciones.....	72
Referencias.....	73

---

Anexos.....78

**Lista de tablas**

<b>Tabla 1</b> Clasificación de los movimientos en masa .....	24
<b>Tabla 2</b> Cartografía básica de la localidad de Sumapaz .....	34
<b>Tabla 3</b> Pendiente del terreno .....	41
<b>Tabla 4</b> Curvatura del terreno .....	43
<b>Tabla 5</b> Aspecto del terreno .....	45
<b>Tabla 6</b> Geología del terreno .....	46
<b>Tabla 7</b> Geomorfología del terreno .....	49
<b>Tabla 8</b> Coberturas de la tierra CLC para 2020 .....	52
<b>Tabla 9</b> Pesos de evidencia para las variables condicionantes .....	55
<b>Tabla 10</b> Área total por categoría de susceptibilidad .....	57
<b>Tabla 11</b> Coberturas de la tierra CLC para 2024 .....	61
<b>Tabla 12</b> Área total por categoría de susceptibilidad para el 2024 .....	63
<b>Tabla 13</b> Pesos de evidencia para la pendiente .....	78
<b>Tabla 14</b> Pesos de evidencia para la curvatura .....	79
<b>Tabla 15</b> Pesos de evidencia para el aspecto .....	79
<b>Tabla 16</b> Pesos de evidencia para la geología .....	80
<b>Tabla 17</b> Pesos de evidencia para la geomorfología .....	81
<b>Tabla 18</b> Pesos de evidencia para las coberturas .....	83

**Lista de figuras**

<b>Figura 1</b> Etapas de un desastre .....	28
<b>Figura 2</b> Localidad de Sumapaz .....	40
<b>Figura 3</b> Mapa de pendiente del terreno.....	41
<b>Figura 4</b> Mapa de curvatura del terreno .....	43
<b>Figura 5</b> Mapa de aspecto del terreno .....	44
<b>Figura 6</b> Mapa de geología del terreno .....	46
<b>Figura 7</b> Mapa de geomorfología del terreno.....	49
<b>Figura 8</b> Mapa de coberturas de la tierra 2020.....	52
<b>Figura 9</b> Mapa de inventarios de movimientos en masa.....	54
<b>Figura 10</b> Mapa de Susceptibilidad del terreno a movimientos en masa.....	57
<b>Figura 11</b> Validación del modelo LSI.....	59
<b>Figura 12</b> Mapa de coberturas de la tierra para el 2024 .....	61
<b>Figura 13</b> Mapa de Susceptibilidad del terreno a movimientos en masa para el 2024 .....	63
<b>Figura 14</b> Mapa de cambios en la susceptibilidad a movimientos en masa.....	64
<b>Figura 15</b> Mapa de escenario proyectado de cambio en la precipitación 2011-2040 .....	85
<b>Figura 16</b> Áreas protegidas de la localidad de Sumapaz.....	86

**Siglas, acrónimos y abreviaturas**

<b>AUC</b>	Área bajo la curva
<b>CLC</b>	Corine Land Cover
<b>DEM</b>	Modelo Digital de Elevación
<b>Esp.</b>	Especialista
<b>IDEAM</b>	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
<b>IDECA</b>	Infraestructura de Datos Espaciales de Bogotá
<b>IDIGER</b>	Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático
<b>FEMA</b>	Agencia Federal para el Manejo de Emergencias
<b>Ha</b>	Hectárea
<b>LSI</b>	Índice de Susceptibilidad a Deslizamientos
<b>PMA</b>	Plan de Manejo Ambiental
<b>POT</b>	Plan de Ordenamiento Territorial
<b>RF</b>	Random Forest
<b>ROC</b>	Característica Operativa del Receptor
<b>SDA</b>	Secretaría Distrital de Ambiente
<b>SGC</b>	Servicio Geológico Colombiano
<b>SIG</b>	Sistema de Información Geográfica
<b>SIMMA</b>	Sistema de Información de Movimientos en Masa
<b>SINAP</b>	Sistema Nacional de Áreas Protegidas
<b>UManizales</b>	Universidad de Manizales
<b>UNGRD</b>	Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres
<b>UPR</b>	Unidad de Planeamiento Rural
<b>UPZ</b>	Unidad de Planeamiento Zonal
<b>USC</b>	Índice de cobertura superficial
<b>WoE</b>	Pesos de Evidencia

## Resumen

La localidad de Sumapaz ha venido enfrentando un alto riesgo de movimientos en masa, debido a factores como el cambio climático, la expansión urbana desmedida y la pérdida de la cobertura vegetal. Las altas precipitaciones aumentan la propensión a presentar movimientos en masa afectando a las comunidades aledañas. El presente trabajo tiene como objetivo realizar un análisis estadístico de las condiciones del terreno para identificar las áreas con mayor susceptibilidad a presentar eventos de movimiento en masa mediante un proceso de zonificación apoyado en el uso de sistemas de información geográfica (SIG) teniendo en cuenta la pérdida de vegetación como factor detonante. Todo este proceso incluye la recopilación de información, elaboración de un modelo digital de elevación (DEM) y planteamiento de escenarios de zonificación de susceptibilidad. La finalidad del trabajo es elaborar un insumo para la elaboración de recomendaciones para prevenir y mitigar el riesgo.

*Palabras clave:* Movimientos en masa, cobertura vegetal, expansión urbana desmedida, susceptibilidad, Sistemas de Información Geográfica.

---

### **Abstract**

The locality of Sumapaz has been experiencing a high risk of mass movements, driven by factors such as climate change, uncontrolled urban expansion, and the loss of vegetation cover. Intense rainfall further increases the likelihood of such events, posing significant threats to surrounding communities. This study aims to perform a statistical analysis of terrain conditions to identify areas with higher susceptibility to mass movement events through a zoning process supported by Geographic Information Systems (GIS), considering vegetation loss as a triggering factor. The methodology includes data collection, the development of a Digital Elevation Model (DEM), and the formulation of susceptibility zoning scenarios. The ultimate purpose of this research is to provide a technical basis for developing recommendations to prevent and mitigate mass movement risks in the region.

*Keywords:* Mass movements, vegetation cover, urban sprawl, Susceptibility, Geographic Information Systems.

## Introducción

Sumapaz es la número 20 de las localidades que conforman el Distrito Capital de Bogotá, se encuentra ubicada al sur del casco urbano de la ciudad sobre la cordillera oriental de los andes colombianos siendo la única localidad de carácter rural. Geográficamente se encuentra dividida por dos cuencas, la cuenca del Río Blanco y la del Río Sumapaz. Esta localidad se caracteriza por su productividad agrícola, contribuyendo significativamente a la economía local y la oferta alimentaria de la ciudad (Colombia, Alcaldía de Bogotá, 2024).

A pesar de ello, actividades desarrolladas en la localidad durante años recientes como la ganadería extensiva y la expansión de la frontera agrícola han llevado a un deterioro en la vegetación nativa, favoreciendo su pérdida y limitando su función ecosistémica.

La localidad de Sumapaz, es una zona que cuenta con mucha biodiversidad, con un clima frío y húmedo, por ende, sus suelos necesitan agarre y este se da, con siembra de árboles o del mismo pasto. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede mencionar que cuando se modifican las capas de un terreno, surge un problema significativo referente la pérdida de cobertura vegetal. Este proceso puede ser gradual o repentino dependiendo de los factores involucrados. Entre las múltiples causas que lo generan se encuentra la deforestación, la urbanización o la agricultura intensiva, así como malos manejos en el uso del suelo, contaminación y cambio climático, Al perder los suelos su cobertura natural se presenta, enseguida, una serie de cambios que repercuten de manera negativa en la fertilidad y la productividad natural del suelo (Muñoz Iniestra, et al., 2009)

El presente documento plantea un ejercicio de zonificación de la susceptibilidad de movimientos en masa en la localidad del Sumapaz a consecuencia del cambio de la cobertura vegetal con el objetivo de servir como insumo para la gestión de políticas que favorezcan la mitigación del riesgo de desastres y la elaboración de un plan de acción vinculando a la comunidad y las autoridades locales.

## **1 Planteamiento del problema**

El cambio en el uso del suelo es uno de los temas mayormente estudiados en el campo de las ciencias ambientales ya que este fenómeno constituye uno de los factores con más importancia en el proceso de cambio climático debido a la alteración de los ciclos biogeoquímicos, así como una de las causas más grandes en cuanto a disminución de biodiversidad. La pérdida de cobertura vegetal es el primer paso del proceso de degradación del suelo, y cuando no es controlado a tiempo provoca la erosión y posterior declive.

Bogotá, la capital de Colombia, se caracteriza por una gran variedad ecológica, topográfica y con un clima variado, sin embargo, en las últimas décadas, la urbanización y el crecimiento demográfico se han encargado de afectar significativamente a los ecosistemas. La expansión de la infraestructura urbana, la agricultura intensiva y la explotación de recursos naturales han llevado a una notable disminución de la cobertura vegetal, crucial para el equilibrio ecológico de la región (Achicanoy, et al., 2018).

Una de las herramientas más óptimas para controlar este fenómeno son los monitoreos regulares del estado del suelo. Sin embargo, los monitoreos del terreno son poco utilizados y no son bien vistos por las autoridades gubernamentales ya que no muestran resultados a corto plazo, son costosos o difíciles de ejecutar y sus tiempos de desarrollo no siempre concuerdan con los tiempos para la toma de decisiones por parte de las autoridades.

### **1.1 Antecedentes**

En Venezuela es común la visualización de comunidades no planificadas, pues los campesinos dejaron los campos para trabajar con lo referente al petróleo. El problema fue el crecimiento exponencial de la comunidad La Lagunita y el desconocimiento de antecedentes del terreno de esa zona, pues se ha visto gran intervención antrópica, lo que quiere decir que es una zona con escenarios de riesgo latentes cuando haya precipitaciones afectando la calidad de vida de la comunidad. Estos escenarios de riesgo pueden alterar el medio ambiente generando una amenaza mayor, ya que la remoción en masa altero significativamente el terreno, debilitándose y ocasionando movimientos en masa. (Rosales-Veitía & Marcano-Montilla, 2021)

La pérdida de cobertura vegetal es generada por el uso indiscriminado de distintas actividades que se le da al suelo de manera antrópica, que de cierta manera afecta negativamente a zonas aledañas a ríos o quebradas, hasta tal punto de llegar a perjudicar a las montañas o páramos. Estas afecciones suelen ser de gran magnitud ocasionando una pérdida de cobertura a gran velocidad deteriorando así, la calidad y cantidad de los recursos naturales tales como los hídricos y del suelo, por ende, logrando afectar a comunidades aledañas. Cabe resaltar que las producciones agrícolas son aquellas que mayor impacto ecológico genera en los terrenos por inadecuadas prácticas (Albarracín-Zaidiza, et al., 2018)

El suelo es tan indispensable que es directamente responsable de actividades claves tanto ecológicas como sociales y económicas, que resultan fundamentales para la vida. La capacidad de almacenar y retener agua, filtrar hasta tal punto de purificarla, amortiguar todo tipo de sustancias y transformar, hace que el ecosistema suelo sea uno de los principales para la protección del agua. Sin embargo, los bosques naturales han sufrido una implementación de prácticas inadecuadas e insostenibles que han afectado a los recursos naturales y el entorno mismo que nos los brinda, para la agriculturas se incrementa de manera significativa la deforestación de los bosques, favoreciendo a la degradación de suelos y su erosión, dejando como resultado terrenos inestables sin dejar de lado, que se destruyen hábitats de distintas especies endémicas de Colombia, estimulando la migración de los animales y la extinción de la vegetación nativa del país (Calderón, 2021).

Los movimientos en masa son uno de los escenarios de riesgo más frecuentes a los que se atribuyen pérdidas humanas y económicas alrededor del mundo. Dicho esto, las investigaciones toman bastante auge ya que es un tema de gran interés científico. Principalmente en zonas con alta cantidad de precipitaciones, ya que las lluvias son la causa principal de la ocurrencia de los movimientos en masa (Ospina, et al, 2021)

En las riberas de las cuencas hidrográficas, los deslizamientos son causados la mayoría de veces de manera antrópica, como por ejemplo el crecimiento demográfico, el cual se ve reflejado en cambios del uso de suelo, remoción de cobertura vegetal y cortes en las pendientes para establecer viviendas, llegando a afectar la estabilidad del suelo (Leal Villamil, et al, 2018)

La iniciativa de elaborar estudios de zonificación en Colombia nace de la necesidad identificar de forma temprana la alerta de ocurrencia de fenómenos naturales que puedan amenazar la integridad de la población expuesta. Los procesos de movimiento en masa presentados en zonas inestables se basan en el uso de metodologías que se alinean con los objetivos de prevenir, mitigar

y controlar la vulnerabilidad del terreno a presentar estos fenómenos. Los corredores viales como el corredor Cano-Mojarras, en el departamento de Nariño, son zonas consideradas de especial interés para la elaboración de estos estudios debido a las condiciones de terreno que favorecen la alta incidencia de movimientos de remoción en masa sobre la vía, lo que afecta el transporte de suministros, comercio y movilidad en corredores viales importantes para la conexión terrestre entre centros poblados. (Osorio, 2019)

En municipios como lo es Manizales, los movimientos en masa también denominados como deslizamientos, son muy comunes ya que estos se generan principalmente por factores ambientales comunes de esa zona como el clima, la cercanía con una zona volcánica que ha propiciado las condiciones geomorfológicas para un alto relieve donde los suelos pueden ser poco consolidados y fuertemente meteorizados, acompañados de fuertes pendientes. Dicho esto, Manizales es una zona de laderas muy pronunciadas e inestables (Osorio, 2023).

Conforme pasa el tiempo, los movimientos de masa se han convertido en una problemática muy repetitiva en el municipio de Manizales, por el hecho de que urbanizaciones, vías y las distintas redes de servicio público, se ubican en zonas susceptibles a movimientos en masa; por tal motivo, es de suma importancia obtener datos para facilitar el control y el monitoreo de procedimientos que sirvan para prevenir y mitigar el riesgo, factores de vital importancia a estudiar cómo el cambio en la cobertura vegetal, la cantidad de lluvia caída en una hora y lugar específico, la topografía del terreno y otras características de los suelos que se deben tener en cuenta para realizar este tipo de estudios (Gallardo, 2024)

Las condiciones geográficas, sumado al hecho de que Bogotá se encuentra a 2600 msnm, y presente una topografía montañosa hacen que la ciudad sea altamente propensa a la ocurrencia de deslizamientos con oscilaciones de temperatura mínima entre 16° a 17° y la máxima puede llegar aproximadamente a 20°. En los últimos años, Bogotá ha experimentado un proceso de crecimiento constante que ha generado modificaciones significativas en el uso del suelo. Este crecimiento ha llevado a una concentración de asentamientos humanos en áreas de alta amenaza por deslizamientos. Estudios previos en la ciudad se han enfocado principalmente en la perspectiva de amenaza, vulnerabilidad y zonificación de riesgo (Zamora, 2018).

Más específicamente en la localidad de Engativá, en Bogotá, debido a su ubicación geográfica, se presentó un gran problema, pues se empezaron a concretar proyectos de urbanización tanto legal como ilegal, donde personas con pocos recursos se asentaban en la zona, donde

conformaron un sitio ideal para construir una vivienda ilegal sin ningún tipo de conocimiento sobre la zona. Al momento de construir las viviendas, se realizó un relleno de escombros en una parte del humedal y, por si fuera poco, se relleno en algunos tramos del río Bogotá, aumentando la probabilidad de vulnerabilidad de la gente que se asiente en esa zona (Vallejo et al, 2023).

En contexto, en varias localidades de Bogotá se han identificado actividades no sostenibles como la extracción de madera, la propagación de incendios antrópicos forestales con el fin de deforestar ciertas zonas que van de la mano con actividades ilegales como la minería, uso inadecuado de recursos e introducción de especies invasoras. Estos son solo unos de los pocos factores que detonan las deforestaciones que están relacionadas con actividades antrópicas ya sean de manera intrínseca, trayendo consecuencias en la afectación del medio ambiente, removiendo capas del suelo como la cobertura vegetal llegando a generar en cierto punto, la inestabilidad de suelos que, con grandes precipitaciones o mal uso del agua puede traer problemas de erosión, deslizamientos y socavaciones. En la localidad y en el Páramo de Sumapaz, se han implementado obras de bioingeniería en zonas afectadas, utilizando sistemas de mitigación por movimientos en masa, los cuales se llevaron a cabo siguiendo los parámetros establecidos por los estudios especializados de suelos, topografía, manejos de pendientes, filtración de agua y como adaptación final, la revegetación y reforestación de la zona para mejorar la estabilidad del suelo, con el fin de prevenir y mitigar los riesgos que podrían haber cobrado vidas humanas y gastos económicos muy altos (Sánchez López et al, A. 2017)

## 2 Justificación

La ley 1523 del 2012, concreta un acuerdo donde todos los municipios de Colombia pongan en marcha una serie de estudios de riesgos tanto naturales como antrópicos con el fin de que esto se vuelva un pilar fundamental en las políticas que van encaminadas a la búsqueda del desarrollo seguro y de la integridad colectiva de las comunidades para lograr una gestión ambiental sostenible para poder aplicar una gestión de riesgo de desastres con el propósito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible (Colombia. Congreso de la República, 2012).

Los movimientos en masa son un proceso natural que se presenta debido a altas pendientes, materiales de suelo débiles y falta o remoción de cobertura vegetal. En algunos escenarios la topografía es responsable de deslizamientos en masa, donde se evidencia especies de cobertura vegetal no aptas para los tipos de terreno afectando así, sus propiedades y ocasionando que el suelo se vuelve propenso a los deslizamientos generando una amenaza significativa a zonas aledañas a esos terrenos, llegando hasta tal punto de afectar las vías principales y viviendas cercanas, dificultando el crecimiento en el desarrollo socioeconómico (Ospina, et al, 2021).

Bogotá se encuentra a unos 2600 msnm, teniendo como base, de que se encuentra ubicada en la parte alta de los andes colombianos, comprendiendo un vasto y extenso territorio de 37,075 ha a zonas urbanas mientras que para expansión rural es de 2,331 ha. Bogotá es una ciudad con una topografía montañosa llegando a equivaler aproximadamente un 83% de zonas de montaña y un 17% correspondiendo a zonas planas, donde cabe destacar que una gran parte de la población se encuentra localizada en zonas de ladera. Estas características que presenta la capital de Colombia, presentan un gran desafío y al mismo tiempo, oportunidades para estudiar los movimientos en masa que, con la actualización y revisión del POT, se debe realizar un mapa de amenaza por este tipo de escenario de riesgo (Colombia, IDIGER, 2024).

En el año 2021, se estimó que aproximadamente el 3,2% está en una zona categorizada como amenaza alta por movimientos en masa (1.269 ha), en amenaza media un 17,4% (6.865 ha) y en amenaza baja un 79,4% (31.272 ha).

El Instituto Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático de Bogotá (IDIGER) desempeña un papel fundamental en la prevención y mitigación de desastres naturales y antrópicos, incluidos los movimientos en masa, que son una amenaza muy recurrente en esta región. Bogotá

al estar en una zona montañosa, enfrenta riesgos asociados a la inestabilidad de sus laderas, especialmente debido a factores como la deforestación, la sobreexplotación del suelo y las intensas lluvias. Estos movimientos en masa, que pueden manifestarse como deslizamientos de tierra o flujos de lodo, no solo ponen en peligro la infraestructura urbana y rural, sino que también amenazan la vida y la seguridad de sus habitantes. El IDIGER además trabaja en la identificación y evaluación de áreas vulnerables, implementando estrategias de sensibilización y educación para las comunidades sobre los riesgos asociados a estos fenómenos. A través de campañas informativas, busca concientizar a la población sobre la importancia de la conservación del entorno natural y la implementación de prácticas sostenibles que ayuden a estabilizar el suelo (Vargas, 2022).

Por medio de esta investigación se busca identificar cómo se relaciona la pérdida de cobertura vegetal con los escenarios de riesgo por movimientos en masa en Bogotá, más específicamente en la localidad de Sumapaz, recolectando información literaria que permita comprender las causas y efectos que pueda tener esta situación en una zona que se ha visto deteriorada por algún movimiento en masa, ayudando a conservar el medio ambiente y dándole mayor estabilidad a los suelos afectados. En resumen, esta investigación puede aportar múltiples beneficios en los temas del desarrollo ambiental, económico y social de la comunidad que se pueda ver afectada, llegando a tal punto de convertirse en una base o insumo importante como una medida de prevención y mitigación en el Plan Local de Gestión del Riesgo de la localidad minimizando costos económicos, sociales y ambientales.

### **3 Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Realizar la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa y su relación con la pérdida de cobertura vegetal mediante la aplicación de sistemas de información geográfica en la localidad de Sumapaz, Bogotá.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Analizar las características geológicas, topográficas, climáticas para identificar áreas con mayor susceptibilidad a presentar movimientos en masa
- Evaluar la relación de las características del terreno con el cambio de coberturas vegetales ocurrido en el periodo 2020-2024 en la localidad de Sumapaz
- Identificar las características de la distribución de la cobertura vegetal en la localidad de Sumapaz

## 4 Hipótesis

### 4.1 Hipótesis de trabajo

La reducción de la cobertura vegetal en la localidad de Sumapaz genera inestabilidad de los suelos, lo que genera una mayor ocurrencia de movimientos en masa.

#### 4.1.1 *Hipótesis nula*

La reducción de la cobertura vegetal no genera inestabilidad de los suelos ni ocurrencia de movimientos en masa en la localidad de Sumapaz.

**4.1.1.1 Hipótesis alterna.** La reducción de la cobertura vegetal en la localidad de Sumapaz se asocia significativamente con la inestabilidad de los suelos y con una mayor frecuencia de movimientos en masa

**4.1.1.1.1 Variables.** Las variables a considerar son la pendiente, curvatura, aspecto, geología, cobertura vegetal, geomorfología, curvatura, y catálogo de movimientos en masa.

## 5 Marco teórico

### 5.1 Suelo

El suelo es una capa en la superficie terrestre, en algunos sitios modificados o aun hechos por el hombre, que contienen materia viviente. Esta capa es capaz de soportar plantas y árboles creciendo al aire libre, adquiriendo del suelo el agua y nutrientes necesarios para subsistir y desarrollarse adecuadamente y con ello, adquiriendo un gran agarre en el suelo, aumentando la cobertura vegetal y contribuyendo a la flora y fauna de una zona en particular. (Uruguay, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2016)

De esta definición se ha analizado y revisado muchas conceptualizaciones permitiendo adaptar una definición distinta al concepto de suelo. El suelo es un componente natural con una característica particular que es un recurso multifuncional, ya que este mismo es muy variable y tiene una composición de materia orgánica, minerales y líquidos ocupando cierto espacio en las capas que conforman el suelo logrando detallar la capacidad del material de poder soportar las plantas que se arraigan al suelo en cualquier tipo de ecosistema natural. Agregado a esto, el recurso suelo equivale al 90% de la generación de alimentos, consolidándose un pilar para los seres vivos, porque además de lo que aporta, es un recurso no renovable y es un deber cuidarlo. (Navas Vásquez, 2010)

El suelo es un componente fundamental del ambiente, natural y finito, constituido por minerales, aire, agua, materia orgánica, macro y microorganismos que desempeñan procesos permanentes de tipo biótico y abiótico, cumpliendo funciones vitales para la sociedad y el planeta. A pesar de su importancia, el uso insostenible del suelo, entre otras actividades antrópicas, ocasiona su degradación, la cual resulta particularmente preocupante, por el efecto negativo en los ecosistemas, los organismos y las comunidades. (Sánchez, et al, 2017)

Burbano (2016) afirma que el suelo influye considerablemente sobre el medio en el que se ubica y repercute en las actividades sociales y económicas de los grupos humanos que se asientan en ese territorio. No obstante, suele dejarse de lado cuando se trata de recursos naturales

## 5.2 Cobertura vegetal

La cobertura vegetal en un terreno es lo que caracteriza un tipo de suelo, en esto se pueden encontrar objetos sobre la superficie como en el interior del suelo, puede ser de origen natural como los bosques, especies arbóreas endémicas de la zona, glaciares o hasta ríos, del mismo modo pueden ser de origen antrópico como la creación de carreteras, represas y ciudades o pueblos. Además, a esto, la cobertura vegetal está estrechamente relacionada por factores como el clima, la topografía, la calidad de suelos, la disponibilidad de agua en esa zona y los tipos de vegetación que hay en la zona. Cabe aclarar que la cobertura vegetal florece cuando las actividades humanas se ven minimizadas, esto es importante tenerlo en cuenta como un bioindicador para posteriores estudios y ver como la presencia de los seres humanos afectan de tal manera a un ecosistema (López et al., 2010).

## 5.3 Movimientos en masa

Este tipo de movimientos hace parte del proceso biológico natural de la tierra. Su ocurrencia en las distintas zonas se debe a una gran variedad de procesos geológicos, hidrometeorológicos, químicos y mecánicos que se presentan en la superficie terrestre y en el resto de sus capas morfológicas. Son aquellos movimientos, que a causa de la gravedad el suelo se desmorona y causa múltiples afectaciones tanto a seres vivos como a la infraestructura. Estos eventos, son impredecibles dado que, por lo general son imperceptibles al ojo humano pero que pueden adaptarse al terreno aumentando la velocidad y tamaño del deslizamiento (Proyecto Multinacional Andino, 2007).

Los deslizamientos de tierra son uno de los riesgos geológicos más críticos y destructivos. El desarrollo generalizado de actividades y asentamientos humanos, sumado a los efectos del cambio climático en el clima, está provocando un gran aumento en la frecuencia y el poder destructivo de los deslizamientos de tierra, lo que los convierte en una grave amenaza para la vida humana y la economía. (Monopoli, et al, 2024)

Las clasificaciones de movimientos en masa son numerosas, según sus autores, escuelas, países de origen o el perfil profesional de quienes tratan el tema. La mayoría de los autores adoptan como criterios de clasificación los mecanismos de falla de los movimientos, los tipos de materiales

involucrados, la actividad de los movimientos y su velocidad. Otros consideran factores tales como la edad, las formas de relieve (pendiente), su ubicación geográfica, el clima y la afectación de laderas, cauces o taludes construidos por el hombre. (Montero, 2017)

Sharpe (1938) desarrolló la primera clasificación sistemática de los movimientos en masa conocida en América<sup>1</sup>, considerada como una de las más completas. En principio realiza una diferenciación entre movimientos con una cara libre en el sentido de inclinación de las laderas y movimientos confinados sin cara libre en sentido descendente vertical, a los cuales denomina grupos mayores. A partir de los grupos mayores reconoce 16 tipos de movimientos.

En relación con los materiales menciona tres tipos: tierra, talus y roca, o mezcla de estos en tres ambientes geomorfológicos: glacial, que considera el efecto del transporte por hielo; fluvial, que tiene en cuenta el efecto del transporte por agua, y tropical o semejante, que considera que los materiales se desplazan con poca intervención del hielo o del agua.

En los tres casos, el desplazamiento se produce por la fuerza de gravedad, y en dos de ellos con alguna contribución selectiva de transporte por agua o por hielo. Por otra parte, en esta clasificación se discriminan los movimientos que se presentan a lo largo de las laderas, según la velocidad sea imperceptible o varíe de lenta a muy rápida. La separación de flujos y deslizamientos, y la consideración de un medio de transporte (glaciar o fluvial) ayudan a comprender mejor los mecanismos de los movimientos considerados dentro de cada subgrupo. (Montero. 2017)

---

<sup>1</sup> En esta clasificación, todos los movimientos con cara libre y debido a la gravedad se clasifican como deslizamientos, incluidas las caídas.

**Tabla 1***Clasificación de los movimientos en masa*

	Movimiento		Gravedad + transporte glacial	Gravedad	Gravedad + transporte fluvial
	Tipo	Tasa de velocidad	Tierra o roca + hielo	Tierra o roca + algo de hielo o agua	Tierra o roca + agua
Con cara libre	Flujo	Imperceptible o lento	Creep glacial de roca	Creep de roca	
				Creep de talus	
			Soliflucción	Creep de suelos	Soliflucción
		Lento a rápido	Avalancha de detritos		Flujo de tierra
				Flujo de lodo (ambiente semiárido alpino volcánico)	
				Avalancha de detritos	
	Tipo	Tasa de velocidad	Tierra o roca + hielo	Tierra o roca + algo de hielo o agua	Tierra o roca + agua

---

		Deslizamiento de detritos
		Caída de detritos
		Deslizamiento de roca
		Caída de roca
Sin cara libre	Subsidencia	Subsidencia

---

*Fuente: Elaboración a partir de Sharpe 1938.*

#### 5.4 Índice de susceptibilidad a deslizamientos

El índice de susceptibilidad a movimientos en masa, también conocido como índice de susceptibilidad a deslizamientos (LSI), es una medida estadística que permite calcular el nivel de propensión del terreno a presentar movimientos en masa considerando los valores ponderados de los factores condicionantes del terreno y sus propiedades intrínsecas sin tener en cuenta la probabilidad temporal. El LSI es una herramienta que permite identificar las áreas con mayor predisposición bajo condiciones similares

Van Westen (1997, 2008, 2019) desarrolló la metodología para el cálculo del índice, estableciendo el procedimiento de adecuación de los datos representativos de los factores desencadenantes y detonantes del evento de remoción en masa. Entre las variables que suelen considerarse para este cálculo se nombran frecuentemente la pendiente del terreno, el tipo y uso del suelo, la cobertura vegetal del terreno y un inventario histórico de deslizamientos para realizar corroboraciones del resultado final

Thanh, et al., (2022) describen la naturaleza bivariada de este modelo, donde se comparan dos variables entre sí, cada una con un peso calculado según su factor condicionante, donde el valor de índice es el resultado de la suma de estos pesos

Con el propósito de determinar la susceptibilidad a deslizamientos, las variables representadas mediante la cartografía analizan afecciones a la estabilidad del terreno como la geología, geomorfología, topografía y distancia a ríos. La elaboración de modelos cartográficos de susceptibilidad considera la calidad de datos, resolución espacial del área de trabajo y la metodología para el análisis y digitalización de las variables empleadas. El desarrollo de estos modelos considera enfoques cualitativos —como el método heurístico y método Mora-Vahrson-Mora (Ortiz Maestre. et al, 2024)—, cuantitativos (como el método determinístico y método estadístico) o la unión de ambos. Históricamente, los primeros modelos en desarrollarse constaban de datos cualitativos con aspectos geológicos y morfológicos de deslizamientos de laderas inventariadas. Progresivamente, fueron perfeccionándose e incluían análisis más robustos como los análisis de jerarquía analítica, bivariados, multivariados, regresión logística y lógica difusa (Cargua. et al., 2018)

## **5.5 Desarrollo sostenible**

En pocas palabras, el desarrollo sostenible busca una relación multidisciplinar, enfocado en el equilibrio económico, lo socio cultural y el medio ambiente. Este concepto es interesante y algo que se maneja en todos los países, dado que, se busca que todo sea un ciclo que, al usar tantos recursos ambientales, beneficie el medio económico y a la sociedad sin afectar al medio ambiente y viceversa. Se puede decir que estamos en la era del desarrollo sostenible, donde se busca la implementación de tecnologías sostenibles y renovables con el fin de abastecer los servicios básicos (Sachs, 2014).

## **5.6 Gestión del riesgo de desastres**

La gestión de riesgo de desastres es un proceso que tiene ciertas etapas, como el planeamiento, la aprobación y aplicación de políticas y herramientas que tienen como objetivo analizar, impedir, reducir, prever, mitigar y/o controlar los efectos que pueda traer consigo los fenómenos, sean naturales o de origen antrópico sobre los habitantes y el ambiente de una región (Maturana, 2011).

A partir de la expedición de la ley de gestión del riesgo de desastres (Ley 1523 de 2012), todos los municipios del país deben realizar estudios de riesgos naturales como parte esencial de las políticas encaminadas a la planificación del desarrollo seguro y a la gestión ambiental territorial sostenible.

## **5.7 Emergencia**

Es comprendido como una alteración intensa y grave de las condiciones normales dentro de una comunidad. Es causada por un evento que requiere de una reacción que exige la atención inmediata de las instituciones del Estado, los medios de comunicación y de la comunidad (Maturana, 2011). Una emergencia se caracteriza por su imprevisibilidad, lo que conlleva una respuesta rápida para controlar sus efectos ya que involucra una alta probabilidad de escalar a un peligro mucho mayor y comprometer la vida, salud propiedad o el entorno en el que se produce.

La definición oficial de emergencia se puede adaptar a contextos específicos mientras se amplía hacia temas globales. En Colombia, la Ley 1523 de (2012) describe las etapas de una emergencia y el proceso de ejecución de respuestas y recuperación desde el ámbito público, privado e institucional (Colombia, IDIGER, 2018)

## **5.8 Desastre**

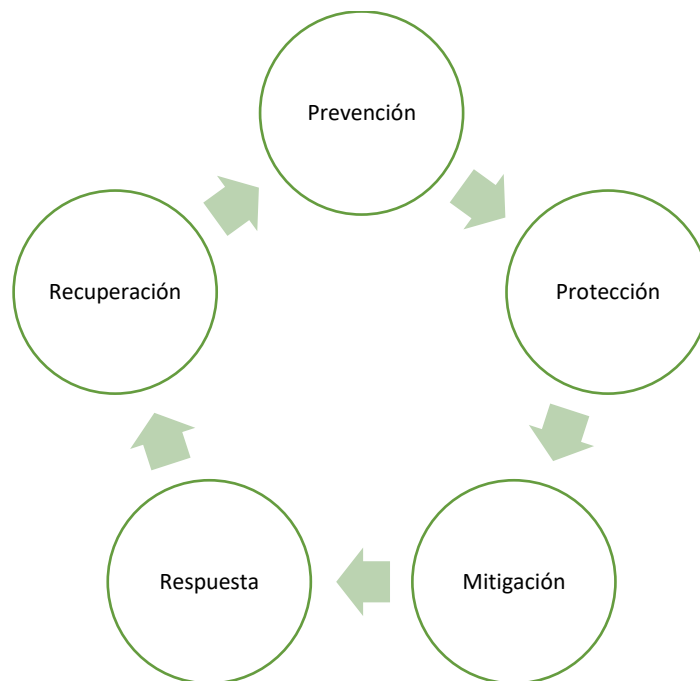
Los desastres son entendidos como afectaciones graves que interrumpen el funcionamiento de una comunidad excediendo su capacidad de respuesta. Y llegado el caso de sobrepasar la capacidad de una comunidad, obligan a la misma para solicitar asistencia de los niveles superiores que colaboren con la emergencia (Maturana, 2011).

Los desastres pueden ser causados por factores naturales, antropogénicos o tecnológicos, así como por diversos factores que influyen en la exposición de la comunidad. Algunos eventos solo obtienen la categoría de desastre cuando el fenómeno de origen supera cierta medición de un parámetro definido como una magnitud de normalidad. Los eventos más recurrentes en Colombia son las inundaciones y los deslizamientos de tierra. Los primeros son los que han arrojado el mayor número de pérdidas materiales como viviendas averiadas o destruidas, mientras que los últimos

son los desastres naturales que han generado el mayor número de afectados graves. (Ayala-García & Ospino-Ramos, 2023)

La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, 2020) indica que en un desastre se distinguen cinco etapas principales que pueden presentarse antes, durante o después del evento

**Figura 1**  
*Etapas de un desastre*



*Fuente: Elaboración a partir de FEMA 2020.*

Los efectos de los desastres varían de acuerdo a la gravedad observada, pudiendo tratarse de pérdidas económicas, ambientales o humanas, alterando el desarrollo social, cultural, económico y ambiental de la región, lo que deriva en pobreza y estancamiento. Cuando más se supere la capacidad de respuesta de las comunidades, más grave se vuelve el fenómeno.

## 5.9 Amenaza

La amenaza es básicamente un peligro latente que representa la probable manifestación de un fenómeno de origen natural o de origen antrópico, que puede producir efectos adversos en las personas, los bienes y servicios y en el ambiente.

De acuerdo a lineamientos del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2016), la amenaza se define como la probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa en un tiempo y lugar determinado, y puede calcularse como:

$$\text{Amenaza} = \text{Probabilidad espacial} \times \text{Probabilidad condicional de evento desencadenante}$$

Para determinar la amenaza por movimientos en masa, es necesario realizar la distinción entre suelo urbano y rural, debido a que la unidad de análisis y las metodologías varían según esta naturaleza. De esta manera, la unidad de análisis, es decir, el área que posee una serie de condiciones diferentes a las de la unidad contigua, puede ser tratada según celdas regulares tipo ráster. Estas deben ser definidas para cada sitio de estudio, según la calidad de los datos que se disponga, pero siempre teniendo como limitante las disposiciones mínimas exigidas dentro de la reglamentación (Ospina. et al., 2021).

## 5.10 Susceptibilidad

Es el grado de predisposición intrínseca de un elemento, territorio, sistema o componente físico a ser afectado por un fenómeno sin considerar la frecuencia, magnitud o duración de dichos eventos. La susceptibilidad no mide el riesgo ni la ocurrencia del fenómeno, sino la facilidad con que un territorio o elemento podría verse afectado, proporcionando una base esencial para la planificación territorial, la prevención de desastres y la toma de decisiones en materia de ordenamiento ambiental. Esta evaluación es atemporal, pues no depende de la ocurrencia de un evento desencadenante específico sino de los factores condicionantes que controlan la estabilidad del terreno.

La ocurrencia de deslizamientos es el producto de las condiciones geológicas, hidrológicas y geomorfológicas y la modificación de éstas por procesos geodinámicos, vegetación, usos de la

tierra y actividades humanas, así como la frecuencia e intensidad de las precipitaciones y la sismicidad. (Londoño Linares, 2017)

### **5.11 Vulnerabilidad**

La vulnerabilidad hace referencia al grado de afectación al que está expuesto un elemento en caso de ocurrencia de un evento amenazante. Este concepto abarca la predisposición o fragilidad de los seres humanos, sus medios de subsistencia y los sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo, los cuales pueden sufrir daños, pérdidas o interrupciones al enfrentarse a un peligro específico.

El nivel de vulnerabilidad depende de factores físicos, socioeconómicos y ambientales. A mayor vulnerabilidad, mayores serán los posibles daños ante una amenaza.

Los escenarios de vulnerabilidad se elaboran a partir de los escenarios de amenaza y consisten en identificar los tipos de daños esperados. Para esto, se consideran los elementos expuestos, como bienes físicos y personas, así como la fragilidad de estos frente al tipo de amenaza definida en el escenario evaluado. (Colombia, SGC, 2016)

### **5.12 Riesgo**

El riesgo está definido como la probabilidad de que se produzcan pérdidas o daños cuando una amenaza interactúa con elementos vulnerables. No se origina únicamente por la presencia de un fenómeno peligroso, sino por la coincidencia espacial y temporal entre una amenaza y un conjunto de elementos susceptibles a consecuencias adversas.

La vulnerabilidad y la amenaza, consideradas de manera aislada, no constituyen un peligro. Sin embargo, su combinación genera un riesgo, entendido como la probabilidad de que ocurra un desastre. Este concepto se representa comúnmente mediante la siguiente relación:

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza} \times \text{Vulnerabilidad}$$

El análisis del riesgo requiere considerar las causas y fuentes del riesgo, así como sus consecuencias y la probabilidad de que estas ocurran. Este análisis puede realizarse de manera

cualitativa, semicuantitativa o cuantitativa, relacionando la amenaza y la vulnerabilidad para determinar los posibles efectos sociales, económicos y ambientales, junto con sus probabilidades. (Colombia, SGC, 2016)

### **5.13 Ordenamiento territorial**

El ordenamiento territorial es un conjunto de acciones concertadas para orientar la transformación, ocupación y utilización de los espacios geográficos, a partir de las necesidades e intereses de la población, las potencialidades del territorio y la armonía con el medio ambiente, todo esto con el fin de promover el desarrollo social y económico (Hernández, et al., 2015).

En el contexto colombiano, la ley 1454 de 2011 (Colombia, Congreso de la República, 2011), define:

El ordenamiento territorial es un instrumento de planificación y de gestión de las entidades territoriales y un proceso de construcción colectiva de país, que se da de manera progresiva, gradual y flexible, con responsabilidad fiscal, tendiente a lograr una adecuada organización político administrativa del estado en el territorio, para facilitar el desarrollo institucional, el fortalecimiento de la identidad cultural y el desarrollo territorial, entendido este como desarrollo económicamente competitivo, socialmente justo, ambientalmente y fiscalmente sostenible, regionalmente armónico, culturalmente pertinente, atendiendo a la diversidad cultural y físico-geográfica de Colombia.

Es de interés mencionar el rigor técnico y científico con el que se parte para la elaboración de este instrumento con el fin de regular y orientar el desarrollo urbano y rural y proteger los recursos de la nación. Mediante estudios detallados que sustenten la realidad de la ocupación territorial se busca generar mecanismos de planificación y gestión del territorio que respondan a estrategias basadas en equidad, sostenibilidad y bienestar (Colombia, Secretaría Distrital de Planeación, 2019)

### **5.14 Plan de manejo ambiental**

También conocido como el PMA, es un documento detallado de medidas y actividades que, debido a una evaluación ambiental a una zona o establecimiento, están orientadas a prevenir,

mitigar, corregir y compensar los impactos ambientales que pueden identificar en la evaluación de la misma, los cuales pueden haber surgido por el desarrollo de un proyecto, obra o actividad (Colombia. Ministerio de Ambiente, 2015).

El PMA constituye una herramienta de gestión ambiental de imperativo cumplimiento, que busca además de identificar los aspectos ambientales del proyecto, prevenir los efectos negativos y diseñar estrategias para mitigar y compensar los impactos que se puedan ocasionar sobre el ambiente natural y social en el desarrollo y operación del mismo. (Proyecto BPUN 365, 2020)

Según el Decreto 555 de 2021 (Colombia, Alcaldía Mayor de Bogotá, 2021), un PMA contempla como mínimo los siguientes aspectos:

1. El alinderamiento y amojonamiento definitivo a partir de las áreas propuestas en el Plan de Ordenamiento Territorial. Zonificación ecológica de los sectores que por su condición requieren la aplicación de acciones de preservación y restauración ecológica.
2. Los aspectos técnicos de las acciones de preservación, restauración y aprovechamiento sostenible que son guiados por los lineamientos vigentes del Protocolo Distrital de Restauración y por el Plan de Manejo de Ecosistemas Estratégicos de Área Rural del Distrito Capital, de la Secretaría de Ambiente (SDA).
3. La definición de los equipamientos necesarios para la implementación de las acciones de preservación, restauración y aprovechamiento sostenible, atendiendo al régimen de uso del Plan y aplicándolo a las condiciones propias de cada categoría del sistema de áreas protegidas.

## 6 Metodología

El estudio empleó métodos cualitativos y cuantitativos para realizar un análisis integral de la susceptibilidad a movimientos en masa. En la fase cualitativa, se revisó la literatura y se recopiló información secundaria relevante sobre las condiciones físicas y ambientales del área de estudio. En la fase cuantitativa, se utilizaron herramientas SIG para analizar, integrar y cartografiar variables relacionadas con el terreno y otros factores ambientales.

El proceso se desarrolló en varias etapas y se fundamentó en la metodología del LSI, previamente utilizada en estudios para evaluar la susceptibilidad de diferentes zonas. Esta metodología permite identificar áreas con diversos niveles de inestabilidad del terreno, lo que facilita la toma de decisiones y la delimitación de zonas con alta susceptibilidad.

También se reunió información de bases de datos geográficas y ambientales que ofrecen análisis detallados sobre las coberturas del terreno. Esto ayudó a identificar zonas con alta susceptibilidad en Sumapaz. El objetivo final es crear un insumo técnico que contribuya a la mitigación y control de los movimientos en masa y que, a largo plazo, sirva como herramienta para la gestión y prevención de otros desastres naturales. (Romero Niño, et al.2024)

### 6.1 Procedimiento

#### 6.1.1 Fase I: *Obtención de Información*

**6.1.1.1 Actividad I. Definición del área de estudio:** En esta primera fase se definieron los límites geográficos del área en la cual se centró el análisis de pérdida de cobertura vegetal con el fin de implementar medidas de prevención. Para la identificación de la zona de estudio se reunió la cartografía básica proveniente del IDECA, la cual se encuentra resumida en la tabla 2:

**Tabla 2***Cartografía básica de la localidad de Sumapaz.*

Nombre	Geometría	Fuente
Límite político-administrativo	Polígono	Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital
Corregimientos	Polígono	Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital
Centros poblados	Punto	Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital
Cuerpos de agua	Línea	Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital
Drenajes	Línea	Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital
Malla vial integral	Línea	Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital

*Fuente: Elaboración a partir de IDECA 2025.*

Esta información sirvió como insumo complementario al estudio para funciones de delimitación y contextualización de las salidas gráficas generadas.

**6.1.1.2 Actividad II. Recopilación de artículos y estudios:** En esta actividad se planteó hacer una recopilación de literatura relacionada con el tema, incluyendo artículos científicos, estudios previos y normativa relacionada, también se consideraron conceptos técnicos emitidos por profesionales temáticos y estudios afines al tema de la gestión del riesgo y prevención de desastres cuya metodología pudo enriquecer el procedimiento para desarrollar el tema de estudio.

De igual forma se procedió a catalogar y comparar los documentos previamente recopilados para determinar su relevancia para el tema de estudio. El objetivo de esta fase es conocer los tipos de movimientos en masa que existen, sus características, causas, efectos, frecuencia y la probabilidad de ocurrencia en zonas similares a la zona de estudio, además de otras variables climáticas y geomorfológicas que pudieran ser de influencia en el análisis.

Una vez finalizada esta fase se realizó una clasificación y ajuste del material complementario de acuerdo al nivel de aporte que pudiera suministrar la información recopilada

### **6.1.2 Fase II: Análisis del terreno**

**6.1.2.1 Actividad I. Generación del modelo digital de elevación:** Durante esta fase se creó el DEM para observar con detalle la topografía de la zona y generar productos que permitan ilustrar las características de la zona. (Querejeta, 2015).

El modelo fue creado mediante las curvas de nivel obtenidas de la cartografía básica de la zona de estudio, el primer paso consistió en generar el TIN a partir de las curvas de nivel, para luego generar el DEM

**6.1.2.2 Actividad II. Definición de variables de interés:** En esta fase se procedió a realizar la identificación de las variables más relevantes para escenarios de susceptibilidad a movimientos en masa mediante el análisis de la literatura previamente catalogada para identificar factores morfológicos, geológicos y bióticos condicionantes de la ocurrencia de movimientos en masa, así como variables que influyen en la susceptibilidad, frecuencia e intensidad de estos eventos. Se evaluaron los factores condicionantes para la pérdida de vegetación y las condiciones del terreno. También se realizó una comparación con casos históricos de movimientos en masa o pérdida de vegetación que hayan ocurrido en zonas similares a la zona de estudio (Romero Rojas & Vázquez Jiménez, 2019)

A continuación, se detallan las variables que funcionaron como base para el cálculo del escenario de susceptibilidad:

- **Pendiente:** La pendiente del terreno se calculó con base en el DEM realizado a partir de las curvas de nivel de la localidad obtenidas de la cartografía básica mediante la herramienta Slope en el software ArcGIS Pro.
- **Curvatura del terreno:** La curvatura se calculó a partir del DEM generado para la zona de estudio mediante la herramienta Curvature en ArcGIS Pro.
- **Aspecto del terreno:** El aspecto se calculó a partir del DEM generado para la zona de estudio mediante la herramienta Aspect en ArcGIS Pro

- Geología del terreno: Para ilustrar la composición geológica del terreno se tomó la capa generada por el IDIGER adaptada según la metodología de Carvajal (2012)
- Geomorfología del terreno: Para ilustrar la composición geomorfológica del terreno se tomó la capa generada por el IDIGER adaptada según la metodología de Carvajal (2012)
- Coberturas vegetales: Para las coberturas de la tierra se tomó como referencia la capa de coberturas generada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) para el 2020, ajustada a la metodología Corine Land Cover (CLC) para Colombia
- Histórico de movimientos en masa: La capa de inventarios de movimientos en masa se tomó del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) del SGC, complementando los puntos manualmente mediante digitalización sobre imágenes tomadas de Google Earth para identificar huellas de movimientos en masa

Las variables estudiadas fueron representadas mediante capas geográficas vectoriales y ráster que ilustran el comportamiento, distribución e influencia para la zonificación, prestando atención a los metadatos (resolución, escala, fecha, precisión) que están definidos en las capas para lograr una precisión óptima. Los mapas temáticos utilizados para representar las capas se encuentran en la sección de resultados

**6.1.2.3 Actividad III. Obtención de imágenes satelitales:** En esta fase se procedió a compilar las imágenes satelitales que sirvieron como insumo del análisis espacial para estudiar el cambio de coberturas vegetales. De igual forma las imágenes sirvieron como insumo adicional para identificar algunas características relevantes del terreno (topografía, pendiente, clima, estado de la cobertura vegetal, tipo y uso del suelo, eventos previos de movimientos en masa). Se tuvo en cuenta que las imágenes cumplieran con los requisitos de cobertura del área de estudio y de calidad definida en cuanto a criterios de búsqueda, los cuales se encuentran resumidos en la sección de resultados

### **6.1.3 Fase III: Cálculo del índice de susceptibilidad**

**6.1.3.1 Actividad I. Cálculo del índice de susceptibilidad:** En esta fase se realizó el proceso de generación de capas temáticas mediante la conversión de los datos vectoriales a datos ráster, esto con el fin de estructurar el catálogo de objetos para aplicar el cálculo del índice LSI.

Se realizó un remuestreo a 20m a todos los rústers para mantener la integridad espacial entre todas las capas, posteriormente se realizó una reclasificación para cada categoría de los rústers convertidos

El mapa de susceptibilidad se obtuvo a partir de la sumatoria de los pesos de evidencia calculados para cada una de las clases de las variables.

**6.1.3.2 Actividad: IV. Análisis temporal de coberturas:** En esta fase se llevó a cabo el análisis de cambio de coberturas mediante una clasificación supervisada en las imágenes satelitales para establecer cómo ha cambiado el terreno de acuerdo a la pérdida de vegetación y como ha sido el impacto en los escenarios de movimiento en masa con el fin de establecer una relación de causa y efecto entre ambos fenómenos

### **6.1.4 Fase IV: Sintetización de resultados**

**6.1.4.1 Actividad I. Elaboración de mapa de susceptibilidad:** En esta fase se elaboró el mapa de susceptibilidad de la zona de estudio integrando los resultados del cálculo del LSI con las zonas identificadas como susceptibles a movimientos en masa.

Finalmente se interpretaron los resultados de la clasificación de la cobertura vegetal para el año 2024, discutiendo la influencia del cambio de cobertura en el período temporal estudiado con la vulnerabilidad del terreno a los movimientos en masa. Se realizó también la comparación de los escenarios de zonificación durante el año 2020 y el 2024, representando la diferencia en a la susceptibilidad mediante un mapa.

**6.1.4.3 Actividad II. Elaboración de conclusiones:** Durante esta fase se elaboró del documento final que contiene todos los hallazgos obtenidos durante las fases anteriores del proceso

de análisis, acompañado de los productos geográficos que permiten sustentar los resultados del estudio y su respectivo análisis.

## 7 Resultados

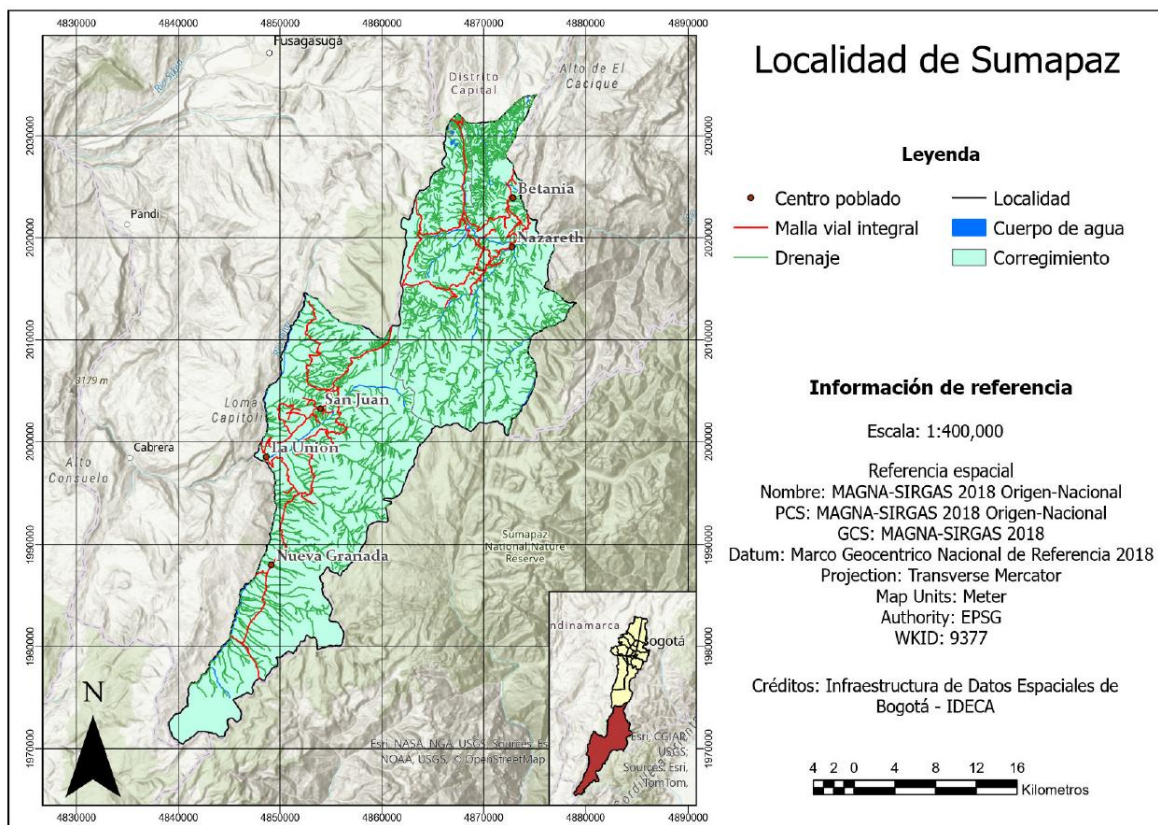
### 7.1 Descripción de la zona de estudio

La localidad de Sumapaz se ubica al sur del caso urbano de Bogotá sobre la cordillera oriental de los Andes colombianos, entre los 2700 y 4100 m.s.n.m. Limita al norte con las localidades de Usme y Ciudad Bolívar; al sur con los departamentos de Huila y Meta, al oriente con los municipios de Une y Gutiérrez y al occidente con los municipios de Pasca, Arbeláez, San Bernardo y Cabrera, Sumapaz es la localidad más extensa de las 20 que conforman el distrito y única con carácter netamente rural; por esta razón, se divide en Unidades de Planeamiento Rural (UPR), centros poblados y veredas en lugar de Unidades de Planeamiento Zonal (UPZ) o barrios. Entre los centros poblados de mayor relevancia se encuentran Betania y Nazaret, ubicados la norte, y La Unión, Nueva Granada y San Juan de Sumapaz al sur.

Parte de la localidad se encuentra ubicada dentro de los límites del Páramo de Sumapaz, lo que le confiere a la localidad una abundante presencia de drenajes naturales y nacimientos de cuerpos de agua, entre lo que se destacan los ríos Sumapaz, Blanco y Nevado. Predomina el ecosistema de páramo, con vegetación típica como frailejones, pajonales y musgos. Presenta un clima frío de montaña y de páramo, con temperaturas que oscilan entre 0 °C y 12 °C dependiendo de la altitud.

La cartografía básica de la localidad de Sumapaz es como se muestra en la figura 2.

**Figura 2**  
*Localidad de Sumapaz*

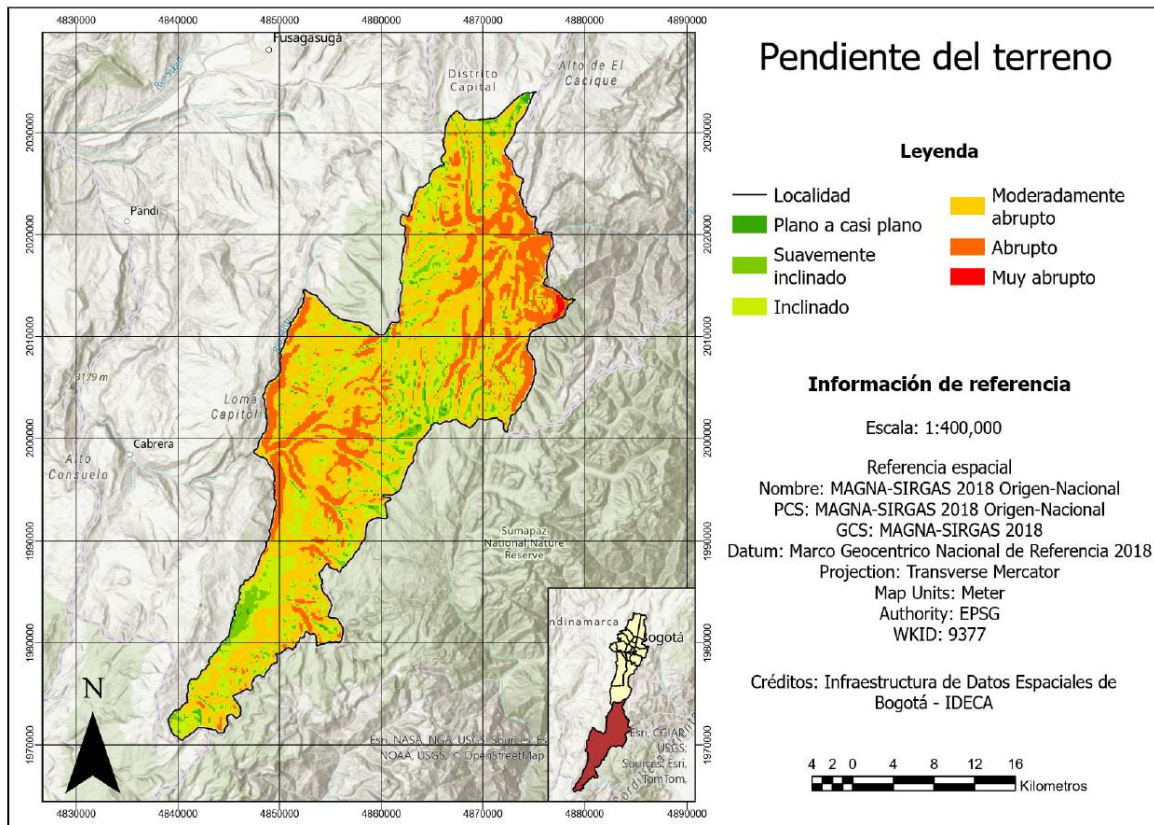


*Fuente: Elaboración a partir de IDECA 2025.*

## 7.1 Pendiente

La pendiente está definida como el grado de inclinación de la superficie del terreno con respecto a la horizontal, la cual puede representarse en porcentaje o grados (Rendón, et al, 2017). Para la zona de estudio se realizó una reclasificación de los resultados calculados de acuerdo a los lineamientos definidos por el SGC para las pendientes calculadas en grados, lo cual se encuentra representado en la figura 2, detallando su descripción en la tabla 3. Según se puede apreciar en el mapa la mayoría del territorio presenta una pendiente moderadamente abrupta, destacando zonas al noreste y al suroeste donde la pendiente asciende a abrupta

**Figura 3**  
*Mapa de pendiente del terreno*



*Fuente: Elaboración a partir de IDECA 2025.*

**Tabla 3**  
*Pendiente del terreno*

Categoría	Inclinación (°)	Descripción
Plano a casi plano	0-2	No hay denudación apreciable
Suavemente inclinado	2-4	Susceptible a desarrollar movimientos en masa de baja velocidad y procesos erosivos

---

Inclinado	4-8	Alta susceptibilidad a presentar procesos erosivos
Moderadamente abrupto	8-16	Movimientos en masa de todos los tipos, Susceptible a erosión y deslizamientos
Abrupto	16-35	Procesos denudacionales intensos de diferentes tipos. Alta propensión a desarrollar procesos erosivos
Muy abrupto	35-55	Afloramientos rocosos. Procesos denudacionales muy fuertes

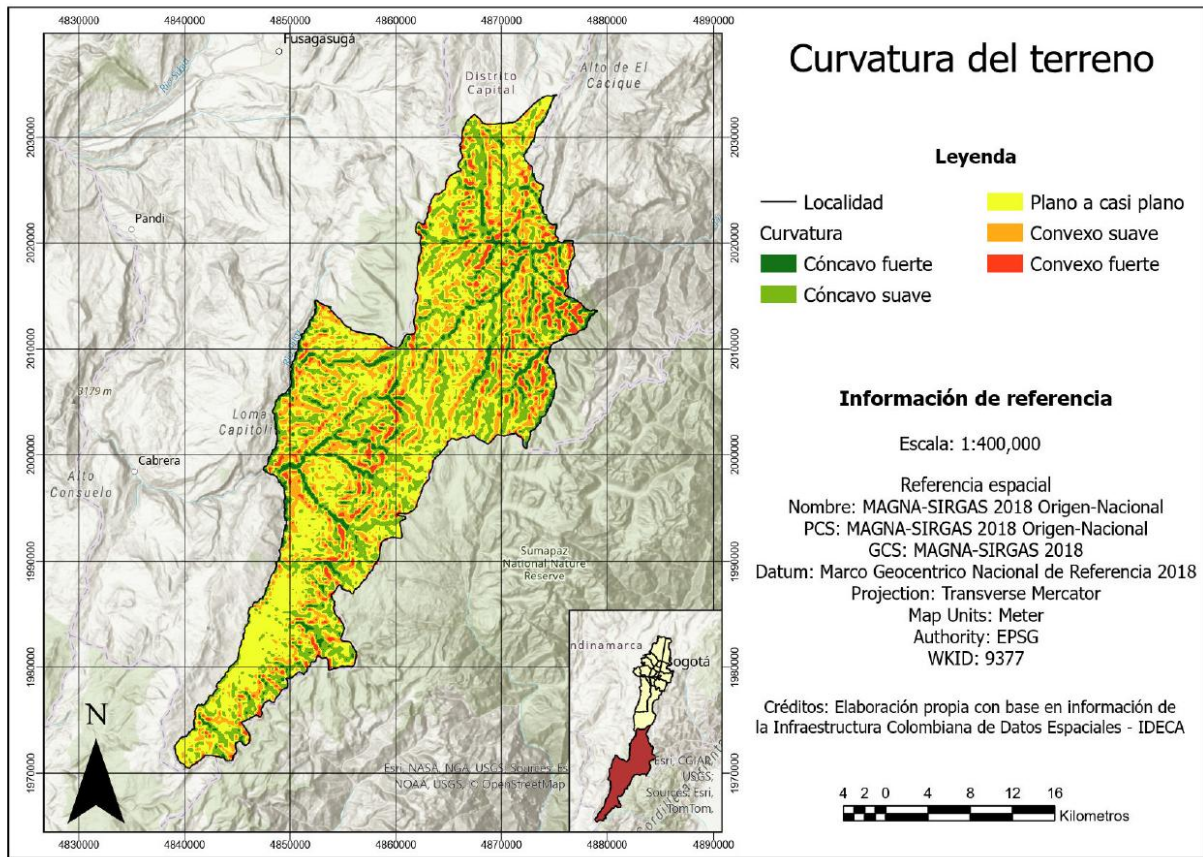
---

*Fuente: Elaboración a partir de IDECA 2025.*

## **7.2 Curvatura**

La curvatura del terreno es como se aprecia en la figura 4, detallando su descripción en la tabla 4. Para su representación cartográfica se realizó una reclasificación en cinco clases manuales para ilustrar los rangos de curvatura. En general, la curvatura del terreno es plana a casi plana, pueden observarse zonas con curvatura cóncava que recorren el territorio de forma transversal

**Figura 4**  
*Mapa de curvatura del terreno*



Fuente: Elaboración a partir de IDECA 2025.

**Tabla 4**  
*Curvatura del terreno*

Categoría	Rango
Cóncavo fuerte	-0.5 – -0.1
Cóncavo suave	-0.1 - -0.02
Plano a casi plano	-0.02 – 0.04
Convexo suave	0.04 – 0.13
Convexo fuerte	0.13 – 0.72

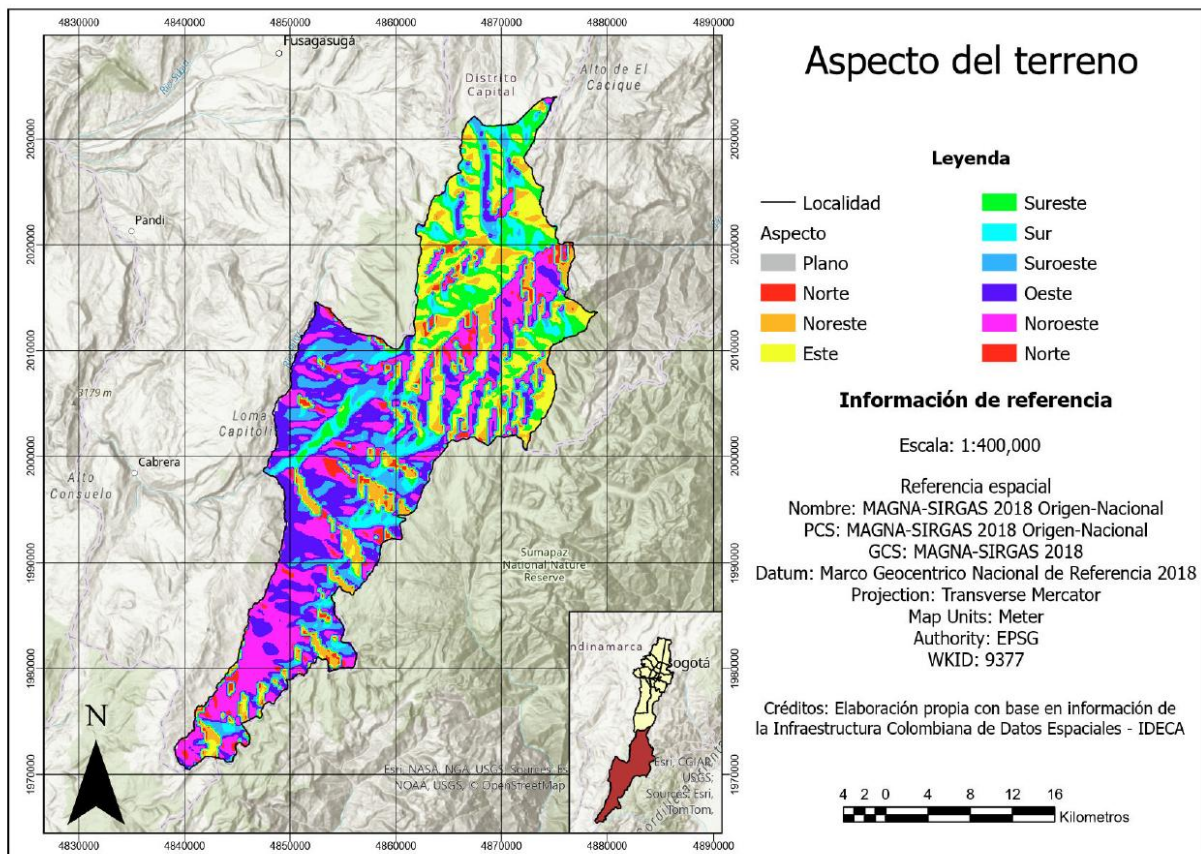
Fuente: Elaboración a partir de IDECA 2025.

### 7.3 Aspecto

El aspecto del terreno hace referencia a la orientación de la pendiente más inclinada en un punto dado de la superficie del terreno determinada en grados medidos en el sentido horario, para la zona de estudio el aspecto es como se muestra en la figura 5, detallando su descripción en la tabla 5. Para ilustrarlo se realizó una reclasificación en diez clases manuales para representar los rangos de aspecto. El aspecto de la localidad se encuentra dividido, presentando la parte norte un aspecto orientado al este y al sureste con algunas zonas orientadas al noroeste. Mientras tanto la parte sur de la localidad presenta su terreno mayormente orientado al este y noroeste

**Figura 5**

*Mapa de aspecto del terreno*



Fuente: Elaboración a partir de IDECA 2025.

**Tabla 5***Aspecto del terreno*

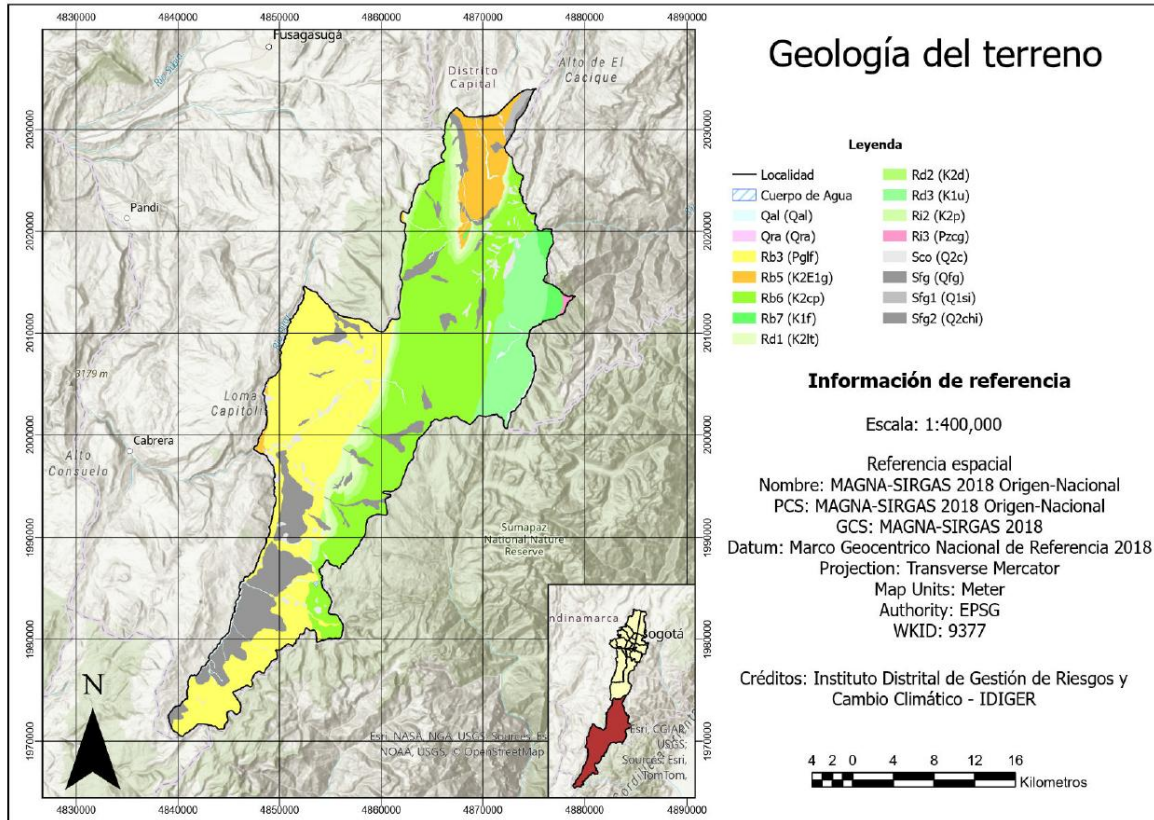
Categoría	Rango (°)
Plano	-1
Norte	0 – 22.5
Noreste	22.5 – 67.5
Este	67.5 – 112.5
Sureste	112.5 – 157.5
Sur	157.5 – 202.5
Suroeste	202.5 – 247.5
Oeste	247.5 – 292.5
Noroeste	292.5 – 337.5
Norte	337.5 - 360

*Fuente: Elaboración a partir de IDECA 2025.*

## 7.5 Geología del terreno

La geología del terreno se tomó de la capa geográfica generada por el IDIGER adaptada según la metodología de Carvajal (2012), la cual se representa en la figura 6, se incluye una descripción breve de cada unidad geológica en la tabla 6. La geología del terreno se compone principalmente de rocas sedimentarias, siendo la principal unidad geológica la lutita gris oscuro a negra con intercalaciones menores de limolitas silíceas, calizas arenáceas, arenitas de grano fino, seguida en distribución por lodolita y limolita grises rojiza y blanca, intercalada con arenita lítica

**Figura 6**  
*Mapa de geología del terreno*



Fuente: Elaboración a partir de IDIGER 2025.

**Tabla 6**  
*Geología del terreno*

Unidad	Descripción	Área (ha)
Cuerpo de Agua	Cuerpo de Agua	23.54
Qal (Qal)	Depósitos actuales no consolidados del cauce y orillas de los drenajes. Conformados por bloques, cantos, gravas y arenas, de composición heterogénea	1313.78

Qra (Qra)	Rellenos antrópicos	3.20
Rb3 (Pglf)	Secuencia de lodolitas y limolitas grises rojizas y blancas, intercaladas con arenitas líticas en capas gruesas	21332.87
Rb5 (K2E1g)	Secuencia predominante de arcillolitas gris claras y abigarradas, con intercalaciones de niveles de cuarzoarenitas de colores grises de grano fino a medio en capas delgadas, y limolitas; con esporádicos mantos de carbón	4257.89
Rb6 (K2cp)	Conformada por gruesos niveles de lutitas gris oscuro a negras con intercalaciones menores de limolitas silíceas, calizas arenáceas, arenitas de grano fino y hacia la base esporádicos mantos de carbón.	24498.19
Rb7 (K1f)	Alternancia de lutitas negras gris oscuro a negras, con areniscas y capas delgadas de caliza.	870.47
Rd1 (K2lt)	Secuencia de areniscas color blanco y gris claro de grano fino a grueso, en capas gruesas a muy gruesas en general friables con intercalaciones de capas delgadas de arcillolitas y limolitas	2097.43
Rd2 (K2d)	Secuencia predominante de areniscas de grano fino ocasionalmente grano medio a grueso en estratos delgados a muy gruesos con intercalaciones menores de lodolitas y limolitas silíceas	2673.33
Rd3 (K1u)	Estratos de cuarzo areniscas gris claro a blanco, de grano fino a grueso, en capas muy gruesas con delgadas intercalaciones de lodolita gris oscura	6698.40

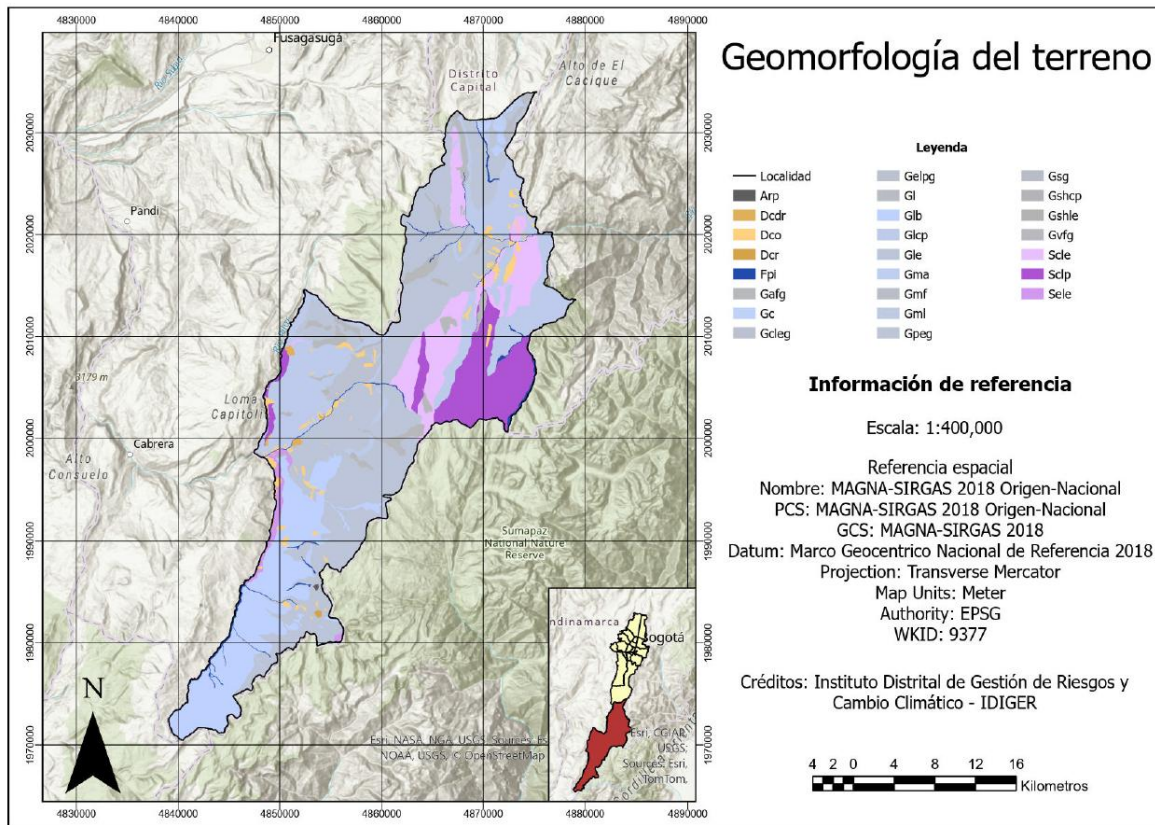
Ri2 (K2p)	Secuencia interestratificada de estratos muy delgados a delgados de arcillolitas silíceas, limolitas silíceas y arcillolitas, con intercalaciones de areniscas de grano fino en la parte superior. En general fracturadas.	1861.59
Ri3 (Pzcg)	Alternancia de limolitas y areniscas de color rojizo a verdoso, con intercalaciones lenticulares de arenisca de grano grueso a conglomerático. Interdigitaciones de niveles calcáreo	116.31
Sco (Q2c)	Depósitos de ladera procedentes de movimientos de remoción en masa, de composición heterogénea (bloques y fragmentos angulosos en matriz arenarcillosa) y espesor variado	1749.99
Sfg (Qfg)	Bloques, cantos y gravas	9795.83
Sfg1 (Q1si)	Depósito de gravas con intercalaciones de arenas, arcillas orgánicas y paleosuelos	366.82
Sfg2 (Q2chi)	Depósitos morrénicos de fragmentos de roca subangulares a subredondeados con tamaños de grandes bloques, envueltos en matriz arenosa	287.24

*Fuente: Elaboración a partir de IDIGER 2025.*

## 7.6 Geomorfología del terreno

La geomorfología del terreno se tomó de la capa geográfica generada por el IDIGER adaptada según la metodología de Carvajal (2012), la cual se encuentra representada en la figura 7, se incluye una breve descripción de cada unidad geomorfológica en la tabla 7. El tipo de suelo que domina el territorio es el suelo glacial, siendo las laderas estructurales y las laderas de contrapendiente estructural las que tienen mayor presencia

**Figura 7**  
*Mapa de geomorfología del terreno*



Fuente: Elaboración a partir de IDIGER 2025.

**Tabla 7**  
*Geomorfología del terreno*

Nomenclatura	Descripción	Área (ha)
Arp	Represas	23.54
Dcdr	Conos de deslizamiento rotacional recientes y antiguos	170.09
Dco	Conos y lóbulos coluviales y de solifluxión	1627.95

---

Dcr	Cerros residuales	41.02
Fpi	Planicies o llanuras de inundación (Fpi)	1290.59
Gafg	Abanicos fluvioglaciares	2375.65
Gc	Circos glaciares y de nivación	59.73
Gceg	Ladera estructural de espinazo glaciado	1059.67
Gelpg	Ladera de contrapendiente de espinazo glaciado	142.75
Gl	Lago glaciar	17.56
Glb	Conos y lóbulos de gelifracción	12381.15
Glcp	Ladera de contrapendiente estructural glaciada	14304.26
Gle	Ladera estructural glaciada	28677.07
Gma	Morrenas de ablación	93.78
Gmf	Morrena lateral	7.92
Gml	Morrena lateral	91.97
Gpeg	Planchas y espolones estructurales glaciados	58.83
Gsg	Planicies glaciolacustrinas	329.42

---

Gshcp	Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal glaciada	32.06
Gshle	Ladera estructural de sierra homoclinal glaciada	5.62
Gvfg	Valles o artesas glaciares	513.16
Scle	Ladera estructural de cuestras denudadas y residuales	7037.69
Sclp	Ladera estructural de cuestras denudadas y residuales	6806.91
Sele	Ladera estructural de espinazo denudado	798.24

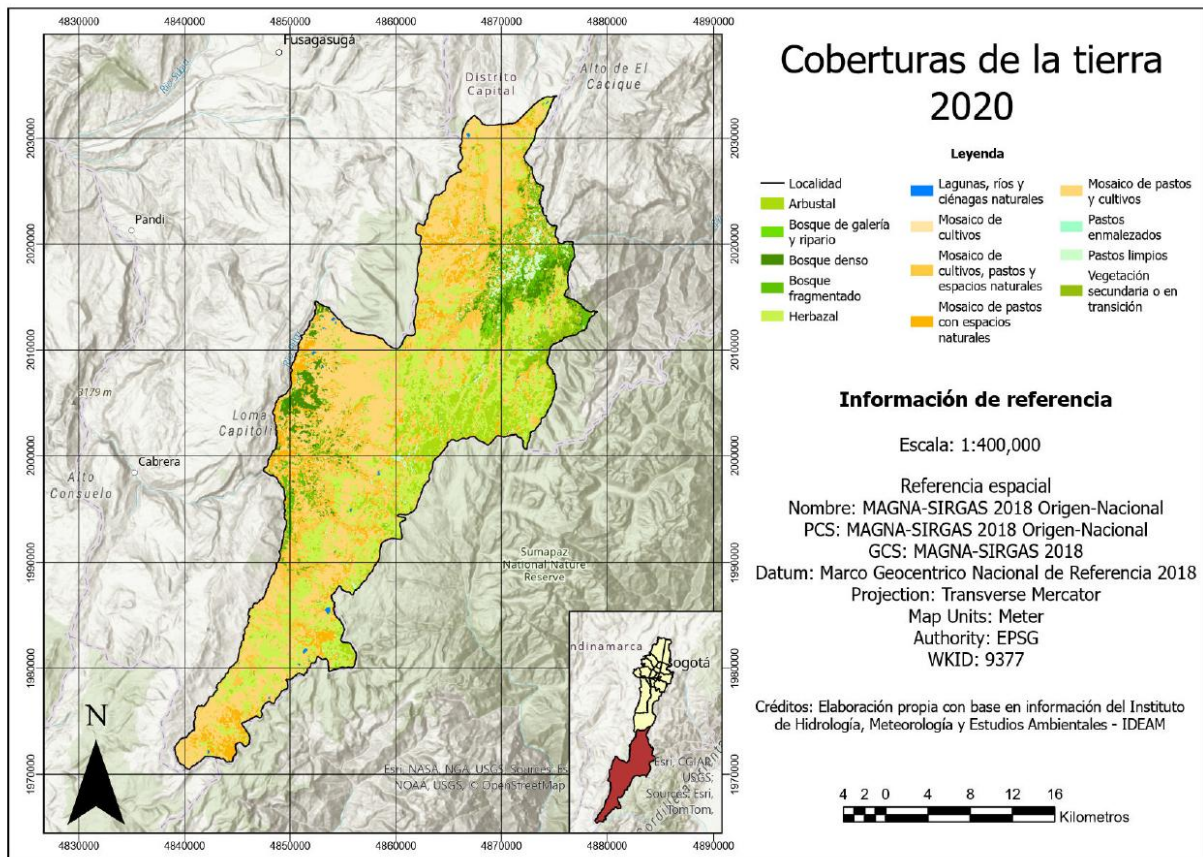
---

*Fuente: Elaboración a partir de IDIGER 2025.*

### **7.7 Coberturas de la tierra**

Las coberturas de la tierra se tomaron de la capa de coberturas generada por el IDEAM para el 2020, ajustada a la metodología CLC para Colombia. Las coberturas presentes en la zona son como se muestran en la figura 8, se incluye una breve descripción de cada categoría en la tabla 8. El tipo de cobertura que más se presenta en la localidad son los mosaicos de cultivos, ocupando gran parte del territorio, también se evidencian zonas herbáceas y arbustivas, y escasa cobertura boscosa

**Figura 8**  
*Mapa de coberturas de la tierra 2020*



Fuente: Elaboración a partir de IDEAM 2020.

**Tabla 8**  
*Coberturas de la tierra CLC para 2020*

Cobertura	Área (ha)
Pastos limpios	1646.11
Pastos enmalezados	21
Mosaico de cultivos	270.07

---

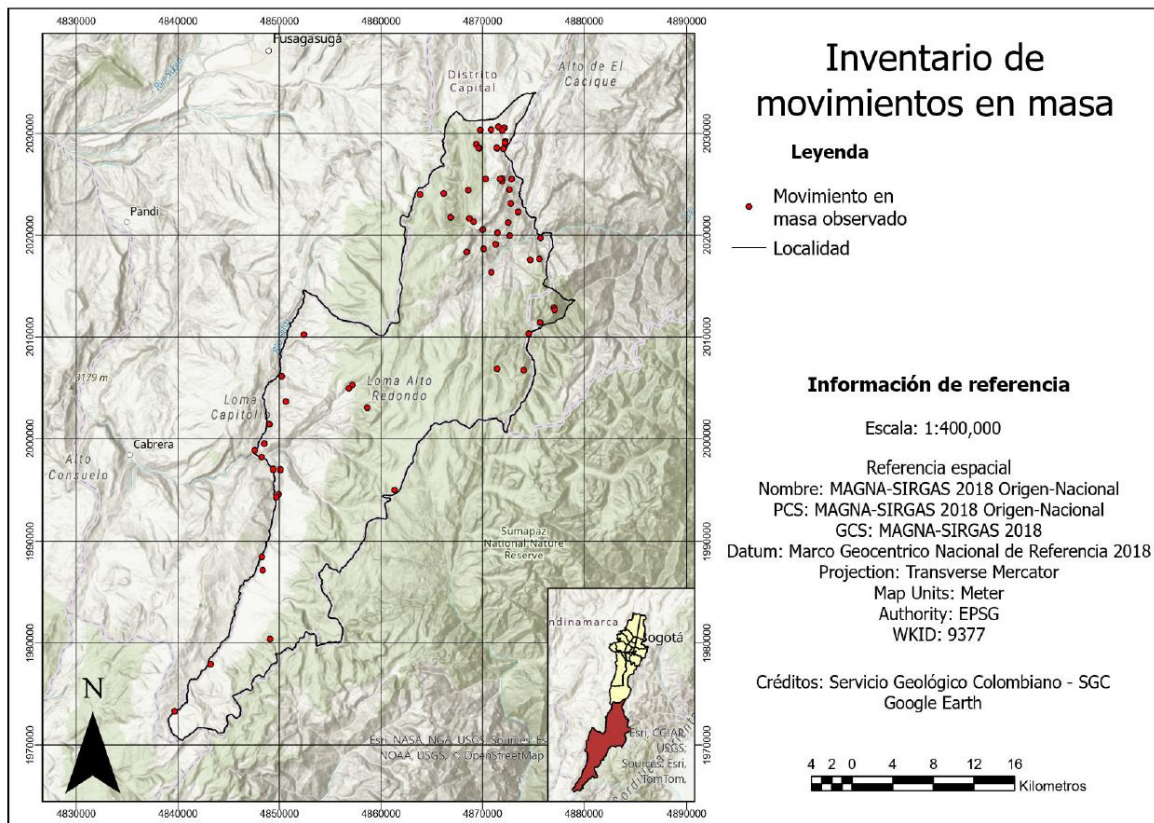
Mosaico de pastos y cultivos	24027.22
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	12455.76
Mosaico de pastos con espacios naturales	6105.40
Bosque denso	2532.19
Bosque fragmentado	2570.91
Bosque de galería y ripario	604.47
Herbazal	18585.36
Arbustal	5845.95
Vegetación secundaria o en transición	3082.04
Ríos, lagos y ciénagas naturales	189.53

---

*Fuente: Elaboración a partir de IDEAM 2020.*

### **7.8 Inventario de movimientos en masa**

La información histórica de movimientos en masa se tomó del aplicativo SIMMA del SGC, complementando los puntos manualmente mediante digitalización sobre imágenes tomadas de Google Earth para identificar huellas de movimientos en masa. El inventario de movimientos en masa es como se muestra en la figura 9. Se puede observar que la mayoría de movimientos en masa registrados ocurren en la zona noreste de la localidad

**Figura 9***Mapa de inventarios de movimientos en masa*

Fuente: Elaboración a partir de SGC 2025.

### 7.9 Zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa

Para realizar la ponderación de las variables condicionales del terreno se utilizó el método de Pesos de Evidencia. Para el cálculo de los pesos equivalentes se utilizó la fórmula de cálculo de pesos de evidencia propuesta por Van Westen (2008). La fórmula se describe a continuación

$$W_i = \ln \frac{DenClase}{DenMapa} = \ln \frac{Area(S_i) / Area(N_i)}{\sum Area(S_i) / \sum Area(N_i)}$$

Donde:

$W_i$ : Peso de Evidencia calculado para cada clase de la variable

$Ln$ : Logaritmo natural

$DenClase$ : Densidad de movimientos en masa identificados en una clase determinada

DenMapa: Densidad de movimientos en masa identificados en toda el área de estudio

Area(Si): Area de movimientos en masa identificada en una clase determinada

Area(Ni): Area total de la clase determinada

El cálculo de áreas se realizó mediante la herramienta Tabulate Area en ArcGIS Pro, convirtiendo el resultado final en hectáreas

Para el cálculo del porcentaje de aporte de las variables se utilizó la siguiente fórmula:

$$Aporte = \frac{|Wi|}{\sum_{j=1}^n |Wj|} \times 100$$

Donde:

|Wi|= Valor absoluto del peso general de la variable

A continuación, se presentan los resultados por cada variable. Para conocer con detalle los pesos calculados para cada clase consultar el anexo 1

El cálculo de pesos de evidencia para cada variable condicionante es como se muestra en la tabla 9

**Tabla 9**

*Pesos de evidencia para las variables condicionantes*

Variable	Peso general	Aporte (%)
Pendiente	0.6843	15.6496
Curvatura	0.0419	0.9596
Aspecto	0.5626	12.8655

---

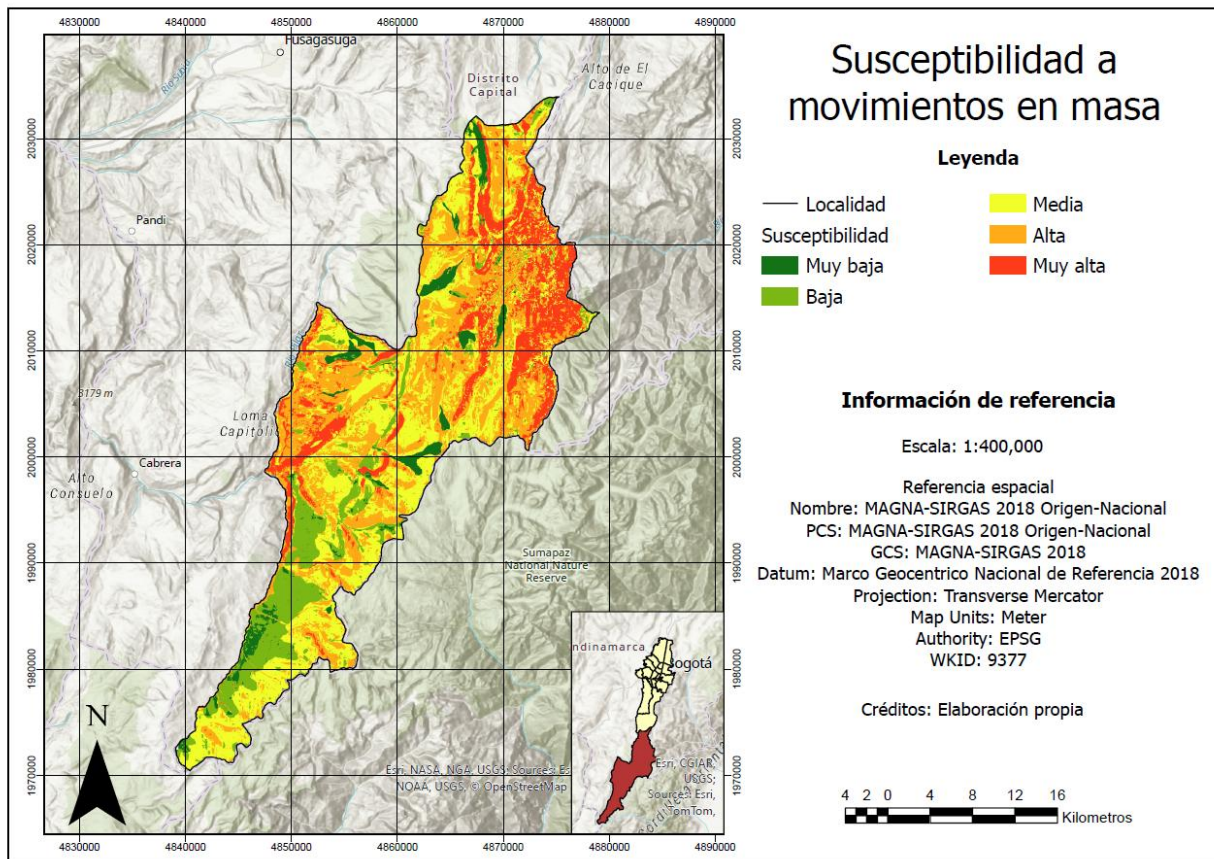
Geología del terreno	1.7430	39.8585
Geomorfología del terreno	1.1334	25.9171
Coberturas de la tierra	0.2077	4.7495

---

*Fuente: Elaboración propia.*

El resultado final de aplicar la metodología LSI para calcular la susceptibilidad del terreno a los movimientos en masa es como se muestra en la figura 10, detallando su clasificación en la tabla 15. Se reclasificó el resultado final en cinco clases mediante cortes naturales para expresar la probabilidad de ocurrencia (muy bajo, bajo medio, alto, muy alto). Se puede apreciar que la mayoría del territorio presenta una susceptibilidad media a alta, especialmente en la zona norte y noreste en tanto que hacia el sur la susceptibilidad pasa a ser media a baja

**Figura 10**  
*Mapa de Susceptibilidad del terreno a movimientos en masa*



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 10**  
*Área total por categoría de susceptibilidad*

Categoría	Área (ha)
Muy baja	3412.02
Baja	9833.92
Media	24302.26

---

Alta	26938.27
Muy alta	12629.70

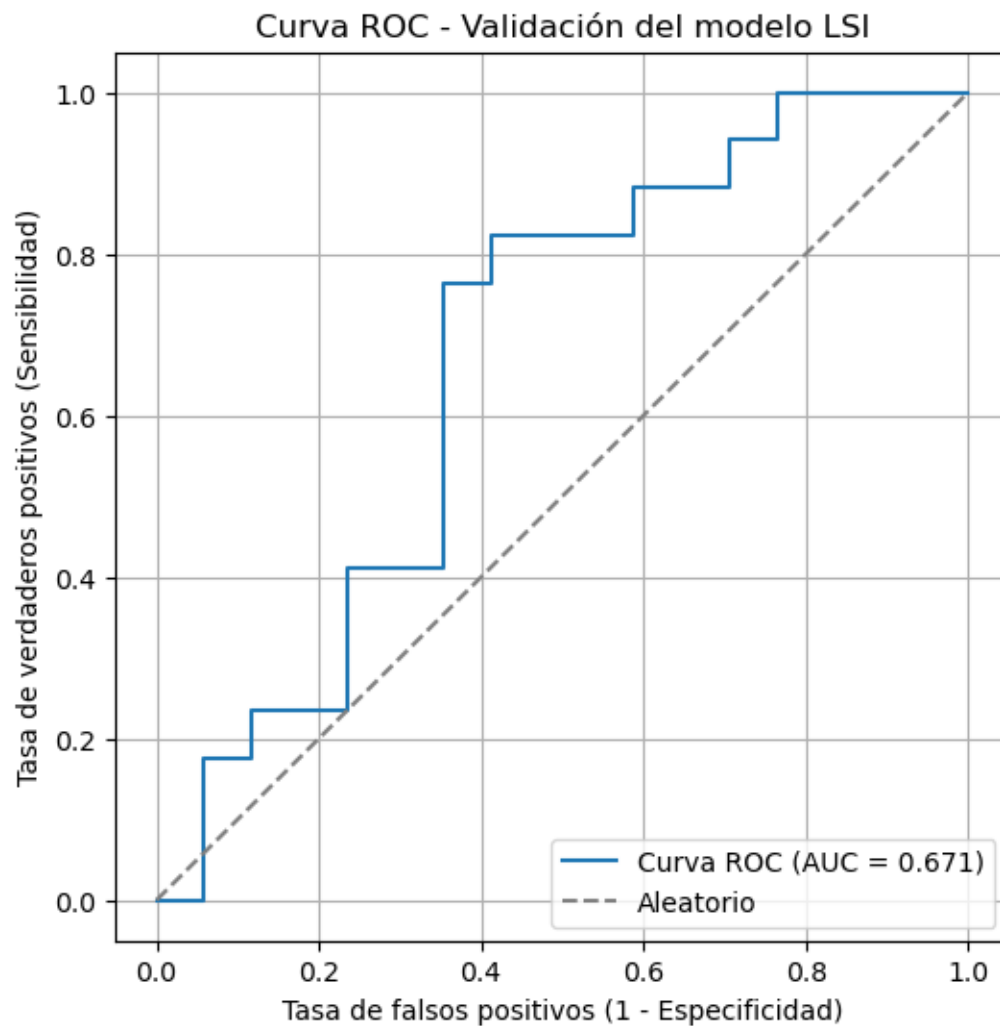
---

*Fuente: Elaboración propia.*

### **7.10 Validación del resultado**

Se realizó una validación del modelo mediante el método ROC/AUC para verificar la veracidad del resultado, para esto se complementó la capa de inventarios de movimientos en masa con una simulación de puntos aleatorios en la zona de estudio marcados como ausencia de movimientos en masa para luego asignarles un valor de LSI mediante la herramienta Extract Multi Values to Points en ArcGIS Pro, posteriormente se tomó el 70% de estos puntos para entrenar el modelo de validación en tanto que el 30% se utilizó para validar el resultado final, el gráfico resultante del AUC se presenta en la sección de resultados

La gráfica de la curva ROC/AUC es como se muestra en la figura 11. El script de validación se encuentra en el anexo 4

**Figura 11***Validación del modelo LSI*

*Fuente: Elaboración propia.*

### 7.11 Coberturas de la tierra para el 2024

Las imágenes seleccionadas para llevar a cabo el análisis de coberturas son del tipo Sentinel 2 con resolución de 20m descargadas desde el portal Copernicus. Para los criterios de selección se hizo especial énfasis en datos que cubrieran la temporalidad definida entre el 1 y el 31 de enero de 2024 y el porcentaje de nubosidad presente, siendo este no mayor al 20%

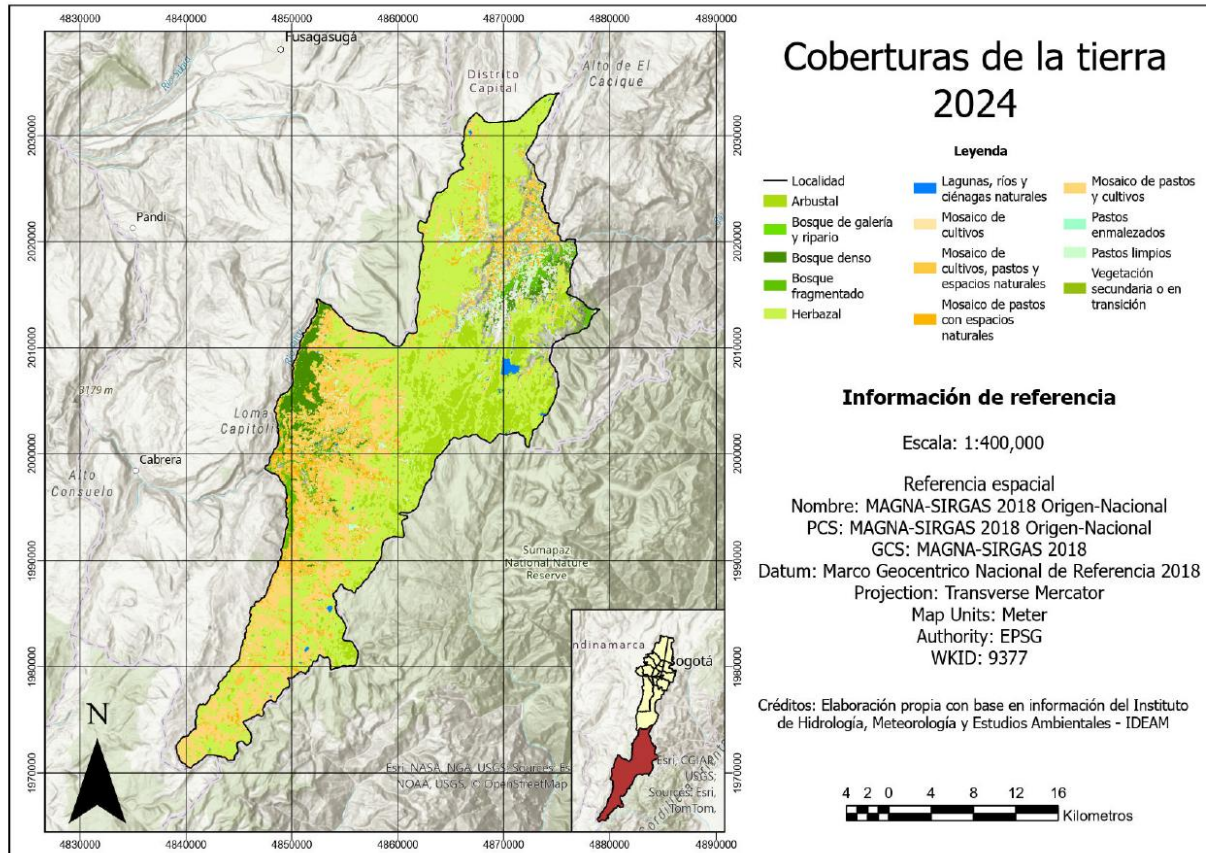
Las combinaciones de bandas utilizadas para tomar las muestras de píxeles y entrenar el algoritmo de clasificación supervisada Random Forest (RF) son las siguientes:

- Vegetación saludable vs no saludable (R=8 G=4 B=3)
- Bosques densos vs fragmentados (R=7 G=6 B=5)
- Áreas húmedas vs bosques de galería (R=11 G=8 B=3)
- Suelos descubiertos vs mosaicos agrícolas (R=12 G=11 B=4)
- Agua vs vegetación (R=4 G=3 B=2)

Para realizar la clasificación supervisada primero se tuvo en cuenta la resolución apta para trabajar las coberturas de la zona (20m), siendo necesario realizar un proceso de remuestreo de algunas bandas espectrales de las imágenes Sentinel2 para equilibrar la resolución de los píxeles y mejorar la precisión. Posterior a esto se realizó el entrenamiento del modelo de clasificación Random Forest en ArcGIS Pro mediante la toma de muestras de las coberturas observadas en las imágenes tomando como referencia la capa oficial de coberturas vegetales del IDEAM y utilizando varias combinaciones de bandas para identificarlas. Finalmente se realizó un proceso de filtrado por mayoría de los píxeles para corregir errores de interpretación del modelo

El resultado de la clasificación supervisada de las coberturas vegetales para el año 2024 es como se muestra en la figura 12, detallando su descripción en la tabla 16. Se puede observar un cambio en las coberturas, en especial en la cobertura herbácea la cual aumentó su extensión debido al abandono de cultivos ya que también se aprecia que la cobertura de cultivos presenta una disminución notable. Esto sumado a la presencia de áreas declaradas en protección contribuye a la recuperación de la cobertura. También se aprecia la aparición de nuevos cuerpos de agua debido a la acumulación en el terreno

**Figura 12**  
*Mapa de coberturas de la tierra para el 2024*



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 11**  
*Coberturas de la tierra CLC para 2024*

Cobertura	Área (ha)
Pastos limpios	2553.52
Pastos enmalezados	22.45
Mosaico de cultivos	400.30

---

Mosaico de pastos y cultivos	11680.86
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	7684.36
Mosaico de pastos con espacios naturales	2817.74
Bosque denso	2877.11
Bosque fragmentado	2239.66
Bosque de galería y ripario	238.07
Herbazal	32522.17.66
Arbustal	9332.64.79
Vegetación secundaria o en transición	5197.38
Ríos, lagos y ciénagas naturales	371.84

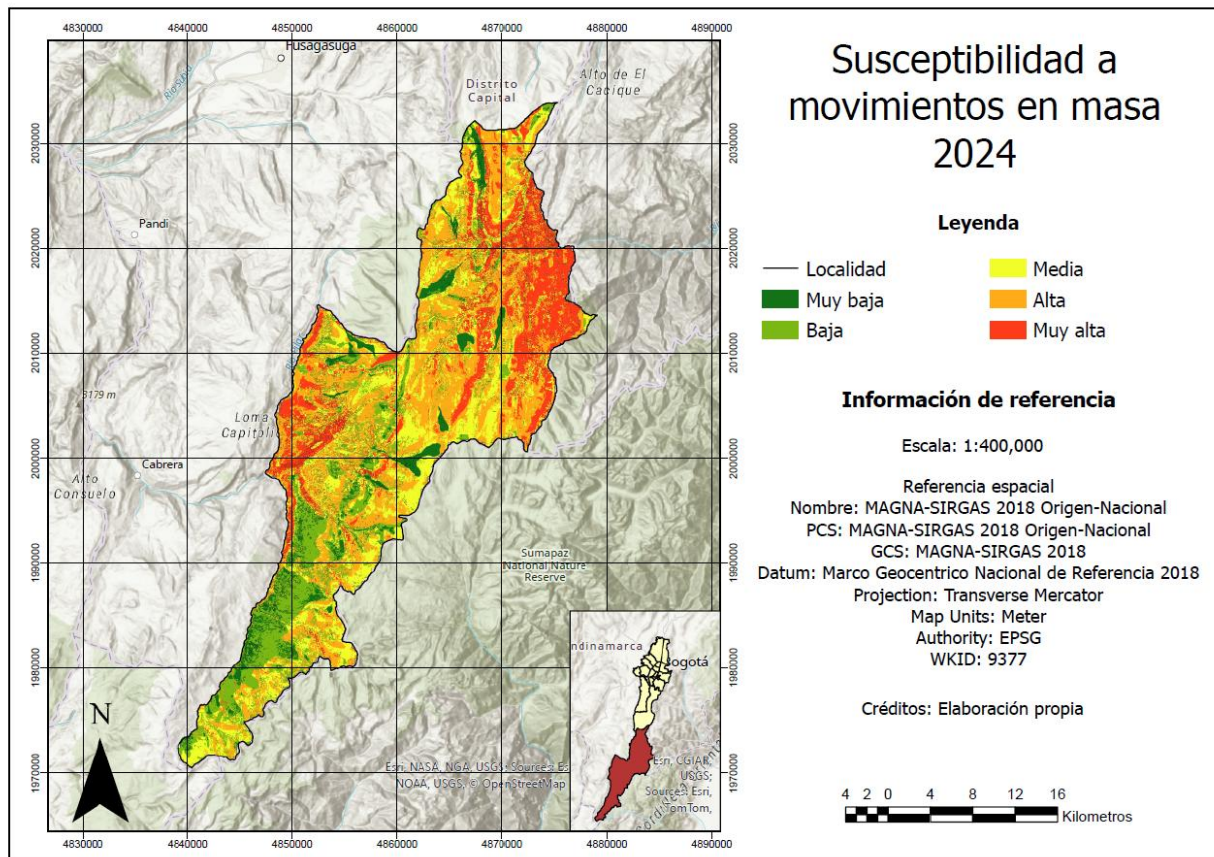
---

*Fuente: Elaboración propia.*

Con esta distribución de coberturas para el 2024, el escenario de zonificación de susceptibilidad es como se muestra en la figura 13, detallando su distribución en la tabla 12

**Figura 13**

*Mapa de Susceptibilidad del terreno a movimientos en masa para el 2024*



*Fuente: Elaboración propia.*

**Tabla 12**

*Área total por categoría de susceptibilidad para el 2024*

Categoría	Área (ha)
Muy baja	4530.45
Baja	12280.69
Media	16992.82

Alta

26217.87

Muy alta

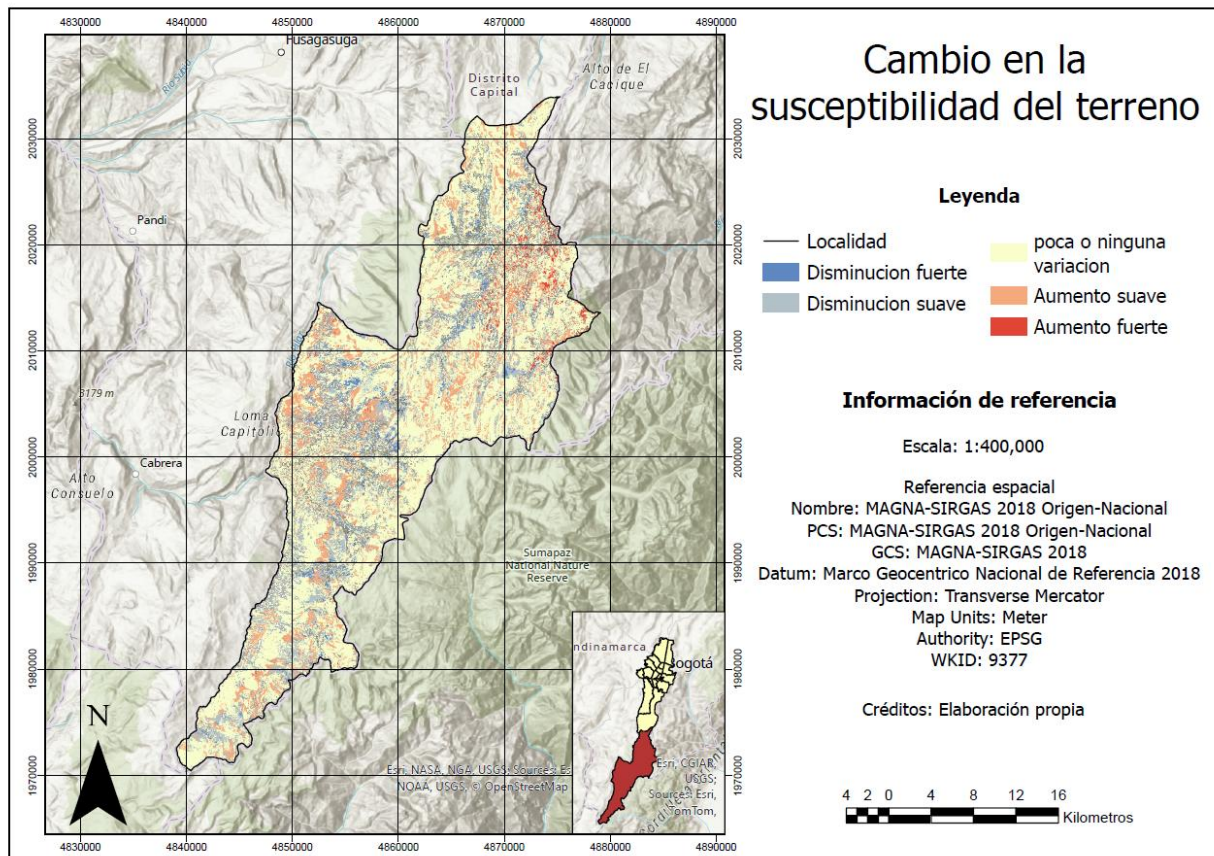
12745.94

*Fuente: Elaboración propia.*

La diferencia de susceptibilidad en ambos escenarios es como se muestra en la figura 14

**Figura 14**

*Mapa de cambios en la susceptibilidad a movimientos en masa*



*Fuente: Elaboración propia.*

## 8 Discusión

Se realizó la zonificación del territorio según los resultados del LSI para identificar las zonas con mayor susceptibilidad a movimientos en masa, los resultados del LSI indican la importancia de cada variable condicionante en el resultado final, un resultado positivo indica la tendencia de la variable a aumentar el nivel de susceptibilidad en tanto que los valores negativos indican reducción. Cuanto más lejos se encuentre en resultado de cero más fuerte es la relación entre la variable y el fenómeno, así, es posible identificar cuáles son los factores con más criticidad en la zonificación y cuales no aportan suficiente peso de evidencia o son completamente ausentes. En los escenarios donde no se registraron deslizamientos en una clase el cálculo del logaritmo natural no está determinado debido a la ausencia de área considerada ( $\text{DenClase} = 0$ ), para evitar distorsiones en los cálculos se adaptó un valor negativo correspondiente a  $-5,94$  conforme a criterios utilizados en cálculos de pesos de evidencia (Yang et al., 2023)

Según el mapa de zonificación (ver figura 10) se puede notar que las zonas catalogadas con susceptibilidad alta y muy alta se ubican al norte y noreste del territorio, donde se sabe por observación de las variables condicionantes que hay presencia de pendientes consideradas inclinadas y abruptas además de cobertura vegetal que limita la resistencia del suelo, también se observa que gran parte de los drenajes y corredores hidrológicos de la localidad se concentran en la zona norte, lo cual da pie a considerar factores de erosión del terreno. Gran parte del territorio se clasifica con un grado de susceptibilidad media con tendencia a ser baja en la parte sur y sureste del terreno, esto debido a que las condiciones del suelo cambian a páramo y el territorio entra en una zona de protección declarada por el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP) (ver anexo 3), lo cual favorece la conservación de la cobertura vegetal, adicional el terreno se vuelve más uniforme, presentando menor variación de relieve

Con respecto al proceso de validación, el resultado final del AUC dio un valor de 0.67, lo cual entra dentro de los parámetros aceptables para la predicción, indicando además que el cálculo del LSI aún es susceptible de mejoras. En estudios similares realizados en zonas andinas se encontró que los valores AUC oscilaban entre 0.65 y 0.8 (Herrera-Coy et al., 2023)

Se analizaron las características geológicas, topográficas y climáticas de la localidad de Sumapaz, encontrando que la zona presenta un relieve mayormente montañoso y suelo principalmente sedimentario, evidenciando que gran parte del terreno presenta una pendiente

moderadamente inclinada con zonas marcadas como abruptas. Como se aprecia en la tabla 9 la pendiente aporta un valor considerable para el cálculo de LSI, lo cual concuerda con el postulado de que las pendientes más pronunciadas aumentan la susceptibilidad debido a que el ángulo de inclinación tan pronunciado favorece los desprendimientos de material en tanto las zonas con pendiente moderada aportan cierta estabilidad al terreno. El hecho de que la susceptibilidad se concentre en zonas con pendiente elevada es un indicador de la importancia de esta característica. Este comportamiento ha sido observado en otros estudios donde se destaca la influencia de la inclinación de la pendiente en la vulnerabilidad del terreno, tal como lo describen Zhang, et al, (2025)

La localidad presenta una curvatura mayormente plana con zonas convexas fuertes al noreste y algunas al sur en tanto que las zonas cóncavas se extienden por gran parte del mapa. En cuanto a los movimientos en masa las zonas cóncavas aumentan la probabilidad de ocurrencia debido a la acumulación de agua y sedimentos, las zonas convexas por otro lado son menos propensas a acumular material, pero también aumentan la inestabilidad debido a la pérdida de soporte del terreno.

El aspecto de terreno indica que la mayoría de las pendientes se orientan hacia el norte con variaciones al noroeste y al noreste. Se puede observar que el aspecto del terreno se encuentra mayormente dividido entre pendientes orientadas al este y al oeste. Para los resultados de susceptibilidad es importante notar que las pendientes orientadas al norte y al este son las que presentan mayor relación con los eventos ya que reciben menor exposición a luz solar, por ende, tienen menor tasa de evaporación de agua, lo cual aumenta la saturación del suelo debido a la concentración de humedad, los suelos húmedos aumentan la probabilidad de ocurrencia de los eventos de movimientos en masa; en tanto las pendientes orientadas al oeste aportan más estabilidad

Como se mencionó, la geología del terreno es mayormente sedimentaria, presentando mayor presencia las formaciones geológicas de tipo cuaternario y blando (ver figura 6), este tipo de rocas son altamente susceptibles debido a que su composición por acumulación de materiales finos aumenta el proceso de erosión, otro tipo de sedimentos presentes en la zona de estudio son de categorización blanda, lo cual aumenta la susceptibilidad debido a su tendencia a la meteorización del suelo. Se evidencia la presencia de rocas ígneas, lo cual aumenta la resistencia del suelo, pero son un factor a considerar debido a la tendencia de presentar fracturas. Los valores

altos de LSI en las unidades catalogadas como formaciones rocosas blandas hablan del peso que tiene esta característica geológica como factor condicionante. Wang, et al (2024) hablan de como las unidades geológicas blandas contribuyen de manera significativa a la susceptibilidad del terreno a deslizamientos. Esto refuerza los hallazgos encontrados en este estudio donde la geología del terreno ocupa un lugar importante en el cálculo de la susceptibilidad

La formación geomorfológica corresponde mayormente a altiplanos y superficies de erosión, lo cual aporta mayor estabilidad al terreno y reduce la susceptibilidad, sin embargo, existe una presencia notable de depósitos coluviales, abanicos aluviales y terrazas en zonas donde se ha descrito mayor tendencia a la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa según las variables anteriormente estudiadas. Es importante resaltar que este tipo de formaciones geomorfológicas son propensas a acumular materiales sueltos, aumentando la susceptibilidad a desprendimientos de rocas. (Herrera-Coy, et al, 2023)

Entre los datos climatológicos se encontró que gran parte del territorio posee una precipitación media, rondando entre los 1000mm a 2000mm. En cuanto a cambio climático, según las predicciones realizadas por el IDIGER en el escenario del cambio de la precipitación desde el año 2011 al 2040, se proyecta una variación de -15% a +15% mostrando una gran disminución hacia la parte del suroeste, y un aumento significativo hacia el noreste, en tanto el centro de la localidad se mantendrá estable en cuanto a las lluvias. (ver anexo 2)

Se identificó la distribución de las coberturas vegetales en la localidad, se destaca que gran parte de la localidad tiene cobertura arbustiva o herbácea, lo cual contrasta con la gran cantidad de suelos destinados a producción agrícola. Este tipo de suelos favorece el aumento de susceptibilidad debido a que procesos de intervención humana para adecuar las tierras de cultivo tiene como consecuencia la compactación del suelo, provocando disminución de la capacidad de absorción y aumento de escorrentía. En las zonas donde se presenta cobertura herbácea o arbustiva la susceptibilidad del terreno tiende a ser media, ya que esta cobertura ofrece algo de protección y estabilidad al suelo, la cobertura boscosa es escasa en general en la localidad, presentándose en los extremos donde se evidencia que la susceptibilidad es baja.

El mapa de coberturas de tierras del año 2024 deja en evidencia la gran ausencia de bosque denso que hay en la localidad de Sumapaz. Esto puede deberse a una gran tala de bosques para distintas aplicaciones como agricultura o ganadería. En la mayoría de la localidad se presentan tipos de coberturas de tierra como herbazal, mosaico de cultivos, pastos con espacios naturales, lo

que indicaría que anteriormente eran zonas de bosques. Del mismo modo, en la parte noreste del mapa de coberturas de tierra se denota una leve cantidad de pastos enmalezados y pastos limpios que podría significar que hay zonas donde la tierra ya no tiene el mismo agarre, lo que da a entender que antes era una zona donde la ganadería era su fuente de recursos (CAR, 2017).

Se evaluó la relación del cambio de coberturas con las características del terreno, se puede observar un leve aumento en los bosques densos, lo que indica que en ese periodo de años hubo un proceso de recuperación de los bosques. Además, se pudo ver una disminución en los bosques fragmentados, que son la transformación de un bosque denso en bosques más pequeños aislados entre sí, por lo general estos bosques fragmentados son producto de la acción humana como la tala de árboles con el fin de crear zonas de cultivos o de ganadería. (Farnum. 2019)

Se encontró un avance en la cobertura de cultivos, esto es un indicador de pérdida de la cobertura natural de la zona, ya que terrenos intervenidos aumentan su inestabilidad al eliminar la pérdida de soporte proporcionado por las raíces de árboles, esto en laderas inclinadas es especialmente alarmante ya que se altera el equilibrio de fuerzas, causando que el terreno ceda con más facilidad. También se observa la aparición de cuerpos de agua, lo que significa que al haber una disminución notoria en los bosques fragmentados se crea un nuevo ecosistema reteniendo agua de lluvia, lo cual aumenta la humedad del suelo y su escorrentía. Por el contrario, la presencia de bosques contribuye a la protección del terreno al proporcionar estabilidad y mejorar la cohesión del sustrato. Murgia, et al (2024) concuerdan en que aumentar la cobertura boscosa contribuye a la estabilidad del terreno, especialmente en laderas pronunciadas, en tanto que la tala de árboles para dar paso a pastos y tierras de cultivo eleva la susceptibilidad.

El avance en la cobertura de cultivos se da principalmente en zonas que no han sido declaradas como protegidas por el SINAP, lo cual da a entender que no hay una política de conservación del suelo definida. Además, esas zonas limitan con áreas urbanas de la localidad de Usme, lo que significaría que es posible que existan procesos de invasión y ocupación ilegal del territorio, dando una explicación al proceso de pérdida de la cobertura vegetal natural

La cobertura herbácea aumentó su extensión de manera notable, esto igualmente puede ser una señal de que el terreno ha sido intervenido, lo cual degrada la estructura del suelo, aumentando su saturación y exponiendo el suelo a procesos erosivos. Este tipo de cobertura debilita el terreno debido a su poca capacidad de sujeción. Esto tiene como consecuencia que el suelo, en especial en

pendientes inclinadas o terrenos blandos presente mayor inestabilidad. Este cambio en la cobertura vegetal aumenta la susceptibilidad del terreno, pasando en zonas de media a alta

Tras comparar la zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa en ambos escenarios de cobertura vegetal se puede deducir que la mayor parte del terreno aumentó levemente su grado de susceptibilidad con zonas puntuales que aumentaron de manera fuerte. Estas zonas se ubican principalmente en la parte noreste de la localidad, donde se observa la presencia de pendientes inclinadas y coberturas herbáceas que debilitan la estabilidad del terreno. En cuanto a la disminución es menos frecuente y se da sobre todo en zonas puntuales del sur de la localidad, esta disminución se asocia principalmente al cambio de pendientes, pasando a ángulos de inclinación más suaves, además de la presencia de áreas protegidas que contribuyen a la conservación de la capa vegetal boscosa o de páramo, lo que estabiliza el terreno.

Estudios recientes han demostrado que la fragmentación de la cobertura vegetal es uno de los elementos más importantes en el cálculo de susceptibilidad a movimientos en masa (Pacheco Quevedo, et al, 2023), en diversos escenarios se ha estudiado que la inclusión de un índice de cobertura superficial (USC) influye notablemente en la precisión de modelos de zonificación a lo largo del tiempo. Sin embargo, dado que las actividades humanas pueden modificar áreas considerables, este índice requiere de escenarios más dinámicos. Un ejemplo de este es el trabajo adelantado por Chen et al (2019) donde calcularon el USC durante un periodo de 21 años, los resultados de su trabajo indican la relevancia del cálculo del USC en zonas con evidencia de deforestación, donde este índice se redujo al incluir políticas de conservación del suelo.

## 9 Conclusiones

La zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa en la localidad de Sumapaz permitió establecer el grado de probabilidad de ocurrencia de un evento, lo que permite identificar las zonas con alto nivel de susceptibilidad y desarrollar planes de acción para mitigar, controlar y prevenir desastres

La localidad de Sumapaz presenta una tendencia al aumento de la susceptibilidad a movimientos en masa influenciado en parte por procesos de pérdida de cobertura vegetal protectora del terreno y su reemplazo por coberturas que afectan la estabilidad del suelo

El valor obtenido en el cálculo de ROC/AUC indica que el modelo de zonificación tiene un valor de predicción aceptable que funciona para el ejercicio inicial, si bien se deben considerar elementos de mejora mediante la inclusión de otras variables condicionantes y factores adicionales asociados al uso del suelo

La geología, la geomorfología y la pendiente del terreno son las variables topográficas que más influencia tuvieron en el estudio de susceptibilidad a movimientos en masa, en tanto que la curvatura y el aspecto actúan como factores de variación que no influyen directamente. La composición topográfica presente en gran parte de la localidad de Sumapaz constituye un escenario crítico para la susceptibilidad debido a la presencia de pendientes con grados de inclinación altos y estructuras geológicas blandas que favorecen la degradación del terreno, aumentando la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa

El cambio de la cobertura vegetal es un factor determinante en el cálculo de la susceptibilidad del terreno, en particular el cambio de la cobertura boscosa natural por zonas con actividad antrópica influye directamente en el aumento de la susceptibilidad del terreno a movimientos en masa

La identificación de las zonas donde la cobertura vegetal ha cambiado es importante para la planeación de políticas de intervención y conservación de la cobertura vegetal, ya que permite priorizar las áreas donde la fragmentación de la cobertura vegetal es crítica

Estos resultados dejan en evidencia que la parte noreste de la localidad de Sumapaz es la que más afectaciones ha tenido a nivel de pérdida de cobertura vegetal, por ende, se prioriza esas zonas para realizar proyectos de reforestación para que el suelo gane agarre y evite la fragmentación, sin dejar de lado las capacitaciones que son fundamentales para la comunidad en

temas de conocimiento, preparación, prevención y mitigación en caso de ocurrencia en un movimiento en masa, evitando pérdidas humanas y económicas.

Los estudios referentes a la zonificación de susceptibilidad brindan una gran fuerza como herramienta para establecer que zonas son las que deben tener especial atención y vigilancia, convirtiéndose en un pilar para la toma de decisiones en el futuro que aplicaría para el desarrollo sostenible y la planeación territorial. Además, como parte de esto, será de gran ayuda para anticipar los posibles riesgos y formar comunidades y entornos resilientes.

## 10 Recomendaciones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos es necesario priorizar las zonas catalogadas con susceptibilidad alta en procesos de planificación, y control territorial para mitigar el proceso de degradación el suelo y pérdida de la cobertura vegetal, esto con el fin de mitigar la ocurrencia de eventos de movimientos en masa

Para conseguir una mejor precisión en el cálculo de la zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa debe tenerse en cuenta el cálculo de índices como el USC u otros relativos a la cobertura vegetal, asimismo tener presente otras variables condicionantes que puedan aportar a mejorar los cálculos

Es necesario incorporar escenarios de monitoreo climático en futuros modelos debido a la proyección de aumento en la precipitación, lo que podría derivar en un aumento en la susceptibilidad

Para un mejor desempeño de futuros análisis se recomienda realizar una estructuración de datos geográficos para permitir la integración de la información actualizada, facilitando la toma de decisiones para fortalecer la gestión preventiva del territorio

Con los resultados que se obtuvieron se logró denotar un gran cambio en coberturas y la amenaza en determinadas zonas de la localidad de Sumapaz, a pesar de que la temporalidad definida es un rango corto. Por ende, se recomienda hacer investigaciones de este tipo con un espectro mayor entre años para dejar en evidencia mayores cambios y contrastes en los insumos finales, proporcionándole más fuerza a la investigación.

Para tener un trabajo de investigación completo y conciso, es necesario actualizar los datos con cierta periodicidad, ya que, las condiciones ambientales son muy cambiantes y pueden variar los patrones definidos en los mapas de amenaza.

Como una forma de dar más consistencia a la investigación se recomienda considerar trabajo de campo, verificando que la información sobre coberturas vegetales, usos del suelo o pendientes estén acordes a las imágenes satelitales utilizadas en la investigación.

## Referencias

- Achicanoy, J. A., Rojas-Robles, R., & Sánchez, J. E. (2018). Análisis y proyección de las coberturas vegetales mediante el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica en la localidad de Suba, Bogotá-Colombia. *Gestión y Ambiente*.  
<https://doi.org/10.15446/ga.v21n1.68285>
- Albarracín-Zaidiza, J. A., Fonseca-Carreño, N. E., & López-Vargas, L. H. (2019). Agroecological Practices as Contribution to the Sustainability of Agroecosystems. Case Study of Sumapaz Province. *Ciencia Y Agricultura*, 16(2), 39-55.  
<https://doi.org/10.19053/01228420.v16.n2.2019.9139>
- Ayala-García, J., Ospino-Ramos, K. (2023) Desastres naturales en Colombia: un análisis regional. *Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana*. 317.  
<https://tinyurl.com/53ey5axh>
- Burbano, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de ciencias agrícolas*. 33(2):117-124.  
<https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Calderón, S. F. (2021). Evaluación de pérdida del suelo de la cuenca del río Combeima mediante el modelo RUSLE aplicando sistemas de Información geográfica. [Trabajo de grado de especialización, Universidad de Manizales] RIDUM Repositorio Institucional Universidad de Manizales. Colombia
- Cargua, C., Espin, R., Valencia, B., Simbaña, M., Araujo, S., Ocampos, A., & Cornejo, C. (2024). Análisis de susceptibilidad a deslizamientos empleando el proceso de jerarquía analítica en una carretera amazónica del Ecuador. *La Granja. Revista de ciencias de la vida*. 39(1) <https://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.07>
- Carvajal Perico, J. H., (2012) Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. *Servicio Geológico Colombiano*, <https://doi.org/10.32685/9789589952825>
- Caviedes, L. Y., & Chaparro, F. S. (2021). Zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa en el área urbana del sector este de la UPZ Verbenal, Bogotá D.C [Trabajo de grado de pregrado, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. Bogotá.D.C]. Repositorio de Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. Colombia
- Chen, L., Guo, Z., Yin, K., Shrestha, D. P., & Jin, S. (2019) The influence of land use and land cover change on landslide susceptibility: a case study in Zhushan Town, Xuan'en County (Hubei, China). *Natural Hazards Earth System Sciences* 19:2207–2228. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2207-2019>
- Colombia. Alcaldía Mayor de Bogotá. Alcaldía local de Sumapaz (2024). *Localidad de Sumapaz*. Alcaldía local de Sumapaz

- Colombia. Alcaldía Mayor de Bogotá. Secretaría Jurídica Distrital (2021). Decreto 555 de 2021: *Por el cual se adopta la revisión general del Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá D.C.* Secretaría Jurídica Distrital
- Colombia, Congreso de la República. (2011). Ley 1454 de 2011: (junio 28). *Por la cual se dictan normas orgánicas sobre ordenamiento territorial y se modifican otras disposiciones.* Diario oficial.
- Colombia, Congreso de la República. (2012). Ley 1523 de 2012: (abril 12). *Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.* Diario oficial.
- Colombia. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (2017) *Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Sumapaz (cód. 2119), localizada en los departamentos de Cundinamarca y Tolima.* CAR
- Colombia. Secretaría Distrital de Ambiente. Instituto Distrital de Gestión de Riegos y Cambio Climático. (2024). *Caracterización General del Escenario de Riesgo por Movimientos en Masa en Bogotá.* IDIGER
- Colombia. Secretaría Distrital de Planeación (2019) *Presentación de la revisión general del POT de Bogotá D.C.- CTPD.* SDP
- Colombia. Servicio Geológico Colombiano (2016) *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.* 15.  
<https://doi.org/10.32685/9789589952856>
- Gallardo, L. C. (2024). Estudio detallado de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimiento en masa con fines de desafectación en la vereda cueva santa, en la cantera Manizales, Manizales-Caldas [Trabajo de grado de pregrado, Universidad de Caldas. Manizales]. Repositorio Universidad de Caldas, Colombia
- Farnum, F. (2019) Caracterización de un bosque fragmentado en un área adyacente a la carretera Boyd Roosevelt, Provincia de Colón, Panamá. *Revista Colón Ciencias, Tecnología Y Negocios*, 6(2), 31–43. <https://tinyurl.com/3sfbjcn8>
- Federal Emergency Management Agency. (2020). Mission Areas and Core Capabilities. <https://tinyurl.com/4dynvs58>
- Hernández Márquez, B., Pérez, J., & Pérez, E. (2016). Centros integradores: una experiencia de ordenamiento territorial en el estado de Tabasco. *Problemas Del Desarrollo. Revista Latinoamericana De Economía*, 47(184). <https://doi.org/10.1016/j.rpd.2016.01.006>
- 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 Sensing*, 15(15), 3870. <https://doi.org/10.3390/rs15153870>
- Kottow, M. (2011). Anotaciones sobre vulnerabilidad. 1(95) 91-95. *Revista Red Bioética / UNESCO*. <https://tinyurl.com/b8fmwc23>
- Leal Villamil, J., Pérez Gómez, U., & Ortiz Lozano, N. E. (2018). Distribución espacial y temporal de deslizamientos (199-2015) en la cuenca del río Combeima, Colombia. *Revista Geográfica venezolana*. 59(2), 346-365. <https://tinyurl.com/yc2kc72t>
- Londoño Linares, J. P. (2017). Cálculo de susceptibilidad a deslizamientos mediante análisis discriminante. Aplicación a escala regional. *DYNA*, 84(201), 278–289. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.61385>
- López, E., Mendoza, M. E., & Bocco, G. (2010). Cobertura vegetal y uso del terreno. *Atlas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo: un análisis de la geografía del lago y su entorno socioambiental (pp.54-59)*. Universidad Nacional Autónoma de México
- Monopoli, T., Montello, F., & Rossi, C. (2024). Landslide mapping from Sentinel-2 imagery through change detection. *IEEE IGARSS 2024 conference proceedings*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.20161>
- Montero, O. (2017). Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia. *Servicio Geológico Colombiano*. <https://tinyurl.com/r66xnsrn>
- Muñoz-Iniestra, D. J., López, G. F., Hernández, M. M., Soler, A. A., & López, G. J. (2009) Impacto de la pérdida de la vegetación sobre las propiedades de un suelo aluvial. *Terra Latinoamericana*, 27(3), 237-246. <https://tinyurl.com/23eyfbns>
- Murgia, I., Vitali, A., Giadrossich, F., Tonelli, E., Baglioni, L., Cohen, D., Schwarz, M., & Urbinati, C. (2024). Effects of Land Cover Changes on Shallow Landslide Susceptibility Using SlideforMAP Software (Mt. Nerone, Italy). *Land*, 13(10), 1575. <https://doi.org/10.3390/land13101575>
- Navas Vásquez, M. (2010). Bases técnicas para evaluar la calidad del suelo. *Departamento de Fertilidad y Biología de Suelo. INIA-Venezuela*. <https://tinyurl.com/45nd3ffh>
- Ortiz Maestre, V., Polo Mendoza, C. C., Giraes Puerta, D. I., & Manco Jaraba, D. C. (2023). Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa implementando el método Mora-Vahrson modificado para el corregimiento de Chemesquemena (Cesar, Colombia) *Tecnura*. <https://doi.org/10.14483/22487638.19951>
- Osorio, A. F. (2023). Modelo de zonificación en tiempo real de amenazas por deslizamientos detonados por lluvia para el municipio de Manizales-Caldas [Trabajo de grado de especialización, Universidad de Manizales] RIDUM Repositorio Institucional Universidad de Manizales, Colombia.

- Osorio, L. F. (2019). Zonificación de la Susceptibilidad del terreno a los Deslizamientos. Caso de estudio: Nariño – Colombia [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia] Repositorio Institucional UNAL.
- Ospina-Gutiérrez, J. P., & Aristizábal, E. (2021). Application of Artificial Intelligence and machine learning techniques for landslide susceptibility assessment. *Revista Mexicana De Ciencias Geológicas*, 38(1), 43–54. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2021.1.1605>
- Pacheco Quevedo, R., Velastegui-Montoya, A., Montalván-Burbano, N. Morante-Carballo, F., Korup, O., & Daleles Rennó, C. (2023) Land use and land cover as a conditioning factor in landslide susceptibility: a literature review. *Landslides* 20, 967–982 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10346-022-02020-4>
- Proyecto BPUN 365. (2020) Plan de manejo ambiental para la construcción del edificio de bienestar universitario. *Saneamiento ambiental E.A.T.* <https://tinyurl.com/5n78jyjf>
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. (2007). Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas., *Publicación Geológica Multinacional*, No. 4, 432 <https://tinyurl.com/yyc7tshz>
- Querejeta, P. (2015). Procesamiento digital de imágenes. *Universidad Nacional del Sur, Argentina.* <https://tinyurl.com/9cymbre4>
- Rendón, J. R., & Bermúdez, L. N. (2017). Criterios para el establecimiento de cultivos de café en Colombia. *Avances Técnicos Cenicafé*, 475, 1-8. <https://doi.org/10.38141/10779/0475>
- Romero Niño, K. A., & Suarez Gonzales, P.A (2024) Determinación de Zonas Susceptibles a Deslizamientos en el Municipio de Granada, Antioquia, usando la Metodología LSI. *Repositorio UNAD.* <https://tinyurl.com/2azdk5nz>
- Romero-Rojas, W., & Vázquez-Jiménez, R. (2019). Estudio de susceptibilidad a procesos de remoción en masa. Caso de estudio: Zona centro del Estado de Guerrero, México, mediante herramientas geotecnológicas. *Revista Cartográfica.* <https://doi.org/10.35424/rcar.i98.147>
- Rosales-Veitía, J., & Marcano-Montilla, A. (2021). Amenaza por remoción en masa. Una experiencia en la comunidad La Lagunita, estado Miranda, Venezuela. *Scientia, revista científica multidisciplinaria*, 6(2), 63-81. <https://doi.org/10.25214/27114406.1103>
- Sachs, J. (2014). *The Age of Sustainable Development*. Nueva York: Centro Libros PAPF, S.L.U.
- Sánchez López, R., Mira Agudelo, A., & Vélez Zea, A. (2017). Estudio nacional de la degradación de suelos por erosión, 2015. *Fundación Alejandro Ángel Escobar.* <https://tinyurl.com/hfpmd7pv>
- Thanh, L. N., Fang, Y.-M., Chou, T.-Y., Hoang, T.-V., Nguyen, Q. D., Lee, C.-Y., Wang, C.-L., Yin, H.-Y., & Lin, Y.-C. (2022). Using Landslide Statistical Index Technique for Landslide

- Susceptibility Mapping: Case Study: Ban Khoang Commune, Lao Cai Province, Vietnam. *Water*, 14(18), 2814. <https://doi.org/10.3390/w14182814>
- UNIR. (2024). *Riesgos ambientales: qué son, tipos y evaluación*. <https://tinyurl.com/yhrxmab9>
- Uruguay. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección General de Recursos Naturales (2016) *Nuestro suelo patrimonio nacional*. MGAP
- Vallejo Arteaga, M, P., Acosta Tamos, V., Mosquera Molina, A. M., & Peña Céspedes., D. (2023). Asentamientos humanos ilegales en Bogotá. *Secretaría Distrital de Gobierno*. <https://tinyurl.com/3ckp9aek>
- Vargas, R., (2022). Guía Territorial para la Gestión del Riesgo de Desastres en Articulación con la Adaptación al Cambio Climático. *Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres*. <https://tinyurl.com/2nrke43h>
- Van Westen, C., (1997) Statistical landslide hazard analysis. ILWIS 2.1 for Windows application guide. *ITC Publication, Enschede*, pp 73–84 <https://tinyurl.com/n67hft6j>
- Van Westen, C., Castellanos, E., Kiriakose, S., (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*. 102 (3-4) <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Van Westen, C., Allstadt, K., Jibson, R., Tanyas, H., (2018) Factors controlling landslide frequency–area distributions. *Earth surface processes and landforms* 44, 900–917 <https://doi.org/10.1002/esp.4543>
- Wang, H., Wu, W., Yang, W., & Liu., M (2024) Examining the contribution of lithology and precipitation to the performance of earthquake-induced landslide hazard prediction. *Front. Earth Sci.* 12:1431203. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1431203>
- Yang, H., Wu, Q., Dong, J., Xie, F., & Zhang, Q. (2023). Landslide Risk Mapping Using the Weight-of-Evidence Method in the Datong Mining Area, Qinghai Province. *Sustainability*, 15(14), 11330. <https://doi.org/10.3390/su151411330>
- Zamora, N. J. (2018). The landslide hazard map of Bogotá an updating. *Copernicus publications* (42)-4. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W8-233-2018>
- Zhang, C., Liu, D., Tsangaratos, P., Ilia, I., Ma, S., & Chen, W. (2025). Enhancing Predictive Accuracy of Landslide Susceptibility via Machine Learning Optimization. *Applied Sciences*, 15(11), 6325. <https://doi.org/10.3390/app15116325>

## Anexos

### Anexo 1: Cálculo de pesos de evidencia para cada clase de variable

**Tabla 13**

*Pesos de evidencia para la pendiente*

Clase	Area_Si	Area_Ni	DenClase	DenMapa	Wi
Plano a casi plano	0.0000	341.6400	0.0000	0.0004	-5.9403 <sup>2</sup>
Suavemente inclinado	0.0800	4359.5600	0.0000	0.0004	-3.0306
Inclinado	1.4000	24964.6000	0.0001	0.0004	-1.9135
Moderadamente abrupto	13.1200	35745.0000	0.0004	0.0004	-0.0348
Abrupto	14.0800	10034.1200	0.0014	0.0004	1.3062
Muy abrupto	0.0000	19.3200	0.0000	0.0004	-5.9403 <sup>2</sup>

<sup>2</sup> El cálculo del logaritmo natural de 0 no está definido, por ende, para evitar errores se añadió una millonésima al resultado de DenClase y se realizó el cálculo

**Tabla 14***Pesos de evidencia para la curvatura*

Clase	Area_Si	Area_Ni	DenClase	DenMapa	Wi
Cóncavo fuerte	0.7600	5181.5600	0.0001	0.0004	-0.9512
Cóncavo suave	7.0400	20053.4400	0.0004	0.0004	-0.0784
Plano a casi plano	11.8800	30612.6800	0.0004	0.0004	0.0218
Convexo suave	8.0800	15545.8800	0.0005	0.0004	0.3140
Convexo fuerte	0.9200	4141.0800	0.0002	0.0004	-0.5359

**Tabla 15***Pesos de evidencia para el aspecto*

Clase	Area_Si	Area_Ni	DenClase	DenMapa	Wi
Norte	2.2000	1041.6000	0.0021	0.0006	1.2909
Noreste	6.3200	6358.4400	0.0010	0.0006	0.5372
Este	3.4000	10481.9600	0.0003	0.0006	-0.5827
Sureste	7.6000	8622.3200	0.0009	0.0006	0.4170
Sur	3.7200	7603.1200	0.0005	0.0006	-0.1716

Suroeste	2.0000	9344.5200	0.0002	0.0006	-0.9984
Oeste	1.9600	15735.2800	0.0001	0.0006	-1.5397
Noroeste	1.4800	14470.3600	0.0001	0.0006	-1.7368
Norte	0.0000	1806.6400	0.0000	0.0006	-5.9403 <sup>2</sup>

**Tabla 16***Pesos de evidencia para la geología*

Clase	Area_Si	Area_Ni	DenClase	DenMapa	Wi
Cuerpo de Agua	0.0000	23.5600	0.0000	0.0003	-5.9403 <sup>2</sup>
Qal (Qal)	0.8400	1308.3600	0.0006	0.0003	0.8810
Qra (Qra)	0.0000	3.3600	0.0000	0.0003	-5.9403 <sup>2</sup>
Rb3 (Pglf)	3.8400	20301.8800	0.0002	0.0003	-0.3412
Rb5 (K2E1g)	2.2400	3778.9600	0.0006	0.0003	0.8011
Rb6 (K2cp)	6.3600	24500.2000	0.0003	0.0003	-0.0246
Rb7 (K1f)	4.6400	717.0800	0.0065	0.0003	3.1914
Rd1 (K2lt)	0.0000	2076.2000	0.0000	0.0003	-5.9403 <sup>2</sup>

Rd2 (K2d)	1.0400	2672.6800	0.0004	0.0003	0.3802
Rd3 (K1u)	8.7200	6698.6400	0.0013	0.0003	1.5878
Ri2 (K2p)	0.5200	1861.8000	0.0003	0.0003	0.0486
Ri3 (Pzcg)	0.0000	116.3162	0.0000	0.0003	-5.9403 <sup>2</sup>
Sco (Q2c)	0.8800	1739.0000	0.0005	0.0003	0.6429
Sfg (Qfg)	0.0000	9538.5200	0.0000	0.0003	-5.9403 <sup>2</sup>
Sfg1 (Q1si)	0.0000	95.5600	0.0000	0.0003	-5.9403 <sup>2</sup>
Sfg2 (Q2chi)	0.0400	134.1600	0.0003	0.0003	0.1139

**Tabla 17***Pesos de evidencia para la geomorfología*

Clase	Area_Si	Area_Ni	DenClase	DenMapa	Wi
Arp	0.0000	23.5600	0.0000	0.0002	-5.9403 <sup>2</sup>
Dcdr	0.0000	170.2000	0.0000	0.0002	-5.9403 <sup>2</sup>
Dco	0.1200	1629.6400	0.0001	0.0002	-0.8584
Dcr	0.0000	40.9200	0.0000	0.0002	-5.9403 <sup>2</sup>
Fpi	0.8400	1286.1600	0.0007	0.0002	1.3242

---

Gafg	0.0000	2375.1200	0.0000	0.0002	-5.9403 <sup>2</sup>
Gc	0.0000	40.4800	0.0000	0.0002	-5.9403 <sup>2</sup>
Gcleg	0.1200	1060.0800	0.0001	0.0002	-0.4284
Gelpg	0.0000	140.5200	0.0000	0.0002	-5.9403 <sup>2</sup>
Gl	0.0000	13.4000	0.0000	0.0002	-5.9403 <sup>2</sup>
Glb	0.6800	11035.3200	0.0001	0.0002	-1.0365
Glcp	0.0000	13922.0000	0.0000	0.0002	-5.9403 <sup>2</sup>
Gle	2.0800	28352.7200	0.0001	0.0002	-0.8621
Gma	0.2000	11.1600	0.0179	0.0002	4.6362
Gmf	0.0000	1.2800	0.0000	0.0002	-5.9403 <sup>2</sup>
Gml	0.0000	92.2800	0.0000	0.0002	-5.9403 <sup>2</sup>
Gpeg	0.0000	38.0800	0.0000	0.0002	-5.9403 <sup>2</sup>
Gsg	0.4000	104.5200	0.0038	0.0002	3.0923
Gshcp	0.0000	32.0632	0.0000	0.0002	-5.9403 <sup>2</sup>
Gshle	0.0000	5.6263	0.0000	0.0002	-5.9403 <sup>2</sup>
Gvfg	0.0000	471.8400	0.0000	0.0002	-5.9403 <sup>2</sup>

---

Scle	6.2400	7035.4400	0.0009	0.0002	1.6302
ScIp	0.6800	6807.1200	0.0001	0.0002	-0.5534
Sele	0.6000	797.8800	0.0008	0.0002	1.4652

---

**Tabla 18***Pesos de evidencia para las coberturas*


---

Clase	Area_Si	Area_Ni	DenClase	DenMapa	Wi
Pastos limpios	0.3600	1628.4800	0.0002	0.0004	-0.6385
Pastos enmalezados	0.0000	20.4000	0.0000	0.0004	-5.9403 <sup>2</sup>
Mosaico de pastos con espacios naturales	0.4000	267.7200	0.0015	0.0004	1.2723
Mosaico de cultivos	6.2000	22807.3600	0.0003	0.0004	-0.4317
Bosque fragmentado	8.9200	12270.6400	0.0007	0.0004	0.5519
Mosaico de pastos y cultivos	1.9600	5621.9200	0.0003	0.0004	-0.1829

---

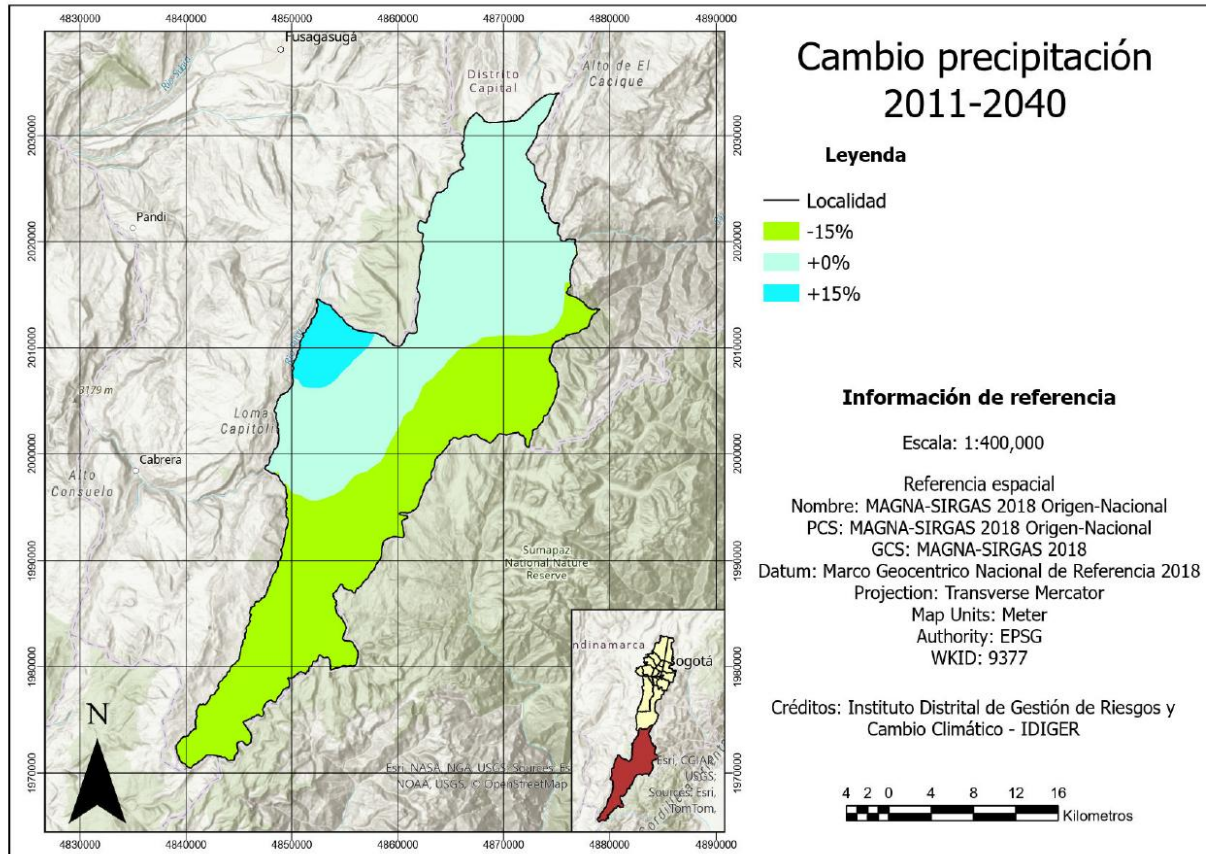
Bosque denso	0.1600	2505.6800	0.0001	0.0004	-1.8803
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	1.2400	2473.6400	0.0005	0.0004	0.1802
Bosque de galería y ripario	0.2400	602.1200	0.0004	0.0004	-0.0490
Herbazal	2.4400	18302.9200	0.0001	0.0004	-1.1443
Arbustal	2.2800	5819.4400	0.0004	0.0004	-0.0662
Vegetación secundaria o en transición	0.0000	2980.4800	0.0000	0.0004	-5.9403 <sup>2</sup>
Lagunas, ríos y ciénagas naturales	0.0000	176.1200	0.0000	0.0004	-5.9403 <sup>2</sup>

---

**Anexo 2: Escenario proyectado de cambio en la precipitación**

**Figura 15**

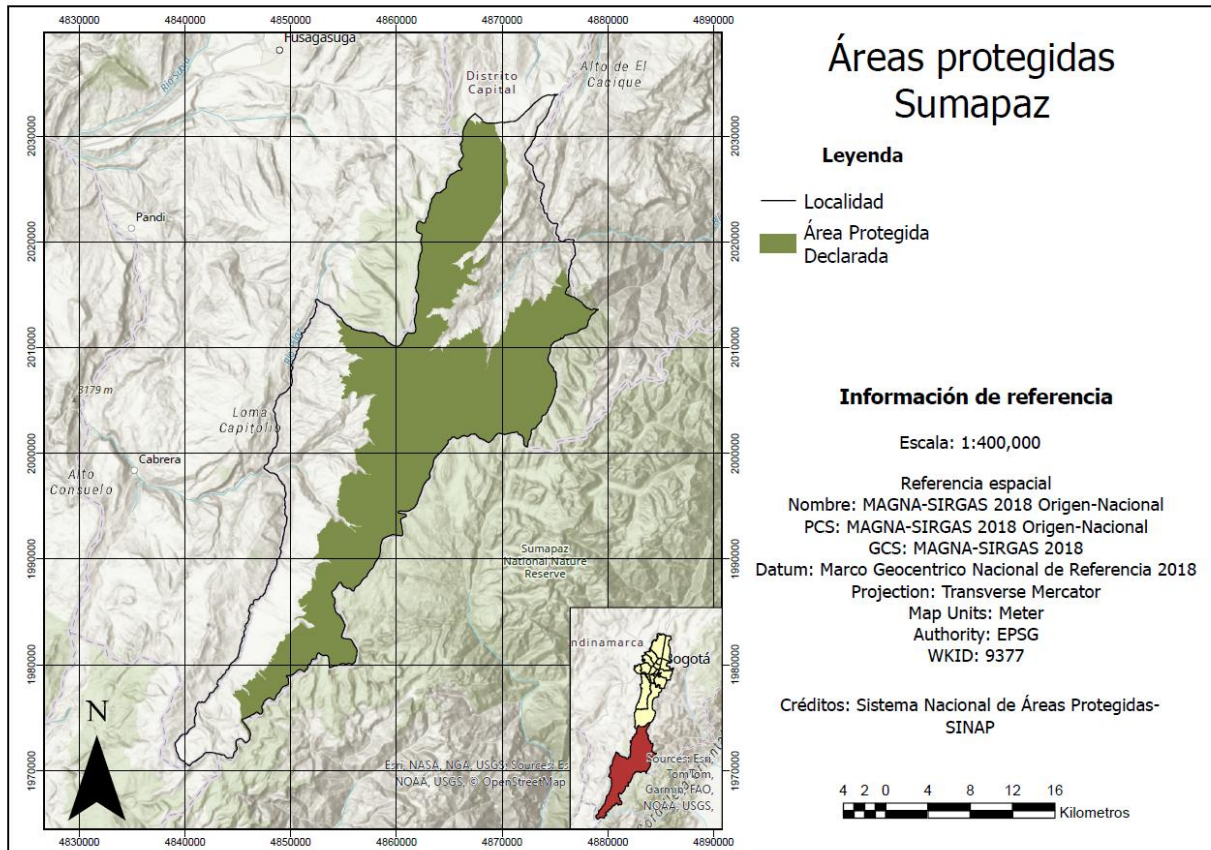
*Mapa de escenario proyectado de cambio en la precipitación 2011-2040*



### Anexo 3: Áreas protegidas del SINAP

**Figura 16**

*Áreas protegidas de la localidad de Sumapaz*



### Anexo 4: Script de validación de resultados mediante ROC/AUC

```
import arcpy
import pandas as pd
import numpy as np
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import roc_curve, roc_auc_score
import matplotlib.pyplot as plt
```

#parámetros de entrada

```
tabla = r"C:\Users\PC\Documents\ArcGIS\Projects\Trabajo de grado\Trabajo de
grado\Insumos.gdb\Inventario_mov_masa"
campo_objetivo = "presencia" # 1 = Hay movimiento, 0 = no hay movimiento
campo_lsi = "LSI" # valor de LSI calculado

campos = [campo_objetivo, campo_lsi]
arr = arcpy.da.TableToNumPyArray(tabla, campos)
df = pd.DataFrame(arr)

#Limpiar datos nulos e indeterminados
df = df.replace([np.inf, -np.inf], np.nan).dropna() # quitar NaN e infinitos
df[campo_objetivo] = df[campo_objetivo].astype(int) # convertir a entero

#División de datos para entrenamiento y validación
X = df[[campo_lsi]]
y = df[campo_objetivo]
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
    X, y, test_size=0.3, random_state=42, stratify=y
)

#Validar ROC/AUC
y_score = X_test[campo_lsi]

tasa_falsos, tasa_verdaderos, umbral = roc_curve(y_test, y_score)
auc = roc_auc_score(y_test, y_score)

#Graficar AUC
plt.figure(figsize=(6,6))
plt.plot(tasa_falsos, tasa_verdaderos, label=f"Curva ROC (AUC = {auc:.3f})")
plt.plot([0, 1], [0, 1], linestyle="--", color="gray", label="Aleatorio")
plt.xlabel("Tasa de falsos positivos (1 - Especificidad)")
```

```
plt.ylabel("Tasa de verdaderos positivos (Sensibilidad)")  
plt.title("Curva ROC - Validación del modelo LSI")  
plt.legend(loc="lower right")  
plt.grid()  
plt.show()
```