



Evaluación del impacto de la densidad de flujo acumulado en la zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa en la microcuenca La Presidenta (Medellín)

Anderson Stiven Guerra Polania

Catherin Lizeth Rey Guerra

Jeniffer Carolina Rincón Tovar

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

Asesor: Carlos Marcelo Jaramillo Echeverry, Magíster (MSc) en Ciencias de la Tierra

Asesores de recursos académicos: Juan Pablo Charry Osorio (asesor bibliográfico)

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual
Manizales, Caldas, Colombia
2025

Cita	(Guerra Polania, et al., 2025)
Referencia	Guerra Polanía, A. S., Rey Guerra, C. L., & Rincón Tovar, J. C. (2025). <i>Evaluación del impacto de la densidad de flujo acumulado en la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa en Medellín</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica , II

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

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, Turnitin, Gemini, DeepSeek, Google Notebooks, Consensus,], 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

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.

Agradecimientos

Agradecemos al profesor Carlos Marcelo Jaramillo Echeverry por su valiosa guía y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo de grado, así como al Centro de Bibliotecas de la Universidad de Manizales por el apoyo brindado en las asesorías y el acceso a recursos clave para la investigación.

Tabla de contenido

Resumen	11
Abstract	13
Introducción	15
1 Planteamiento del problema.....	17
1.1 Antecedentes	17
1.2 Descripción del área problemática	19
2 Justificación	22
3. Objetivos.....	24
3.1 Objetivo general	24
3.2 Objetivos específicos.....	24
4 Referente normativo y legal.....	25
5 Marco teórico	27
6 Metodología	30
6.1 Tipo de estudio	30
6.2 Enfoque metodológico	30
6.3 Área de estudio.....	31
6.3.1 Geología	31
6.3.2 Geomorfología	32
6.3.3 Pendiente	33
6.3.4 Cobertura de la tierra.....	34
6.3.5 Densidad de flujo acumulado	35
6.4 Procedimiento.....	37
6.4.1 Caracterización geoambiental	40
6.4.2 Análisis de susceptibilidad:	42

6.4.2.1	Calculo pesos de evidencia	42
6.4.2.2	Función final de susceptibilidad.....	46
6.4.2.3	Curva de éxito y validación.....	47
7	Resultados	49
7.1	Fase 1. Caracterización geoambiental	49
7.1.1	Variable condicionante - Geología superficial.....	51
7.1.2	Variable condicionante - Geomorfología.....	53
7.1.3	Variable condicionante – Pendiente.....	56
7.1.4	Variable condicionante – Coberturas de la tierra	59
7.1.5	Variable condicionante – Densidad de flujo acumulado.....	61
8	Discusión.....	71
9	Conclusiones	74
10	Recomendaciones.....	76
11	Referencias	77

Lista de tablas

Tabla 1. Insumos usados para el análisis y zonificación de la susceptibilidad a MM	38
Tabla 2. Insumos usados para el análisis y zonificación de la susceptibilidad a MM	41
Tabla 3. Categorización mapa de susceptibilidad a MM tipo deslizamiento.....	47
Tabla 4. Categorización de los factores condicionantes usados para la zonificación de susceptibilidad a MM.	49
Tabla 5. Pesos de la variable condicionante geología superficial derivadas de la metodología wofe (SGC, 2017)	51
Tabla 6. Tabla de relación deslizamiento y factor condicionante de la geología.....	53
Tabla 7. Pesos de la variable condicionante geomorfología derivadas de la metodología wofe (SGC, 2017)	54
Tabla 8. Tabla de relación deslizamiento y factor condicionante de la geomorfología.....	56
Tabla 9. Pesos de la variable condicionante pendiente derivadas de la metodología wofe (SGC, 2017).....	56
Tabla 10. Tabla de relación deslizamiento y factor condicionante pendientes.....	58
Tabla 11. Pesos de la variable condicionante cobertura de la tierra derivadas de la metodología wofe (SGC, 2017)	59
Tabla 12. Tabla de relación deslizamiento y factor condicionante cobertura de la tierra.....	61
Tabla 13. Pesos de la variable condicionante densidad de flujo acumulado derivadas de la metodología wofe (SGC, 2017)	62
Tabla 14. Tabla de relación deslizamiento y factor condicionante Densidad de flujo acumulado	64
Tabla 15. Peso normalizado por factor.....	64
Tabla 16. Áreas en cada categoría de susceptibilidad, sin incluir la densidad de flujo acumulado como variable condicionante.....	67
Tabla 17. Áreas en cada categoría de susceptibilidad, al incluir la densidad de flujo acumulado como variable condicionante.....	68
Tabla 18. variable densidad de flujo en relación con el área general de la zona de estudio.	71

Lista de figuras

Figura 1. Clasificación de los tipos de MM según Cruden & Varnes (1996)	28
Figura 2. Ubicación general de la microcuenca La Presidenta, respecto a la zonificación del POMCA del río Aburrá	31
Figura 3. Geología que caracteriza la microcuenca La Presidenta	32
Figura 4. Geomorfología que caracteriza la microcuenca La Presidenta.....	33
Figura 5. Pendientes que caracteriza la microcuenca La Presidenta.....	34
Figura 6. Cobertura de la tierra que caracteriza la microcuenca La Presidenta	35
Figura 7. Densidad de flujo acumulado en la microcuenca La Presidenta	37
Figura 8. Insumos usados para el análisis de la susceptibilidad a MM tipo deslizamiento con base en la guía metodológica del SGC (2017).	39
Figura 9. Metodología usada para el análisis de la susceptibilidad a MM tipo deslizamiento con base en la guía metodológica del SGC (2017).	40
Figura 10. Interpretación de los factores en términos de pixeles con base en la guía metodológica del SGC (2017).....	43
Figura 11. Interpretación de los pesos finales con base en la guía metodológica del SGC (2017).	45
Figura 12. Metodología de cálculo de la curva de éxito con base en la guía metodológica del SGC (2017).	47
Figura 13. Poligonización de los procesos morfodinámicos en el inventario de AMVA y complementados con algunas cicatrices de deslizamiento identificadas.	50
Figura 14. Análisis porcentual de los MM en cada categoría de unidades geológicas superficiales.	52
Figura 15.Variable condicionante – Geología y procesos morfodinámicos.	53
Figura 16.Variable condicionante – Geomorfología y procesos morfodinámicos.....	54
Figura 17. Análisis porcentual de los MM en cada categoría geomorfológica.	55
Figura 18.Variable condicionante – Pendiente y procesos morfodinámicos.	56

Figura 19. Análisis porcentual de los MM en cada categoría de pendiente.	58
Figura 20. Variable condicionante – Coberturas de la tierra y procesos morfodinámicos.	59
Figura 21. Análisis porcentual de los MM en cada categoría de cobertura de la tierra.	60
Figura 22. Variable condicionante – Densidad de flujo acumulado y procesos morfodinámicos. .	62
Figura 23. Análisis porcentual de los MM en cada categoría de densidad de flujo acumulado. ...	63
Figura 24. Reclasificación de las variables condicionantes con sus valores normalizados y aplicación de la fórmula de IS para generación de ráster de índice de susceptibilidad.	65
Figura 25. Curva de éxito para el raster de IS para el modelo basado en SGC (2017).....	66
Figura 26. Curva de éxito para el ráster de IS para el modelo ajustado con la inclusión de la variable densidad de flujo acumulado	67
Figura 27. Zonificación susceptibilidad sin considerar la variable densidad de flujo acumulado. Modelo basado en SGC (2017)	69
Figura 28. Zonificación susceptibilidad considerando la variable densidad de flujo acumulado. Modelo basado en SGC (2017)	70
Figura 29. Cambios en la zonificación al incorporar la variable densidad de flujo acumulado (aparición de líneas variando la categorización)	72

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AMVA	Autoridad ambiental del Área Metropolitana del Valle de Aburrá
CORNARE	Corporación autónoma regional de las cuencas de los ríos Negro y Nare
DEM	Modelo de elevación de terreno
IDW	Distancia Inversa Ponderada
IS	Índice de susceptibilidad
Km²	Kilómetros cuadrados
m	Metros
MM	Movimiento en masa
m²	Metros cuadrados
MSc	Magister Scientiae
POT	Plan de Ordenamiento Territorial
SGC	Servicio Geológico Colombiano
SIG	Sistemas de información geográfica
UManizales	Universidad de Manizales

Resumen

La microcuenca La Presidenta, ubicada en el municipio de Medellín, Antioquia, enfrenta un alto riesgo de movimientos en masa debido a su topografía abrupta, su régimen hídrico y un proceso de urbanización acelerado. Aunque en Colombia se han desarrollado metodologías para la zonificación de amenaza, la versión vigente propuesta por el Servicio Geológico Colombiano (2017) no contempla la densidad de flujo acumulado como variable condicionante, lo que podría limitar la capacidad del modelo para capturar dinámicas locales relevantes en la ocurrencia de estos eventos.

Esta investigación evalúa el impacto de incorporar la densidad de flujo acumulado en el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa en la microcuenca La Presidenta. Para ello, se compilaron registros históricos y secundarios de eventos tipo deslizamiento, los cuales sirvieron como base para aplicar un modelo de zonificación mediante el método de Pesos de Evidencia (WoFE). Posteriormente, se comparó el desempeño de la metodología estándar con una versión modificada que incluye la nueva variable, utilizando análisis estadísticos (curva de éxito) y validación espacial.

Los resultados revelan que la densidad de flujo acumulado presenta el mayor peso estadístico dentro del modelo, destacando su alto valor explicativo para representar procesos de escorrentía que inciden en la inestabilidad del terreno. Aunque la mejora porcentual en la curva de éxito fue leve (de 70.49 % a 70.5 %), la inclusión de esta variable permitió ajustes significativos en zonas urbanizadas cercanas a corrientes de agua, donde la susceptibilidad pasó de baja o media a alta, refinando la representación espacial del riesgo. Este efecto se observó principalmente en sectores con infraestructura crítica o dinámicas de drenaje complejas.

No obstante, se identificaron limitaciones en áreas sin historial de eventos, como la zona media-alta de la cuenca, donde la densidad de flujo acumulado no mejoró la predicción. Esto sugiere una dependencia importante de la calidad y cobertura del inventario de procesos morfodinámicos para que esta variable exprese su potencial predictivo.

En conjunto, la investigación aporta una metodología robusta y replicable que combina enfoques estadísticos con criterios heurísticos, y demuestra que la densidad de flujo acumulado puede enriquecer la zonificación de susceptibilidad, siempre que se cuente con información base suficiente. Los hallazgos contribuyen al fortalecimiento de los procesos de planificación territorial y gestión del riesgo en territorios con características similares.

Keywords: susceptibility zoning, mass movement, flow accumulation density, risk management, susceptibility index.

Abstract

The La Presidenta micro-watershed, located in the municipality of Medellín, Antioquia, faces a high risk of mass movements due to its steep topography, hydrological regime, and accelerated urbanization. Although Colombia has developed methodologies for hazard zoning, the current version proposed by the Colombian Geological Survey (2017) does not consider flow accumulation density as a conditioning variable, which may limit the model's ability to capture relevant local dynamics in the occurrence of these events.

This research evaluates the impact of incorporating flow accumulation density into the landslide susceptibility analysis in the La Presidenta micro-watershed. To this end, historical and secondary records of landslide-type events were compiled and used as the basis to apply a zoning model using the Weight of Evidence (WoFE) method. The performance of the standard methodology was then compared to a modified version that includes the new variable, using statistical analyses (success curve) and spatial validation.

The results show that flow accumulation density has the highest statistical weight within the model, highlighting its strong explanatory value for representing runoff processes that influence terrain instability. Although the percentage improvement in the success curve was small (from 70.49% to 70.5%), the inclusion of this variable led to significant adjustments in urbanized areas near watercourses, where susceptibility shifted from low or medium to high, refining the spatial representation of risk. This effect was particularly notable in areas with critical infrastructure or complex drainage dynamics.

However, limitations were identified in areas without a history of events, such as the mid-upper zone of the watershed, where flow accumulation density did not improve prediction. This suggests a significant dependency on the quality and coverage of the landslide inventory for this variable to fully express its predictive potential.

Overall, this study contributes a robust and replicable methodology that combines statistical and heuristic approaches and demonstrates that flow accumulation density can enhance

susceptibility zoning, provided that sufficient baseline information is available. The findings support improved territorial planning and risk management in areas with similar characteristics..

Keywords: susceptibility, mass movements, accumulated flow density, risk management, artificial intelligence

Introducción

Los movimientos en masa son fenómenos naturales que causan pérdidas humanas y económicas a nivel mundial (Ospina & Aristizábal, 2021). En Colombia, este fenómeno configura una de las principales amenazas, la cual se ve acentuada en regiones con orografía montañosa, de fuertes pendientes y altamente urbanizadas, siendo la región Andina altamente vulnerable debido a la combinación de estos factores geológicos, geomorfológicos, antrópicos y climáticos (Hernan et al., 2006).

Los sistemas de información geográfica (SIG) han jugado un papel crucial para este tipo de estudios, ya que permiten el manejo de grandes volúmenes de datos y el procesamiento de elementos como los Modelos Digitales de Elevación (DEM), volviéndose fundamentales para obtener diferentes tipos de análisis de forma ágil y precisa (Alvarado et al., 2012; Guinau, 2007). La implementación de estas tecnologías permite obtener mejores resultados en comparación con los métodos clásicos usados para evaluar la susceptibilidad a movimientos en masa, sin embargo, requieren de la disponibilidad de un inventario de eventos, robusto y el levantamiento detallado de las variables predictoras (Aristizábal & Ospina, 2021).

En este contexto, se identifica la microcuenca La Presidenta con un área de 13,1 km², localizada en el municipio de Medellín, Antioquia, al suroriente de la Cuenca del Valle de Aburrá en la que se presentan una mezcla de ambientes urbanos y rurales (Valdés, et al., 2017) y que ha sido sujeto de estudios relacionados con la gestión hídrica usando como base el flujo acumulado para definir las unidades hidrológicas y los caudales simulados ya que es una zona identificada con un alto índice del uso del agua y una demanda significativa, lo que la convierte en un área priorizada y de relevancia para el estudio de sus dinámicas internas que pueden afectar las laderas y con ello, el servicio ecosistémico brindado (Corantioquia, 2014).

Se ha identificado una limitación relacionada con la disponibilidad y calidad de información geoespacial, especialmente en zonas rurales, donde los registros históricos de eventos son escasos o inexistentes. En este contexto, resulta pertinente evaluar variables complementarias que permitan mejorar la representación espacial de las condiciones y dinámicas del terreno. por lo que este

estudio pretende analizar el impacto de la inclusión de la densidad de flujo acumulado como variable condicionante en la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa (MM), mediante la aplicación de la metodología oficial vigente en Colombia del Servicio Geológico Colombiano (SGC), tomando como área de estudio la microcuenca de la quebrada La Presidenta, municipio de Medellín, Antioquia por medio de la validación del ajuste de la curva de éxito obtenida de los modelos obtenidos por medio de metodologías estadísticas (pesos de evidencia WofE) y heurísticas (SGC, 2017).

1 Planteamiento del problema

¿Afecta la incorporación de la variable de densidad de flujo acumulado en la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa en la microcuenca La Presidenta en comparación con la metodología propuesta por el Servicio Geológico Colombiano?

1.1 Antecedentes

Los fenómenos de remoción en masa se han estudiado mediante múltiples metodologías que pueden clasificarse como cuantitativas, cuando están basados en datos o estadísticos usando diversos modelos para calcular la probabilidad de ocurrencia de un evento (Aristizábal & Ospina, 2021; Aristizábal & Yokota, 2005) y cualitativas o heurísticas, cuando están basados en el conocimiento, entendimiento, experiencia y criterio de un evaluador experto en el tema basándose en diferentes técnicas como el algebra de mapas y elementos cartográficos que permitan determinar características geológicas y geomorfológicas y las relaciones entre estas variables y el entorno del sitio de estudio para darle un peso relativo a cada variable (Aristizábal & Ospina, 2021; Sarmiento, 2017; Guinau, 2007)

A nivel internacional, se han abordado diversas metodologías para zonificar este fenómeno, Barredo et al. (2000) se centraron en la comparación e implementación de técnicas basadas en una evaluación heurística asistida por SIG para la cuenca de Tirajana, en la isla los Rocosos, España demostrando con su investigación que, si bien existe un factor de subjetividad, el método heurístico puede ofrecer resultados más precisos al considerar las particularidades de territorios dinámicos, especialmente a pequeñas escalas como una microcuenca.

Del mismo modo, Elmoulat et al (2021) seleccionan el método heurístico para la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa en la provincia de Tétouan (Norte de Maruecos), sobre otros métodos ya que prioriza el análisis de la correspondencia de la información de los factores condicionantes con la realidad del terreno obteniendo un 70% de ajuste.

Por otro lado, Lira et al., (2024) analizaron en el municipio de Areia, Paraíba, Brasil, la dinámica y mecanismos que influyen en la estabilidad de los taludes en relación con la infiltración de agua en el suelo, encontrando que las zonas cóncavas donde se acumula mayor concentración de flujo y precipitación antecedente sufren una reducción en la cohesión del suelo, propiciando inestabilidad aumentando la probabilidad de falla.

Estos efectos de la escorrentía son identificados por He et al (2022) como ignorados en los estudios que evalúan la inestabilidad en zonas de ladera destacando la importancia crítica de considerar la concentración de escorrentía en depresiones topográficas a partir de un modelo generado para simular simultáneamente la escorrentía superficial, la infiltración y la inestabilidad de taludes.

En Colombia el SGC ha liderado la elaboración y publicación de guías y manuales para la construcción del conocimiento en esta área, implementando la Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000, ampliamente usada en el territorio ya que fue construida teniendo en cuenta los estudios realizados en el país, y, por ende, las dinámicas particulares del mismo enfocándose en ser una herramienta que complementa la experiencia de los profesionales (SGC, 2017) donde se propone el enfoque estadístico bivariado (Pesos de evidencia WofE), el cual es uno de los más comúnmente utilizados para el análisis de susceptibilidad por deslizamientos.

Teniendo en cuenta la persistencia y severidad de los movimientos en masa en Colombia y la restricción al acceso de información, se ha identificado la necesidad de refinar y reevaluar las metodologías existentes aplicables al estudio de este fenómeno a unas que respondan a la complejidad geológica y de acceso al histórico multitemporal de procesos morfodinámicos, los cuales son datos indispensables para la calibración completa de la capacidad predictiva de los mapas de susceptibilidad (Guinau, 2007; Sarmiento, 2017; SGC, 2017; Vasquez & Tocasuche, 2023)

Alvarado et al. (2012) en la cuenca del río Combeima, en Ibagué, Tolima, una zona altamente propensa a deslizamientos y flujos de lodo, propusieron un modelo que integraba análisis

bivariados (WofE) y heurísticos, incluyendo la variable de cuenca acumulada para calcular el flujo y acumulación de agua en la zona de estudio y mejorar la identificación de áreas vulnerables lo que resulto en ajuste de 84% del modelo definido por la curva de éxito y validación.

A esto le siguió la actualización del mapa de susceptibilidad a los deslizamientos de tierra coordinado por el SGC (2010) en convenio con distintas entidades universitarias buscando alcanzar un mayor nivel de detalle y en el cual se presenta la variable cuenca acumulada como una de las variables condicionantes a emplear en el modelo ya que se considera importante en el modelamiento hidrológico y la influencia de la escorrentía en la estabilidad del terreno.

Para el Valle de Aburrá es importante, además, el factor antrópico inducido por la expansión de la urbanización sobre terrenos con alta susceptibilidad a la ocurrencia de deslizamientos. Kühnl et al. (2023) llevaron a cabo un análisis que evidenció un aumento considerable en la población de la ciudad de Medellín derivando en el asentamiento de personas en terrenos que presentan potenciales peligros de deslizamientos, lo que configura una variable importante a tener en cuenta en la gestión del riesgo ya que señala los focos más vulnerables.

Valdés et al. (2017) identifican a la microcuenca La Presidenta, como de importancia dada la presencia de entornos urbanos y rurales lo que la hace representativa en termino de dinámicas que se presentan en el Valle de Aburrá, aunado a esto, también presenta desarticulación entre las obras hidráulicas y un aumento en la escorrentía dada su urbanización por lo que por medio de la caracterización y mapeo de las funciones y servicios ecosistémicos generaron un modelo para apoyar la gestión territorial en cuanto a la delimitación de áreas que deben ser protegidas evitando su urbanización y con ello, el aumento del riesgo.

1.2 Descripción del área problemática

Los movimientos en masa tipo deslizamiento son desplazamientos de material de la superficie, que se dan por diversas razones, entre ellas la gravedad que se potencializa con factores como la carga hídrica de los suelos, la baja cohesión, las pendientes, el uso de suelos, la erosión, meteorización o la combinación de varios de estos factores. La interacción de procesos

geológicos, climáticos, antropogénicos contribuye a la alta recurrencia de estos eventos en el país. La región Andina de Colombia es particularmente susceptible a movimientos en masa debido a su compleja geología y topografía accidentada (Montero Olarte, 2017 ; SGC, 2015). La interacción de procesos geológicos, climáticos y antropogénicos contribuye a la alta recurrencia de estos eventos en el país. La región Andina de Colombia es particularmente susceptible a movimientos en masa debido a su compleja geología y topografía accidentada (Montero Olarte, 2017; SGC, 2015).

En el departamento de Antioquia, esta situación es especialmente crítica, presentando áreas con amenaza muy alta, alta y media (Aristizabal & Yokota, 2006). La combinación de formaciones rocosas fracturadas, suelos residuales profundos y pendientes pronunciadas incrementa la vulnerabilidad a deslizamientos. Las precipitaciones intensas y prolongadas comunes en la región actúan como detonantes de estos movimientos, saturando los suelos y disminuyendo su cohesión (Montero Olarte, 2017; Moreno et al., 2006; POMCA Río Aburrá, 2018).

La microcuenca de la quebrada La Presidenta es un área de interés estratégico para la ciudad de Medellín ya que atraviesa vías principales y sectores con alta densidad poblacional, lo que hace que cualquier alteración en su dinámica represente un riesgo. Además, ha experimentado un desarrollo urbanístico acelerado, que ha llevado a la ocupación de laderas y a la deforestación para el desarrollo de proyectos inmobiliarios, reduciendo la estabilidad del terreno y exacerbando la problemática, incrementando a su vez, la susceptibilidad a movimientos en masa y eventos de desbordamiento. Históricamente en esta microcuenca se han registrado eventos hidrológicos extremos que han derivado en inundaciones y movimientos en masa, afectando viviendas, infraestructuras viales y, en algunos casos, cobrando vidas humanas (Vargas Agudelo et al., 2018) y en los últimos años, se presentaron incidentes de desbordamiento en sectores como Patio Bonito y la urbanización Aguas Claras, evidenciando la vulnerabilidad de la zona (Alcaldía de Medellín, AMVA & Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia, 2007; Valdés et al., 2017; AMVA & Universidad de Antioquia, 2023).

Por lo que a pesar de los esfuerzos de entidades como el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y CORNARE para monitorear y gestionar los riesgos asociados, persisten desafíos en la implementación de herramientas que permitan abordar otras medidas preventivas.

En este contexto, la presente investigación se alinea con la necesidad de desarrollar metodologías que permitan una planificación territorial que se ajuste al contexto geográfico, integrando variables clave que puedan derivarse de insumos comúnmente accesibles como el DEM a partir del cual se puede calcular la densidad de flujo acumulado, que representa la cantidad de agua que se acumula y fluye a través de un punto específico en el terreno. Al analizar esta variable, es posible identificar áreas donde la acumulación de escorrentía es mayor, lo que puede incrementar la saturación del suelo y, por ende, la susceptibilidad a movimientos en masa (Alvarado et al., 2012).

Se sabe que, la integración de factores como la litología, pendiente, textura y profundidad del suelo, junto con la caracterización de sus coberturas, permite evaluar la susceptibilidad a deslizamientos (Guinau Sellés, 2007). Por lo tanto, incorporar la densidad de flujo acumulado en los análisis de estabilidad del terreno proporciona una comprensión más detallada de las dinámicas hidrológicas que contribuyen a la inestabilidad, facilitando la identificación de zonas críticas y la implementación de medidas preventivas para identificar áreas de riesgo y proponer soluciones sostenibles que garanticen la seguridad de la comunidad.

2 Justificación

Los SIG han posibilitado un cambio de paradigma en la gestión de riesgo y evaluación de los desastres naturales, permitiendo grandes avances en el análisis de variables espaciales, contribuyendo a un entendimiento más preciso de los procesos que configuran el territorio. Esto los ha consolidado como una herramienta indispensable, lo que ha implicado una transición desde aplicaciones fundamentales hacia la integración con técnicas computacionales como la inteligencia artificial (Eminoglu, Y. & Tarhan, C., 2025). En el contexto colombiano, particularmente en regiones montañosas como la región Andina, donde se localiza el departamento de Antioquia y especialmente en zonas de alta pendiente, densamente urbanizadas como lo es la ciudad de Medellín, el fenómeno de los movimientos en masa hace parte de las principales amenazas comprometiendo la seguridad de comunidades vulnerables costando pérdidas humanas y económicas por lo que se requiere de estrategias efectivas de prevención (Alvarado F., et al, 2012; Moreno et al., 2006)

Pese a la robustez de las metodologías existentes, el desempeño y confiabilidad de los mapas de zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa, está directamente relacionado con la escala, calidad y el volumen de los datos de entrada disponibles ya que estos afectan significativamente la exactitud de los modelos predictivos y la capacidad de los mapas para identificar las zonas susceptibles (Chang, K., et al, 2019; Gaidzik, K., y Ramírez-Herrera, M., 2021), motivo por el cual nace la necesidad de indagar sobre variables que puedan ser calculadas a partir de otros insumos de más amplio acceso como los DEM, apoyándose de los análisis realizados en SIG (Guinau, 2007) a partir de los cuales es posible calcular información sobre el área de estudio, como por ejemplo la densidad de flujo acumulado.

Los resultados de esta investigación contribuirán con conocimiento especializado con el potencial de ser usado para la toma de decisiones en la gestión del riesgo y planificación territorial. Este enfoque puede optimizar la identificación de áreas de mayor riesgo, promoviendo iniciativas orientadas a generar respuestas más oportunas y focalizadas en la planificación territorial y la gestión del riesgo.

Este proyecto no solo busca resolver un problema local, sino que también aporta conocimiento replicable, estableciendo un precedente metodológico para el análisis de riesgos en territorios montañosos y urbanizados.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Analizar el impacto de la inclusión de la densidad de flujo acumulado como variable condicionante en la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa, mediante la aplicación de la metodología oficial vigente en Colombia del Servicio Geológico Colombiano, tomando como área de estudio la microcuenca de la quebrada La Presidenta en el Distrito de Medellín, Antioquia.

3.2 Objetivos específicos

1. Realizar la zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa en la microcuenca La Presidenta utilizando la metodología estándar establecida por el Servicio Geológico Colombiano (2017), como base para evaluar el impacto de la incorporación de la nueva variable.
2. Incorporar la densidad de flujo acumulado como variable condicionante adicional en la zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa, siguiendo los lineamientos metodológicos vigentes, para determinar su influencia en los resultados obtenidos.
3. Comparar el ajuste de los modelos de zonificación obtenidos mediante la metodología estándar y la versión modificada que incluye la densidad de flujo acumulado, utilizando análisis cuantitativos que permitan identificar el aporte de esta variable.

4 Referente normativo y legal

La gestión del riesgo por movimientos en masa en Colombia se sustenta en un marco normativo y legal que establece directrices para la identificación y zonificación de amenazas naturales. Este marco se organiza jerárquicamente, según la pirámide de Hans Kelsen.

Constitución Política de Colombia de 1991

Artículo 79 consagra el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano y la obligación del Estado de proteger la diversidad e integridad del ambiente. Asimismo, el artículo 80 establece que el Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible, conservación, restauración o sustitución (Congreso de Colombia, 1991).

Ley 388 de 1997

Esta ley, conocida como la Ley de Desarrollo Territorial, establece mecanismos para ordenar el territorio colombiano, promoviendo el uso racional del suelo y la prevención de desastres. En su artículo 10, numeral 1.5, dispone la incorporación de determinantes ambientales en los POT, incluyendo la identificación de áreas de riesgo por fenómenos naturales (Congreso de Colombia, 1997).

Ley 1523 de 2012

Mediante esta ley se adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. La ley enfatiza la necesidad de identificar y zonificar áreas susceptibles a amenazas naturales, como los movimientos en masa, y de incorporar estas consideraciones en la planificación territorial y en los POT (Congreso de Colombia, 2012).

Decreto 1807 de 2014

Este decreto reglamenta la incorporación de la gestión del riesgo en los POT y otros instrumentos de planificación territorial. Establece procedimientos para la delimitación y zonificación de áreas con diferentes niveles de amenaza por movimientos en masa, determinando

criterios para su ocupación y uso. El artículo 11 del decreto señala la necesidad de realizar estudios detallados para áreas propuestas para desarrollo que se encuentren en zonas de amenaza media y alta (Presidencia de la República de Colombia, 2014).

Decreto 1077 de 2015

Este decreto compila las disposiciones relacionadas con el sector vivienda, ciudad y territorio. En su artículo 2.2.3.2.2.4, define las Áreas con Condición de Amenaza (ACA) como aquellas zonas del territorio municipal zonificadas con niveles de amenaza alta o media por fenómenos naturales, incluyendo movimientos en masa, y establece lineamientos para su manejo en los POT (Presidencia de la República de Colombia, 2015).

Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa

El SGC ha desarrollado una guía metodológica que proporciona lineamientos técnicos para la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25.000. Esta guía es una herramienta fundamental para la identificación y evaluación de áreas susceptibles, facilitando la incorporación de estas consideraciones en la planificación territorial (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

5 Marco teórico

El estudio del fenómeno de los movimientos en masa juega un papel crucial dentro de la planificación de los territorios permitiendo establecer planes de gestión del riesgo, lo que es especialmente importante en regiones con un entorno geológico, geomorfológico y climático diverso que, aunado a las intervenciones antrópicas, tienen un efecto sobre la estabilidad del terreno lo que deriva en pérdidas humanas y económicas.

La gestión del riesgo de desastres esta reglamentada para Colombia a través de la Ley 1523 de 2012 donde se define como un proceso de ámbito social que gira en torno a la planificación y monitoreo del territorio mediante la evaluación de políticas cuyo objetivo es alimentar el conocimiento acerca del riesgo con el fin de ser una estrategia clave para prevenir, mitigar, controlar, pero también de preparar a los habitantes para enfrentar situaciones de desastre fortaleciendo la seguridad y bienestar de la población contribuyendo desde un enfoque de desarrollo sostenible.

Uno de los fenómenos estudiados en la gestión del riesgo, son todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (SGC, 2017). Existen diversas clasificaciones definidas por los criterios usados para su determinación, dentro de los cuales se encuentran mecanismos de falla, tipo de materiales involucrados, forma del relieve, clima, afectación de laderas y tipo grado de intervención antrópica (clasificación MM). Varnes (1978) y Cruden & Varnes (1996), definen cinco tipos de movimientos los cuales a su vez son clasificados teniendo en cuenta la velocidad, humedad y materiales desplazados según su tamaño con el fin de combinar estos movimientos “básicos” para referirse a movimientos complejos (Figura 1):

- Caída: cuando ocurre un desprendimiento de roca o suelo sobre un talud con altas pendientes lo que provoca un descenso, principalmente en forma de caída libre.
- Volcamiento: que comprende tres grandes subcategorías: Volcamiento de bloques de roca, volcamiento de bloques aislados y volcamiento de detritos.

- Deslizamiento: el cual se refiere a movimientos de roca o tierra a lo largo de las laderas, debilitando progresivamente la ladera por medio de rupturas concentradas en la parte superior (corona del deslizamiento) propiciadas por la gravedad, se proponen tres tipos de deslizamientos definidos como rotacional cuando se presenta la rotación de la masa de suelo o roca sobre una superficie de falla curva y cóncava y traslacional que se dan a lo largo de una superficie de falla relativamente plana o ligeramente ondulada.
- Propagación lateral: ocurre cuando se presenta la expansión de un suelo compacto o roca blanda, lo que causa un hundimiento de materiales blando sin formar líneas de ruptura definidas como en los anteriores tipos.
- Flujo: que se caracteriza por ser un movimiento continuo de una masa (roca o suelo) con características de líquido viscoso que puede fluir más o menos rápido dependiendo de la inclinación de la superficie y la saturación de los materiales, los cuales arrastran. También conocidos como avenidas torrenciales.

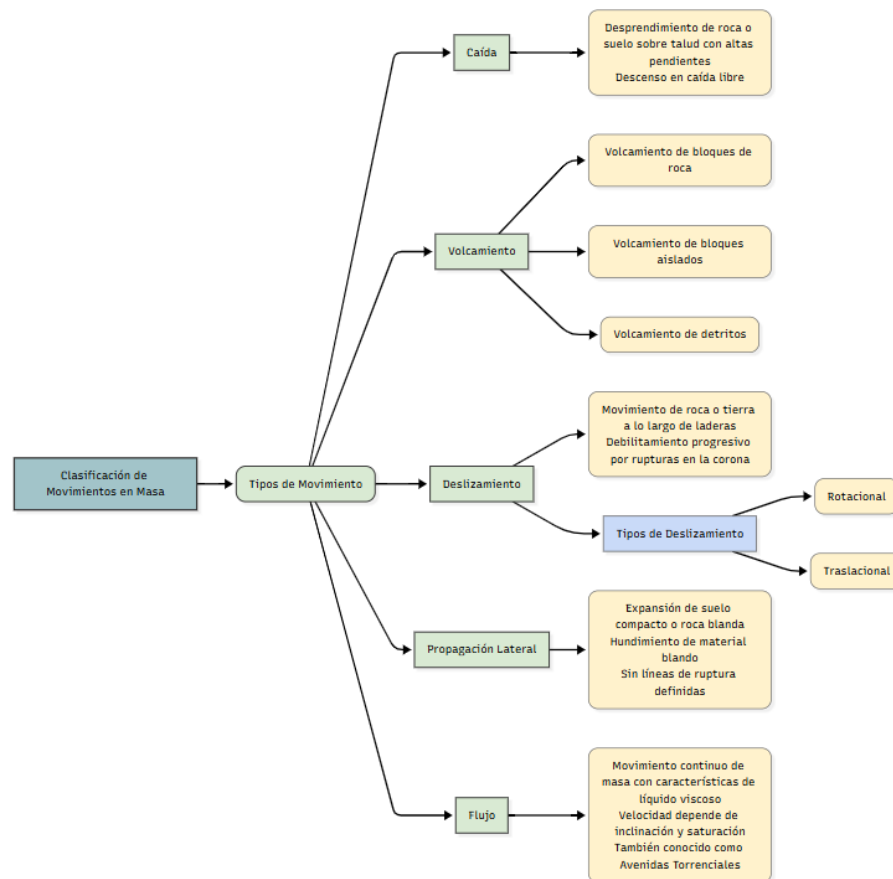


Figura 1. Clasificación de los tipos de MM según Cruden & Varnes (1996)

Fuente: Elaboración propia, adaptado de SGC (2017)

La densidad de flujo acumulado se define como la cantidad de agua que fluye, se infiltra y acumula en una superficie con la característica de que entre mayor es el área mayor agua es interceptada, incrementando la saturación del suelo y, por consecuencia, la susceptibilidad a presentar inestabilidad (Sarmiento, 2017). Es una variable que generalmente es obviada y clasificada como de importancia media en la guía metodológica del SGC (2017). Su exclusión limita, según Sarmiento (2017), la comprensión detallada de las dinámicas hidrológicas de ladera.

6 Metodología

6.1 Tipo de estudio

El presente trabajo de grado se enmarca en un enfoque correlacional, ya que busca analizar la relación entre distintas variables involucradas en la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa. En particular, se incluye la densidad del flujo acumulado como factor condicionante, con el fin de evaluar su posible influencia en la delimitación de zonas susceptibles.

La elección de un enfoque correlacional resulta pertinente, dado que permite explorar en qué medida esta variable se asocia con la ocurrencia y distribución espacial de los procesos morfodinámicos. A través de este análisis, se espera identificar patrones significativos que contribuyan a mejorar la precisión de la zonificación de susceptibilidad a movimientos en masa, superando así las limitaciones de metodologías convencionales.

6.2 Enfoque metodológico

La metodología trabajada se fundamenta en un enfoque mixto que integra métodos cuantitativos y cualitativos, siguiendo los lineamientos establecidos por el SGC (2017).

El componente cuantitativo se desarrolló mediante el método de Pesos de Evidencia (Weight of Evidence, WoE), un análisis estadístico bivariado basado en la teoría bayesiana. Este método evalúa la influencia de los factores condicionantes de la ocurrencia de movimientos en masa, asignando pesos específicos a cada variable. La asignación de pesos se basa en el análisis de eventos pasados y su patrón de distribución dentro del área de estudio (SGC, 2017).

El enfoque cualitativo se realizó por medio de criterio de expertos, lo que viabiliza una evaluación más objetiva del papel que desempeña cada factor condicionante en la susceptibilidad del terreno. Además, al integrar la densidad del flujo acumulado como variable adicional, se espera obtener una cartografía más detallada y ajustada a las condiciones reales del entorno, en comparación con los métodos tradicionales.

6.3 Área de estudio

La microcuenca de la quebrada La Presidenta, se ubica en el sector central de la cordillera Occidental, en la zona suroriental del municipio de Medellín. En esta área de interés se identifican condiciones geológicas, morfológicas y antrópicas que inciden directamente en el desarrollo de zonas con susceptibilidad a MM de tipo deslizamiento. A continuación, se describen las principales variables condicionantes consideradas en el presente estudio:

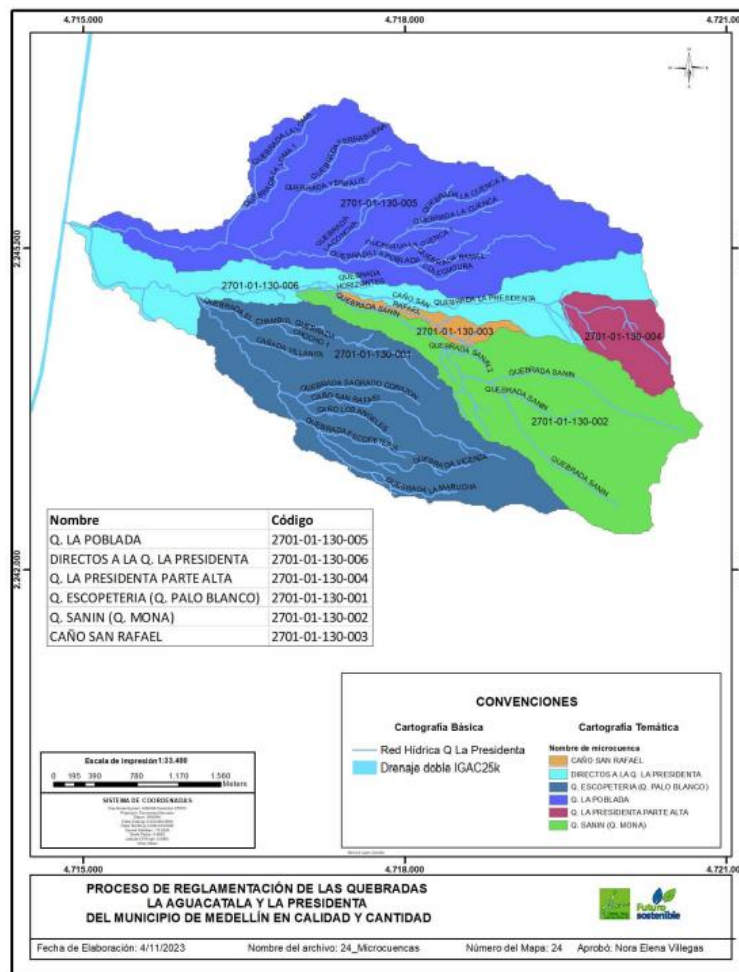


Figura 2. Ubicación general de la microcuenca La Presidenta, respecto a la zonificación del POMCA del río Aburrá

Fuente: POMCA Río Aburrá, 2018

6.3.1 Geología

A nivel regional, la microcuenca se encuentra dentro de la provincia geológica correspondiente al Complejo Medellín. En este sector predominan rocas ígneas y metamórficas, con edades entre el Precámbrico y el Paleozoico, las cuales han sido deformadas y presentan altos

grados de metamorfismo (Figura 3). Estas unidades hacen parte de los complejos Cajamarca y Medellín (Martínez & Restrepo, 2008).

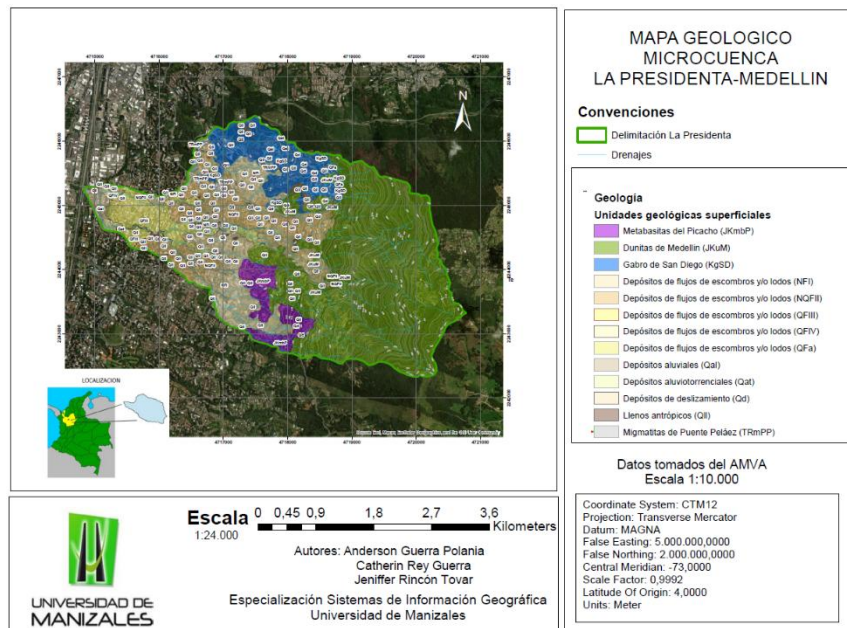


Figura 3. Geología que caracteriza la microcuenca La Presidenta

Fuente: Elaboración propia, cartografía AMVA

A escala local, los insumos trabajados evidencian la presencia de rocas como las migmatitas de Puente Peláez, con características de rocas mixtas entre ígneas y metamórficas; las dunitas de Medellín, de composición ultramáfica, los gabros de San Diego, de naturaleza plutónica y de grano grueso; finalmente las metabasitas del Picacho, derivadas de basaltos y otras litologías maficas. Estas unidades constituyen gran parte de las rocas de la microcuenca. Se identifican zonas con depósitos de deslizamiento, coluviones y rellenos antrópicos, distribuidos principalmente en las áreas urbanizadas.

6.3.2 Geomorfología

La microcuenca de la quebrada La Presidenta se ubica sobre el flanco oriental de la Cordillera Occidental, dentro de una zona montañosa que presenta una topografía compleja y accidentada (Figura 4). En términos generales, el relieve está fuertemente influenciado por la acción de sistemas de fallas regionales, entre ellos la falla de Romeral, lo que ha contribuido a la formación de pendientes pronunciadas y una red de drenaje erosionados. (Martínez & Restrepo, 2008).

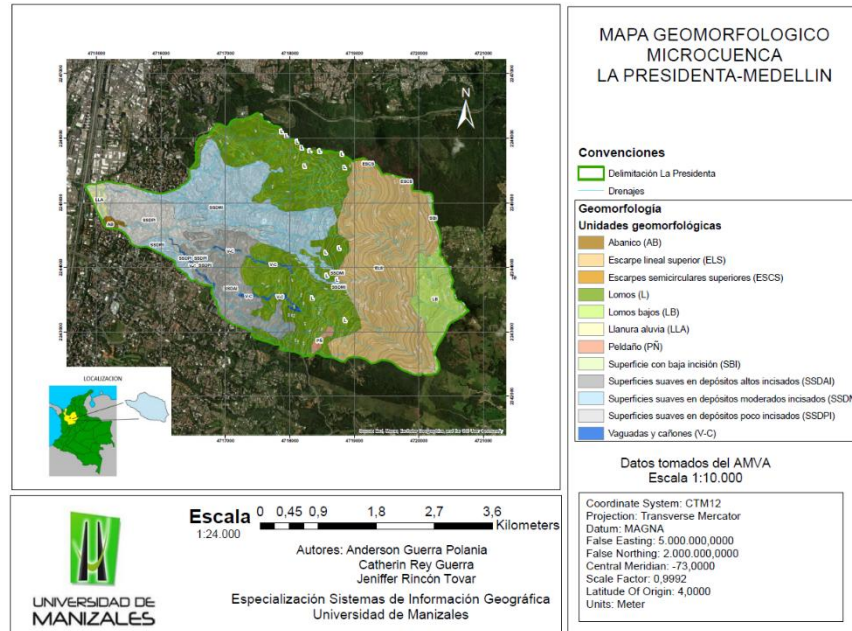


Figura 4. Geomorfología que caracteriza la microcuenca La Presidenta

Fuente: Elaboración propia, cartografía AMVA

A partir de los insumos recolectados a lo largo de este estudio, se reconoce una gran diversidad de formas de relieve. En las partes medias y altas de la microcuenca predominan lomos de distintos tamaños, muchos de ellos interrumpidos por escarpes lineales o semicirculares, asociados a antiguos MM. Estas formas indican la influencia de procesos gravitacionales y estructurales sobre la morfología del terreno.

Hacia la parte baja del área, se destacan las vaguadas y cañones encajonados, acompañados de superficies aluviales y pequeños abanicos, que funcionan como zonas de acumulación y transporte de sedimentos. Estas áreas son susceptibles a la reactivación de materiales sueltos, especialmente bajo condiciones de saturación hídrica prolongada.

6.3.3 Pendiente

Las laderas que conforman el valle de Aburrá, especialmente hacia Medellín, presentan pendientes notoriamente inclinadas. En la microcuenca de la quebrada La Presidenta, estas pendientes varían notablemente, desde zonas planas (0–6 %) en los fondos del valle hasta inclinaciones superiores al 30 % en las laderas más escarpadas. Entre estos extremos, predominan pendientes moderadas (12–30 %), que abarcan tanto áreas rurales como urbanas, y que suelen

asociarse con distintos niveles de susceptibilidad a deslizamientos, según la cobertura vegetal y las condiciones del terreno (Figura 5).

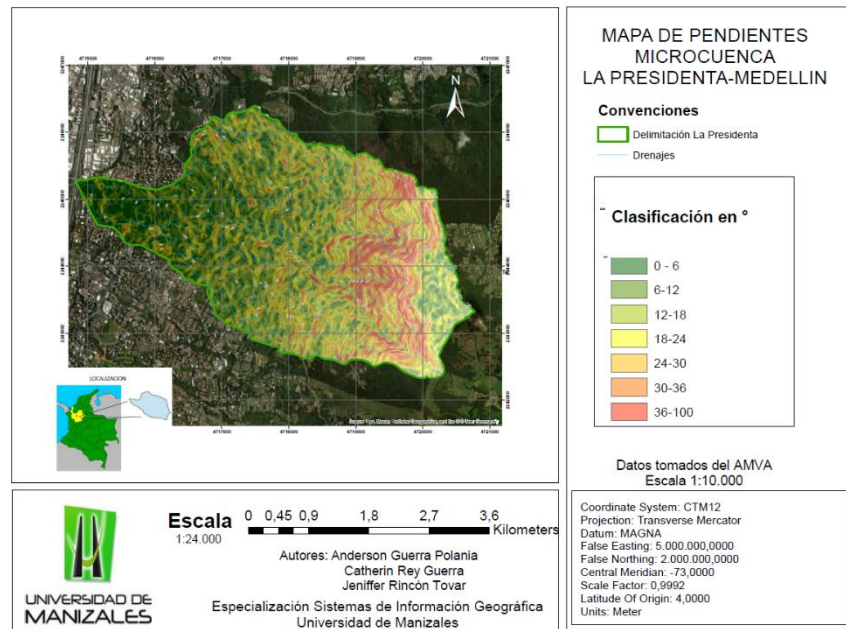


Figura 5. Pendientes que caracteriza la microcuenca La Presidenta

Fuente: Elaboración propia, ALOS PASAR

6.3.4 Cobertura de la tierra

El uso del suelo en la zona varía bastante. En áreas rurales, es común encontrar una mezcla de pastos, cultivos y vegetación en recuperación, además de algunas zonas de bosque en las partes más elevadas. También hay presencia de plantaciones forestales. Por otro lado, en el sector urbano, predomina la infraestructura construida, con superficies impermeables que facilitan la escorrentía. La actividad antrópica ha afectado la cobertura de la tierra reduciendo la vegetación natural, lo que aumenta la posibilidad de inestabilidad del terreno en ciertos puntos (Figura 6).

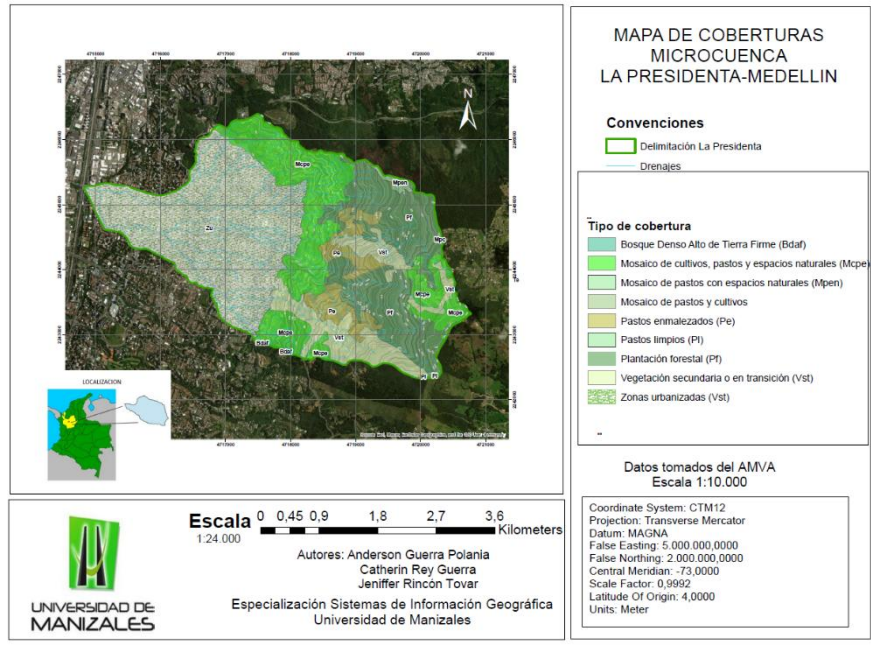


Figura 6. Cobertura de la tierra que caracteriza la microcuenca La Presidenta

Fuente: Elaboración propia, cartografía AMVA

6.3.5 Densidad de flujo acumulado

Esta variable es útil para identificar los sectores donde tiende a concentrarse el escurrimiento superficial.

Para la estimación de la densidad de flujo acumulado, se utilizó un MDE proveniente de la misión ALOS PALSAR, el cual fue procesado en el software ArcGIS Pro. El procedimiento seguido comprendió varias etapas secuenciales, descritas a continuación:

6.3.5.1 Preprocesamiento del MDE

En primera instancia, se realizó un llenado de depresiones o "sinks" en el MDE, con el fin de asegurar la continuidad del escurrimiento superficial. Este paso es fundamental, ya que pequeñas imperfecciones o celdas sin valor en el modelo pueden interrumpir artificialmente la red de drenaje. Para ello se empleó la herramienta Fill de la caja de herramientas Spatial Analyst – Hydrology.

En caso de presentarse píxeles vacíos o sin datos, estos fueron tratados con valor nulo y posteriormente integrados al proceso de llenado, garantizando que la superficie resultante representara una topografía hidrológicamente coherente.

6.3.5.2 Dirección de flujo

A partir del MDE corregido se calculó la dirección de flujo mediante el algoritmo Flow Direction, que asigna a cada celda la dirección hacia su vecino de menor elevación. Este procedimiento permite establecer las rutas potenciales de escurrimiento en la superficie topográfica.

6.3.5.3 Flujo acumulado

Posteriormente, con base en la dirección de flujo, se obtuvo el raster de flujo acumulado. Este representa, en cada celda, el número de celdas que drenan hacia ella, es decir, la magnitud de escurrimiento superficial concentrado en la topografía. En este raster, los valores altos indican áreas de convergencia de flujo, mientras que los valores bajos corresponden a zonas de divisoria o con poca acumulación.

6.3.5.4 Cálculo de densidad de flujo acumulado

Una vez obtenido el flujo acumulado, se procedió a calcular la densidad de flujo acumulado, la cual consiste en normalizar el valor de cada celda por su área. Este procedimiento se realizó en la Calculadora Raster de ArcGIS Pro, dividiendo los valores del raster de flujo acumulado entre el área correspondiente a cada celda del MDE. Dado que la resolución espacial del MDE ALOS PALSAR empleado es de 12,5 m, el área de cada celda corresponde a 156,25 m² (12,5 × 12,5).

De esta manera, la densidad de flujo acumulado, se expresa como la proporción de flujo acumulado por unidad de superficie, lo que permite comparar celdas de forma estandarizada e identificar las zonas con mayor concentración relativa de escorrentía.

El resultado final corresponde a un raster, el cual constituye la variable principal en el presente estudio para la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa, ya que refleja la tendencia del relieve a concentrar el escurrimiento y, en consecuencia, la posibilidad de generación de procesos de inestabilidad.

En el caso de la microcuenca, se incorporó la variable donde se observó que la mayoría de la zona presenta valores bajos a moderados (Figura 7), mientras que las mayores concentraciones

se localizan en las principales vaguadas y en zonas urbanizadas donde el drenaje natural ha sido intervenido. Estas áreas, donde se acumula con mayor facilidad el agua, coinciden frecuentemente con puntos de convergencia hídrica. Allí, el exceso de humedad en el suelo podría actuar como un factor que favorece la ocurrencia de procesos de deslizamientos.

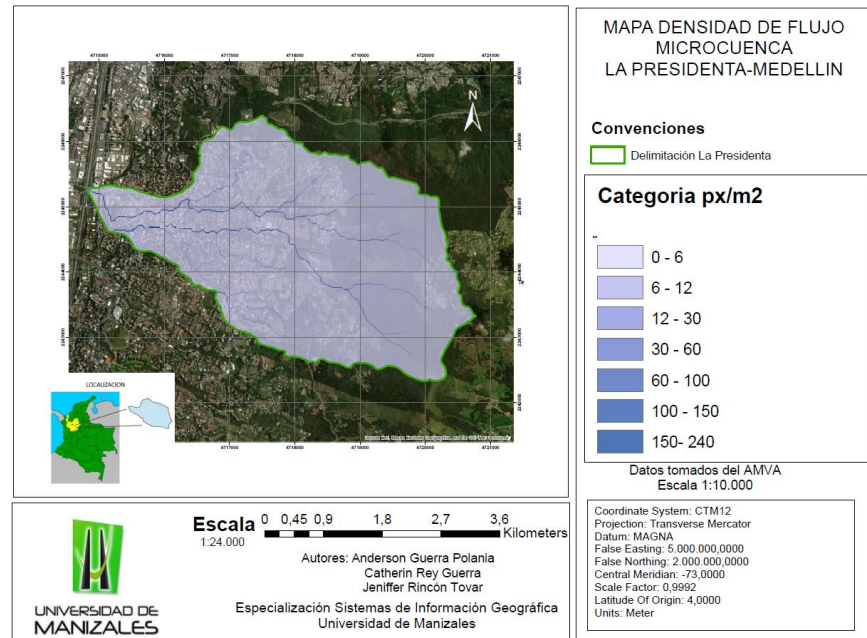


Figura 7. Densidad de flujo acumulado en la microcuenca La Presidenta

Fuente: Elaboración propia, ALOS PASAR

6.4 Procedimiento

El SGC ha llevado a cabo diferentes estudios centrados en profundizar el conocimiento acerca de este fenómeno, con el fin de brindar herramientas a los tomadores de decisiones para la prevención y mitigación de los efectos negativos generados por los fenómenos de MM (Montero, 2017), para lo cual, elaboró la Guía Metodológica para zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000, que ha sido incorporada dentro de los Planes de Ordenamiento Territorial, allí se presentan los aspectos y variables clave a tener en cuenta para realizar un buen análisis de la susceptibilidad de ocurrencia de este fenómeno.

Adicional al inventario de procesos, el cual aporta información multitemporal sobre la espacialización, frecuencia y magnitud de los movimientos en masa tipo deslizamiento, es importante identificar los factores que propician dichos eventos los cuales son diferenciados entre

detonantes y condicionantes. La identificación y análisis de estas variables constituye la base para la zonificación de la susceptibilidad a movimientos en masa, entendida como el proceso mediante el cual se delimitan las áreas con mayor o menor probabilidad de que ocurran estos fenómenos. Este procedimiento constituye un insumo fundamental para los procesos de evaluación y gestión del riesgo y, en zonas de poca densidad de datos, es considerado un producto final incorporable a los análisis de planificación el territorio (SGC, 2017)

Teniendo en cuenta que este fenómeno está enmarcado dentro de todo ese contexto de particularidades y que existe una restricción en la cantidad y calidad de datos que puedan ser usados, no se restringe la inclusión de aquellos factores que el investigador considere indispensables en el contexto de su área de estudio (Alvarado et al., 2012; Montero, 2017; SGC, 2017) por lo que en el presente, se incorpora la densidad de flujo acumulado como una de estas variables condicionantes. Esta es calculada a partir del DEM usando herramientas informáticas de procesamiento de datos geográficos asociados a un sistema de referencia coordinado o SIG (Vasquez & Tocasuche, 2023). Por lo que los insumos finales usados para realizar el análisis se listan en la Tabla 1 y Figura 8.

Tabla 1. Insumos usados para el análisis y zonificación de la susceptibilidad a MM

Insumo	Aporte	Origen	Resolución
Inventario de procesos	Base del análisis de la susceptibilidad por el método estadístico bivariado	Geoportales institucionales (SIMMA, SGC, AMVA, IDEAM)	10 m
Geología	Litología y estructuras geológicas	Información institucional AMVA	10 m
Geomorfología	Características de las unidades geomorfológicas presentes	Información institucional AMVA	10 m
Cobertura de la tierra	Cobertura de la tierra definida en base a la metodología Corine Land Cover	Información institucional AMVA	10 m
DEM	-Generar base cartográfica - Pendiente, morfología - Densidad de flujo acumulado	ALOS PALSAR	12,5 m

Fuente: Elaboración propia

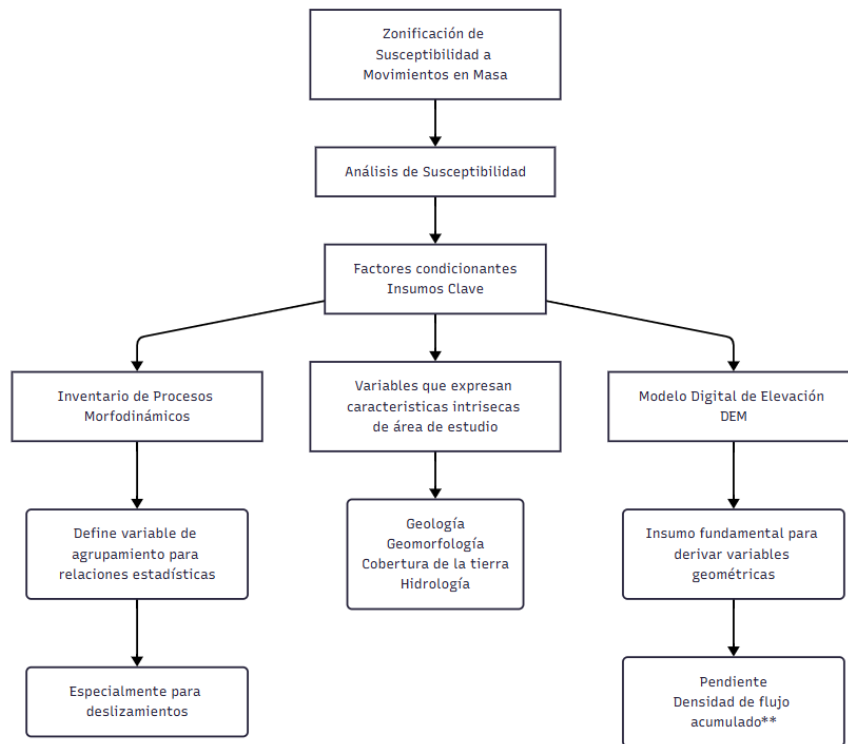


Figura 8. Insumos usados para el análisis de la susceptibilidad a MM tipo deslizamiento con base en la guía metodológica del SGC (2017).

Fuente: Elaboración propia adaptado de SGC (2017)

Siguiendo la guía metodológica (SGC, 2017), el proceso para obtener la zonificación de la susceptibilidad, que es el alcance definido para este estudio, se desarrolló en dos fases, ilustradas en la Figura 9.

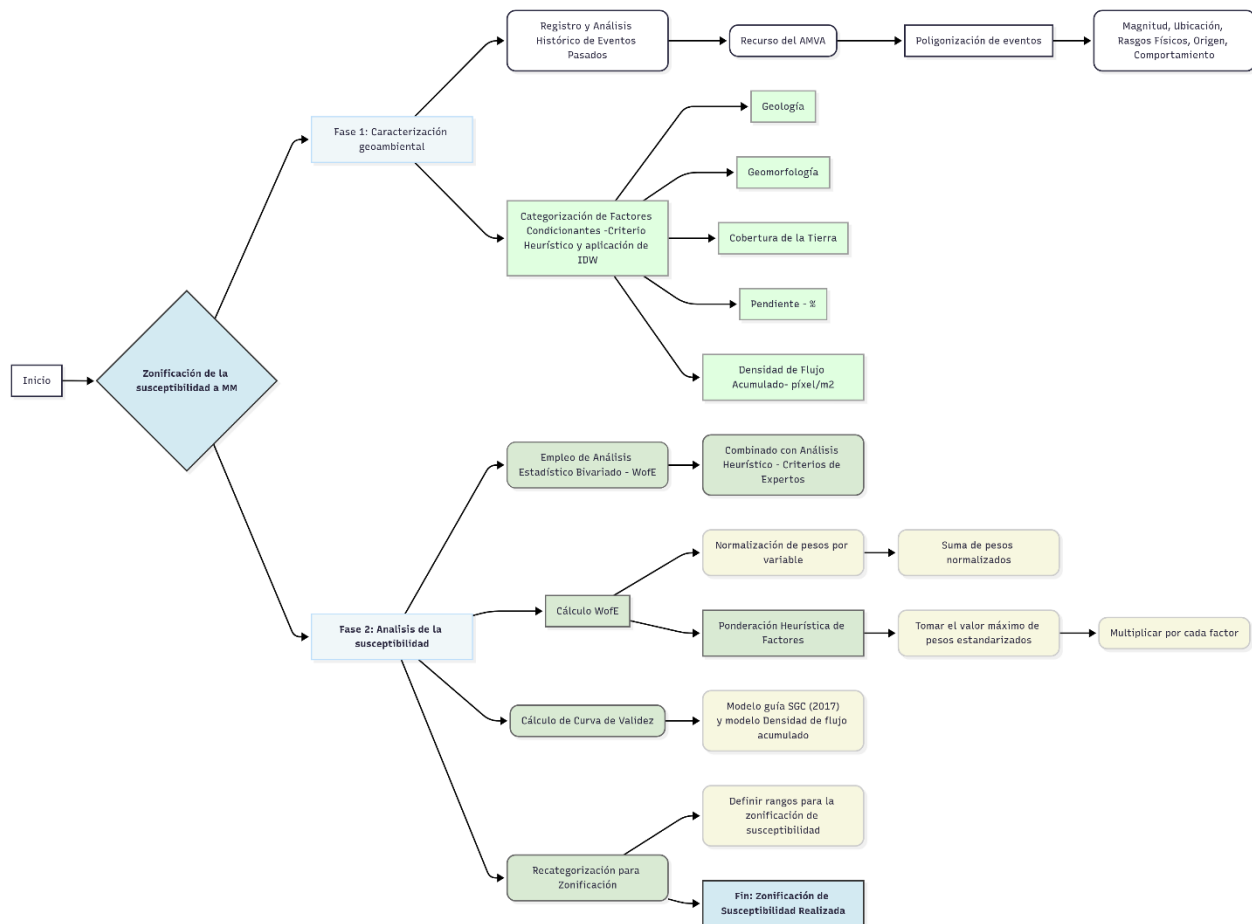


Figura 9. Metodología usada para el análisis de la susceptibilidad a MM tipo deslizamiento con base en la guía metodológica del SGC (2017).

Fuente: Elaboración propia adaptado de SGC (2017)

6.4.1 Caracterización geoambiental

Este registro incluye también información histórica disponible sobre eventos pasados, lo cual permitió enriquecer el análisis. El inventario en sí representa gráficamente aspectos como la magnitud, la ubicación y otros rasgos físicos asociados a los MM, que ayudan en la interpretación de su origen y comportamiento (SGC, 2017).

Los factores condicionantes utilizados en el análisis de susceptibilidad fueron categorizados mediante un criterio heurístico (Tabla 2), fundamentado en el conocimiento técnico y la experiencia sobre el comportamiento y la respuesta de distintos tipos de materiales, geoformas, coberturas del suelo, pendientes y características hidrológicas del terreno. Como parte del refinamiento de la

cartografía de susceptibilidad, se aplicó el método de interpolación IDW, el cual se basa en la idea de que los lugares más próximos entre sí tienden a compartir características similares. En este caso, los valores en puntos no muestreados se estiman asignando mayor peso a los datos más cercanos, en proporción inversa a su distancia (SGC, 2017).

Tabla 2. Insumos usados para el análisis y zonificación de la susceptibilidad a MM

Factor condicionante	Categoría (Wi)
Geología	Llenos antrópicos
	Depósitos aluviales y aluvio torrenciales
	Depósitos de deslizamiento y de flujo de escombros y/o lodo
	Migmatita de puente Peláez, Dunita de Medellín, Gabro de San Diego, Metabasitas del Picacho
Geomorfología	Lomos, lomos bajos
	Escarpe semicircular superior, escarpe lineal superior
	Superficies suaves de diferentes grados de incisión y peldaños
	Vaguadas y cañones
	Abanicos
	llanura aluvial
Cobertura de la tierra	Mosaico de pastos con cultivos y cultivos con espacios naturales
	Plantaciones forestales
	Pastos enmalezados, pastos limpios, y mosaico de pastos con espacios naturales
	Zonas urbanizadas
	Vegetación secundaria o en transición
	Bosque denso, alto de tierra firme.
Pendiente (%)	0-6
	6-12
	12-18
	18-24
	24-30
	30-36
	30-100
Densidad de flujo acumulado (píxel/m ²)	0-6
	6-12
	12-30

	30-60
	60-100
	100-150
	150-240

Fuente: Elaboración propia en base a metodología heurística.

6.4.2 *Análisis de susceptibilidad:*

Una vez procesados todos los insumos necesarios para abordar el trabajo, se empleó un análisis estadístico bivariado denominado WofE o pesos de evidencia, combinado con un análisis heurístico, a partir del cual se obtuvo la susceptibilidad a MM (SGC, 2017).

6.4.2.1 *Calculo pesos de evidencia*

En el modelo de Pesos de Evidencia propuesto por Bonham-Carter (1994), se busca cuantificar la relación entre la presencia de deslizamientos y los factores condicionantes del terreno. Para ello, se parte del supuesto de que los deslizamientos (L) han ocurrido p veces dentro de un área total q , lo que permite estimar una probabilidad base de ocurrencia del fenómeno mediante la razón:

$$p(L) = \frac{n(L)}{q} = \frac{p}{q}$$

Fórmula 1. Probabilidad de ocurrencia de procesos morfodinámicos (SGC, 2017).

Cuando se incorpora un factor condicionante, dividido en varias clases w_i , la probabilidad condicional de ocurrencia de deslizamientos en una clase específica se calcula a través de la proporción entre el número de deslizamientos que se presentan en esa clase y el número total de áreas con esa clase.

$$p(L|w_i) = \frac{p(w_i \cap L)}{p(w_i)}$$

Fórmula 2. Formula probabilidad condicional (SGC, 2017).

Este enfoque permite transformar las probabilidades en razones de proporción, lo que facilita el análisis mediante logaritmos. Así, se definen los pesos positivos como el logaritmo

natural de la razón entre la proporción de áreas con deslizamientos en una clase determinada y la proporción de áreas sin deslizamientos en esa misma clase.

$$w_i^+ = \ln \frac{p(w_i|L)}{p(w_i|\bar{L})}$$

Fórmula 3. *Fórmula usada en la metodología, peso positivo (SGC, 2017).*

De forma similar, los pesos negativos se calculan como el logaritmo de la proporción de áreas sin deslizamientos frente a aquellas con presencia del fenómeno. Estas medidas permiten evaluar qué tanto favorece o desfavorece una clase particular del factor al evento estudiado

$$w_i^- = \ln \frac{p(w_i|\bar{L})}{p(w_i|L)}$$

Fórmula 4. *Fórmula usada en la metodología, peso negativo (SGC, 2017).*

En términos de píxeles, según Van Westen (1993):

$$q = N = \text{Npix1} + \text{Npix2} + \text{Npix3} + \text{Npix4}$$

Donde:

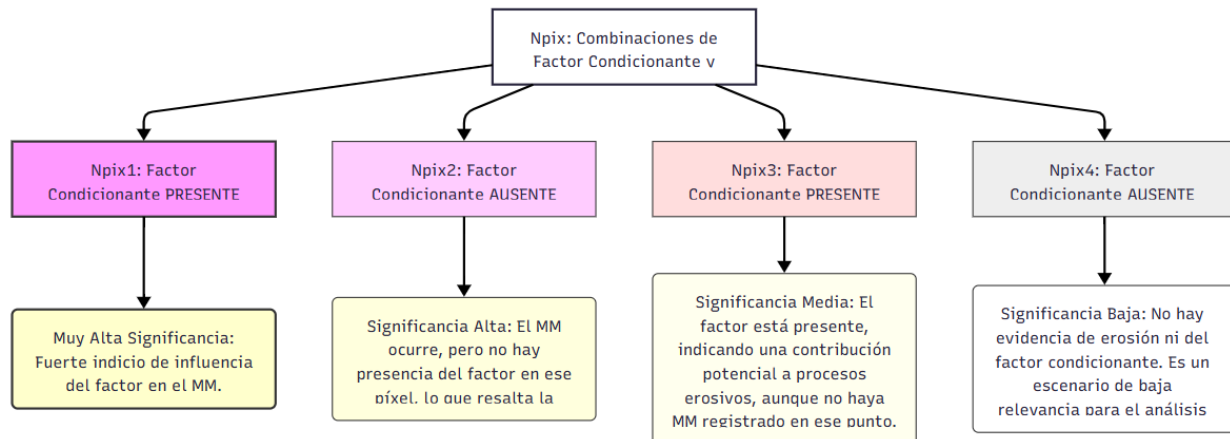


Figura 10. Interpretación de los factores en términos de píxeles con base en la guía metodológica del SGC (2017).

Fuente: Elaboración propia adaptado de SGC (2017)

El peso positivo se define como:

$$w_i^+ = \ln \frac{\frac{Npix1}{Npix1 + Npix2}}{\frac{Npix3}{Npix3 + Npix4}}$$

Fórmula 5. *Peso de evidencia positivo en términos de píxeles (SGC, 2017).*

Donde el peso positivo indica la importancia de la presencia del factor en el proceso erosivo de la siguiente forma:

$W_i^+ > 0$: Positivo, la presencia del factor contribuye a presencia de MM, su magnitud indica el grado de contribución.

$W_i^+ < 0$: Negativo, la presencia del factor contribuye a la ausencia de MM, su magnitud indica el grado de correlación inversa.

$W_i^+ = 0$: Indica que el factor no es relevante.

El peso negativo se define como:

$$w_i^- = \ln \frac{\frac{Npix2}{Npix1 + Npix2}}{\frac{Npix4}{Npix3 + Npix4}}$$

Fórmula 6. *Peso de evidencia negativo en términos de píxeles (SGC, 2017).*

Donde el peso negativo indica la importancia de la ausencia del factor en MM de la siguiente forma:

$W_i^- > 0$: Positivo, indica que la ausencia del factor contribuye a la presencia de MM.

$W_i^- < 0$: Negativo, indica que la ausencia del factor contribuye a la ausencia de MM.

$W_i^- = 0$: Indica que el factor no es relevante.

Los pesos de evidencia W_i^+ y W_i^- se calcularon para cada clase del factor condicionante.

En la siguiente ecuación se define el peso final, el cual describe la correlación entre el factor condicionante y los procesos erosivos (deslizamientos) (Figura 11).

$$w_f = w_i^+ - w_i^-$$

Fórmula 7. *Peso de evidencia total de cada variable condicionante (SGC, 2017).*

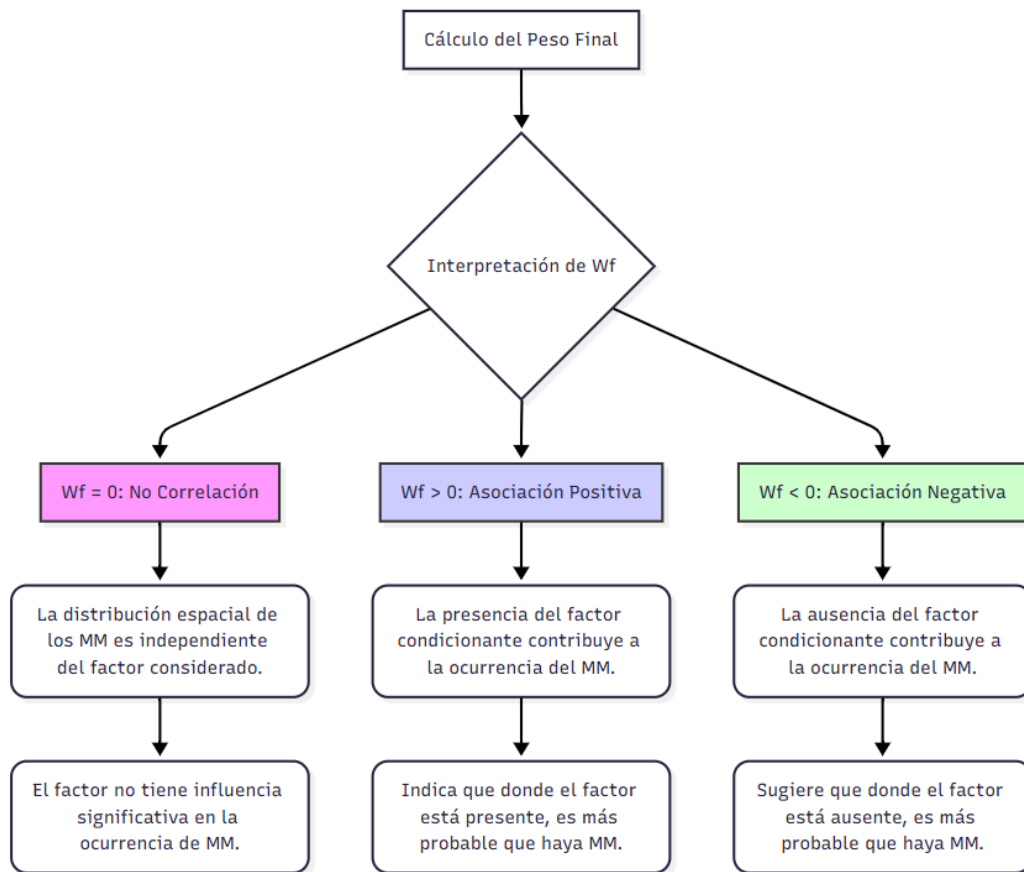


Figura 11. Interpretación de los pesos finales con base en la guía metodológica del SGC (2017).

Fuente: Elaboración propia adaptado de SGC (2017)

El análisis cualitativo complementa el enfoque cuantitativo al incorporar un método basado en la experiencia y en la interpretación geomorfológica del terreno. Esta fase permite identificar características locales que muchas veces no son reflejadas con precisión por los modelos estadísticos. La participación del conocimiento experto es fundamental para comprender la evolución del paisaje, reconocer áreas con mayor probabilidad de inestabilidad y contrastar los resultados cuantitativos, considerando aspectos como la orientación de las laderas, la morfología del relieve y la presencia de formas cóncavas. Esta mirada complementaria contribuye a una evaluación más precisa y ajustada al contexto real de los factores condicionantes.

Por ello, con base en criterio experto, se calcularon los pesos normalizados para ajustar los resultados al enfoque del análisis. Estos se obtienen a partir del valor W_f de cada categoría, tomando como referencia el peso máximo y el mínimo registrados en la tabla. Se aplica una escala de normalización que permite expresar los pesos de forma relativa, facilitando la comparación entre clases.

$$W_{normalizado} = \frac{(w_{fi} - w_{f\ min})}{(w_{f\ max} - w_{f\ min})} \times Valor\ total\ de\ categoría\ por\ cada\ factor$$

Fórmula 8. *Peso normalizado para cada variable condicionante (SGC, 2017).*

Dónde:

W_{fi} : peso final de la categoría

$W_{f\ min}$: menor valor de W_f en la tabla

$W_{f\ max}$: mayor valor de W_f en la tabla

Total de categorías por cada factor

6.4.2.2 Función final de susceptibilidad

En la Ecuación (SGC, 2017) se presenta la función final de susceptibilidad o IS. Donde el valor IS de cada píxel corresponde a la suma de los pesos finales calculados para la clase a la que pertenece el píxel de cada uno de los factores seleccionados.

$$IS = W_f \text{ Geomorfología} + 2 W_f \text{ Pendientes} + 2 W_f \text{ geología} + 2 W_f \text{ coberturas} \\ + 5 W_f \text{ Densidad de flujo acumulado}$$

Fórmula 9. *Índice de susceptibilidad para las variables que se trabajaran en este estudio, modificado de la guía del servicio geológico conforme a los pesos asignados para cada variable (SGC, 2017).*

En la aplicación del método WofE se seleccionó una muestra de entrenamiento con la cual se calcularon los pesos de cada factor que definen la función final que representa la susceptibilidad del área de estudio (Conforti et al., 2012, en SGC, 2017). Con estos procesos morfodinámicos se definió la función final se establece el ajuste mediante la curva de éxito (Figura 12). El porcentaje de procesos erosivos restante se utilizó para la construcción de la curva de validación, con la cual se verificó la potencialidad de la función para pronosticar la ocurrencia de procesos erosivos.

6.4.2.3 Curva de éxito y validación

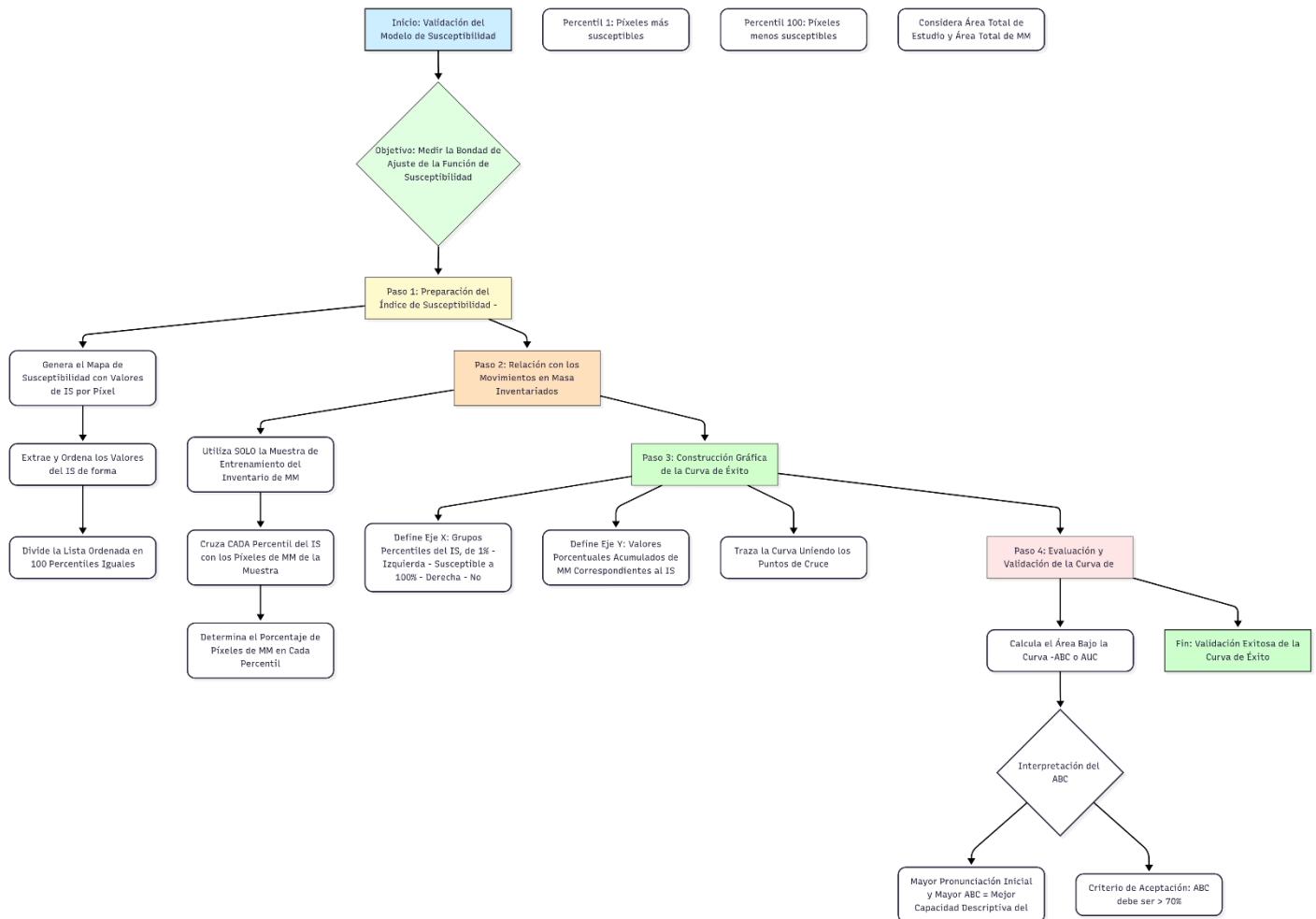


Figura 12. Metodología de cálculo de la curva de éxito con base en la guía metodológica del SGC (2017).

Fuente: Elaboración propia adaptado de SGC (2017)

Se debe tener en cuenta que las categorías de susceptibilidad se definieron una vez se comprobó que la función de susceptibilidad definida representa las condiciones del área de estudio de forma adecuada y satisfactoria (SGC, 2017).

Se propone la siguiente categorización para el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa:

Tabla 3. Categorización mapa de susceptibilidad a MM tipo deslizamiento.

Susceptibilidad	Porcentaje acumulado de movimientos en masa
-----------------	---

Alta	$> 70\%$
Media	$\geq 10\% \text{ y } \leq 70\%$
Baja	$< 10\%$

Fuente: Elaboración propia con base en criterios heurísticos.

Esta metodología se aplicó para las variables condicionantes propuestas, con y sin la densidad de flujo acumulado, con el fin de saber si afecta la curva de éxito, si el modelo mejora, y realizar la zonificación en ambas condiciones para verificar el aporte de la densidad de flujo acumulado en la elaboración de la zonificación.

7 Resultados

7.1 Fase 1. Caracterización geoambiental

Previo a la elaboración de las tablas para la metodología WofE se realizó el alistamiento de los insumos, primero se generó el mapa de pendientes y de densidad de flujo acumulado, estas junto con las demás variables condicionantes (geología, geomorfología, coberturas de la tierra), se recategorizaron, de modo que las categorías que sean muy similares se reagrupen en una sola, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Categorización de los factores condicionantes usados para la zonificación de susceptibilidad a MM.

Reclas_raster	Categorías				
	Unid_Geológicas	Geomorfológicas	Coberturas	Densidad_flujo_acumulado	Pendientes
1	Llenos antrópicos	Lomos, lomos bajos	Mosaico de pastos con cultivos y cultivos con espacios naturales	0-6	0-6
2	Depósitos aluviales y aluvio torrenciales	Escarpe semicircular superior, escarpe lineal superior	plantaciones forestales	6-12	6-12
3	Depositos de deslizamiento y de flujo de escombros y/o lodo	Superficies suaves de diferentes grados dde incisión y peldaños	Pastos enmalezados, pastos limpios, y mosaico de pastos con espacios naturales	12-30	12-18
4	Migmatita de puente pelaez, dunita de medellín, Gabro de San Diego, Metabasitas del picacho	vaguadas y cañones	Zonas urbanizadas	30-60	18-24
5		Abanicos	Vegetación secundaria o en transición	60-100	24-30
6		llanura aluvial	Bosque denso, alto de tierra firme.	100-150	30-36
7				150-240	30-100

De las variables estudiadas con respecto a los deslizamientos o procesos morfodinámicos de la zona de estudio, se creó a partir del inventario de procesos morfodinámicos un shape de polígonos, sin embargo, el inventario en la parte media - alta, donde se caracteriza por ser zona rural, escarpada con cobertura predominantemente de plantaciones forestales, no registra procesos morfodinámicos ni deslizamientos históricos como se esperaría debido a las altas pendientes; el margen occidental presenta pocos procesos, pero esto es debido a que se localiza en superficies muy suaves con inclinaciones menores a 6° sobre suelos urbanizados en donde se presentan tramos de la quebrada canalizados (figura 13).

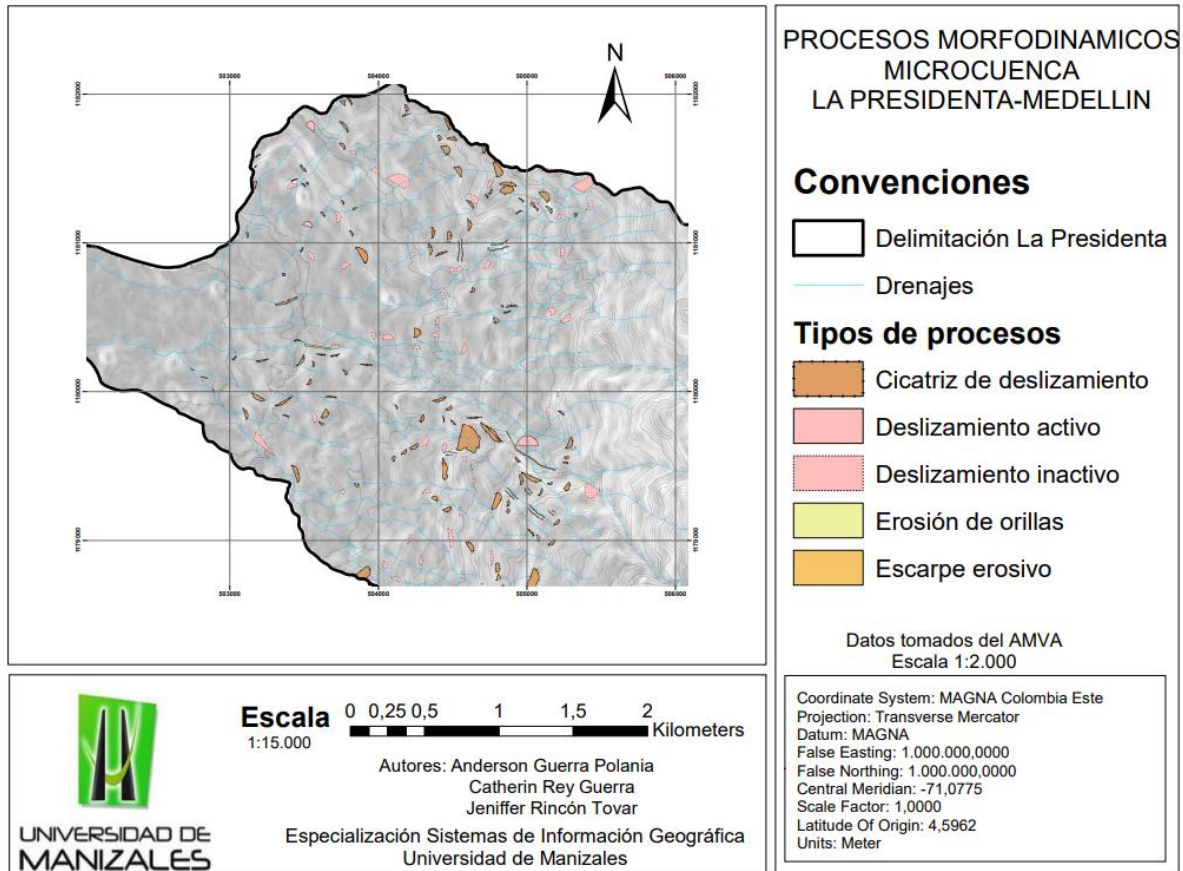


Figura 13. Poligonización de los procesos morfológicos en el inventario de AMVA y complementados con algunas cicatrices de deslizamiento identificadas.

Fuente: Elaboración propia.

Para la elaboración de las tablas correspondientes a las diferentes variables condicionantes, se tiene en cuenta que:

- Las cantidades de la tabla se expresan en número de píxeles.
- El tamaño del píxel utilizado en los cálculos fue de 12,5 x 12,5 m para los insumos derivados del DEM y de 10 x 10 m para la geología, geomorfología y coberturas por lo que el resultado final tiene una resolución de 12,5 x 12,5.
- El área deslizada fue de 1391,1 m².
- El área de estudio fue de 13,1 km².
- En la columna 1 se presenta el número de identificación o reclasificación de cada categoría, de forma que unidades con características similares estén en la misma categoría con respecto a la variable condicionante propuesta.

- _ En la columna 2 se presentan las categorías del factor condicionante definido según la categoría identificada en el estudio de la zona de interés.
- _ En la columna 3 se presenta el número de píxeles con deslizamientos que corresponden a cada clase del factor condicionante.
- _ En la columna 4 se presenta el porcentaje de deslizamientos correspondiente a cada clase del factor condicionante.
- _ En la columna 5 se presenta el número de píxeles correspondiente a cada clase del factor condicionante.
- _ En la columna 6 se presenta el porcentaje de cada clase del factor condicionante.
- _ En la columna 7 se presenta los valores para el peso positivo aplicando WofE.
- _ En la columna 8 se presenta los valores para el peso negativo aplicando WofE.
- _ En la columna 9 se presenta el peso final o contraste.
- _ En la columna 10 se presenta el resultado normalizado, dentro de los valores 1 a 7 con el propósito de simplificar los cálculos, el siete se escogió por ser la mayor cantidad de categorías en las variables condicionantes.

7.1.1 Variable condicionante - Geología superficial

Se agrupó en cuatro categorías (Figura 15), como se muestra en la Tabla 5, de forma que las unidades con características físicas o mecánicas similares pertenezcan a la misma categoría.

Tabla 5. Pesos de la variable condicionante geología superficial derivadas de la metodología wofe (SGC, 2017)

Id	Categoría	Mov	% mov	Clase	% Clase	wi+	wi-	wf	W normalizado
1	Llenos antrópicos	550	21,4	16261	12,2	0,57454271	-0,112589498	0,461953209	7
2	Depósitos aluviales y aluvio torrenciales	0	0,0	1788	1,3	0	0	0	1

3	Depósitos de deslizamiento y de flujo de escombros y/o lodo	801	31,2	42911	32,3	-0,0354388	0,016497418	-0,018941345	1
4	Migmatita de puente Peláez, dunita de Medellín, Gabro de San Diego, Metabasitas del picacho	1216	47,4	71860	54,1	-0,1353456	0,139779301	0,004433716	1
	Total	2567		132820					

Fuente. Elaboración propia basada en la metodología del SGC (2017).

Análisis porcentual de los movimientos en masa según la categoría geológica

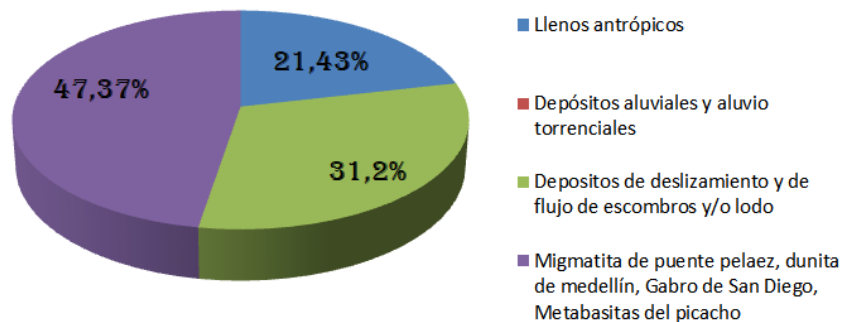


Figura 14. Análisis porcentual de los MM en cada categoría de unidades geológicas superficiales.

Fuente: Elaboración propia.

La gráfica muestra que la mayoría de los MM (47,37%) ocurren en formaciones geológicas como migmatitas, dunitas y gabros, sin embargo, los pesos de evidencia sugieren que la variable que más favorece los MM tipo deslizamiento son los llenos antrópicos que indican mayor susceptibilidad. Le siguen los depósitos de deslizamiento y flujo de lodo (31,2%), y los depósitos aluviales y torrenciales (21,43%), sin embargo, según la metodología estas unidades no presentan significancia en el origen de los deslizamientos y tienen un valor estandarizado de peso de 1, de la misma forma los depósitos aluviales y aluvio torrenciales que no presentan área dentro de los deslizamientos se le asignó el valor mínimo de peso que es 1 (Figura 14). Esto evidencia que la unidad geológica superficial que es crítica y presenta alta susceptibilidad a deslizamientos son los llenos antrópicos.

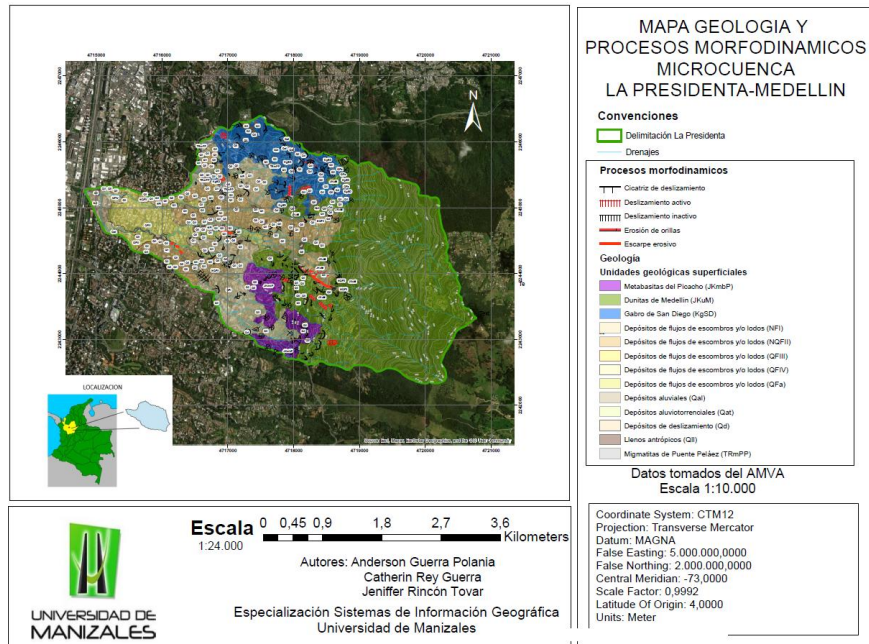


Figura 15. Variable condicionante – Geología y procesos morfodinámicos.

Fuente: Elaboración propia.

Para encontrar los pesos que se relacionan en la tabla 5, se usaron estos valores Npix1, Npix2, Npix3, Npix4, hallados con las fórmulas 5, 6 y 7.

Tabla 6. Tabla de relación deslizamiento y factor condicionante de la geología.

Npix1	Npix2	Npix3	Npix4
550	2017	15711	114542
0	2567	1788	128465
801	1766	42110	88143
1216	1351	70644	59609

Fuente: Elaboración propia basada en la metodología del SGC (2017).

7.1.2 Variable condicionante - Geomorfología

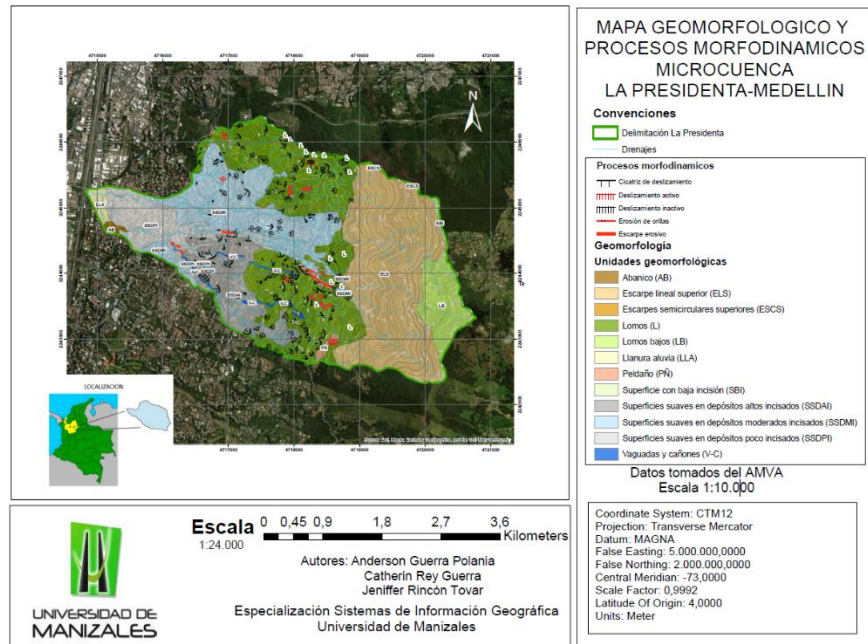


Figura 16. Variable condicionante – Geomorfología y procesos morfodinámicos.

Fuente: Elaboración propia.

Se reagrupó en 6 categorías (Figura 16) como se presenta en la siguiente tabla,

Tabla 7. Pesos de la variable condicionante geomorfología derivadas de la metodología wofe (SGC, 2017)

Id	Categoría	Mov	% mov	Clase	% Clase	wi+	wi-	wf	W normalizado
1	Lomos, lomos bajos	1717	66,9	46921	35,3	0,65613381	-0,679005679	-0,022871865	7
2	Escarpe semicircular superior, escarpe lineal superior	7	0,3	37359	28,1	-4,6554908	0,33521366	-4,320277117	1
3	Superficies suaves de diferentes grados de incisión y peldaños	769	30,0	45900	34,6	-0,1454929	0,069330226	-0,076162645	2
4	vaguadas y cañones	74	2,9	1042	0,8	0,23881752	-0,006286124	0,232531401	1

5	Abanicos	0	0,0	442	0,3	0	0,003399167	0,003399167	1
6	llanura aluvial	0	0,0	1156	0,9	0	0,008914653	0,008914653	1
	Total	2567	100,0	132820	100,0				

Fuente. Elaboración propia basada en la metodología del SGC (2017).

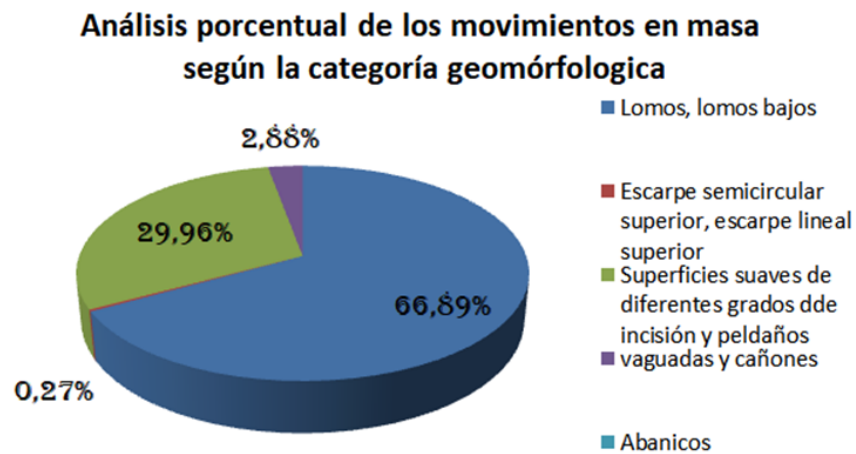


Figura 17. Análisis porcentual de los MM en cada categoría geomorfológica.

Fuente: Elaboración propia

La anterior gráfica indica que el 66,89% de los MM ocurren en lomos y lomos bajos, lo que sugiere que estas formas del terreno son propensas a inestabilidad, lo que se confirma con el peso que se encontró para esta categoría. Le siguen las superficies suaves con diferentes grados de incisión y peldaños (29,96%), donde también se presentan condiciones geomorfológicas que favorecen los deslizamientos. En menor proporción se encuentran los escarpes (2,88%) y los abanicos (0,27%) (Figura 17), lo que indica una menor frecuencia de eventos en estas zonas específicas.

En análisis a los resultados anteriores, se calcula la relación de deslizamiento con el factor condicionante de la geomorfología categorizada en la zona de interés a partir de las fórmulas 5, 6 y 7 para encontrar los pesos de evidencia de cada categoría.

Tabla 8. Tabla de relación deslizamiento y factor condicionante de la geomorfología.

Npix1	Npix2	Npix3	Npix4
1717	850	45204	85049
7	2560	37352	92901
769	1798	45131	85122
74	2493	968	41669
0	2567	442	129811
0	2567	1156	129097

Fuente: Elaboración propia basada en la metodología del SGC (2017).

7.1.3 Variable condicionante – Pendiente

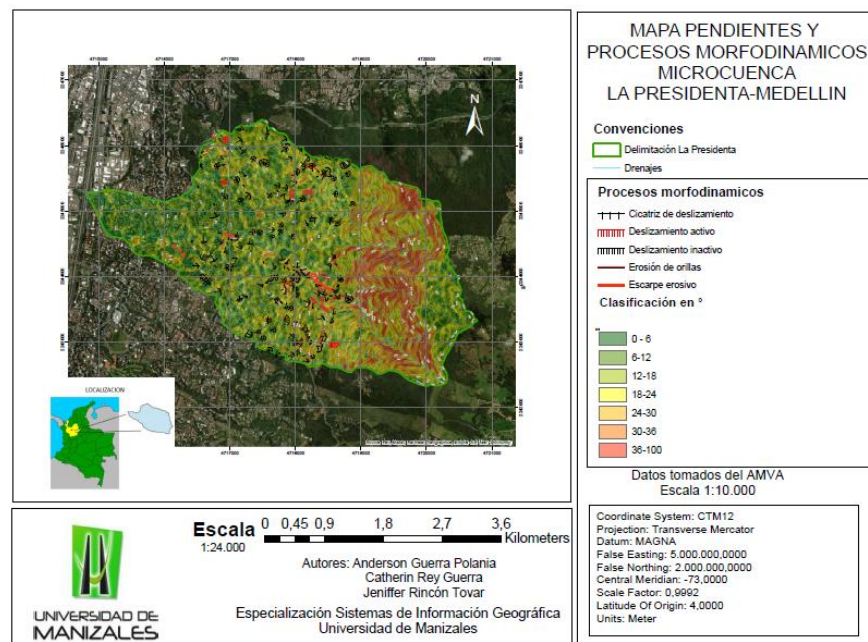


Figura 18. Variable condicionante – Pendiente y procesos morfodinámicos.

Fuente: Elaboración propia.

Se establecieron siete rangos de clasificación (Figura 18) según el grado de inclinación para llevar a cabo el análisis, como se muestra en la siguiente tabla con forme a la guía metodológica del SGC (2017).

Tabla 9. Pesos de la variable condicionante pendiente derivadas de la metodología wofe (SGC, 2017)

id	Categoría (°)	Mov	% mov	Clase	% Clase	wi+	wi-	wf	W normalizado
----	---------------	-----	-------	-------	---------	-----	-----	----	---------------

1	0-6	48	2,9	7836	9,4	-1,187585889	0,070323538	-1,117262351	1
2	6-12	233	14,0	18014	21,5	-0,43329483	0,0927884	-0,34050643	4
3	12-18	495	29,8	19878	23,7	0,233958557	-0,084994477	0,14896408	6
4	18-24	533	32,1	15904	19,0	0,539835995	-0,180205819	0,359630176	7
5	24-30	240	14,5	10682	12,8	0,128599976	-0,020204545	0,108395431	6
6	30-36	77	4,6	7070	8,4	-0,607307039	0,041514991	-0,565792048	3
7	30-100	33	2,0	4361	5,2	-0,974800792	0,034074038	-0,940726754	2
	Total	1659	100,0	83745	100,0				

Fuente. Elaboración propia basada en la metodología del SGC (2017).



Figura 19. Análisis porcentual de los MM en cada categoría de pendiente.

Fuente: Elaboración propia

Según la gráfica, la mayor parte de los MM se presentan en pendientes entre las categorías de 18°-24° (32,1%) y entre 12°-18° (29,8%). En cuanto a los pesos que se encontraron para estas variables son congruentes con zonas de mayor susceptibilidad, obteniendo pesos de 7 y 6 respectivamente, pendientes entre 24° y 30° a pesar de no tener mucha zona dentro de los deslizamientos tiene un peso de evidencia de 6, lo que indica alta susceptibilidad para esta categoría, seguidos por zonas entre 6° y 12° con peso de 4 (Figura 19). las pendientes que muestran más favorabilidad para la no ocurrencia de procesos, según la metodología, son las zonas con pendientes bajas, entre 0° y 6°, lo que sugiere que los MM son menos frecuentes en terrenos muy planos o ligeramente inclinados.

Por tanto, dados los resultados de la anterior tabla, se lleva a cabo el cálculo de la relación de deslizamiento con el factor condicionante de la pendiente, con estos valores y a partir de las fórmulas 5, 6 y 7 se calculan los pesos reportados en la anterior tabla.

Tabla 10. Tabla de relación deslizamiento y factor condicionante pendientes.

Npix1	Npix2	Npix3	Npix4
48	1611	7788	74298
233	1426	17781	64305
495	1164	19383	62703
533	1126	15371	66715

240	1419	10442	71644
77	1582	6993	75093
33	1626	4328	77758

Fuente: Elaboración propia basada en la metodología del SGC (2017).

7.1.4 Variable condicionante – Coberturas de la tierra

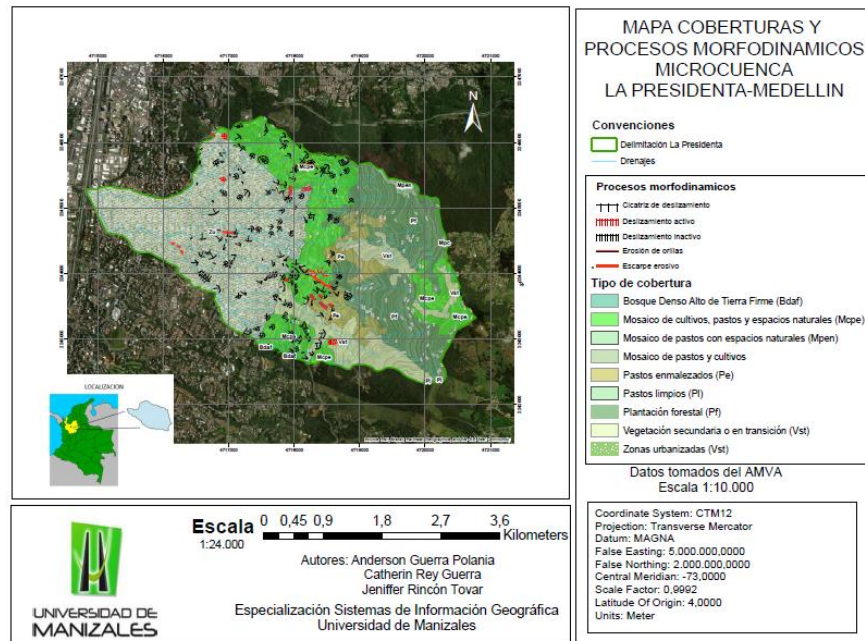


Figura 20. Variable condicionante – Coberturas de la tierra y procesos morfodinámicos.

Fuente: Elaboración propia.

Se tuvieron en cuenta seis categorías (Figura 20), como se muestra a continuación en la tabla 11.

Tabla 11. Pesos de la variable condicionante cobertura de la tierra derivadas de la metodología wofe (SGC, 2017)

id	Categoría	Mov	% mov	Clase	% Clase	wi+	wi-	wf	W normalizado
1	Mosaico de pastos con cultivos y cultivos con espacios naturales	1267	49,4	30543	23,0	0,78662464	-0,425787693	0,360836952	7
2	plantaciones forestales	160	6,2	28097	21,2	-1,2357926	0,177055906	-1,058736721	1

3	Pastos enmalezados, pastos limpios, y mosaico de pastos con espacios naturales	81	3,2	8835	6,7	-0,7560761	0,037509772	-0,71856628	2
4	Zonas urbanizadas	770	30,0	51190	38,5	-0,2550119	0,132922466	-0,122089409	5
5	Vegetación secundaria o en transición	272	10,6	13995	10,5	0,00571434	-0,000675096	0,005039245	5
6	Bosque denso, alto de tierra firme.	17	0,7	160	0,1	1,79710952	-0,005546076	1,791563449	4
	Total	2567	100,0	132820	100,0				

Fuente. Elaboración propia basada en la metodología del SGC (2017).

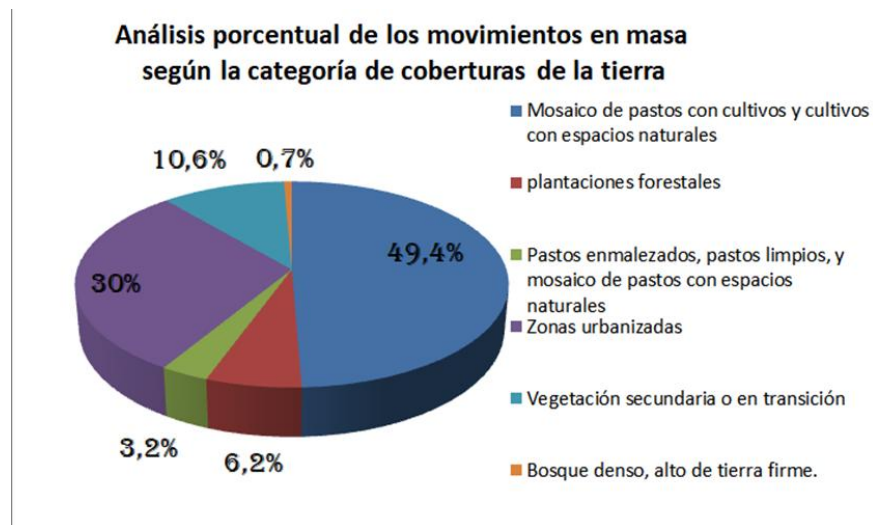


Figura 21. Análisis porcentual de los MM en cada categoría de cobertura de la tierra.

Fuente: Elaboración propia.

La gráfica muestra que el 49,4% de los MM se producen en zonas con predominancia de actividad antrópica (mosaico de pastos y cultivos) lo que sugiere el motivo de la inestabilidad del terreno al ser suelos desprovistos de capa vegetal y arborea que sirva de sostén y mejore la cohesión del suelo. Esto se respalda con el peso de evidencia encontrado para esta categoría. Las zonas urbanizadas representan el segundo porcentaje más altos (30%), seguidas por la vegetación

secundaria (10,6%). Se concluye, que las áreas de actividad antrópica, ya sea por agricultura o urbanización, son las más susceptibles a estos fenómenos. En contraste, los bosques densos presentan un peso de 4, y si bien solo un 0,7% se encuentra en deslizamientos el área general de esta categoría también presenta un área pequeña en comparación con el área de la zona de estudio (Figura 21).

Se obtiene la relación de deslizamiento con el factor condicionante de cobertura categorizada en la zona de interés, con estos valores se calcularon los pesos reportados en la siguiente tabla

Tabla 12. Tabla de relación deslizamiento y factor condicionante cobertura de la tierra.

Npix1	Npix2	Npix3	Npix4
1267	1300	29276	100977
160	2407	27937	102316
81	2486	8754	121499
770	1797	50420	79833
272	2295	13723	116530
17	2550	143	130110

Fuente: Elaboración propia basada en la metodología del SGC (2017).

7.1.5 Variable condicionante – Densidad de flujo acumulado

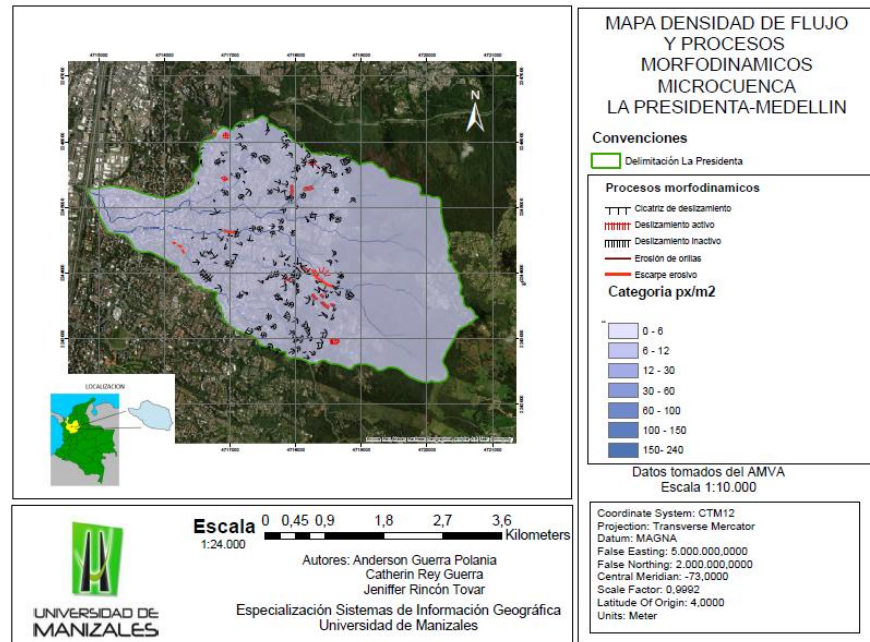


Figura 22. Variable condicionante – Densidad de flujo acumulado y procesos morfodinámicos.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, se realiza el cálculo aplicando la metodología de los pesos de evidencias para la variable condicionante densidad de flujo acumulado (Figura 22) agregada a esta metodología, para esta se tuvo en cuenta siete categorías según estudios realizados para la zona de influencia de la microcuenca, como se evidencia a continuación.

Tabla 13. Pesos de la variable condicionante densidad de flujo acumulado derivadas de la metodología wofe (SGC, 2017)

Id	Categoría px/m2	Mov	% mov	Clase	% Clase	wi+	wi-	wf	w normalizado
1	0-6	1644	98,4	83066	97,7	0,007399786	-0,382651709	-0,375251922	2
2	6-12	6	0,4	436	0,5	-0,362112743	0,001574656	-0,360538087	2
3	12-30	7	0,4	573	0,7	-0,482770933	0,00261551	-0,480155422	2

4	30-60	5	0,3	298	0,4	-0,1608217	0,000524088	-0,160297612	3
5	60-100	6	0,4	98	0,1	1,179883889	-0,00249455	1,177389338	7
6	100-150	2	0,1	210	0,2	-0,734477903	0,001301078	-0,733176825	1
7	150-240	0	0,0	313	0,4		0,0037634	0	3

Fuente. Elaboración propia basada en la metodología del SGC (2017).

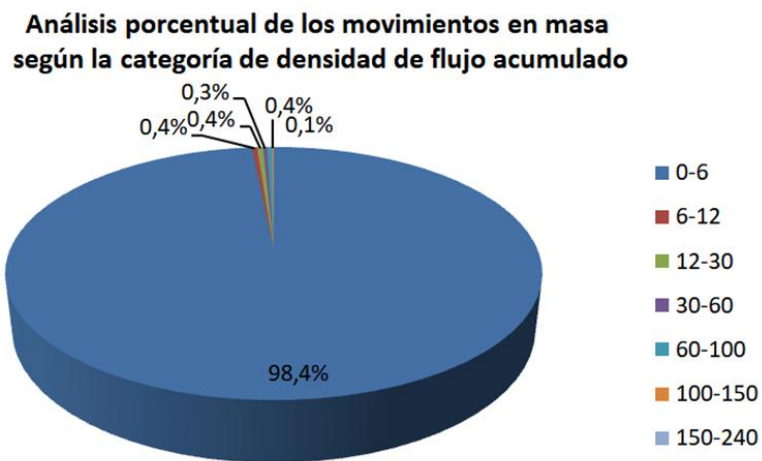


Figura 23. Análisis porcentual de los MM en cada categoría de densidad de flujo acumulado.

Fuente: Elaboración propia.

La gráfica evidencia que el 98,4% de los MM ocurren en áreas con muy baja densidad de flujo acumulado (0-6), esto porque las zonas donde se densifica el flujo o se acumula la escorrentía representa puntos o líneas muy focalizadas donde migra la escorrentía de todos los demás píxeles. Para la zona de entrenamiento del modelo WOFE se evidencia que la categoría de densidad más

crítica, que favorece la ocurrencia de MM son las zonas donde se acumula la escorrentía entre 60 y 100 píxeles por metro cuadrado (píxeles de tamaño 12,5 x 12,5) (Figura 23).

Con los resultados obtenidos de la tabla anterior, se calcula la relación de deslizamiento con el factor condicionante densidad de flujo acumulado para calcular luego los pesos sobre la misma tabla, utilizando las fórmulas 5, 6 y 7 para el cálculo de los pesos de evidencia (Tabla 14).

Tabla 14. Tabla de relación deslizamiento y factor condicionante Densidad de flujo acumulado

Npix1	Npix2	Npix3	Npix4
1644	26	81422	1902
6	1664	430	82894
7	1663	566	82758
5	1665	293	83031
6	1664	92	83232
2	1668	208	83116
0	1670	313	83011

Fuente: Elaboración propia basada en la metodología del SGC (2017).

Posterior al cálculo de los pesos normalizados por categoría, se asigna un peso a cada variable condicionantes (Tabla 15). Esto a partir de las categorías que presentan mayor peso en los factores, en este caso, el mayor peso lo aporta la densidad de flujo acumulado con un total de 1,177, estandarizando estos resultados entre el número 1 y el 5 por tratarse de 5 variables (Figura 24), se tiene el siguiente resultado para la asignación de pesos en las variables condicionantes.

Tabla 15. Peso normalizado por factor.

Variable condicionante	Valores máximos WofE	Peso por variable Normalización
Unidades geológicas superficiales	0,461953209	2
Geomorfología	0,232531401	1
Pendientes	0,359630176	2
Coberturas	0,360836952	2
Densidad de flujo acumulado	1,177389338	5

Se incorporaron estos pesos en la formula final para el ráster de IS de forma que pasa de:

$$IS = W_f \text{ geomorfología} + W_f \text{ Pendiente} + W_f \text{ Geología} + W_f \text{ Cobertura} \\ + W_f \text{ Densidad de flujo acumulado}$$

Fórmula 10. Índice de susceptibilidad para las variables que se trabajaran en este estudio, modificado de la guía del servicio geológico para adicionar la variable densidad de flujo acumulado (SGC, 2017).

A la siguiente forma en caso de usar las 5 variables

$$IS = W_f \text{ Geomorfología} + 2 W_f \text{ Pendientes} + 2 W_f \text{ geología} + 2 W_f \text{ coberturas} \\ + 5 W_f \text{ Densidad de flujo acumulado}$$

Fórmula 11. Índice de susceptibilidad para las variables que se trabajaran en este estudio, modificado de la guía del servicio geológico para adicionar la variable densidad de flujo acumulado conforme a los pesos asignados para cada variable (SGC, 2017).

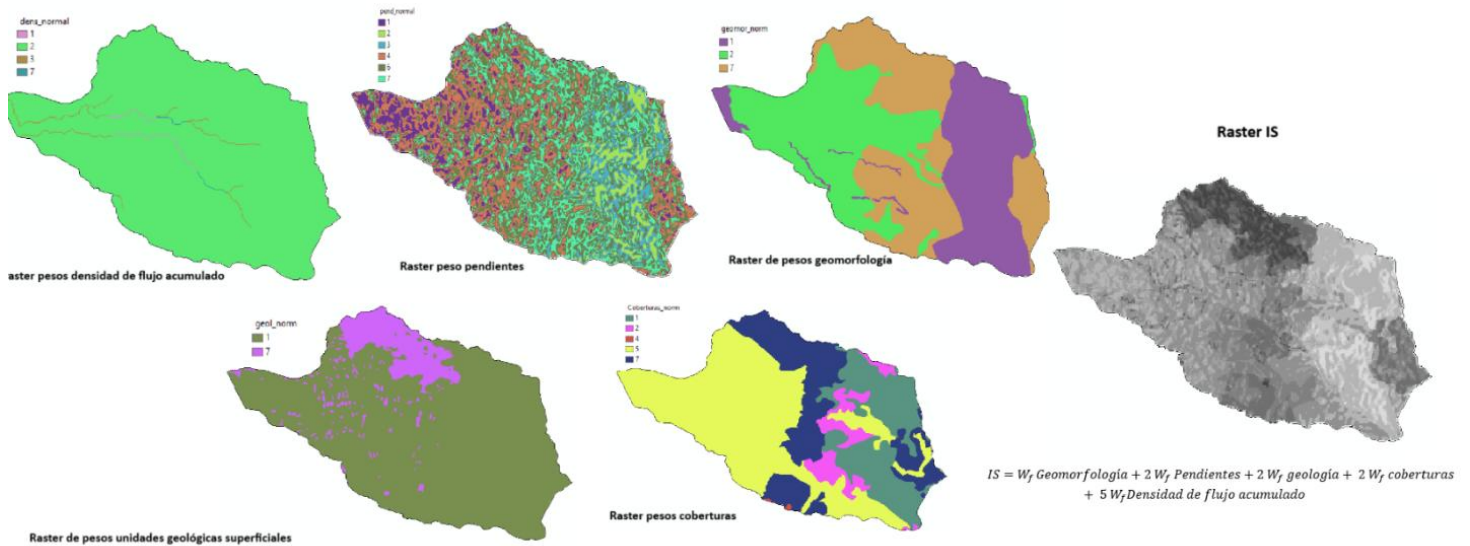


Figura 24. Reclasificación de las variables condicionantes con sus valores normalizados y aplicación de la fórmula de IS para generación de ráster de índice de susceptibilidad.

Fuente: Elaboración propia.

En este punto se calculan los ráster de IS según la anterior fórmula para 4 variables (ignorando el factor que involucra la densidad de flujo acumulado) y para las 5 variables.

La curva de éxito se consigue a partir de un inventario de los 84769 píxeles que tiene el ráster IS para la zona de estudio, y de la relación que estos tienen con respecto al inventario de deslizamientos o procesos morfodinámicos. Se organizan los valores de IS de menor a mayor y se divide en 100 categorías de percentiles, cada 1%. Con ayuda de una tabla dinámica podemos agrupar estos valores como se observa en el Anexo 1, con y sin el uso de la variable densidad de flujo acumulado.

Con base en los cálculos anteriores, se construye la curva de éxito (Figura 25 y 26), la cual representa la distribución acumulada de los deslizamientos a lo largo de los percentiles. Con esta tabla se identifican los rangos con mayor concentración de eventos, facilitando el análisis de las zonas más susceptibles. El área bajo la curva de éxito indica la calidad del ajuste de los datos para los valores de IS hallados, con respecto al inventario de procesos morfodinámicos. Para el estudio de los valores de IS sin la densidad de flujo acumulado se tienen un grado de ajuste de 70,49%, mientras que al incorporar la variable se tiene un grado de ajuste de 70,50. Evidenciando que el uso de la variable suma un 0.01% al grado de ajuste de los datos.

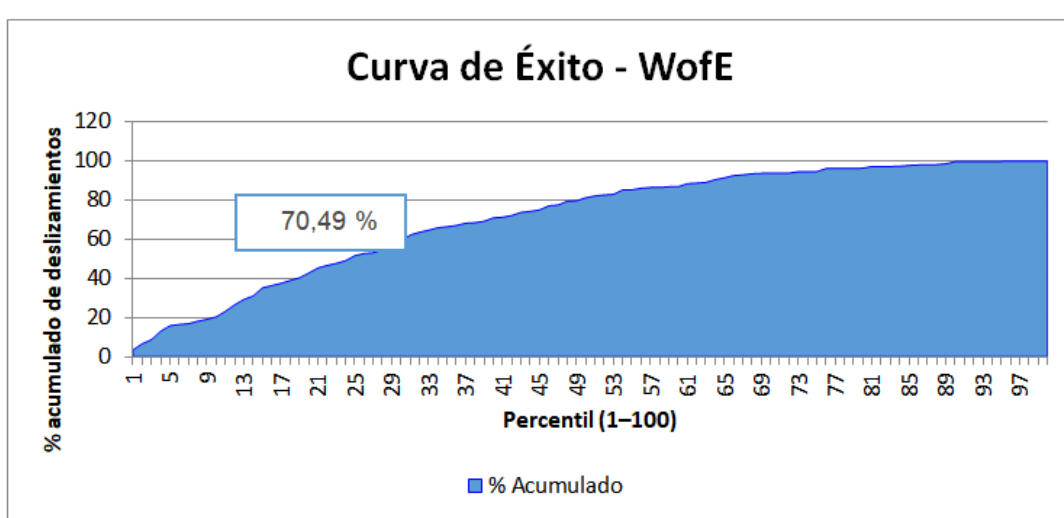


Figura 25. Curva de éxito para el raster de IS para el modelo basado en SGC (2017)..

Fuente: Elaboración propia.

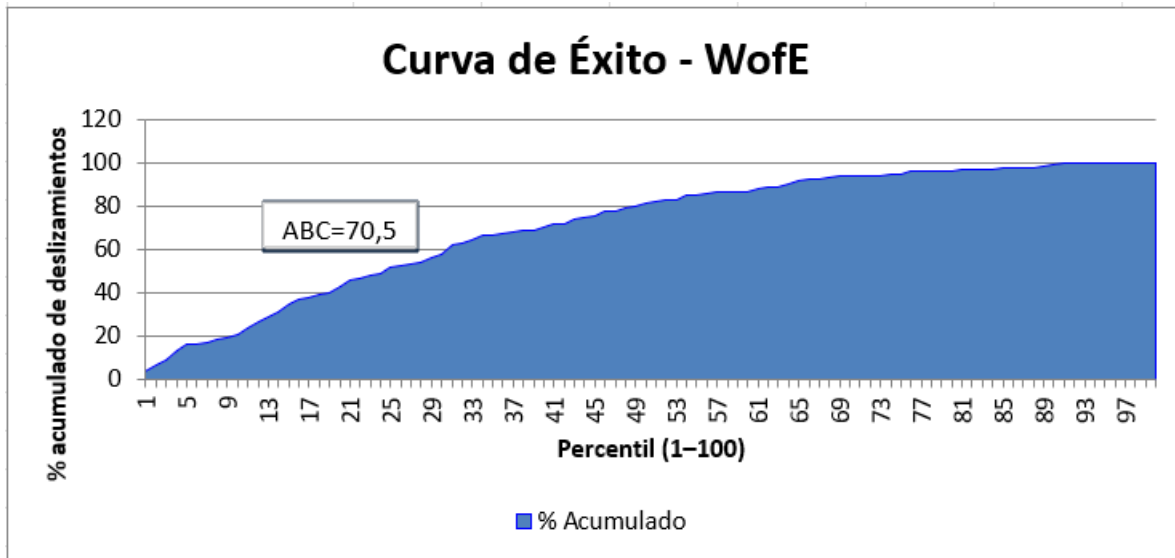


Figura 26. Curva de éxito para el raster de IS para el modelo ajustado con la inclusión de la variable densidad de flujo acumulado

Fuente: Elaboración propia.

Para la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento en la microcuenca la presidenta, se propone una categorización de forma que todos los valores de IS donde el porcentaje acumulado de movimientos en masa fueran inferiores al 10 % estén en categoría baja a la susceptibilidad, entre 10% y 70% de acumulación, categoría de susceptibilidad media, y por último, donde el porcentaje acumulado de deslizamientos sea mayor a 70% se categoriza como susceptibilidad alta. Con estos rangos de valores se reclasifica el raster de pesos finales IS con el fin de tener el resultado de la zonificación.

La zonificación para la microcuenca utilizando las variables condicionantes, sin incorporar la densidad de flujo acumulado muestra, según los anteriores criterios una zona con 13,2% del área total en susceptibilidad a los movimientos en masa alta, 52,2% en susceptibilidad media y 34,6% en susceptibilidad baja (Tabla 16).

Tabla 16. Áreas en cada categoría de susceptibilidad, sin incluir la densidad de flujo acumulado como variable condicionante.

Zonificación (4 variables)					
Susceptibilidad	Nº de píxeles	Área (m2)	Área (Ha)	Área km2	Porcentaje

Baja	28975	4527343,75	452,7	4,5	34,6
Media	43730	6832812,5	683,3	6,8	52,2
Alta	11040	1725000	172,5	1,7	13,2
Total	83745	13085156,3	1308,5	13,1	100,0

Al incorporar la variable densidad de flujo acumulado en la metodología, las áreas en cada categoría tienden a conservarse, ya que son pocos los pixeles que tienen alta densidad de flujo acumulado en relación con el área de estudio (Tabla 17).

Tabla 17. Áreas en cada categoría de susceptibilidad, al incluir la densidad de flujo acumulado como variable condicionante.

Zonificación (5 variables)					
Susceptibilidad	Nº de pixeles	Área (m2)	Área (Ha)	Área km2	Porcentaje
Baja	28964	4525625	452,6	4,5	34,6
Media	43637	6818281,25	681,8	6,8	52,1
Alta	11144	1741250	174,1	1,7	13,3
Total	83745	13085156,3	1308,5	13,1	100,0

A continuación, se presentan los mapas de susceptibilidad para MM tipo deslizamiento, sin (Figura 27) y con (Figura 28) incorporación de la variable densidad de flujo acumulado.

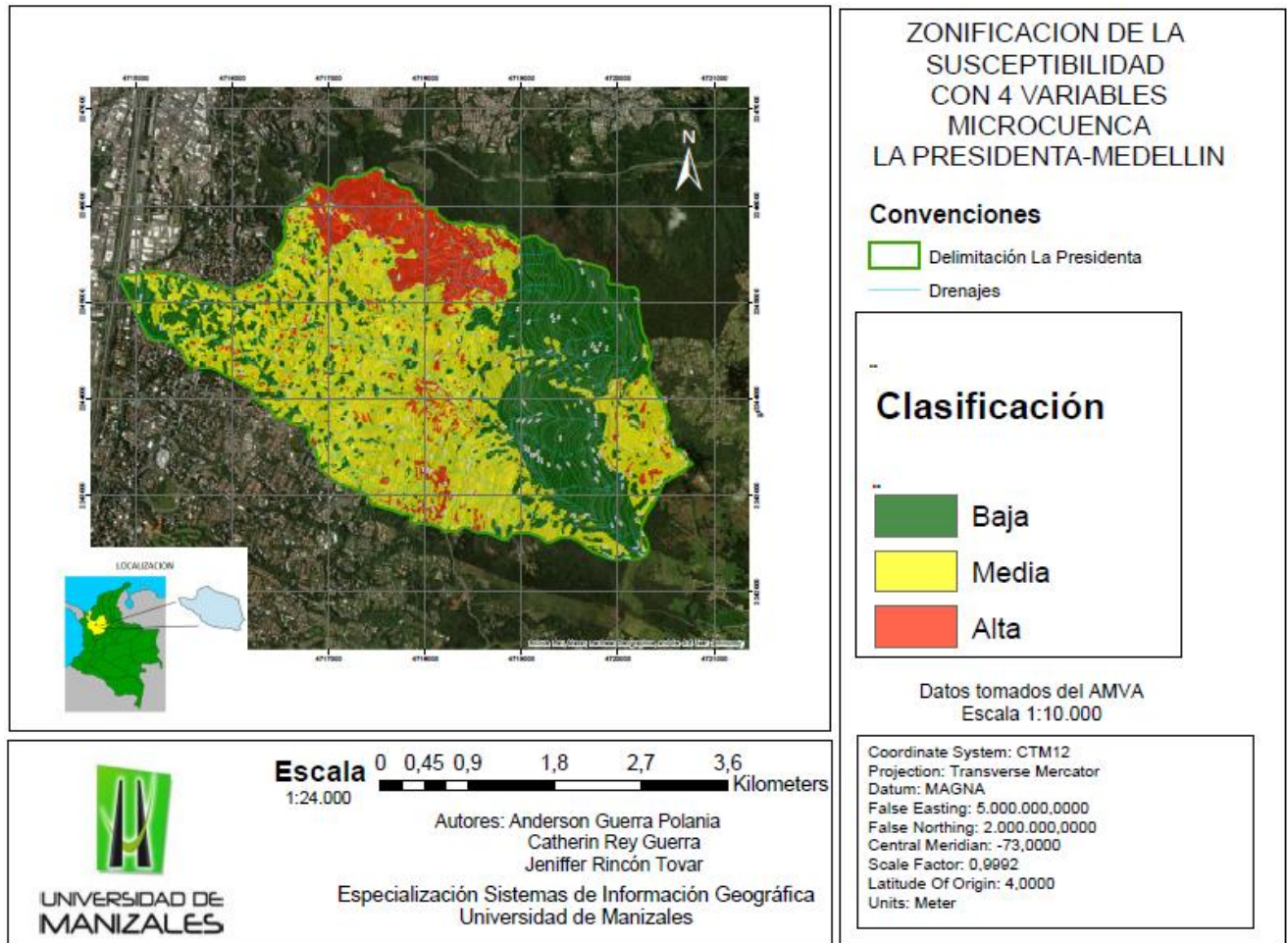


Figura 27. Zonificación susceptibilidad sin considerar la variable densidad de flujo acumulado. Modelo basado en SGC (2017)

Fuente: Elaboración propia.

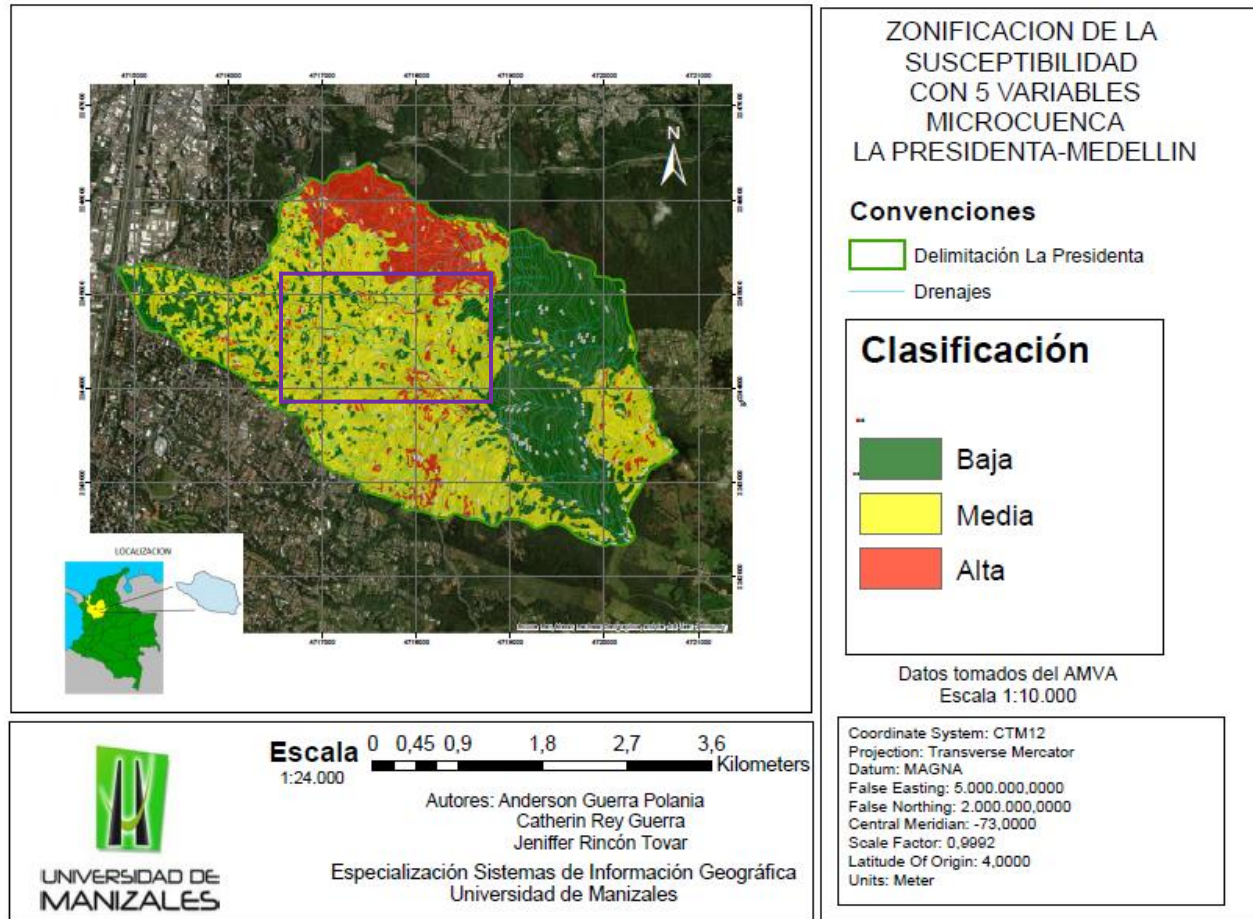


Figura 28. Zonificación susceptibilidad considerando la variable densidad de flujo acumulado. Modelo basado en SGC (2017)

Fuente: Elaboración propia.

8 Discusión

Este estudio sugiere una refinación metodológica que mejora la capacidad de discriminar entre celdas estables e inestables al considerar un factor condicionante que influye directamente en la saturación del suelo y la desestabilización de las laderas. La integración de la variable densidad de flujo acumulado genera conocimiento aplicable y replicable que puede conducir a la implementación de estrategias de mitigación más precisas a entidades encargadas de la gestión del riesgo y las poblaciones vulnerables localizadas en zonas susceptibles.

Para su análisis, se tomaron los pesos más altos de cada categoría y se normalizaron en una escala de 1 a 5, en función del número total de variables condicionantes consideradas en el modelo. Como resultado, la densidad de flujo acumulado se posiciona como la variable con mayor influencia relativa en la zonificación de susceptibilidad, al obtener un peso normalizado máximo de 5. Esta categoría corresponde a las zonas donde la escorrentía se concentra en rangos de entre 60 y 100 píxeles/m². Lo que indica un mayor poder predictivo de esta variable en la caracterización de la estabilización del terreno en comparación con las otras variables condicionantes.

Con lo que se evidencia la importancia de representar adecuadamente aquellas zonas que presentan particularidades en sus dinámicas de escorrentía y configuración del relieve, las cuales no son plenamente capturadas por las variables condicionantes utilizadas en la metodología del SGC (2017). En otras palabras, estas dinámicas locales no parecen ser correctamente predichas mediante el enfoque convencional de zonificación.

A partir del análisis de las curvas de éxito para el modelo de susceptibilidad, tanto con la variable de densidad de flujo acumulado como sin ella, se observa un ajuste aceptable. El modelo sin esta variable alcanza un 70.49% de ajuste, mientras que, al incluirla, el ajuste mejora ligeramente a un 70.5%. Ambos porcentajes superan el umbral del 70% establecido por el SGC (2027), lo que confirma la fiabilidad de los resultados en ambos escenarios.

Tabla 18. variable densidad de flujo en relación con el área general de la zona de estudio.

Categoría	Mov	% mov	Clase	% Clase
0-6	1644	98,44	83066	97,73

6-12	6	0,36	436	0,51
12-30	7	0,42	573	0,67
30-60	5	0,30	298	0,35
60-100	6	0,36	98	0,12
100-150	2	0,12	210	0,25
150-240	0	0,00	313	0,37
Total	1670	100,00	84994	100

Si bien la mejora porcentual en la bondad de ajuste es apenas un 0.01%, lo que es inferior a los resultados de éxito reportados en la bibliografía, es fundamental considerar que esta variable representa un porcentaje muy pequeño de píxeles con categorías críticas dentro del área de estudio en comparación con otras variables. Su impacto principal no radica en una mejora sustancial de la curva de éxito, sino en la recalibración de la susceptibilidad en áreas específicas.

De hecho, la inclusión de la densidad de flujo acumulado influye en la categoría de susceptibilidad ajustando la categoría media a alta, de baja a alta y de media a baja como se muestra en la Figura 29,

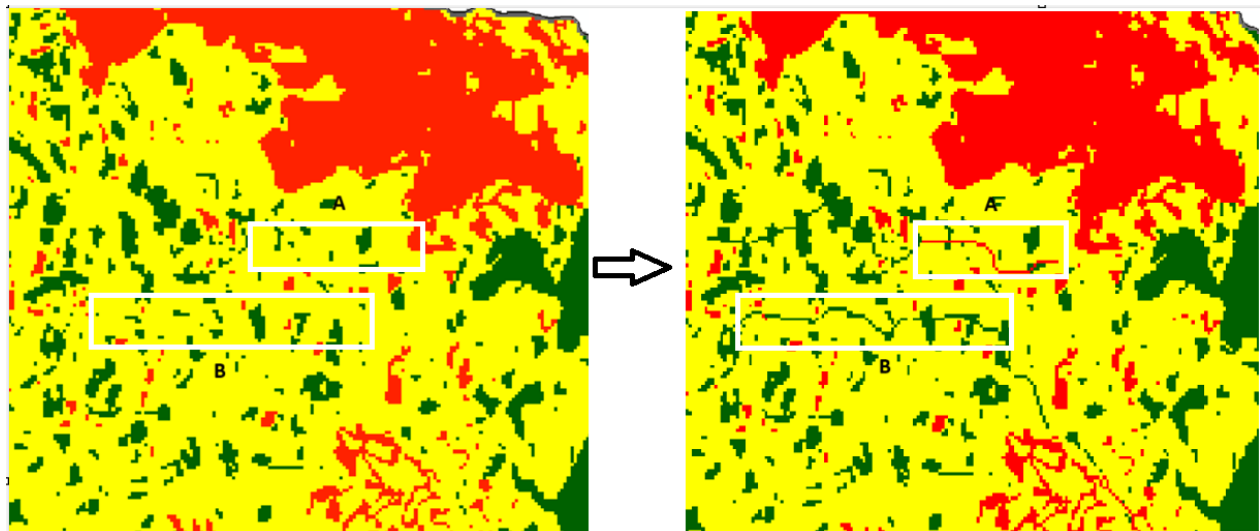


Figura 29. Cambios en la zonificación al incorporar la variable densidad de flujo acumulado (aparición de líneas variando la categorización)

Fuente: Elaboración propia.

Evidenciando, así, un aumento en la precisión del modelo en áreas donde esta variable es determinante. Por ejemplo:

- En zonas con baja susceptibilidad que debido a estabilidad geológica o pendientes moderadas puede aumentar la susceptibilidad si presentan escorrentía significativa.
- Zonas urbanizadas con depósitos de flujos de lodos o escombros, y pendientes moderadas, pueden reducir su categoría de susceptibilidad si tienen densidades de flujo acumulado que el modelo identifica como desfavorables para los movimientos en masa.

Se identifica que la potencia de ajuste se ve ligada directamente a la existencia de un historial de procesos morfodinámicos ya que para las zonas en donde no se contaba con ellos, como la parte media alta de la microcuenca, la densidad de flujo no aporta información adicional y los rangos están mayormente definidos por la pendiente, por lo que no muestra ser una variable que pueda ser usada potencialmente como herramienta de apoyo en zonas en las que no se cuente con la disponibilidad de datos necesaria para el cálculo de la zonificación.

9 Conclusiones

El enfoque mixto que combina el método bivariado de Pesos de Evidencia (WoFE) con criterios heurísticos para asignar valores de peso a cada variable, sumado con la incorporación de variables derivadas de los DEM, demostró ser una alternativa replicable y robusta para otras zonas urbanas o rurales de características similares ya que aporta grados de ajuste al modelo al considerar las particularidades locales a lo largo del territorio.

La densidad de flujo acumulado presenta el peso WofE superior en comparación con las demás variables condicionantes, lo que evidencia su alto poder explicativo para caracterizar dinámicas asociadas a la ocurrencia de MM.

La inclusión de la densidad de flujo acumulado como variable condicionante en el análisis de susceptibilidad a movimientos en masa demostró un impacto positivo en la precisión y refinamiento espacial del modelo. Aunque la mejora porcentual en la curva de éxito fue una leve mejora porcentual (pasando de 70.49 % a 70.5 %), este incremento adquiere relevancia cuando se analiza su efecto espacial. En particular, se identificaron ajustes significativos en zonas urbanizadas cercanas a corrientes de agua, donde la susceptibilidad pasó de baja o media a alta, reflejando con mayor fidelidad las condiciones locales de concentración de escorrentía que no son adecuadamente captadas por otras variables.

Esta variable mejoró la capacidad del índice de susceptibilidad para identificar zonas críticas dentro de la microcuenca La Presidenta permitiendo caracterizar dinámicas locales vinculadas al comportamiento hidrológico superficial, aportando valor explicativo adicional al modelo. No obstante, también se identificaron limitaciones en sectores como la zona media-alta de la cuenca caracterizada por su alta pendiente, cobertura compuesta por plantaciones forestales y sin historial documentado de procesos morfodinámicos, la variable no mostró capacidad predictiva, lo cual sugiere una dependencia significativa del inventario de procesos para calibrar adecuadamente su influencia.

En conjunto, estos hallazgos permiten concluir que la incorporación de la densidad de flujo acumulado aporta un nivel adicional de precisión en la zonificación de susceptibilidad, especialmente útil en zonas con infraestructura crítica o dinámicas complejas de escorrentía. Sin embargo, si bien contribuye a refinar la precisión local de las predicciones, no constituye una variable suficiente para compensar la falta de información en áreas con escasa documentación de procesos.

10 Recomendaciones

En futuras investigaciones orientadas a la zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa, se sugiere considerar de forma prioritaria la incorporación de variables hidrológicas derivadas de los modelos digitales de elevación, como la densidad de flujo acumulado. Este tipo de variables resulta especialmente útil en áreas urbanas o con alta intervención antrópica, donde la dinámica del escurrimiento superficial y la saturación del suelo pueden tener un papel determinante en la ocurrencia de inestabilidades.

Asimismo, se considera pertinente hacer un trabajo de campo para reforzar el inventario de procesos morfodinámicos, y hacer más robusto este insumo ya que es fundamental para la metodología empleada; además con este trabajo en campo se puede ayudar a identificar características fundamentales en la matriz de depósitos y llenos que se encuentran en las zonas de alta susceptibilidad reforzando así el insumo de unidades geológicas superficiales. La importancia de fortalecer los inventarios de procesos morfodinámicos mediante recorridos de campo, verificación directa y colaboración con entidades locales son factores fundamentales para el mejoramiento de la curva de éxito y validez del modelo empleado a eso sumado que los procesos ocurren con cierta regularidad temporal y por ende requieren actualización periódica.

En cuanto a la escala de análisis, se recomienda desarrollar estudios a escalas más detalladas (1:5.000 o incluso 1:2.000) en zonas críticas dentro de microcuencas urbanas, donde la concentración de eventos, la presión urbanística o la presencia de infraestructura estratégica requieran un nivel de precisión mayor para apoyar la toma de decisiones en gestión del riesgo.

Finalmente, se plantea como una línea de trabajo relevante la incorporación de técnicas de inteligencia artificial, como algoritmos de aprendizaje automático supervisado o redes neuronales, en combinación con metodologías tradicionales como el método de Pesos de Evidencia (WoFE). Esta integración puede ser clave en contextos con limitaciones en la disponibilidad de información histórica del área de trabajo.

11 Referencias

- Alcaldía de Medellín, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, & Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia. (2007). Formulación del plan de manejo de la microcuenca de la quebrada La Presidenta 2005-2006. CTA.
- Alvarado F. Carlos., Medina B. Enif., Sandoval R. Jesús., & García N. Jesús. (2012). Zonificación de amenaza por movimientos en masa aplicando un método bivariado y un proceso heurístico. Caso aplicado a la cuenca del río Combeima, Ibagué-Tolima-Colombia. Conference Paper. IV Simposio Panamericano de Deslizamientos: Vulnerabilidad y Gestión del Riesgo en la Región Tropical de Centro y Sur América. Paipa, Boyaca, Colombia, november.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá & Universidad de Antioquia. (2023). Informe técnico: Registro de vertimientos [Documento no publicado].
- Aristizábal, E., & Yokota, S. (2006). Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el Valle de Aburrá. *Dyna*, 73(149), 5-16.
- Bonham-Carter, G. F. (1994). *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Pergamon
- Chang, K., Merghadi, A., Yunus, A., Pham, B. y Dou, J. (2019). Evaluación de los efectos de escala de las variables topográficas en modelos de susceptibilidad a deslizamientos mediante técnicas de aprendizaje automático basadas en SIG. *Scientific Reports* , 9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48773-2> .
- Conforti, M., Robustelli, G., Muto, F., & Critelli, S. (2012). Application and validation of bivariate GIS-based landslide susceptibility assessment for the Vittravo river catchment (Calabria, south Italy). *Natural Hazards*, 61(1), 127-141.
- Congreso de Colombia. (1991). Constitución Política de Colombia. Diario Oficial No. 40.368.

Congreso de Colombia. (1997). Ley 388 de 1997. Diario Oficial No. 43.091.

Congreso de Colombia. (2012). Ley 1523 de 2012. Diario Oficial No. 48.411.

CORANTIOQUIA, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Fondo Adaptación, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, & CORNARE. (2015). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Aburrá – NSS (2701-01), localizada en el departamento de Antioquia jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia (CORANTIOQUIA) – Contrato No. 1504-168 de abril 6 de 2015.

Corantioquia. (2024). Informe técnico de reglamentación por usos la presidenta.
<https://tinyurl.com/3kr22ym2>

Cruden, D. M. & Varnes D. J. 1996. Landslide Types and Processes. In Special Report 247 Landslides Investigation and Mitigation. Turner, A. K. and Schuster R. L. (eds.) TRBNRC, National Academy Press: Washington, pp. 36-75.

Elmoulat, M., Brahim, L. A., Elmahsani, A., Abdelouafi, A., & Mastere, M. (2021). Mass movements susceptibility mapping by using heuristic approach. Case study: province of Tétouan (North of Morocco). *Geoenvironmental Disasters*, 8(1), 20.

Eminoglu, Y. & Tarhan, C. (2025). Decadal evolution of GIS in disaster management and risk assessment. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 10 (2), 173-196.

Gaidzik, K., y Ramírez-Herrera, M. (2021). La importancia de los datos de entrada en el mapeo de susceptibilidad a deslizamientos. *Scientific Reports* , 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98830-y> .

Guinau Sellés, M. (2007). Metodologías para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos basadas en el análisis SIG. Aplicación en el NW de Nicaragua.

- He, W., Ishikawa, T., & Zhu, Y. (2023). Wide/narrow-area slope stability analysis considering infiltration and runoff during heavy precipitation. *Soils and Foundations*, 63(1), 101248. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101248>
- Kühnl, M., Sapena, M., Wurm, M., Geiß, C., & Taubenböck, H. (2023). Multitemporal landslide exposure and vulnerability. *Natural Hazards*, 119, 883–906.
- Lira, B. S., dos Santos Junior, O. F., de Freitas Neto, O., & Sousa, M. N. d. M. (2024). Evaluation of the Effects of Rainwater Infiltration on Slope Instability Mechanisms. *Sustainability*, 16(21), 9530. <https://doi.org/10.3390/su16219530>
- Martínez, M., & Restrepo, J. (2008). Memoria explicativa del mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa Esc. 1:100.000, plancha 147 Medellín oriental [Informe técnico]. Servicio Geológico Colombiano (SGC)
- Montero Olarte, J. M. (2017). Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia. Servicio Geológico Colombiano (SGC). Bogotá, D.C.
- Moreno, H. A., Vélez, M. V., Montoya, J. D., & Rhenals, R. L. (2006). La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. *Revista EIA*, (5), 59-69.
- Ospina-Gutiérrez, J.P., Aristizábal, E., 2021, Aplicación de inteligencia artificial y técnicas de aprendizaje automático para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 38, núm. 1, p. 43-54.
- Presidencia de la República de Colombia. (2014). Decreto 1807 de 2014. <https://tinyurl.com/32vvy8c2>

Presidencia de la República de Colombia. (2015). Decreto 1077 de 2015.
<https://tinyurl.com/56pkr3ap>

Sarmiento Linares, P. A. (2017). Desarrollo y análisis de zonificación de amenaza por fenómenos de remoción en masa: Uso y evaluación del método heurístico del proceso de análisis jerárquico y comparación de criterios adecuados. [Tesis de especialización, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, y CIAF].

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. Bogotá, D.C., Colombia: Imprenta Nacional de Colombia. ISBN: 978-958-59782-2-5

Valdés Q., J. C., Castro C., C. A., Pérez G., H., & Escobar M., J. F. (2017). Procesos de Geoprocesamiento en la Espacialización de Servicios Ecosistémicos en Áreas de Interés Local, Caso de Estudio: Cuenca la Presidenta. ,Ingenierías USBMed 8(1), 19-28]

Valdés Q., J. C., Castro C., C. A., Pérez G., H., & Escobar M., J. F. (2017). Procesos de Geoprocesamiento en la Espacialización de Servicios Ecosistémicos en Áreas de Interés Local, Caso de Estudio: Cuenca la Presidenta. Ingenierías USBMed, 8(1), 19-28.

Valdés, J. C., Castro, C. A., Pérez, H., & Escobar, J. F. (2017). Procesos de geoprocesamiento en la espacialización de servicios ecosistémicos en áreas de interés local, caso de estudio: cuenca La Presidenta. Ingenierías USBMed, 8(1), 19-28.

Van Westen, C. J. (1993). Application of Geographical Information System to landslide hazard zonation. ITC Publication No. 15, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Enschede.

Vargas Agudelo, F. A., Soto Duran, D. E., & Giraldo Mejía, J. C. (Comp.). (2018). Investigación e innovación en ingeniería de software (Vol. 2). Medellín: Publicar T, Sello Editorial TdeA.

Varnes, D. J., (1978). Slope Movement Types and Processes. En Special Report 1976: Landslides Analysis and control (R. L. Schuster and R. J. Krizec, eds). TRB-NRC Washington D. C. pp 11-33.

Vasquez Agudelo, E., & Tocasuche Castro, N. del P. (2023). Procesamiento digital de imágenes satelitales Sentinel para la detección de zonas de amenaza por remoción en masa mediante la implementación de índices espectrales en el periodo comprendido entre los años 2018 y 2023 en los municipios de Jericó, Socotá y Chitá, del departamento de Boyacá [Informe final de trabajo de grado de especialización]. (La institución que otorga el título no se especifica en la fuente).