

"Evaluación de la Susceptibilidad por movimientos en masa para el casco urbano del municipio de El Carmen, Norte de Santander, mediante un método heurístico a escala 1:25.000"

Emily Yuritza López Pérez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director

Dilan Arturo Martínez Sánchez

Magister en Geología/Ciencias de la Tierra

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2026

Contenido

Introducción.....	11
1. Objetivos.....	13
1.1 Objetivo general	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
2. Área de estudio.....	14
3. Marco Geológico	15
4. Marco teórico.....	18
4.1 Movimientos en masa.....	18
4.2 Proceso de Análisis Jerárquico.....	20
5. Antecedentes.....	20
6. Metodología.....	23
6.1 Fase 1. Identificación del fenómeno más recurrente en el municipio y metodología para la susceptibilidad por movimientos en masa.	23
6.2 Fase 2. Recolección de información y selección de insumos.....	23
6.3 Fase 3. Creación de mapas preliminares Geomorfológico y de UGS	25
6.4 Fase 4. Trabajo de campo y construcción de mapas de geología y geomorfología a escala 1:25.000.	26
6.5 Fase 5. Procesamiento de la información y producción de mapas	26
7. Campaña de campo.....	30

SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA	3
8. Resultados	40
8.1 Mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS) a escala 1:10.000	42
8.2 Geomorfología.....	44
8.2.1 Morfometría.....	44
8.2.2 Morfodinámica	52
8.2.3 Morfogénesis	54
8.3 Suelos Edáficos	61
8.4 Cobertura y uso de suelos.....	64
8.5 Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa.....	65
8.5.1 Susceptibilidad Muy Baja.....	67
8.5.2 Susceptibilidad Baja	67
8.5.3 Susceptibilidad Media	68
8.5.4 Susceptibilidad Alta.....	69
8.5.5 Susceptibilidad Muy Alta	70
8.5.6 Validación del mapa de susceptibilidad mediante el inventario de Movimientos en Masa	71
9 Conclusiones.....	74
10 Recomendaciones	76
Referencias Bibliográficas.....	78
Apéndices	84

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Ubicación geográfica del área de estudio correspondiente al casco urbano del municipio de El Carmen, Norte de Santander.</i>	14
Figura 2. <i>Mapa geológico del casco urbano del municipio de El Carmen, Norte de Santander a escala 1:100.000.</i>	17
Figura 3. <i>Partes morfológicas de un movimiento en masa.</i>	19
Figura 4. <i>Modelo para la susceptibilidad por movimientos en masa ponderando los factores y subfactores de cada categoría.</i>	27
Figura 5. <i>Diagrama de la metodología a utilizar para el desarrollo de este proyecto.</i>	28
Figura 6. <i>Suelo residual amarillo de textura franco-arenosa con alta meteorización.</i>	31
Figura 7. <i>Suelo residual marrón oscuro de textura franco-arcillosa con moderada meteorización</i>	31
Figura 8. <i>Suelo residual rojizo claro de textura franco-arcillosa con baja meteorización</i> .	32
Figura 9. <i>Suelo residual rojizo oscuro de textura franco-arcillosa con baja meteorización</i>	33
Figura 10. <i>Suelo residual pardo rojizo a amarillento de textura franca con moderada meteorización</i>	34
Figura 11. <i>Suelo residual marrón oscuro de textura franco-arcillosa con alta meteorización</i>	35
Figura 12. <i>Suelo residual marrón claro de textura franca con alta meteorización.</i>	36
Figura 13. <i>Suelo residual pardo amarillento de textura franco-arenosa con alta meteorización.</i>	37

SUSCEPTIBILIDAD POR MOVIMIENTOS EN MASA	5
Figura 14. <i>Suelo transportado de depósito coluvial</i>	38
Figura 15. <i>Suelo transportado de depósito aluvial</i>	39
Figura 16. <i>Modelo conceptual de los factores utilizados en la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa, con los pesos establecidos en la tabla 1</i>	41
Figura 17. <i>Mapa de UGS a escala 1:10.000 del área de estudio (Ver leyenda en la Página 86 en el Apéndice C)</i>	43
Figura 18. <i>Mapa de UGS categorizado en términos de susceptibilidad como parámetro de entrada para el modelo AHP según las clasificaciones establecidas en el Apéndice B de la Página 85</i>	43
Figura 19. <i>Modelo para producir el ráster de pendiente clasificado</i>	45
Figura 20. <i>Mapa temático del subcriterio pendiente</i>	46
Figura 21. <i>Modelo para producir el ráster de curvatura clasificado</i>	47
Figura 22. <i>Mapa temático del subcriterio Curvatura</i>	47
Figura 23. <i>Modelo para producir el ráster de rugosidad clasificado</i>	48
Figura 24. <i>Mapa temático del subcriterio Rugosidad</i>	49
Figura 25. <i>Modelo para producir el ráster de A. cuenca clasificado</i>	50
Figura 26. <i>Mapa temático del subcriterio A. Cuenca</i>	51
Figura 27. <i>Mapa temático de la variable morfometría</i>	51
Figura 28. <i>Modelo para producir el ráster de relieve relativo clasificado</i>	53
Figura 29. <i>Mapa temático categorizado como variable morfodinámica</i>	54
Figura 30. <i>Distribución porcentual de los ambientes morfogenéticos identificados en el área de estudio</i>	55
Figura 31. <i>Mapa geomorfológico del área de estudio. Ver leyenda en la Página 86 en el Apéndice A</i>	55

Figura 32. Mapa geomorfológico clasificado en términos de susceptibilidad según lo establecido en la Página 84 en el Apéndice A.	56
Figura 33. Ambiente Denudacional en el que se encuentran geoformas de a) cauce aluvial (Fc), ladera denudativa irregular corta (Dlic), ladera denudativa compleja larga (Dlcol), ladera estructural de espolón facetado irregular corta (Slefic) y ladera denudativa irregular moderada (Dlim). b) Ladera denudativa cóncava larga (Dlcl).	59
Figura 34. Ambiente Fluvial, en el que se encuentran geoformas de Plano o llanura de inundación (Fpi) y cauce aluvial activo (Fc), pertenecientes a la Quebrada Grande de El municipio de El Carmen.	60
Figura 35. Ambiente antrópico en el que se encuentra una geoforma de planicie antrópica a) en fotografía y b) en fotogeología (Google Earth Pro, 2019).	61
Figura 36. Mapa de suelos edáficos categorizado en términos de susceptibilidad como parámetro de entrada para el Análisis Jerárquico.	63
Figura 37. Mapa de coberturas categorizado en términos de susceptibilidad como parámetro de entrada para el Análisis Jerárquico.	65
Figura 38. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000 del área de estudio, reclasificado por intervalos geométricos en los rangos: Muy Bajo, Bajo, Medio, Alta y Muy Alta.	66
Figura 39. Mapa de localización de los movimientos en masa del área de estudio.....	72
Figura 40. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa donde se ubican los movimientos en masa del inventario obtenido.	73

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Matriz de pares para la determinación del peso de cada variable.</i>	40
Tabla 2. <i>Propuesta de pesos para la variable de morfometría (Linares, 2017).</i>	45
Tabla 3. <i>Tabla de susceptibilidad de la pendiente (Linares, 2017).</i>	45
Tabla 4. <i>Propuesta de susceptibilidad de la curvatura.</i>	47
Tabla 5. <i>Tabla de susceptibilidad de la rugosidad (Linares, 2017).</i>	49
Tabla 6. <i>Tabla de susceptibilidad de la variable A. cuenca (Linares, 2017).</i>	50
Tabla 7. <i>Propuesta de calificación del relieve relativo.</i>	53
Tabla 8. <i>Calificación de la textura (SGC, 2013).</i>	62
Tabla 9. <i>Calificación de la taxonomía, orden de suelos (SGC, 2013).</i>	62
Tabla 10. <i>Calificación de la profundidad total (SGC, 2013).</i>	63
Tabla 11. <i>Calificación de coberturas (Linares, 2017).</i>	64
Tabla 12. <i>Inventario de movimientos en masa identificados en la zona de estudio.</i>	72

Lista de Apéndices

<i>Apéndice A. Tabla de las unidades presentes en el mapa morfogenético a escala 1:10.000 del área de estudio, con su respectiva calificación.....</i>	<i>84</i>
<i>Apéndice B. Tabla de las unidades presentes en el mapa de UGS a escala 1:10.000 del área de estudio, con su respectiva calificación.....</i>	<i>85</i>
<i>Apéndice C. Tabla de las unidades presentes en el mapa de UGS con su respectiva descripción.....</i>	<i>86</i>
<i>Apéndice D. Tabla de las unidades presentes en el mapa geomorfológico con su respectiva descripción.....</i>	<i>89</i>

Resumen

Título: Evaluación de la Susceptibilidad por movimientos en masa para el casco urbano del municipio de El Carmen, Norte de Santander, mediante un método heurístico a escala 1:25.000*

Autor: Emily Yuritza López Pérez**

Palabras Clave: Susceptibilidad, Movimientos en Masa, Geomorfología, Geología.

Descripción: El municipio de El Carmen, Norte de Santander, ha sido afectado por múltiples movimientos en masa y fue identificado en 2024 en alerta naranja por el IDEAM; sin embargo, carece de mapas actualizados de susceptibilidad por movimientos en masa. Ante esta problemática, el presente informe realizado como parte de la práctica empresarial en la Oficina de Gestión del Riesgo de este municipio, tuvo como objetivo analizar la susceptibilidad por movimientos en masa en el casco urbano mediante el método de Análisis Jerárquico en conjunto con herramientas SIG para generar un mapa preliminar a escala 1:25.000. El modelo integró variables de Geomorfología, Unidades Geológicas Superficiales (UGS), Suelos Edáficos y Coberturas, ponderadas mediante una matriz de comparación por pares según su influencia relativa en la inestabilidad del terreno. Los resultados revelan que predominan las susceptibilidades medias (53.07%) y alta (32.42%), asociadas principalmente a pendientes pronunciadas, geformas de laderas estructurales, depósitos coluviales, antiguos deslizamientos y suelos residuales de texturas franco, franco-arcilloso y franco-arcillolimoso. Se concluye que la susceptibilidad en el municipio está controlada principalmente por factores geomorfológicos y de UGS, donde las zonas críticas se asocian a pendientes superiores a 19° y materiales coluviales o residuales poco consolidados de las formaciones Silgará y Bucaramanga, mientras que las áreas estables predominan en el centro urbano sobre relieves suaves y suelos más consolidados.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Dilan Arturo Martínez Sánchez. Magister en Geología/Ciencias de la Tierra.

Abstract

Title: Susceptibility Assessment of Mass Movements in the Urban Area of El Carmen Municipality, Norte de Santander, Using a Heuristic Method at a 1:25,000 Scale *

Author: Emily Yuritza López Pérez¹

Key Words: Susceptibility, Mass Movements, Geomorphology, Geology.

Description: The municipality of El Carmen, Norte de Santander, has been affected by multiple mass movement events and was classified under orange alert by IDEAM in 2024; however, it lacks updated landslide susceptibility maps. In response to this issue, this report carried out as part of an internship at the Municipal Risk Management Office aimed to analyze landslide susceptibility in the urban area using the Analytic Hierarchy Process (AHP) in combination with GIS tools to produce a preliminary map at a scale of 1:25,000. The model integrated geomorphological variables, superficial geological units (SGU), edaphic soils, and land cover, weighted through a pairwise comparison matrix according to their relative influence on terrain instability. The results indicate a predominance of moderate (53.07%) and high (32.42%) susceptibility levels, mainly associated with steep slopes, structural hillside landforms, colluvial deposits, old landslides, and residual soils with loam, clay loam, and silty clay loam textures. It is concluded that landslide susceptibility in the municipality is primarily controlled by geomorphological factors and SGUs, with critical zones linked to slopes greater than 19° and poorly consolidated colluvial or residual materials from the Silgará and Bucaramanga formations, while more stable areas predominate in the urban center over gentle relief and more consolidated soils.

* Degree Work

¹ Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director: Dilan Arturo Martínez Sánchez. Master in Geology/Earth Sciences.

Introducción

Los movimientos en masa representan uno de los procesos geológicos más perjudiciales, ya que provocan pérdidas humanas significativas y generan daños materiales valorados en miles de millones de dólares anualmente a nivel global (Brabb & Harrod, 1989). Este fenómeno consiste en el desplazamiento de materiales como suelos, rocas, detritos y sedimentos no consolidados hacia niveles más bajos, motivado principalmente por la acción de la gravedad y, en algunos casos, influenciado por la presencia de agua (Girty, 2009). La ocurrencia de estos eventos suele estar relacionada con diversos factores, entre ellos las características del terreno (como la pendiente, la geomorfología, los materiales geológicos, la cobertura vegetal y la presencia de estructuras tectónicas), condiciones naturales (precipitaciones intensas, actividad sísmica, procesos erosivos) y la intervención humana (como excavaciones, modificación de laderas y cambios en el uso del suelo).

Dado que las características del terreno, particularmente la configuración geomorfológica, influyen directamente en la susceptibilidad a movimientos en masa, resulta fundamental comprender el contexto de cada región. Para el caso de Colombia, la geomorfología se caracteriza por una gran diversidad y complejidad estructural, resultado de la interacción entre procesos tectónicos y erosivos a lo largo del tiempo. El territorio se organiza en tres grandes dominios: el sistema montañoso Andino, las extensas llanuras bajas del oriente y norte del país; y los sistemas montañosos periféricos, como serranías y macizos aislados (Flórez, 2003). Las variaciones en el relieve están determinadas principalmente por la altitud y la presencia de los Andes, que divide el territorio en tres cordilleras: Occidental, Central y Oriental (Struth *et al.*, 2015).

Considerando esta configuración del relieve, diversos estudios han evaluado la amenaza por movimientos en masa en el territorio nacional. En 2015, el Servicio Geológico Colombiano (2015) elaboró el Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa a escala 1:100.000, en el cual se estableció que aproximadamente el 50% del territorio colombiano presenta una amenaza baja, el 22% una amenaza media, el 20% una amenaza alta y el 4% una amenaza muy alta frente a este fenómeno. Más recientemente el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) realizó un análisis de la amenaza por deslizamientos de tierra, clasificando al departamento de Norte de Santander con niveles de amenaza alta y moderada. En este estudio, el municipio de El Carmen fue identificado en alerta naranja, lo que indica la necesidad de vigilancia continua debido a las condiciones propicias para la ocurrencia de estos eventos (IDEAM, 2024).

Esta clasificación es coherente con los antecedentes de inestabilidad del municipio, cuyo casco urbano ha sido afectado por múltiples movimientos en masa, especialmente durante temporadas de lluvias intensas, lo que ha generado daños en viviendas, vías y redes de servicios públicos. Un evento significativo ocurrió en 2010, cuando fuertes lluvias iniciadas en julio desencadenaron múltiples movimientos en masa, incluyendo deslizamientos rotacionales y traslacionales, flujos de lodo, caídas de roca y avalanchas. Estos procesos afectaron tanto la zona urbana como las veredas circundantes, destruyendo viviendas y dejando a numerosas familias damnificadas. La combinación de precipitaciones constantes y la geología del área contribuyó a la inestabilidad del suelo y a la ocurrencia de estos desastres (Reyes Merchán & Moya, 2010).

A pesar de la alta susceptibilidad por movimientos en masa en el municipio, la oficina de gestión del riesgo de la alcaldía municipal cuenta con pocos mapas actualizados de

susceptibilidad. Ante este panorama, surge la necesidad de desarrollar un estudio a una escala 1:25.000 de susceptibilidad por movimientos en masa para el casco urbano de El Carmen, empleando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), metodologías de evaluación multicriterio (como el método de Proceso de Análisis Jerárquico – AHP, por sus siglas en inglés: Analytic Hierarchy Process) y, de manera fundamental, la recolección de datos de campo para ajustar los mapas geológicos y geomorfológicos a una escala detallada (1:10.000). Esto permitirá obtener información más precisa sobre las condiciones físicas del terreno, identificar zonas con mayor susceptibilidad y proporcionar una base técnica sólida para la gestión del riesgo urbano, la planificación territorial y el diseño de infraestructuras seguras, contribuyendo así a la reducción del impacto ambiental y social de los desastres naturales en el municipio.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar la susceptibilidad por movimientos en masa para el casco urbano del municipio de El Carmen, Norte de Santander, mediante el uso del método heurístico

1.2 Objetivos específicos

Generar mapas geomorfológicos y de UGS del casco urbano del municipio de El Carmen a partir de trabajo de campo a una escala 1:10.000.

Elaborar mapas temáticos de los factores inherentes a movimientos en masa, integrándolos mediante herramientas SIG a una escala de 1:25.000 (i.e. pendiente, rugosidad, A.cuenca, relieve relativo, curvatura).

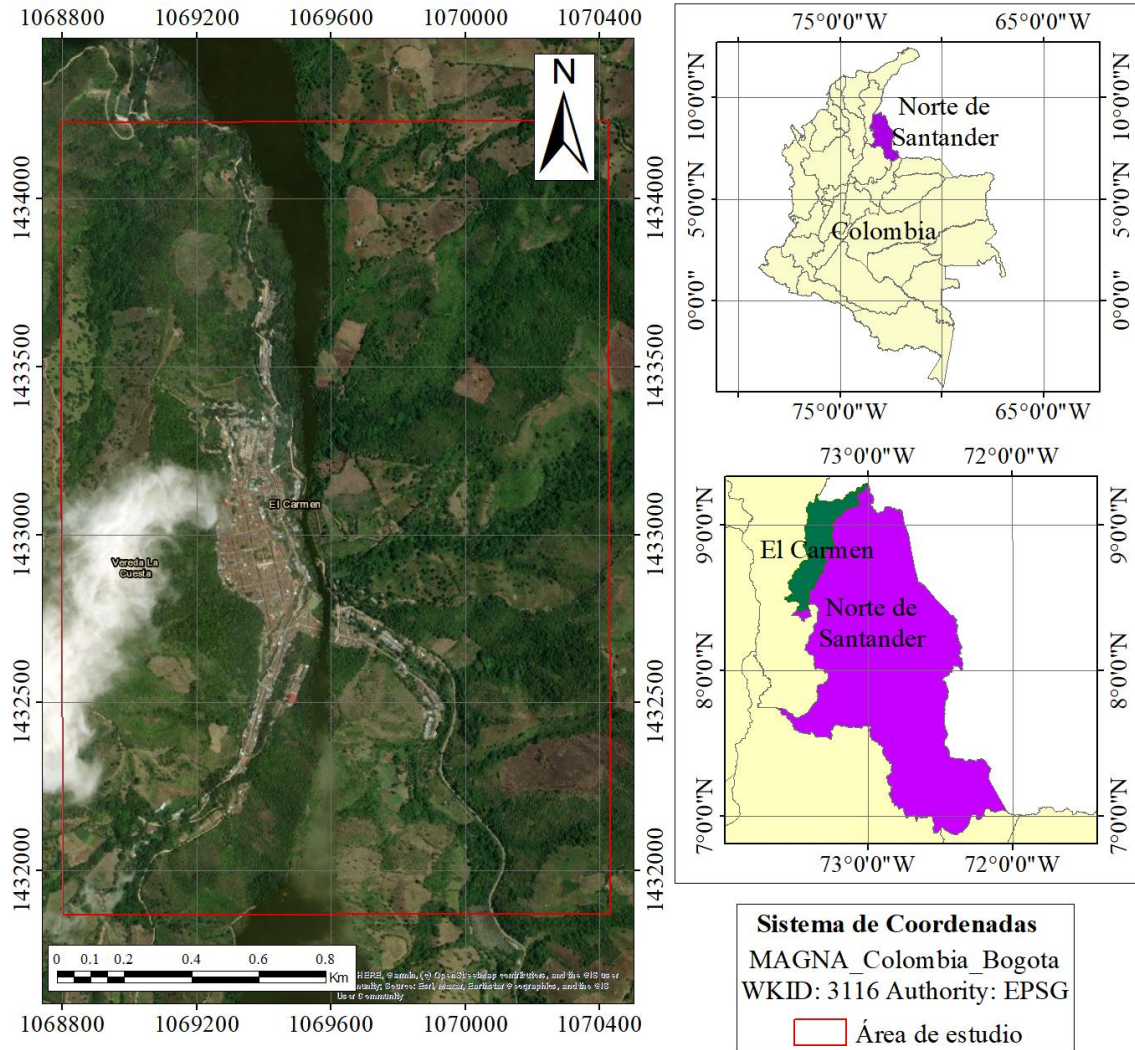
Generar mapas de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000, integrando los factores de susceptibilidad mediante el uso del método de análisis jerárquico (AHP).

Evaluar el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa en el casco urbano de El Carmen.

2. Área de estudio

El municipio de El Carmen se localiza en el noroccidente del departamento de Norte de Santander, dentro de la subregión geográfica de la provincia de Ocaña. Su cabecera municipal, que corresponde al área urbana del municipio (4 Km^2) y será el área de estudio de este proyecto (Figura 1), se encuentra situada a una altitud de 761 metros sobre el nivel del mar, aproximadamente en las coordenadas 1.069.336 m Este y 1.432.942 m Norte. Esta zona presenta un relieve montañoso, con fuertes pendientes, característico del piedemonte Andino Oriental, y se ubica en el piso térmico templado, con una temperatura media anual cercana a los $21 \text{ }^\circ\text{C}$. El casco urbano es atravesado por varias quebradas de carácter permanente, entre las que se destacan la quebrada El Salto o San Rafael El Tigre y El Carmen, las cuales forman parte de microcuencas que drenan hacia el sistema hídrico del río Catatumbo (Alcaldía de El Carmen - Norte de Santander, s.f.).

Figura 1. *Ubicación geográfica del área de estudio correspondiente al casco urbano del municipio de El Carmen, Norte de Santander.*



3. Marco Geológico

Según Decorte y Salinas (1980), en el municipio de El Carmen afloran diversas unidades litológicas, entre las que se destaca el complejo ígneo-metamórfico, conformado por el Neis de Bucaramanga (pDb) (Pre-devónica) y cuerpos intrusivos ígneos de composición granítica (Jci) (Jurásico Superior). En cuanto a las secuencias sedimentarias, se identifican varias formaciones: la Formación Bocas (Jb) (Jurásico Inferior), compuesta por areniscas duras, limolitas, conglomerados y lutitas (shales), en su mayoría con carácter

calcáreo; la Formación Girón (Jg) (Jurásico Superior), integrada por areniscas, areniscas conglomeráticas, lutitas, conglomerados y limolitas; la Formación Jordán (Jj) (Jurásico Inferior a Medio), caracterizada por areniscas de grano medio a conglomerático; la Formación Capacho (Kic) (Cretácico Superior), constituida por lutitas generalmente calcáreas y localmente fosilíferas, con intercalaciones de caliza y arenisca; y la Formación Tibú-Mercedes (Kitm) (Cretácico Inferior), compuesta por calizas fosilíferas con intercalaciones de lutitas, areniscas, y conglomerados de grano fino a grueso

En cuanto a las unidades del periodo Cuaternario, se reconocen depósitos aluviales recientes (Qal) y terrazas fluviales (Qt). También, aflora la Formación Silgará (pDs) (Pre-devónico), integrada por esquistos, filitas, metareniscas, cuarcitas y metalimolitas (Decorte & Salinas, 1980).

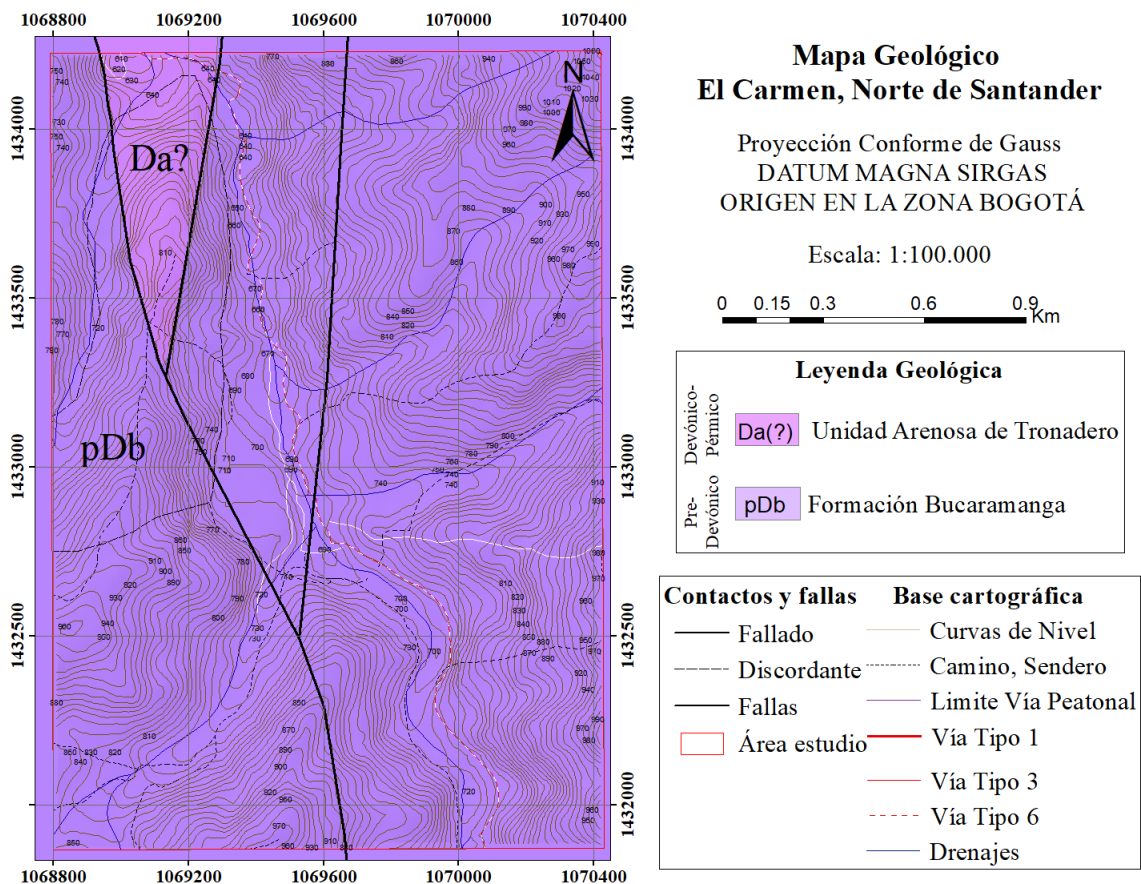
Sin embargo, en la zona de estudio correspondiente al casco urbano del municipio del Carmen, afloran la Formación Bucaramanga (pDb) y la unidad Arenosa de Tronadero (Da?) (Figura 2).

En lo que respecta al control estructural de la zona, predomina el sistema de fallas de Bucaramanga, una estructura que influye significativamente en la Cordillera Oriental y que ha afectado la región en los diversos eventos geológicos a lo largo del tiempo (Velandia, 2017). Esta falla atraviesa también el municipio de El Carmen, donde se evidencian rasgos geomorfológicos característicos de una estructura de este tipo.

El área presenta un relieve esencialmente montañoso y una geomorfología asociada a ambientes morfogenéticos estructural y denudacional. Dentro de su territorio se identifican diversas estructuras geomorfológicas, como facetas triangulares, lomos de presión, lomos de

fallas, cerros de presión, silletas y cuencas de tracción (Naranjo Henao, 2013). Estas formas han sido modeladas por la influencia estructural de la falla de Bucaramanga, la cual, junto con eventos geológicos de tipo intrusivo, ha generado esfuerzos compresionales y distensionales. Dichos procesos han ocasionado fracturamiento y meteorización de las rocas, haciéndolas más susceptibles al desconfinamiento del macizo rocoso, lo que favorece la erosión y los movimientos en masa (Naranjo Henao, 2013).

Figura 2. Mapa geológico del casco urbano del municipio de El Carmen, Norte de Santander a escala 1:100.000.



Nota. Tomado y modificado de SGC (1980)

4. Marco teórico

4.1 Movimientos en masa

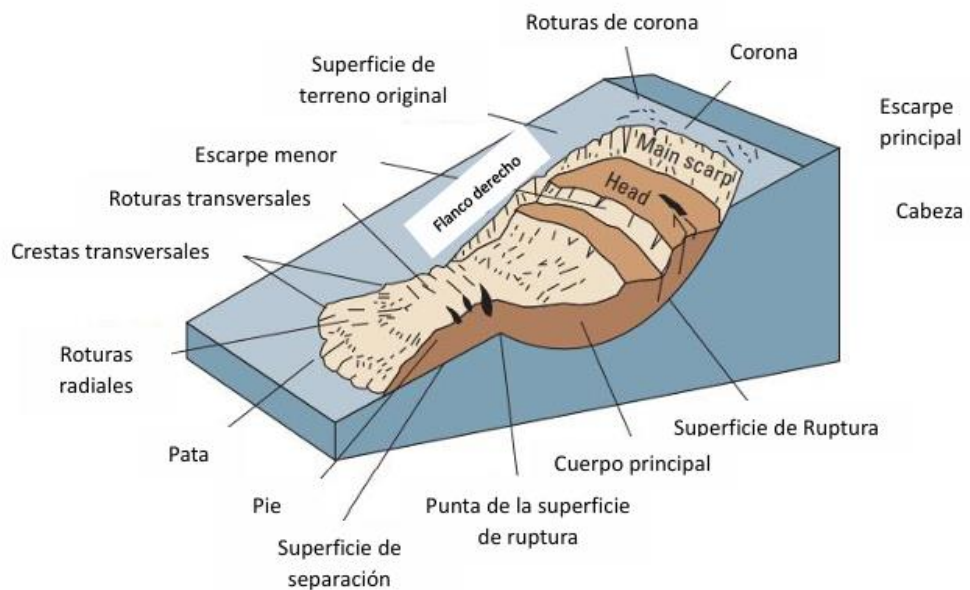
Los movimientos en masa comprenden diversos procesos que se dan como resultado del movimiento hacia abajo y hacia afuera de materiales que forman la pendiente, como rocas, suelo, relleno artificial o una mezcla de estos (United States Geological Survey [USGS], 2004). Los materiales pueden moverse por caída, derrumbe, deslizamientos, propagación o flujo (USGS, 2004).

Los movimientos en masa pueden caracterizarse a partir de las propiedades reológicas de los materiales que los conforman. Se pueden distinguir según Highland y Bobrowsky (2008), los siguientes aspectos morfométricos de un movimiento en masa (Figura 3).

- Corona: Sección superior del deslizamiento, con una forma semicircular o semi-rectangular. Marca el límite con el escarpe principal.
- Escarpe principal: Superficie empinada sobre el terreno no perturbado en el borde superior del deslizamiento, causada por el movimiento del material desplazado
- Superficie de ruptura principal: Superficie que forma (o ha formado) el límite inferior del material desplazado, por debajo de la superficie original del terreno. En materiales arcillosos, puede manifestarse como una superficie lisa con estrías alineadas en dirección al movimiento.
- Flancos: El material no desplazado adyacente a los lados de la superficie de ruptura.
- Cuerpo principal: Parte del material desplazado del deslizamiento que está sobre la superficie de ruptura

- Pie: Parte inferior donde el material en movimiento contacta el terreno intacto.
- Frente: Extremo inferior de la masa sobre el terreno intacto.
- Pata: El margen inferior, usualmente curvado, del material desplazado del deslizamiento; es el punto más lejano del escarpe principal.

Figura 3. *Partes morfológicas de un movimiento en masa.*



Nota. Tomado de Highland & Bobrowsky, 2008

Los movimientos en masa se pueden clasificar de diversas formas, enfocadas principalmente en el tipo de materiales, el mecanismo de movimiento y el grado de deformación y saturación. Varnes (1978), propone cinco tipos básicos de movimientos: caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral y flujo.

Estos movimientos pueden desencadenarse por diferentes factores, principalmente de origen natural, humano o por la interacción de ambos. Entre las causas naturales, destacan la presencia de agua y la actividad sísmica (Highland & Bobrowsky, 2008)

4.2 Proceso de Análisis Jerárquico

El método de análisis jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés "Analytic Hierarchy Process"), fue propuesto y desarrollado por Saaty (1977) (Feizizadeh, Jankowski, & Blaschke, 2013). Este método es reconocido como uno de los enfoques más utilizados en el análisis espacial para la toma de decisiones multicriterio. Su versatilidad ha permitido su aplicación en múltiples campos, entre ellos la evaluación de susceptibilidad por movimientos en masa, donde ofrece la ventaja de incorporar en el proceso diferentes tipos de información relevante. En este caso particular, el AHP se emplea para integrar variables como la geología, la geomorfología, los suelos edáficos y la cobertura del terreno. El procedimiento se fundamenta en la construcción de una matriz de comparación por pares, mediante la cual se evalúa la importancia relativa de cada factor frente a los demás, asignando así un peso numérico a cada criterio (Kayastha *et al.*, 2012).

La evaluación individual de cada variable representa su importancia relativa dentro del proceso de decisión, por lo que es de gran importancia asignar cuidadosamente los valores a cada criterio (Linares, 2017).

5. Antecedentes

El estudio de la susceptibilidad por movimientos en masa ha evolucionado significativamente desde enfoques empíricos y cualitativos hacia modelos cuantitativos integrados con herramientas de sistemas de información geográfica (SIG). Uno de los

métodos más reconocidos y aplicados en las últimas décadas para la toma de decisión multicriterio en este tipo de análisis es el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP, por sus siglas en inglés), desarrollado por Thomas L. Saaty en la década de 1980.

Diversos estudios han contribuido al fortalecimiento de este tipo de metodologías. Van Westen (1993), integró SIG en el análisis espacial de zonas propensas a inestabilidad de laderas. Posteriormente, Soeters y van Westen (1996) desarrollaron un enfoque práctico para el reconocimiento y zonificación de inestabilidades de ladera, incorporando un enfoque jerárquico similar al de las fases reconocidas en los proyectos de ingeniería, una aproximación que sería compatible más adelante con la lógica del AHP.

A nivel nacional, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) elaboró en el año 2001 el Mapa Nacional de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa, a escala 1:1.500.000 (IGAC & SINA, 2001). Para su construcción, se implementó un modelo heurístico basado en el método AHP, el cual integró variables como la pendiente, la litología, la cobertura vegetal, la precipitación y la sismicidad. Estas variables fueron ponderadas mediante el juicio de expertos y modeladas con el apoyo de herramientas de Sistemas de Información Geográfica.

Posteriormente, en el año 2010, con el propósito de mejorar el nivel de detalle de los mapas de amenaza por movimientos en masa, se desarrollaron mapas a escala 1:100.000 en dos zonas piloto, acompañados de un documento metodológico replicable. Este documento permitió establecer una guía técnica para la zonificación en las demás planchas 1:100.000 del territorio nacional, detallando el uso del método AHP como herramienta clave en la elaboración de dichos mapas (SGC, 2013).

En el ámbito regional, se han desarrollado diversos estudios que emplean el método AHP como herramienta principal para la identificación de zonas susceptibles a movimientos en masa. Por ejemplo, en el municipio de Palmira (Valle del Cauca), Sánchez Ospina (2024) aplicó el método AHP en conjunto con el método de Pesos de Evidencia (WoE), a una escala de 1:25.000, con el objetivo de realizar una zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa. Este análisis permitió priorizar las zonas o cuencas con mayor probabilidad de aporte de detritos o material deslizado, de modo que en estas áreas se puedan desarrollar estudios más detallados e implementar medidas de reducción del riesgo por avenidas torrenciales, como la instalación de barreras o mallas de retención de caudal sólido.

De manera similar, Domínguez Ávila (2024) utilizó el método AHP a una escala de 1:5.000 para evaluar la susceptibilidad por movimientos en masa en un sector urbano de Manizales, específicamente en la zona conocida como "Renault Minuto". En este estudio se analizaron variables como la pendiente, el uso y cobertura del suelo, la geomorfología, las formaciones superficiales y la geología local, con el fin de caracterizar un movimiento en masa previamente identificado en dicho sector.

En el municipio de El Carmen, Norte de Santander, donde se localiza el área de estudio, existen pocos trabajos enfocados en la susceptibilidad por movimientos en masa. No obstante, en la actualización del EOT de 2023 se incluye un mapa de susceptibilidad a escala 1:170.000 que abarca todo el territorio municipal (IGAC & DANE, 2023). Sin embargo, en la memoria justificativa de dicho proyecto se aclara que este mapa corresponde en realidad a un análisis detallado y a la zonificación de amenazas, en el que se identifican los elementos expuestos como equipamientos y edificaciones esenciales, pero no se realiza un análisis específico de susceptibilidad ni de riesgos (Municipio de El Carmen, 2023).

6. Metodología

Con el fin de evaluar la susceptibilidad por movimientos en masa en el municipio de El Carmen, Norte de Santander, se llevarán a cabo cinco fases en las que se realizaron diversas actividades con el fin de generar el mapa de susceptibilidad a escala 1:25.000 (Figura 5).

La metodología empleada se basa en enfoques previamente aplicados en estudios como el de Syam *et al.* (2019), Tareq *et al.* (2012), SGC (2013) y SGC (2017), sin embargo, se ha realizado una modificación en los factores considerados adaptando el análisis a las características específicas del área de estudio y a la escala planteada.

6.1 Fase 1. Identificación del fenómeno más recurrente en el municipio y metodología para la susceptibilidad por movimientos en masa.

Se llevó a cabo un análisis conjunto con la Oficina de Gestión del Riesgo para identificar los fenómenos naturales que han afectado con mayor frecuencia al municipio a lo largo de los años, determinándose que los movimientos en masa constituyen los eventos de mayor recurrencia. Por ello, se procedió a consultar guías metodológicas que permitieran evaluar la susceptibilidad a este tipo de fenómenos, destacando la Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017).

6.2 Fase 2. Recolección de información y selección de insumos.

Se realizó una revisión bibliográfica y recopilación de información a partir de diversas fuentes, incluyendo artículos científicos, proyectos de grado, informes técnicos, libros especializados y contenidos disponibles en páginas web confiables, consultados en bases de

datos académicos y repositorios públicos como la Universidad Industrial de Santander (UIS). Esta revisión permitió reunir información relevante sobre la ocurrencia de movimientos en masa en la región, sus factores detonantes, características morfológicas asociadas y condiciones geológicas y climáticas predisponentes, así como los principios y fundamentos del método de Análisis Jerárquico (AHP). De manera complementaria, se incorporó el conocimiento empírico y técnico aportado por los funcionarios de la Oficina de Gestión del Riesgo del municipio, quienes proporcionaron información sobre eventos pasados y zonas críticas.

Para el análisis de susceptibilidad se emplearon insumos cartográficos provenientes de fuentes oficiales. Del Servicio Geológico Colombiano (SGC) se obtuvo la plancha geológica 175 – Ocaña a escala 1:100.000, utilizada como referencia para la elaboración del mapa geológico, mientras que del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) se obtuvo la base cartográfica guía de la zona de estudio. Asimismo, se consultaron las bases de datos DesInventar y el Sistema de Información Minero Ambiental (SIMMA) para complementar la información sobre movimientos en masa históricos. Debido a la disponibilidad de información, los insumos de suelos edáficos y coberturas se utilizaron a escala 1:100.000, mientras que para geomorfología y Unidades Geológicas Superficiales (UGS) se realizó trabajo de campo con el fin de ajustar estos insumos a una escala más detallada (1:10.000). Aunque se manejan diferentes escalas cartográficas, la mayoría de los insumos corresponden a la escala estipulada para el trabajo (1:25.000). A los dos mapas con escala menos detallada (1:100.000) se les asignó un peso menor en el modelo, dado que representan los factores menos influyentes para los movimientos en masa en la zona. Adicionalmente, se obtuvo información relacionada con variables morfométricas y morfodinámicas a partir de un

Modelo Digital de Elevación (MDE), generado con datos del satélite ALOS PALSAR, descargados desde el portal “Alaska Satellite Facility” (ASF, s.f.), con una resolución espacial de 12,5 metros.

6.3 Fase 3. Creación de mapas preliminares Geomorfológico y de UGS

Mediante el análisis de imágenes satelitales y técnicas de fotointerpretación se elaboraron mapas preliminares de geomorfología y de Unidades Geológicas Superficiales (UGS) a escala 1:10.000, los cuales fueron posteriormente verificados y ajustados a partir del trabajo de campo desarrollado en la Fase 4.

Para la elaboración del mapa geomorfológico se adoptó el marco metodológico propuesto por Carvajal (2012) en la “*Propuesta de Estandarización de la Cartografía Geomorfológica en Colombia*”, el cual establece un esquema de jerarquización geomorfológica acorde con la escala de trabajo. De acuerdo con este enfoque, para escalas comprendidas entre 1:25.000 y 1:10.000 se requiere la identificación y descripción de subunidades geomorfológicas, lo que permitió una caracterización detallada de las formas del relieve presentes en el área de estudio. Por su parte, el mapa de Unidades Geológicas Superficiales se desarrolló siguiendo la metodología planteada por Padilla et al. (2004) en la “*Propuesta Metodológica para el Desarrollo de la Cartografía Geológica para Ingeniería*”, la cual se fundamenta en los criterios de clasificación establecidos por la IAEG (1981) y Montero *et al.* (1982), integrando aspectos litológicos, genéticos y de estado de consolidación de los materiales superficiales.

6.4 Fase 4. Trabajo de campo y construcción de mapas de geología y geomorfología a escala 1:25.000.

Se llevó a cabo un trabajo de campo con una duración de siete días, cuyo objetivo fue realizar la caracterización geomorfológica y de las Unidades Geológicas Superficiales (UGS) a escala 1:10.000 en el casco urbano del municipio de El Carmen, Norte de Santander. El área de estudio comprendió aproximadamente 4 km², delimitada en torno a las coordenadas 1.069.336 m Este y 1.432.942 m Norte. Durante el recorrido se recolectó información detallada sobre las UGS y se efectuó el reconocimiento y caracterización de las subunidades geomorfológicas presentes, lo cual permitió validar, ajustar y complementar los mapas preliminares obtenidos a partir de imágenes satelitales y procesos de fotointerpretación

6.5 Fase 5. Procesamiento de la información y producción de mapas

En este proyecto se consideraron los criterios definidos por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017) para el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa, junto con los factores que serán ponderados según la información disponible.

Según el SGC (2017), los criterios empleados para este análisis deben incluir las UGS, geomorfología, suelos edáficos, coberturas vegetales y uso del suelo. Algunos de estos factores incluyen una serie de subcriterios a los cuales se les estableció una ponderación que de igual manera influyeron en los mapas que se generaron.

Para la asignación de los pesos en el método AHP, se elaboró una matriz de comparación por pares considerando las condiciones específicas del área de estudio. Los valores resultantes fueron integrados en el software ArcGIS para la ejecución del modelo final de susceptibilidad a movimientos en masa presente en la Figura 3.

La integración de los factores temáticos y sus respectivos pesos se realizó mediante la herramienta Weighted Sum del software ArcGIS, la cual permite combinar múltiples capas raster ponderadas según su influencia relativa. Para ello, se llevó a cabo un proceso secuencial de suma ponderada de los subfactores que componen cada una de las capas temáticas consideradas.

En el caso de la capa correspondiente a la geomorfología, su construcción se desarrolló en tres etapas. En primer lugar, se generó la componente de morfometría mediante la combinación de los siguientes subfactores: pendiente, rugosidad, acuenca, y curvatura. Posteriormente, se construyó la componente morfodinámica que corresponde al relieve relativo. Finalmente, para obtener la capa total de geomorfología, se integraron las tres componentes principales: morfometría, morfodinámica y morfogénesis.

La capa correspondiente a los suelos edáficos se construyó a partir de la ponderación de tres subfactores: textura, taxonomía y profundidad total.

Una vez obtenidas las capas temáticas individuales de UGS, geomorfología, suelos edáficos y coberturas de la tierra, se integraron en un modelo final de susceptibilidad utilizando nuevamente la herramienta Weighted Sum (Figura 4) y aplicando la siguiente ecuación:

$$S = \text{UGS} + \text{Geomorfología} + \text{Suelos Edáficos} + \text{Cobertura}$$

Figura 4. *Modelo para la susceptibilidad por movimientos en masa ponderando los factores y subfactores de cada categoría.*

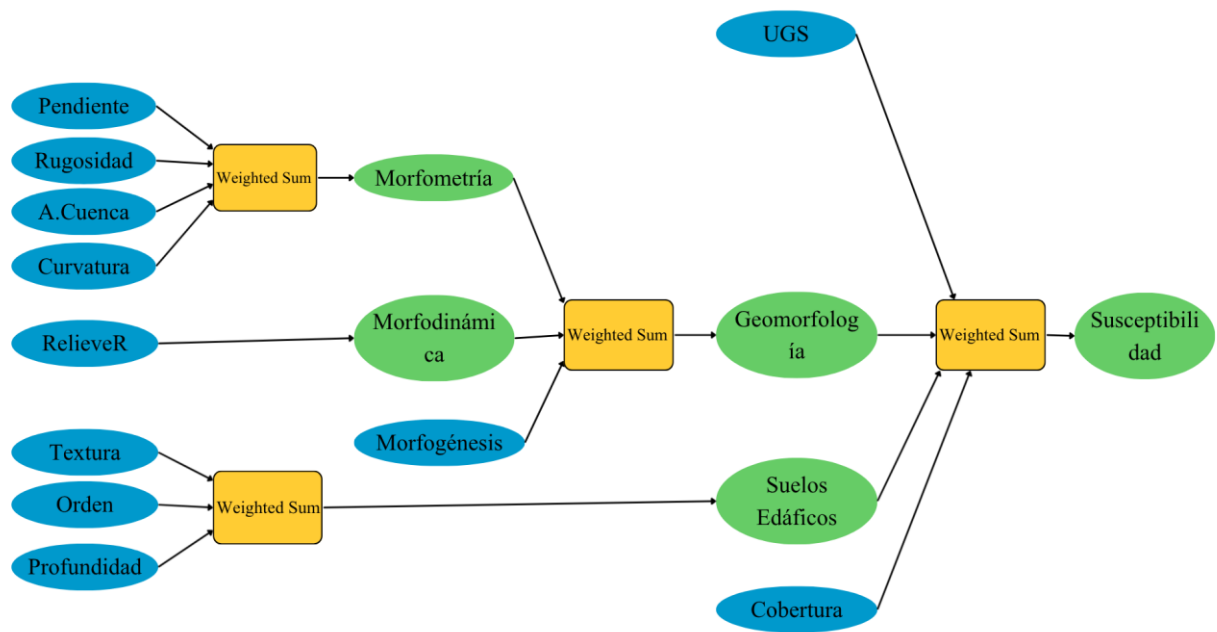
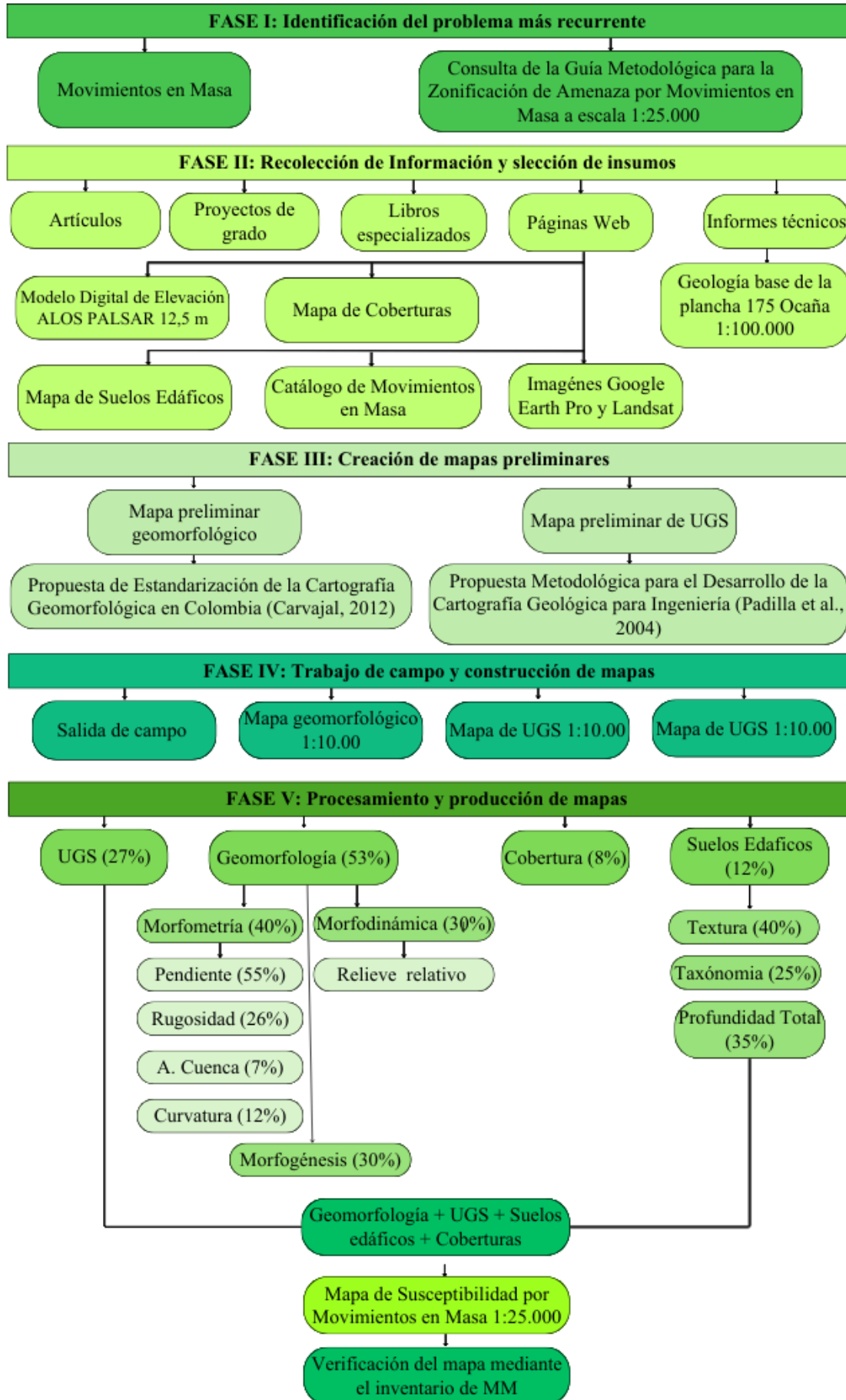


Figura 5. Diagrama de la metodología a utilizar para el desarrollo de este proyecto.



7. Campaña de campo

El reconocimiento de campo se llevó a cabo mediante una campaña de siete días en la zona de estudio. Uno de los principales objetivos de esta fase fue la elaboración de un mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS) a escala 1:10.000 en el casco urbano del municipio de El Carmen, Norte de Santander. El área de trabajo estuvo delimitada a una superficie aproximada de 4 km², comprendida entre las coordenadas 8°30'38" de latitud norte y 73°26'52" de longitud oeste.

Durante las jornadas de campo se llevó a cabo la identificación y descripción de distintas UGS presentes en el área de estudio, las cuales fueron contrastadas con la información obtenida en la revisión bibliográfica. Asimismo, se realizó el reconocimiento y la caracterización de las principales geoformas observadas en el terreno, con el fin de integrarlas en el análisis geomorfológico del sector.

En la zona de estudio se identificaron distintas UGS de roca, suelos residuales y suelos transportados. A continuación, se describen algunos de los suelos más característicos de esta zona:

Suelos Residuales de la Formación Bucaramanga

- Suelo residual franco arenoso de la Formación Bucaramanga con alta meteorización (Srfcfb)

Presenta un color amarillo y textura franco-arenosa sin estructuras visibles. El material exhibe una estructura grueso-granular no cohesiva con baja plasticidad y meteorización alta encontrándose en estado seco. La distribución granulométrica está compuesta por 0% de grava, 39% de arena, 36.25% de limo y 24.75% de arcilla. El espesor de esta unidad es de 2.5 m. (Figura 6)

Figura 6. *Suelo residual amarillo de textura franco-arenosa con alta meteorización*



- Suelo residual franco arcilloso de la Formación Bucaramanga (Srfagcfb)

Presenta un color marrón oscuro y textura franco-arcillosa sin estructuras visibles. El material exhibe una estructura fino-granular cohesiva con ligera plasticidad, alta consistencia y moderada meteorización, encontrándose en estado seco. La distribución granulométrica está compuesta por 0% de grava, 43% de arena, 15% de limo y 42% de arcilla. El espesor de esta unidad es de 1 m. (Figura 7).

Figura 7. *Suelo residual marrón oscuro de textura franco-arcillosa con moderada meteorización*



- Suelo residual franco arcilloso de la Formación Bucaramanga con baja meteorización (Srfagfb)

El perfil del suelo presenta dos horizontes bien diferenciados. En la parte superior se observa el horizonte VI, correspondiente a un suelo residual con un espesor aproximado de 0,3 m, color rojizo claro, textura franco arcillosa y estructura fino-granular o cohesiva. Este horizonte se encuentra húmedo, con alta consistencia, plasticidad moderada y baja meteorización. Hacia la base, se identifica el horizonte V, correspondiente a un saprolito fino con un espesor cercano a 1 m, donde se evidencia un aumento en la cantidad de fragmentos angulosos de roca, derivados del material parental. La textura se torna más gruesa, indicando un menor grado de evolución del suelo (Figura 8).

Figura 8. *Suelo residual rojizo claro de textura franco-arcillosa con baja meteorización*



- Suelo residual franco arcilloso de la Formación Bucaramanga con baja meteorización (Srfa**fb**)

Presenta un color rojizo oscuro y textura franco-arcillosa con algunas grietas superficiales. El material exhibe una estructura fino-granular cohesiva con nula a ligera plasticidad, alta consistencia y meteorización baja, encontrándose en estado seco. La distribución granulométrica está compuesta por 7% de grava, 44% de arena, 10% de limo y 39% de arcilla (Figura 9). El espesor de esta unidad es de 1 m.

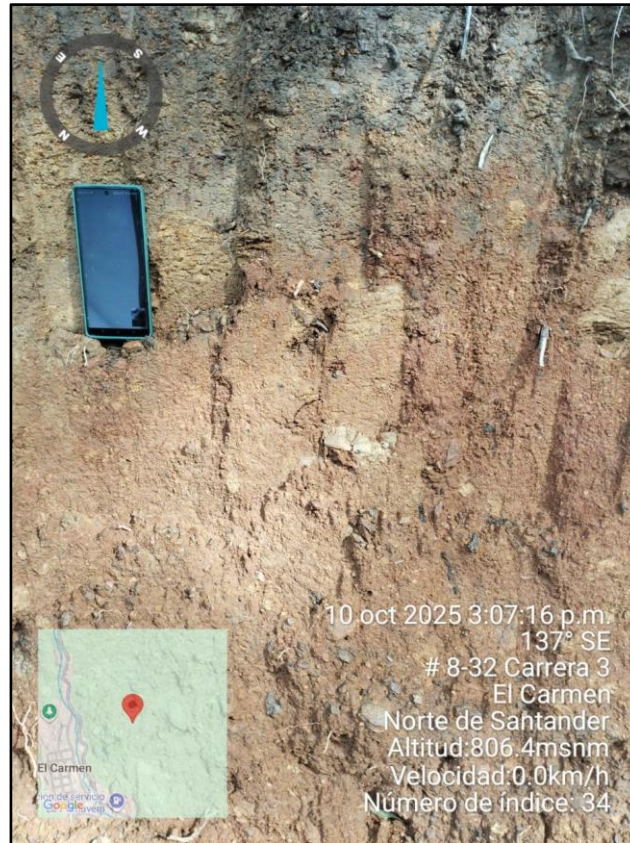
Figura 9. *Suelo residual rojizo oscuro de textura franco-arcillosa con baja meteorización*



- Suelo residual franco de la Formación Bucaramanga con moderada meteorización (Srfcgfb)

Presenta un color pardo rojizo a amarillento y textura franca sin estructuras visibles. El material exhibe una estructura grueso-granular no cohesiva con baja plasticidad y moderada meteorización, encontrándose en estado seco. La distribución granulométrica está compuesta por 5% de grava, 45% de arena, 30% de limo y 20% de arcilla. El espesor de esta unidad es de 0.8 m. (Figura 10)

Figura 10. *Suelo residual pardo rojizo a amarillento de textura franca con moderada meteorización*



Suelos residuales de la formación Silgará

- Suelo residual franco arcilloso de la Formación Silgará con alta meteorización (Srfamfs)

Presenta un color marrón oscuro y textura franco-arcillosa sin estructuras visibles. El material exhibe una textura fino-granular cohesiva con baja plasticidad, de consistencia media y alta meteorización, encontrándose en estado húmedo. La distribución granulométrica está compuesta por 0% de grava, 45% de arena, 20% de limo y 35% de arcilla (Figura 11). El espesor de esta unidad es de 1.6 m.

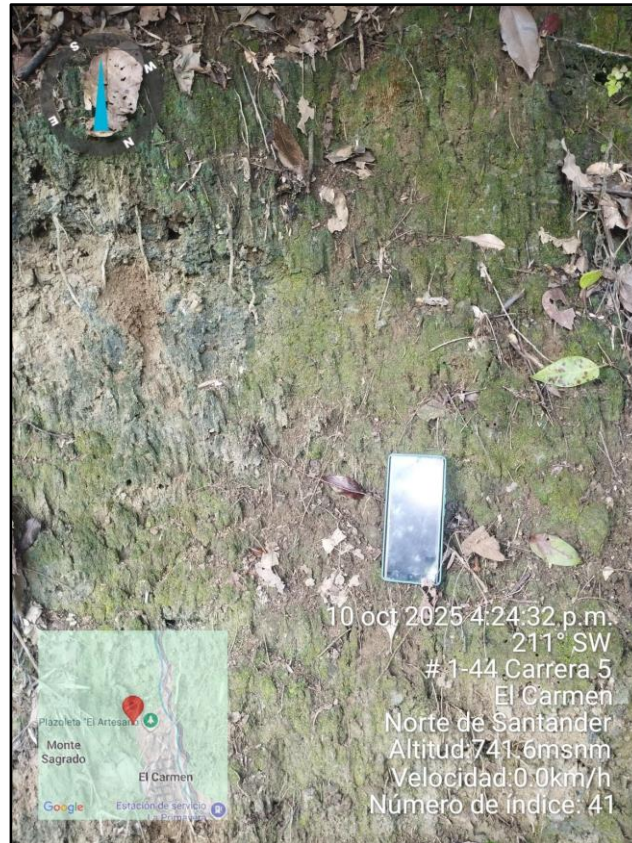
Figura 11. *Suelo residual marrón oscuro de textura franco-arcillosa con alta meteorización*



- Suelo residual franco de la Formación Silgará con alta meteorización (Srfmfs)

Presenta un color marrón claro y textura franca sin estructuras visibles. El material exhibe una textura grueso-granular no cohesiva con nula plasticidad y alta meteorización, encontrándose en estado seco. La distribución granulométrica está compuesta por 8% de grava, 41% de arena, 32% de limo y 19% de arcilla. El espesor de esta unidad es de 0.9 m. (Figura 12).

Figura 12. *Suelo residual marrón claro de textura franca con alta meteorización.*

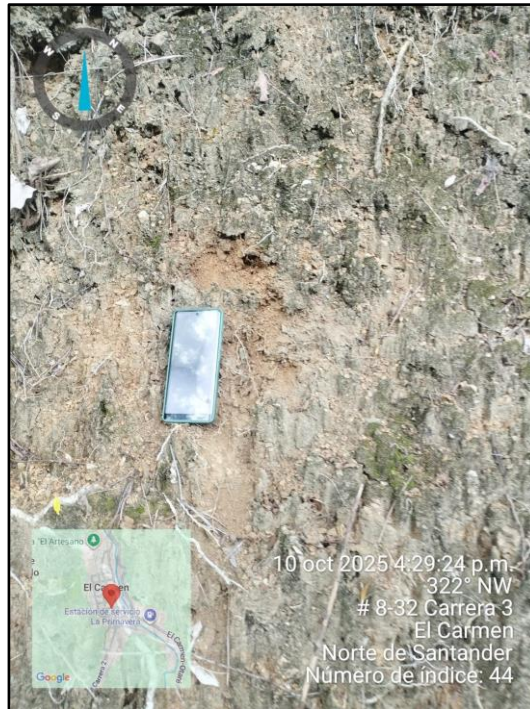


Suelos residuales de la Unidad de Areniscas de Tronadero

- Suelo residual franco arenoso de la Unidad Areniscas de Tronadero con alta meteorización (Srfarat)

Presenta un color pardo amarillo y textura franco-arenosa sin estructuras visibles. El material exhibe una textura grueso-granular no cohesiva con nula plasticidad y meteorización alta encontrándose en estado seco. La distribución granulométrica está compuesta por 10% de grava, 47% de arena, 27% de limo y 16% de arcilla. El espesor de esta unidad es de 1.2 m (Figura 13).

Figura 13. *Suelo residual pardo amarillento de textura franco-arenosa con alta meteorización.*

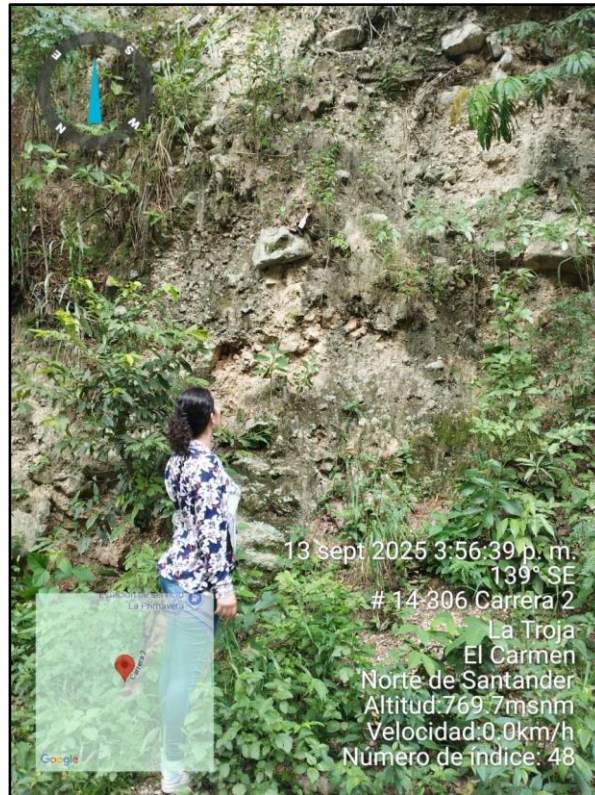


Suelos Transportados

- Suelo transportado de depósito coluvial – gravo arenoso

Deposito matriz soportado, de color verde oscuro por alta meteorización, compuesto por fragmentos de roca de tamaño gravas gruesas a cantos, con formas angulares de baja esfericidad, embebidos en una matriz gravo-arenosa, el depósito se encuentra seco, sin gradación, con densidad suelta, compacidad moderada y pobremente seleccionada (Figura 14).

Figura 14. *Suelo transportado de depósito coluvial*



- Suelo transportado de depósito aluvial

Depósito matriz-soportado, conformado por fragmentos de roca que varían entre 3 y 15 cm de diámetro, con formas subangulares a subredondeadas y baja esfericidad, inmersos en una matriz pardo amarillenta compuesta por arena de granulometría media a gruesa. El material presenta condición húmeda y evidencia una estratificación incipiente a lo largo del depósito (Figura 15).

Figura 15. *Suelo transportado de depósito aluvial*



8. Resultados

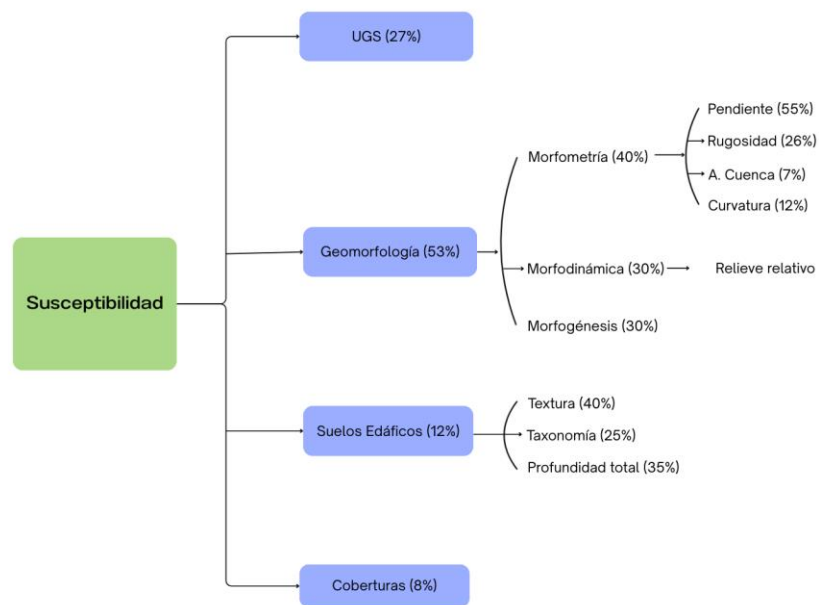
A partir de la matriz de comparación por pares elaborada según el método AHP (Tabla 1), se determinaron los pesos relativos de cada variable considerando las condiciones específicas del área de estudio. Los resultados indican que la geomorfología obtuvo el mayor peso con un 53%, seguida de la geología con un 27%, los suelos edáficos con un 12% y las coberturas de la tierra con un 8%. El índice de consistencia obtenido (CR) fue de 4,24 %, valor inferior al 10 % definido por Saaty como el máximo aceptable de inconsistencia, lo que garantiza la coherencia de las valoraciones asignadas. La ponderación asignada a cada subcriterio, presentada en la Figura 16, refleja la importancia relativa de cada variable en función de su influencia sobre la susceptibilidad a movimientos en masa.

Tabla 1. *Matriz de pares para la determinación del peso de cada variable.*

	Geomorfología	UGS	Suelos edáficos	Coberturas
--	---------------	-----	-----------------	------------

Geomorfología	1	3	4	5
UGS	0.33	1	3	4
Suelos edáficos	0.25	0.33	1	2
Coberturas	0.20	0.25	0.50	1
Peso (W)	0.53	0.273	0.124	0.077
CR	4,24%			

Figura 16. Modelo conceptual de los factores utilizados en la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa, con los pesos establecidos en la tabla 1.



La asignación de estos valores se fundamentó en la relevancia que presenta la geomorfología en el municipio de El Carmen, dada la presencia de un relieve montañoso y de geoformas asociadas a procesos estructurales y denudacionales principalmente. Estas formas del terreno, fuertemente influenciadas por la falla de Bucaramanga, generan laderas de alta pendiente, elevada rugosidad y condiciones de inestabilidad que favorecen la ocurrencia de movimientos en masa. De igual manera, las unidades geológicas superficiales constituyen un factor determinante en el análisis ya que, en áreas de pendientes pronunciadas

y fuerte control estructural los suelos residuales y transportados presentan baja cohesión y alta heterogeneidad, lo que incrementa su susceptibilidad ante saturación o esfuerzos adicionales. Esta condición se intensifica en el área de estudio, donde la presencia de tres fallas principales favorece el fracturamiento de las rocas, facilitando la infiltración y disminuyendo la resistencia mecánica de los materiales, lo que crea un escenario altamente propicio para la ocurrencia de deslizamientos. Por otro lado, se asignaron pesos menores a los factores de uso del suelo y coberturas, dado que, aunque influyen en el comportamiento superficial del terreno, en esta zona predomina un fuerte control estructural y geomorfológico que condiciona los procesos de inestabilidad.

Una vez establecidos los pesos relativos, se obtuvieron los subcriterios y variables necesarias para el análisis de susceptibilidad, elaborándose los mapas resultantes a escala 1:25.000 mediante un Sistema de Información Geográfica para su integración en el modelo de susceptibilidad por movimientos en masa.

8.1 Mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS) a escala 1:10.000

Las Unidades Geológicas Superficiales (Figura 17) corresponden a los materiales que afloran en la superficie y constituyen uno de los principales factores condicionantes en la susceptibilidad por movimientos en masa. Se agrupan en dos categorías principales: suelos y rocas, los cuales presentan un comportamiento geomecánico análogo y comparten un mismo origen (SGC, 2017).

En la zona de estudio se identificaron 36 Unidades Geológicas Superficiales como se observa en el Apéndice B de la Página 85 y C de la Página 88, distribuidas en un 2,86% correspondientes a UGS de roca, un 85,75% a UGS de suelos residuales y un 11,37% a UGS

de suelos transportados. En la Figura 18 se muestra el mapa categorizado de susceptibilidad creado a partir de las UGS.

Figura 17. Mapa de UGS a escala 1:10.000 del área de estudio (Ver leyenda en la Página 86 en el Apéndice C).

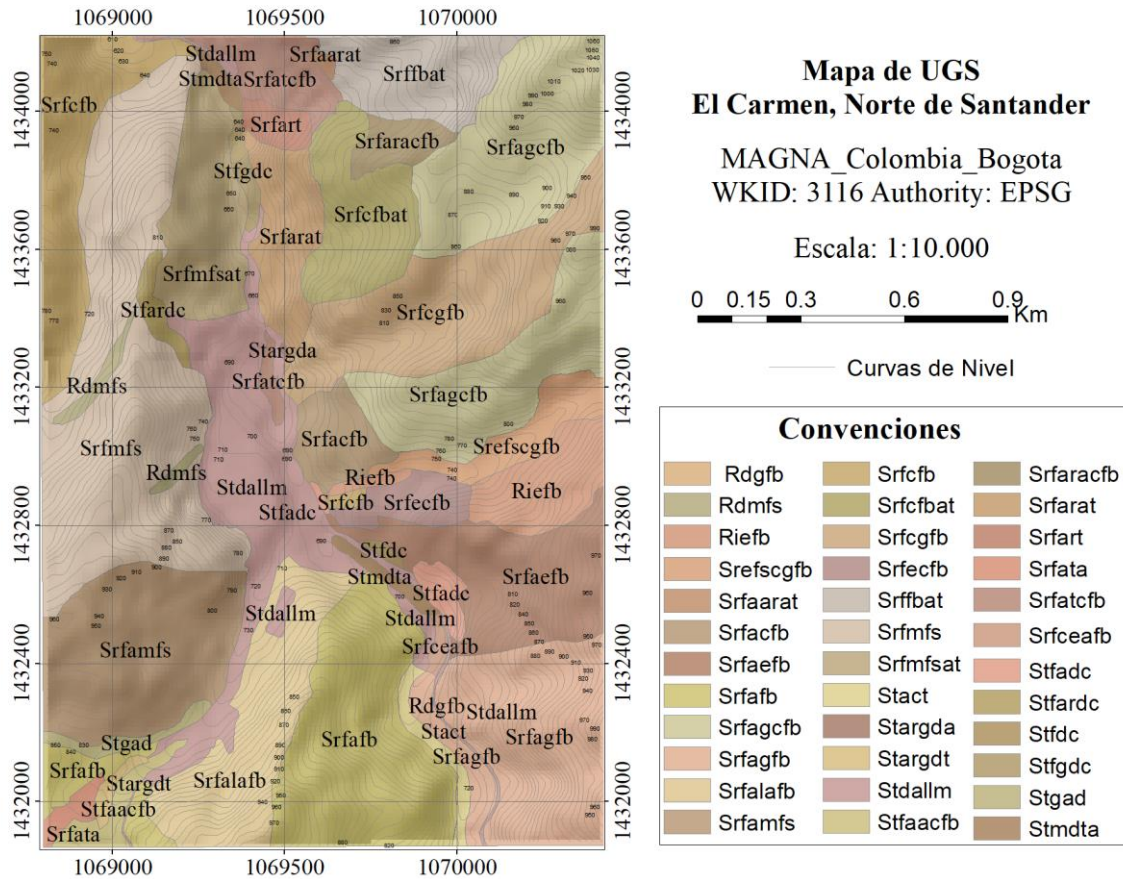
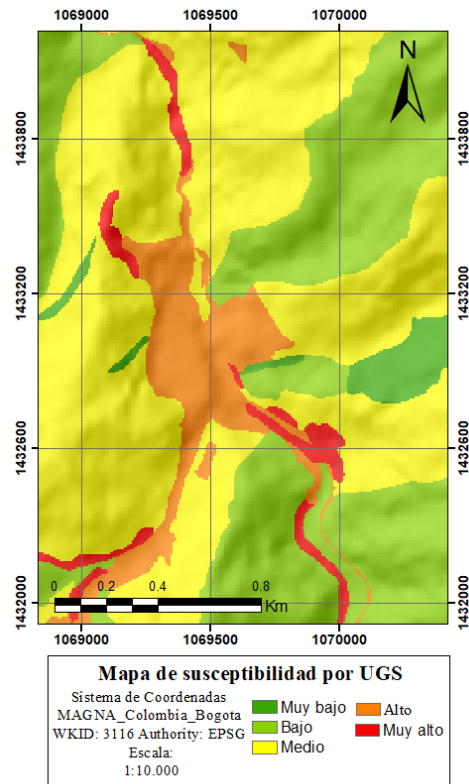


Figura 18. Mapa de UGS categorizado en términos de susceptibilidad como parámetro de entrada para el modelo AHP según las clasificaciones establecidas en el Apéndice B de la Página 85.



8.2 Geomorfología

Este factor será evaluado a partir de tres subcriterios: morfometría, morfodinámica y morfogénesis.

8.2.1 Morfometría

Se trata de aspectos cuantitativos en términos de pendiente, rugosidad, acuenca y curvatura. Para generar estas variables se hará uso del MDE del satélite ALOS PALSAR. En la tabla 2 se presenta la propuesta de pesos para esta variable.

Tabla 2. Propuesta de pesos para la variable de morfometría (Linares, 2017).

	Atributos	Ponderados
MORFOMETRÍA	Pendiente	55%
	Rugosidad	26%
	Acuena	12%
	Curvatura	7%

- Pendiente

La pendiente se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal y su valor en este estudio se definió en grados de 0° a 90°. Este factor es de importancia en este análisis, ya que al aumentar el grado de la pendiente aumenta la susceptibilidad a los movimientos en masa (SGC, 2013) (Figura 20).

Para definir la pendiente se utilizará la herramienta “Slope” del SIG ArcGis como se muestra en la Figura 19 y posteriormente se reclasificará de acuerdo a lo estipulado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2013) (Tabla 3).

Figura 19. Modelo para producir el ráster de pendiente clasificado.

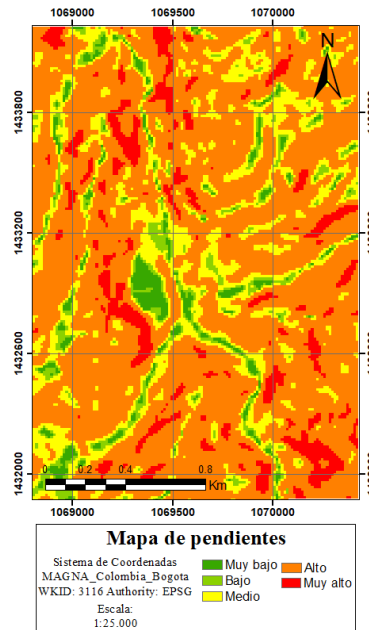


Tabla 3. Tabla de susceptibilidad de la pendiente (Linares, 2017).

Descripción	Grados	Calificación	Susceptibilidad
Plana a suavemente inclinada	0 - 7	1	Muy baja
Inclinada	7 - 11	2	Baja
Muy inclinada	11 - 19	3	Media

Abrupta	19 - 40	4	Alta
Escarpada	40 - 90	5	Muy Alta

Figura 20. Mapa temático del subcriterio pendiente.



- **Curvatura**

Esta capa indica la forma de las laderas. Los valores positivos indican que la superficie es lateralmente convexa hacia la celda, un valor negativo indica que la superficie es lateralmente cóncava hacia la celda y los valores alrededor de cero indican que la superficie es lineal (SGC, 2017). Las superficies cóncavas representan una mayor susceptibilidad del terreno a movimientos en masa.

Para calcular la curvatura se utilizará la herramienta “curvature” como se muestra en la figura 21, y para este caso se trabajará con la curvatura de plano, ya que esta considera la convergencia o divergencia de una corriente.

Posteriormente, se establecieron 5 rangos de clasificación para la curvatura del terreno, considerando los valores negativos, positivos y aquellos cercanos a cero como se muestra en la tabla 4 (Figura 22).

Figura 21. Modelo para producir el ráster de curvatura clasificado.

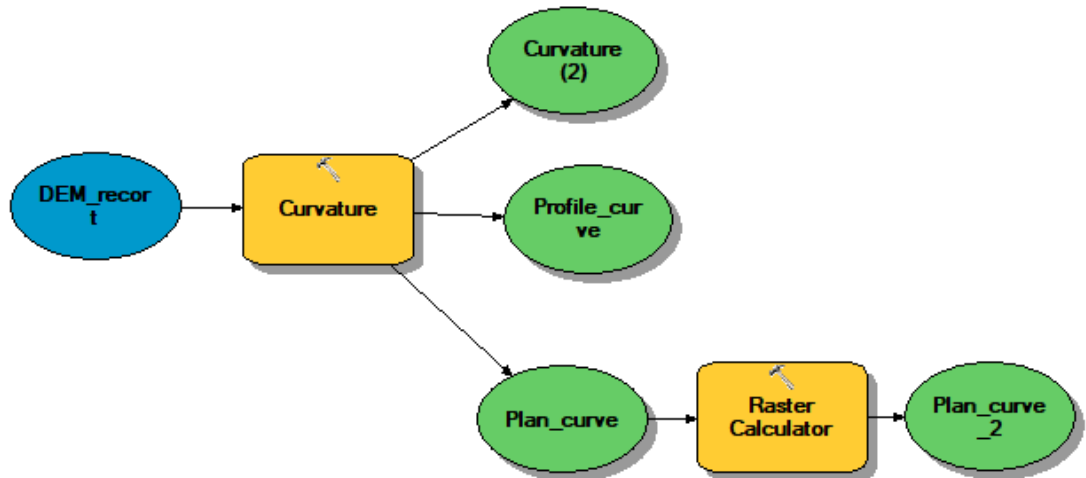
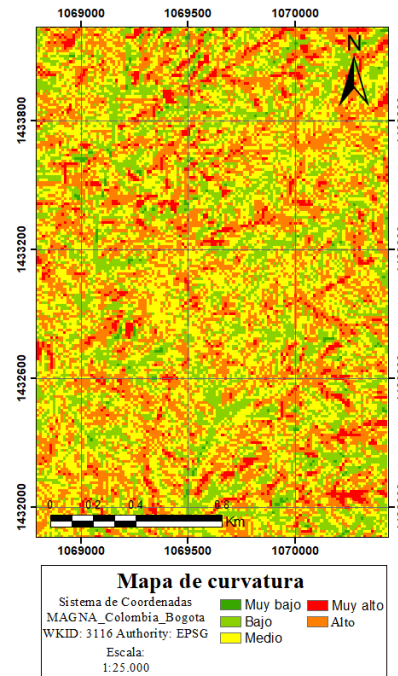


Tabla 4. Propuesta de susceptibilidad de la curvatura.

Rango	Tipo	Calificación	Susceptibilidad
-31.8294 a -1.3976	Superficie cóncava marcada	5	Muy alta
-1.3976 a -0.1639	Superficie cóncava leve	4	Alta
-0.1639 a 0.6585	Superficie plana	3	Media
0.6585 a 2.7147	Superficie convexa leve	2	Baja
2.7147 a 73.0367	Superficie convexa marcada	1	Muy baja

Figura 22. Mapa temático del subcriterio Curvatura.



- Rugosidad

La rugosidad se refiere a la variación de la pendiente dentro de una superficie, indicando la desviación del vector normal en cada celda. Este parámetro se asocia con la susceptibilidad a movimientos en masa, ya que un incremento en la rugosidad favorece la inestabilidad del terreno. Los cambios continuos en la pendiente facilitan una mayor infiltración de agua, lo que contribuye a la pérdida de estabilidad del suelo (SGC, 2013).

La rugosidad puede calcularse como la segunda derivada del terreno, es por esto que para el cálculo de este factor se ejecutará la herramienta “Slope” dentro de *Spatial Analyst/ Surface Analysis* como se muestra en la Figura 23 (Linares, 2017). Posteriormente se asignarán los pesos establecidos en la Tabla 5 (Figura 24).

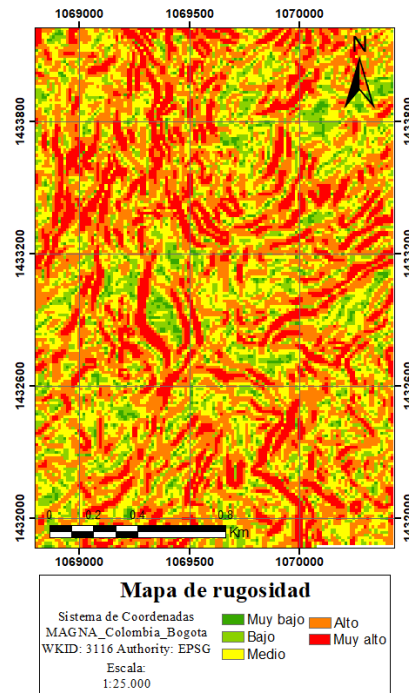
Figura 23. Modelo para producir el ráster de rugosidad clasificado.



Tabla 5. *Tabla de susceptibilidad de la rugosidad (Linares, 2017).*

Descripción	Grados	Calificación	Suceptibilidad
Suave	0 - 3,00	1	Muy baja
Ligeramente rugosa	3,00 - 7,39	2	Baja
Moderadamente rugosa	7,39 - 13,85	3	Media
Rugoso	13,85 - 25,17	4	Alta
Muy rugoso	25,17 - 68,16	5	Muy Alta

Figura 24. *Mapa temático del subcriterio Rugosidad.*



- A. cuenca

El atributo de A. cuenca se refiere a la superficie total que drena hacia una celda específica, conocida como cuenca acumulada, representando el área aguas arriba que vierte su flujo en ese punto. Este parámetro se calcula a partir del Modelo de Elevación Digital (MDE) y se expresa en metros cuadrados (m^2). La extensión de la cuenca está directamente relacionada con la cantidad de agua que puede captar e infiltrar el suelo, de modo que, a mayor área, mayor capacidad de infiltración, lo que incrementa la inestabilidad del terreno (SGC, 2013).

Para el cálculo del factor A. cuenca se calculará la dirección de flujo y la acumulación de flujo, y posteriormente, para determinar el área de la cuenca, se multiplicó el valor de flujo acumulado por el área de cada celda, equivalente a $156.25 m^2$, dado que el MDE presenta una resolución de píxel de 12.5 m. Finalmente, se realizará la clasificación del área calculada (Figura 25). Posteriormente se asignarán los pesos establecidos en la Tabla 6 (Figura 26).

Figura 25. Modelo para producir el ráster de A. cuenca clasificado.

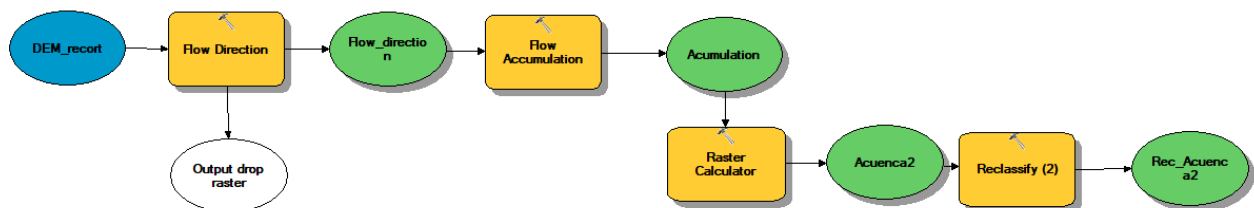
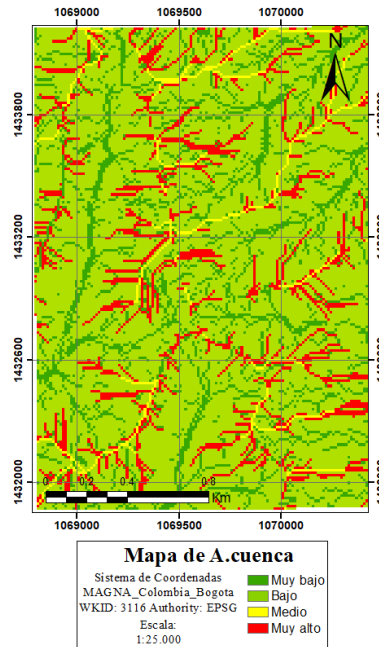


Tabla 6. Tabla de susceptibilidad de la variable A. cuenca (Linares, 2017).

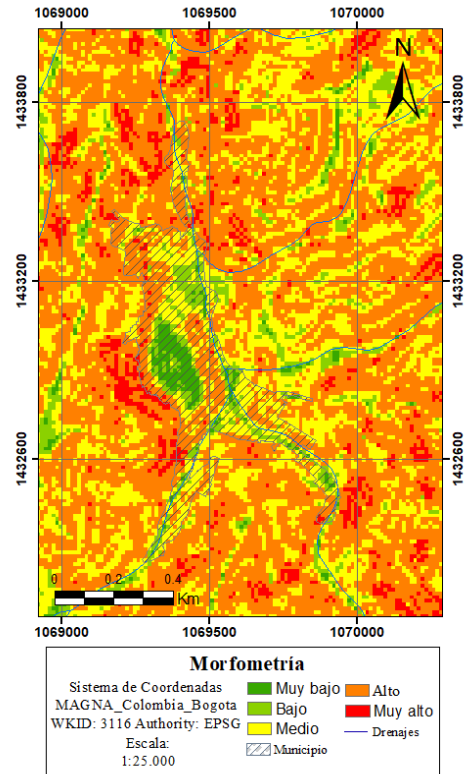
Descripción	Calificación	Susceptibilidad
Divisoria de Aguas o Lomos	1	Muy Baja
Escorrentía lenta	2	Baja
Flujo Acumulado	5	Muy Alta
Drenaje no permanente	3	Media
Quebrada, Ríos	1	Muy baja

Figura 26. *Mapa temático del subcriterio A. Cuenca.*



La Figura 27 presenta el mapa temático obtenido de la integración de cada uno de los subcriterios mencionados anteriormente.

Figura 27. *Mapa temático de la variable morfometría*



8.2.2 Morfodinámica

En este estudio, la capa de relieve relativo constituirá el factor de morfodinámica. La clasificación se realizó exclusivamente con estas capas derivadas del MDE, debido a la falta de información adicional o a la baja calidad de los datos disponibles.

- Índice de relieve relativo

El índice de relieve relativo se define como la diferencia entre la mayor elevación y la menor elevación por unidad de área y se expresa como la máxima diferencia de altura del terreno por km². La Figura 28 ilustra el modelo que se seguirá para producir el ráster del relieve relativo.

Posteriormente, La reclasificación se llevará a cabo en tres clases, siguiendo la tabla de clasificación del relieve (Tabla 7). Los valores utilizados oscilan entre un mínimo de 30 m y un máximo de 154 m (Figura 29)

Figura 28. Modelo para producir el ráster de relieve relativo clasificado.

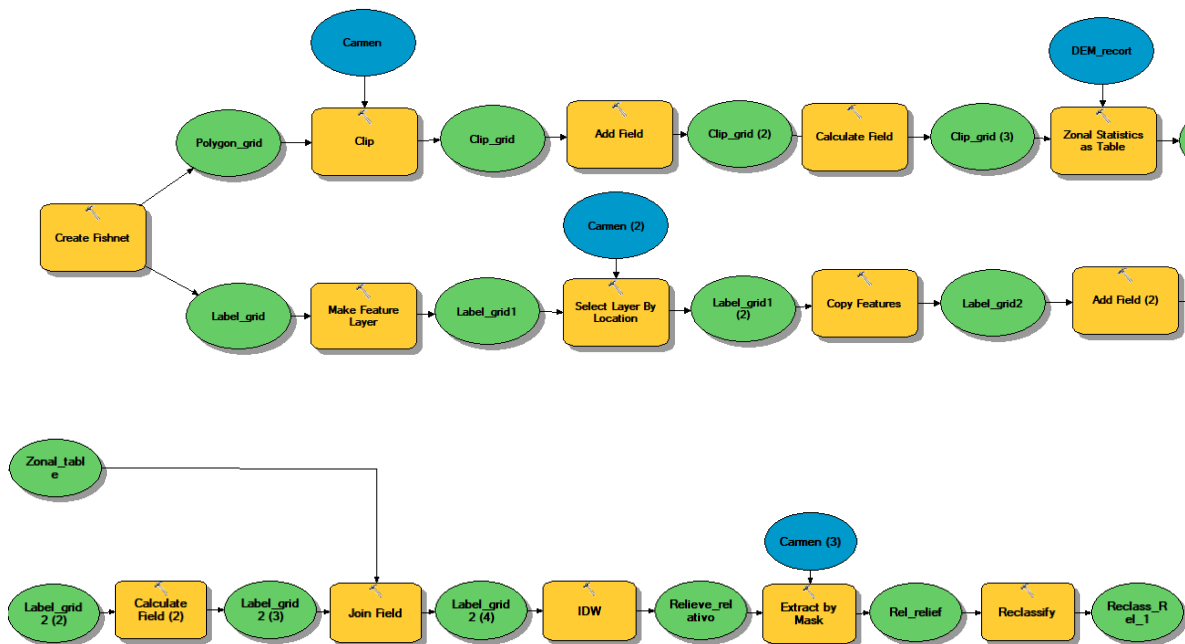
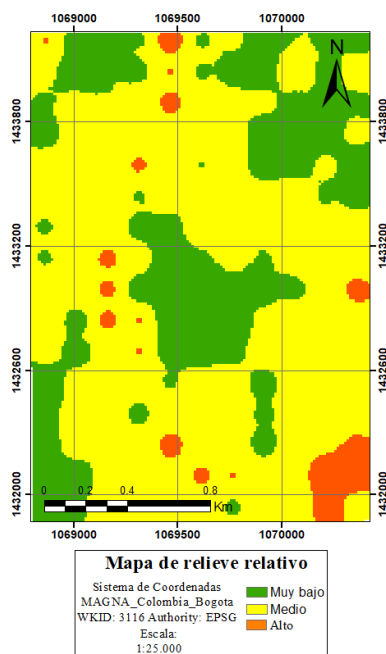


Tabla 7. Propuesta de calificación del relieve relativo.

Intervalo de altura	Calificación	Susceptibilidad
32.771469 – 70 m	1	Muy baja
70-110 m	3	Media
110 - 153.87648 m	4	Alta

Figura 29. Mapa temático categorizado como variable morfodinámica.

8.2.3 Morfogénesis

La morfogénesis corresponde al origen de las formas del terreno, es decir, las causas y procesos que dieron forma al paisaje (SGC, 2013).

La información morfogenética se representa mediante subunidades geomorfológicas, y su calificación se realiza sobre cada geoforma. Para este análisis, se empleará el mapa geomorfológico ajustado a escala 1:10.000 del casco urbano del municipio, el cuál será clasificado según los criterios establecidos en el Apéndice A de la Página 84.

Para la zona de estudio se presentaron cuatro ambientes morfogenéticos (Figura 30): Ambiente Estructural, Ambiente Denudacional, Ambiente Fluvial y Ambiente Antrópico, siendo los dos primeros los de mayor representatividad areal (Figura 31). Dentro de cada uno de estos ambientes se identificaron sus respectivas subunidades morfológicas que en su totalidad sumaron 40 subunidades como se puede observar en la Página 89 en el Apéndice

D, basadas en lo estipulado por Carvajal (2012) para la cartografía a escala 1:10.000. En la Figura 32 se muestra mediante un mapa, la influencia de la geomorfología en la susceptibilidad por movimientos en masa.

Figura 30. *Distribución porcentual de los ambientes morfo genéticos identificados en el área de estudio.*

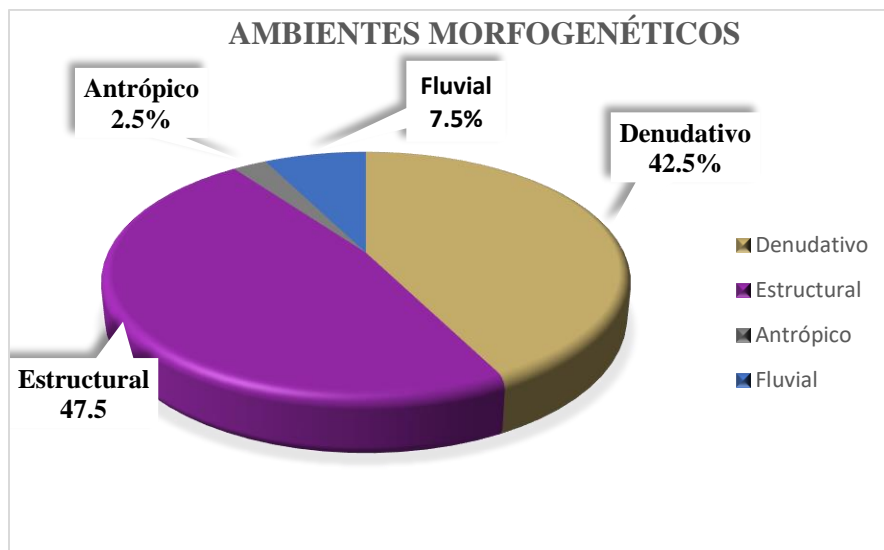


Figura 31. *Mapa geomorfológico del área de estudio. Ver leyenda en la Página 84 en el Apéndice A*

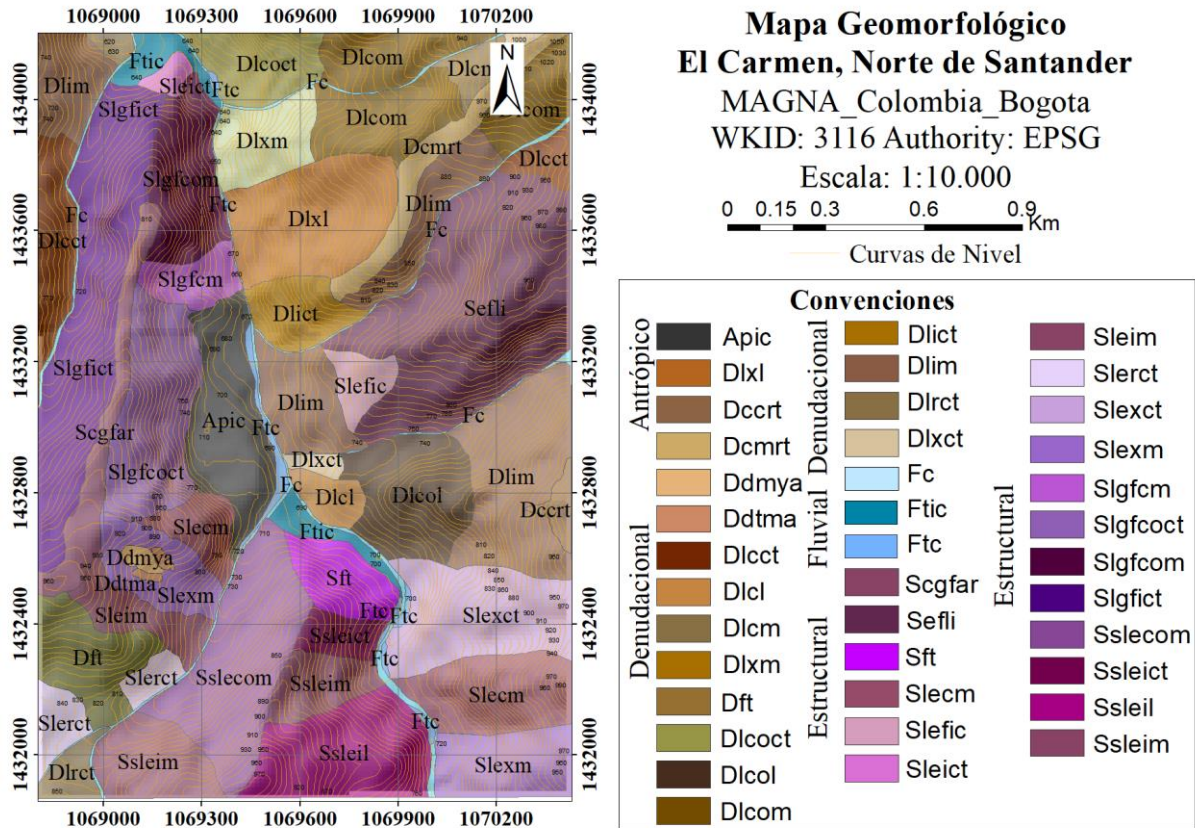
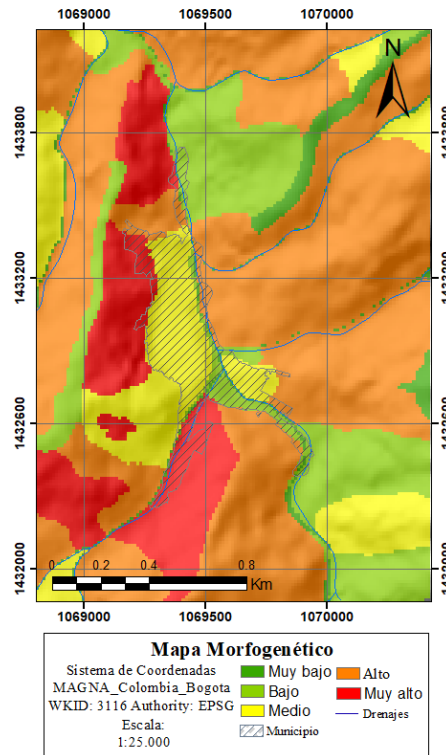


Figura 32. Mapa geomorfológico clasificado en términos de susceptibilidad según lo establecido en la Página 84 en el Apéndice A.



Ambiente Estructural: Corresponde a geformas originadas por procesos endógenos, principalmente plegamientos y fallamientos, cuya morfología está condicionada por la orientación y resistencia diferencial de las unidades rocosas. Presentan un marcado control estructural del relieve, con fuerte influencia de fallas y sistemas de fracturamiento, y comprenden laderas estructurales de diversa tipología (gancho de flexión, convexas, cóncavas, espolón facetado, entre otras). Se caracterizan por pendientes inclinadas a muy escarpadas, distribuyéndose en relieves desde muy alto hasta bajo, según su morfometría y grado de disección. Morfodinámicamente, están asociadas a erosión laminar e inestabilidad superficial, especialmente en áreas con uso agropecuario o intervención antrópica. Incluyen laderas irregulares o complejas, generalmente largas, moderadas a muy disectadas, lo que refleja una dinámica activa del modelado del relieve. Su distribución es amplia en el

municipio, con control litológico dominado por suelos derivados de rocas metamórficas y, en menor proporción, sedimentarias.

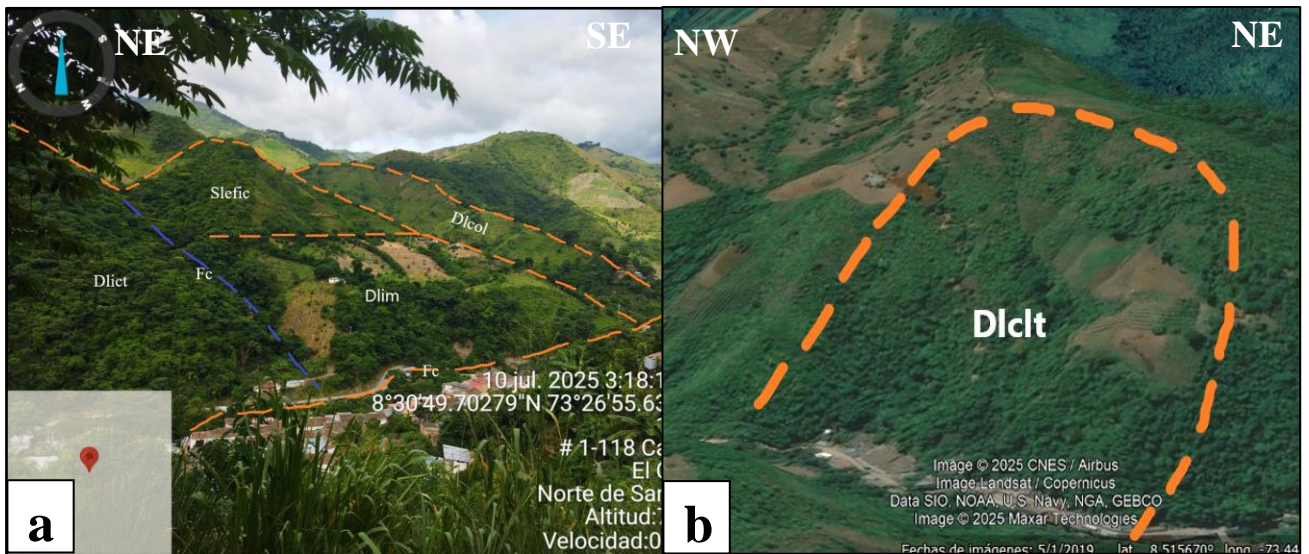
En la zona se identificaron 19 subunidades del ambiente estructural que se muestran en el Apéndice D de la página 89.

Ambiente Denudacional: Incluye geoformas formadas por la remoción de materiales superficiales a través de meteorización, erosión, reptación y movimientos en masa. Se desarrollan principalmente en laderas con pendientes variables, donde la acción combinada de la gravedad y agentes climáticos modela y degrada el relieve. En el municipio se identifican diversas geoformas asociadas al ambiente denudacional, caracterizadas por la acción predominante de procesos gravitacionales y erosivos superficiales. Estas formas comprenden principalmente laderas denudadas con pendientes que varían entre suavemente inclinadas e inclinadas a moderadas, aunque también se presentan sectores abruptos a muy escarpados, donde se desarrollan procesos más activos de modelado.

Predominan laderas denudadas simples, disectadas y complejas, afectadas por erosión laminar, deslizamientos superficiales y reptación, así como cimas denudacionales y deslizamientos traslacionales, evidenciando una dinámica activa asociada a pérdida de cobertura vegetal e intervención antrópica. El relieve presenta contrastes de muy bajo a alto, sobre materiales meteorizados y rocas poco coherentes, favoreciendo la inestabilidad de vertientes y la acumulación de coluviones en zonas bajas. Estas unidades están ampliamente distribuidas en áreas rurales, con mayor concentración en laderas medias y bajas, donde el escurrimiento superficial y el uso del suelo intensifican los procesos de degradación.

En la figura 33 se muestran imágenes tomadas en la campaña de campo

Figura 33. Ambiente Denudacional en el que se encuentran geoformas de a) cauce aluvial (*Fc*), ladera denudativa irregular corta (*Dlic*), ladera denudativa compleja larga (*Dlcol*), ladera estructural de espolón facetado irregular corta (*Slefic*) y ladera denudativa irregular moderada (*Dlim*). b) Ladera denudativa cóncava larga (*Dlcl*).

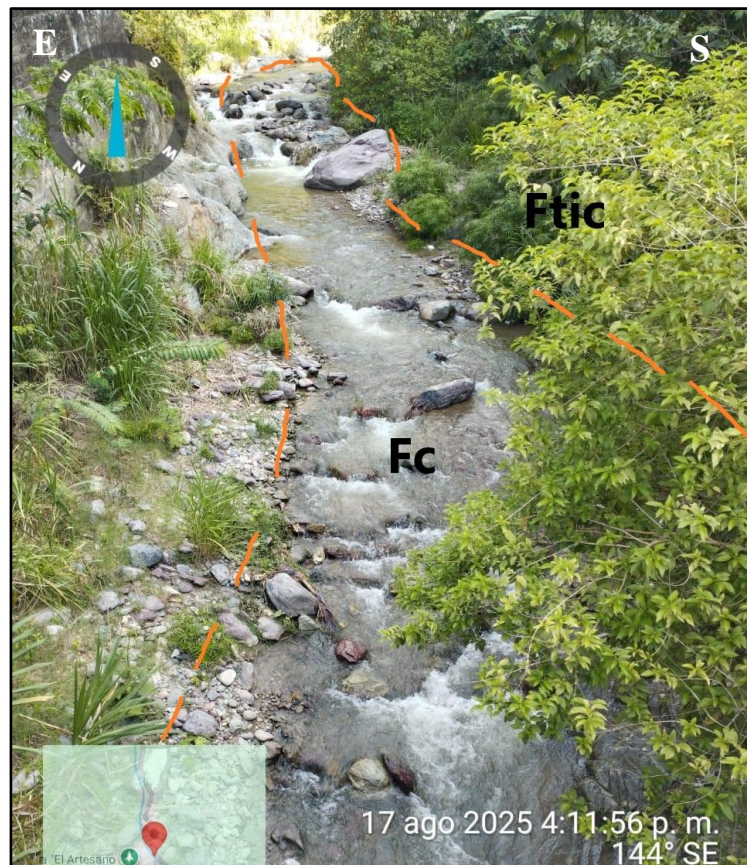


En la zona se identificaron 17 subunidades del ambiente denudacional que se muestran en el Apéndice D de la Página 89.

Ambiente Fluvial: Comprende geoformas fluviales generadas por erosión y sedimentación asociadas a la dinámica de ríos y quebradas, destacándose cauces aluviales activos y una terraza fluvial. Se localizan en zonas bajas siguiendo el trazado de los cauces, con pendientes de suaves a escarpadas y contrastes de relieve de muy bajo a muy alto, según el grado de incisión y acumulación. Los cauces abruptos reflejan alta energía y transporte activo, mientras que los de pendiente suave corresponden a áreas de deposición. La terraza fluvial, ligeramente elevada respecto al cauce, evidencia fases antiguas de acumulación y

constituye un elemento clave para interpretar la evolución hidromorfológica y la susceptibilidad a inundaciones, sedimentación o erosión lateral.

Figura 34. *Ambiente Fluvial, en el que se encuentran geoformas de Plano o llanura de inundación (Fpi) y cauce aluvial activo (Fc), pertenecientes a la Quebrada Grande de El municipio de El Carmen.*

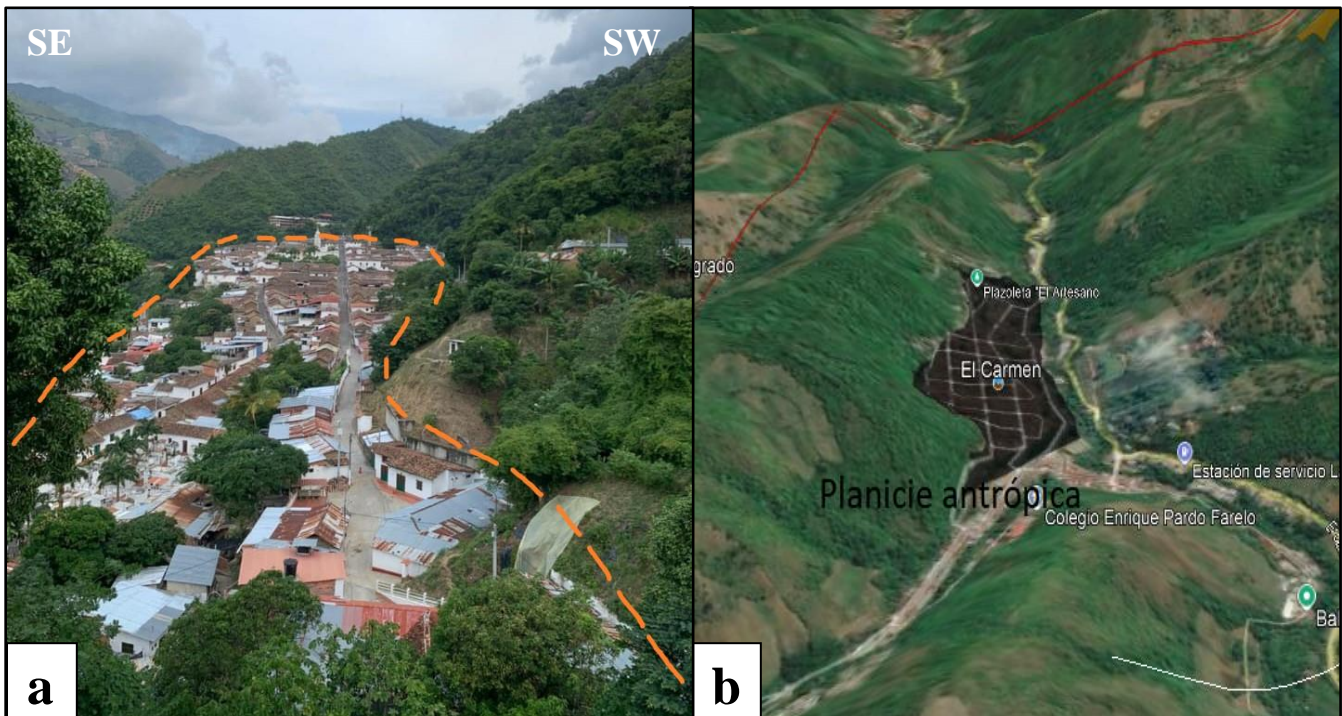


En la zona se identificaron 3 subunidades del ambiente estructural que se muestran en el Apéndice D de la página 89.

Ambiente Antrópico: Comprende geoformas modificadas o generadas por la acción humana, como cortes, rellenos, terrazas artificiales y explanaciones, asociadas a actividades como urbanización, infraestructura vial, minería o agricultura mecanizada. Estas formas

alteran la morfología natural del terreno, modifican los procesos superficiales y pueden inducir inestabilidad en zonas intervenidas

Figura 35. Ambiente antrópico en el que se encuentra una geoforma de planicie antrópica a) en fotografía y b) en fotogeología (Google Earth Pro, 2019).



8.3 Suelos Edáficos

La formación de los suelos parte de un estado litológico inicial y evoluciona con el tiempo bajo la influencia de factores como la vegetación, el clima y la actividad humana. En este estudio, la caracterización se realizó a partir del mapa de suelos del municipio a escala 1:100.000 tomado del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, s.f). Debido a la limitada información disponible, se emplearon tres subcriterios para el análisis: textura, taxonomía y profundidad total. En la Figura 24 se muestra el mapa de susceptibilidad generado a partir de los usos del suelo.

a. Textura

Este factor está estrechamente relacionado con los movimientos en masa, ya que los suelos arcillosos son más susceptibles a estos fenómenos debido a su baja permeabilidad y menor movimiento vertical del agua, lo que los hace propensos a la saturación. Por el contrario, los suelos de textura gruesa presentan una mayor permeabilidad y conductividad hidráulica, lo que permite un drenaje más rápido y reduce la probabilidad de deslizamientos (SGC, 2013)

La clasificación de la textura del suelo se basa en la Tabla 8, donde se establecen los siguientes grupos texturales: Arenoso (A), Arcilloso (Ar), Gravoso (Gr), Franco (F), Piedra (P), Limoso (L) y Orgánico (Org).

Tabla 8. *Calificación de la textura (SGC, 2013).*

Clase Textural	Calificación	Susceptibilidad
Gr, A, FAGrP, Agr, AFP	1	Muy baja
AF, FAGr, FArAGr, FArGr, FGr, FGrP	2	Baja
ArA, ArGr, FA, FArLGr, ArLGr, FLGr, ArAGr	3	Media
F, F-Org, Far, FArA, FArL, FL, FLOrg	4	Alta
Ar, ArL	5	Muy Alta

b. Taxonomía

La taxonomía nos indica la evolución que han presentado los suelos, siendo los más evolucionados y en condiciones ideales los menos susceptibles a los movimientos en masa y los más jóvenes los más susceptibles (SGC, 2013). La clasificación de la taxonomía del suelo se asignará teniendo en cuenta lo establecido en la Tabla 9.

Tabla 9. *Calificación de la taxonomía, orden de suelos (SGC, 2013).*

Orden de Suelos	Calificación	Susceptibilidad
Oxisol, Ultisol	1	Muy baja
Alfisol	2	Baja
Molisol, andisol, espodosol	3	Media
Ertisol, aridisol	4	Alta
Inceptisol, entisol, histosol	5	Muy Alta

c. Profundidad total

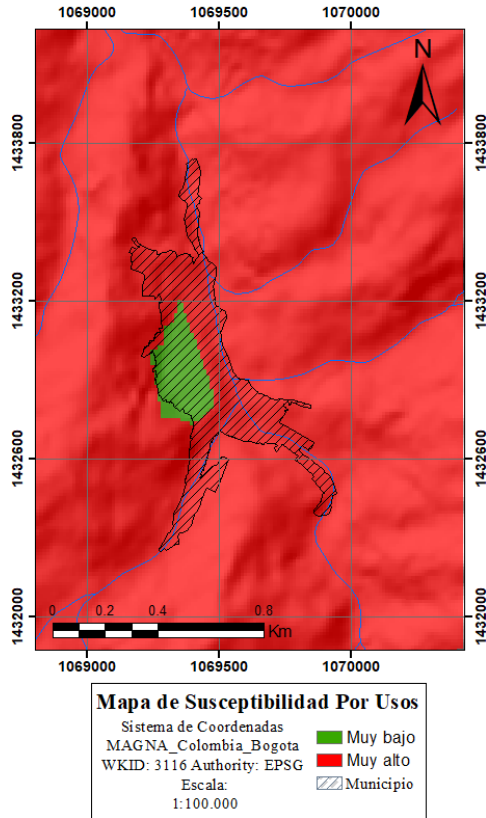
La profundidad total nos indica hasta donde pueden penetrar las raíces de las plantas, hasta donde puede moverse el agua y a que profundidad se encuentran las limitantes o impedimentos tanto de tipo físico como químico. Además, permite estimar los volúmenes de suelo que pueden ser removidos (SGC, 2013). La clasificación de la profundidad total se asignará teniendo en cuenta lo establecido en la Tabla 10.

Tabla 10. *Calificación de la profundidad total (SGC, 2013).*

Profundidad	Categoría	Calificación	Susceptibilidad
0 - 25	Muy baja o superficial	1	Muy baja
25 - 50	Baja o superficial	2	Baja
50 - 100	Media o moderadamente profunda	3	Media
100 - 150	Alta o profunda	4	Alta
Mayor a 150	Muy alta o muy profunda	5	Muy Alta

En la Figura 36 se muestra mediante un mapa, la influencia de los usos del suelo en la susceptibilidad por movimientos en masa de la zona de estudio.

Figura 36. *Mapa de suelos edáficos categorizado en términos de susceptibilidad como parámetro de entrada para el Análisis Jerárquico.*



8.4 Cobertura y uso de suelos.

La cobertura vegetal desempeña un papel crucial en los procesos erosivos, ya que reduce tanto la cantidad como la velocidad del agua en áreas de alta pendiente, disminuyendo así la escorrentía superficial (Linares, 2017). Para el presente estudio se empleó como insumo base el mapa de coberturas de la tierra, correspondiente a la adaptación del modelo “Corine Land Cover”, elaborado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, s.f.). En la Tabla 11 se presentan las calificaciones que serán asignadas a cada tipo de cobertura.

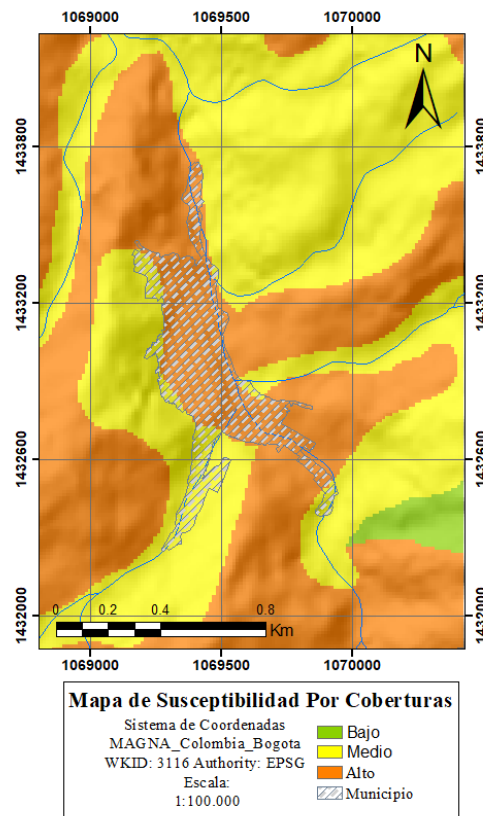
Tabla 11. *Calificación de coberturas (Linares, 2017).*

Cobertura/ Uso del suelo	Calificación	Susceptibilidad
Herbazal denso	2	Baja
Mosaico de pastos con espacios naturales	3	Media
Vegetación secundaria o en transición	3	Media

Tejido urbano discontinuo	4	Alta
Pastos limpios	4	Alta

En la Figura 37 se muestra mediante un mapa, la influencia de las coberturas en la susceptibilidad por movimientos en masa de la zona de estudio.

Figura 37. Mapa de coberturas categorizado en términos de susceptibilidad como parámetro de entrada para el Análisis Jerárquico.

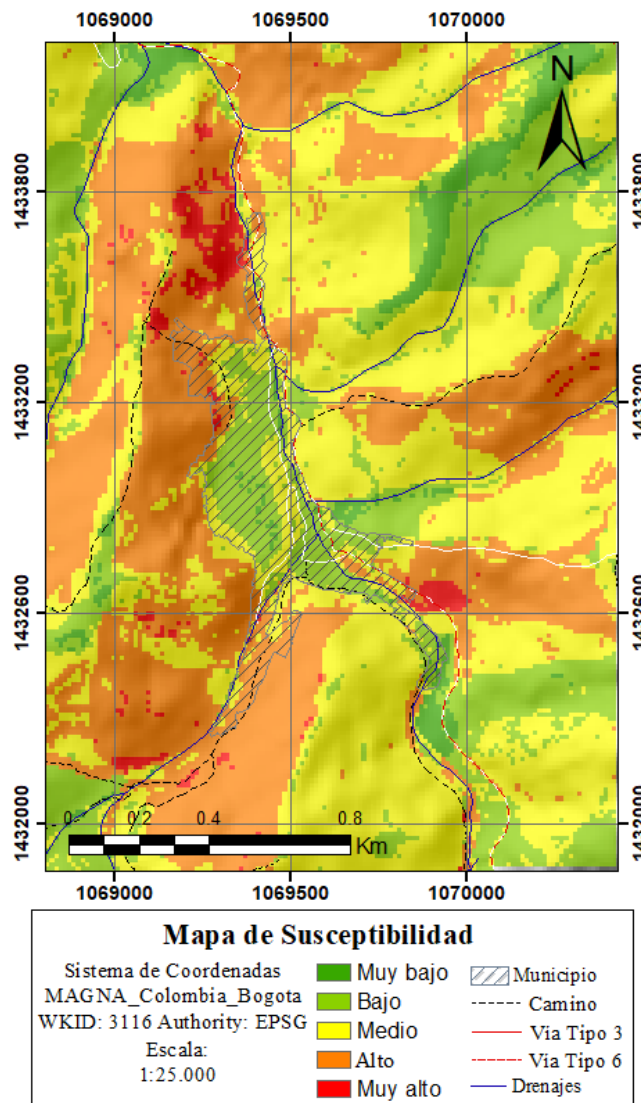


8.5 Mapa de Susceptibilidad por Movimientos en Masa

El mapa final de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000 (Figura 38) fue calculado aplicando el método de Análisis Jerárquico (AHP) donde se incluyeron 4 variables y atributos que fueron condiciones en respuesta a los eventos de inestabilidad

descritos en el área de estudio (Geomorfología, Unidades Geológicas Superficiales, Usos del suelo y Coberturas), y clasificados en 5 rangos: Muy Baja, Baja, Media, Alta y Muy Alta. Las categorías con mayor y menor influencia en el área respectivamente son: Susceptibilidad media y susceptibilidad muy baja.

Figura 38. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000 del área de estudio, reclasificado por intervalos geométricos en los rangos: Muy Bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy Alto.



8.5.1 Susceptibilidad Muy Baja

Esta categoría abarca el 3.72% del área de estudio, siendo la de menor extensión y se localiza principalmente en la zona noreste, la cual presenta altitudes entre 790 y 913 m.s.n.m. y pendientes que oscilan entre 0° y 19°, configurando un relieve suave.

Desde el punto de vista geomorfológico, esta categoría se caracteriza por el predominio de geoformas de tipo denudacional y fluvial, principalmente laderas denudativas (Dlcct), cimas denudativas (Dcmrt) y terrazas fluviales (Ftic). En términos de unidades geológicas superficiales (UGS), esta categoría comprende suelos residuales franco arcillosos, los cuales se superponen al sustrato geológico constituido por gneises cuarzo feldespáticos de la Formación Bucaramanga (pDb).

8.5.2 Susceptibilidad Baja

La categoría de susceptibilidad baja abarca el 19.26% del área de estudio y presenta una distribución espacial dispersa, concentrándose principalmente en las zonas noreste y sureste con altitudes superiores a 800 m.s.n.m., mientras que en menor proporción se extiende hacia el noroeste y la zona central, donde alcanza altitudes de hasta 600 m.s.n.m.

Desde el punto de vista geomorfológico, esta categoría se caracteriza por el predominio de geoformas de tipo denudacional, incluyendo laderas denudativas irregulares (Dlim, Dlic, Dlim), complejas (Dlcol, Dlcom) y cóncavas (Dlcct), así como geoformas antrópicas principalmente una planicie antrópica (Apic) donde se desarrolla el centro poblado caracterizado por viviendas contiguas y adosadas entre sí. Estas unidades geomorfológicas presentan pendientes que oscilan principalmente entre 11° y 40°, configurando un relieve inclinado a abrupto.

En términos litológicos, la susceptibilidad baja se asocia a rocas del basamento cristalino, constituidas por gneis cuarzo-feldespáticos, cuarcitas de la Formación Bucaramanga (pDb) y esquistos anfibólicos de la Formación Silgará (pDs). Estas unidades litológicas han desarrollado perfiles de meteorización que generan suelos residuales de textura franco-arcillosa y franca. Esta categoría también se desarrolla sobre suelos transportados de depósitos antrópicos (llenos mixtos).

Respecto al uso del suelo, corresponde a mosaicos de pastos con espacios naturales y vegetación secundaria o en transición, las cuales influyen en las condiciones de estabilidad del terreno.

8.5.3 Susceptibilidad Media

La categoría de susceptibilidad media abarca un 40.37% del área de estudio y presenta una distribución espacial amplia que cubre la mayor parte del territorio. Su distribución se expande principalmente en el sector central, abarcando una franja continua de norte a sur con prolongación hacia el este, desarrollándose en altitudes superiores a los 800-900 m.s.n.m.

Desde el punto de vista geomorfológico, esta categoría presenta diferentes tipos de geoformas según su ubicación espacial. En la zona noreste predominan las formas de tipo denudacional, incluyendo laderas denudativas irregulares (Dlict, Dlim), complejas (Dlcom), cóncavas (Dlcm, Dlxct) y convexas (Dlxl, Dlxm). Hacia la zona sur y suroeste dominan las geoformas de tipo estructural, representadas por laderas estructurales irregulares (Sleict, Sgflit, Ssleim, Sefli) y cóncavas (Slxm, Slecm), cimas estructurales (Scgfar) y facetas triangulares (Sft). Estas unidades geomorfológicas presentan pendientes que oscilan principalmente entre 19° y 40°, configurando un relieve abrupto.

En términos litológicos, esta categoría abarca principalmente rocas del basamento cristalino, constituidas por gneis cuarzo-feldespáticos, gneises anfibólicos y cuarcitas de la Formación Bucaramanga (pDb), así como anfibolitas de la Formación Silgará (pDs), las cuales han desarrollado suelos residuales de texturas franco, franco-arenoso y franco-arcilloso. En menor proporción incluye esquistos anfibólicos de la Formación Silgará (pDs) y rocas sedimentarias de la Unidad Arenosa de Tronadero (Da(?)), que presentan suelos residuales principalmente de textura franco-arcilloso, franco y franco-arenoso. Adicionalmente, abarca sectores con suelos transportados de depósitos antrópicos.

Respecto al uso del suelo, esta categoría se caracteriza por la presencia predominante de mosaicos de pastos con espacios naturales y vegetación secundaria o en transición.

8.5.4 Susceptibilidad Alta

La categoría de susceptibilidad alta abarca el 34.79% del área de estudio y presenta una distribución espacial dispersa, concentrándose principalmente en las zonas oeste con altitudes superiores a 700 y 800 m.s.n.m., mientras que en menor proporción se extiende hacia la zona central, donde alcanza altitudes superiores a 800 y 900 m.s.n.m. Se presenta con pendientes principalmente entre 19 y mayores a 40°.

Desde el punto de vista geomorfológico, esta categoría presenta una distribución espacial variable de geoformas, con predominio de unidades de tipo estructural en la mayoría de las zonas. Las geoformas más representativas corresponden a laderas estructurales irregulares (Slgfcoc, Sslecom, Sleim, Ssleim, Sefli, Slefic) y complejas (Slgfcom, Slgfc), mientras que en menor proporción se presentan laderas estructurales cóncavas (Slecm, Sftl) y convexas (Slexm), así como laderas denudativas irregulares (Dlim) y complejas (Dlcol, Dlcom). Adicionalmente, esta categoría se localiza en zonas donde se han identificado

deslizamientos traslacionales activos (Ddmya, Ddtma) y coronas de deslizamientos antiguos (Dft), lo cual confirma las condiciones de inestabilidad del terreno.

En términos litológicos, esta categoría está constituida principalmente por metalimolitas de la Formación Silgará (pDs) y anfibolitas de la Formación Bucaramanga (pDb), las cuales han desarrollado suelos residuales de textura franco, franco-arcilloso y franco-arcillo-limoso. En menor proporción incluye esquistos anfibólicos de la Formación Silgará (pDs) y rocas sedimentarias de la Formación Arenosa de Tronadero (Da(?)), que han generado suelos residuales de textura franco-arcilloso, franco y franco-arenoso. Adicionalmente, abarca sectores con suelos transportados correspondientes a depósitos de terraza aluvial y depósitos antrópicos.

Respecto al uso del suelo, la susceptibilidad alta se caracteriza por la presencia predominante de pastos limpios y tejido urbano discontinuo

8.5.5 Susceptibilidad Muy Alta

La categoría de susceptibilidad muy alta abarca el 1.96% del área de estudio y se localiza en zonas dispersas hacia el oeste y el sureste, desarrollándose en altitudes comprendidas entre 700 y 900 m.s.n.m., con pendientes que oscilan entre 19° y superiores a 40°, configurando un relieve abrupto a muy abrupto.

Morfológicamente, esta categoría se encuentra asociada tanto a geoformas denudacionales como estructurales. Las geoformas denudacionales incluyen laderas denudativas complejas (Dlcol), mientras que las geoformas estructurales comprenden laderas estructurales complejas (Slgfc com, Slgfc o ct, Sgflt) y cóncavas (Slgfc m). Adicionalmente, esta categoría se localiza en zonas donde se han identificado deslizamientos traslacionales activos

(Ddmya) y coronas de deslizamientos antiguos (Dft), mostrando la inestabilidad presente en el terreno.

En términos litológicos, esta categoría está constituida principalmente por depósitos cuaternarios coluviales (Qco) y rocas del basamento cristalino representadas por metalimolitas y esquistos anfibólicos de la Formación Silgará (pDs). Los depósitos cuaternarios incluyen depósitos gravo-arenosos de origen coluvial y depósitos antrópicos, mientras que los suelos residuales desarrollados sobre el basamento rocoso presentan principalmente texturas franco-arcillosas y francas. Esta variabilidad en los materiales superficiales contribuye a las condiciones de inestabilidad que caracterizan esta categoría.

Respecto al uso del suelo, la susceptibilidad alta se caracteriza por la presencia predominante de pastos limpios y tejido urbano discontinuo

8.5.6 Validación del mapa de susceptibilidad mediante el inventario de Movimientos en Masa

El inventario cuenta con doce (12) movimientos en masa (Tabla 12): Seis (6) reportados por la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo (UNGR), uno (1) por la Dirección de Gestión del Riesgo (DGR) y cinco (5) identificados mediante Google Earth Pro (Figura 39). En su mayoría se reconocieron movimientos de tipo deslizamiento traslacional y se identificaron reptaciones de áreas considerables. Esta información se empleó como una herramienta de verificación para los resultados obtenidos en el mapa de susceptibilidad, bajo la premisa de que las zonas donde han ocurrido deslizamientos deberían presentar un nivel de riesgo medio a alto. No obstante, estos datos no serán incorporados directamente en el

modelo, debido a la ausencia de coordenadas precisas y a la baja exactitud espacial de varios de ellos.

Figura 39. Mapa de localización de los movimientos en masa del área de estudio.

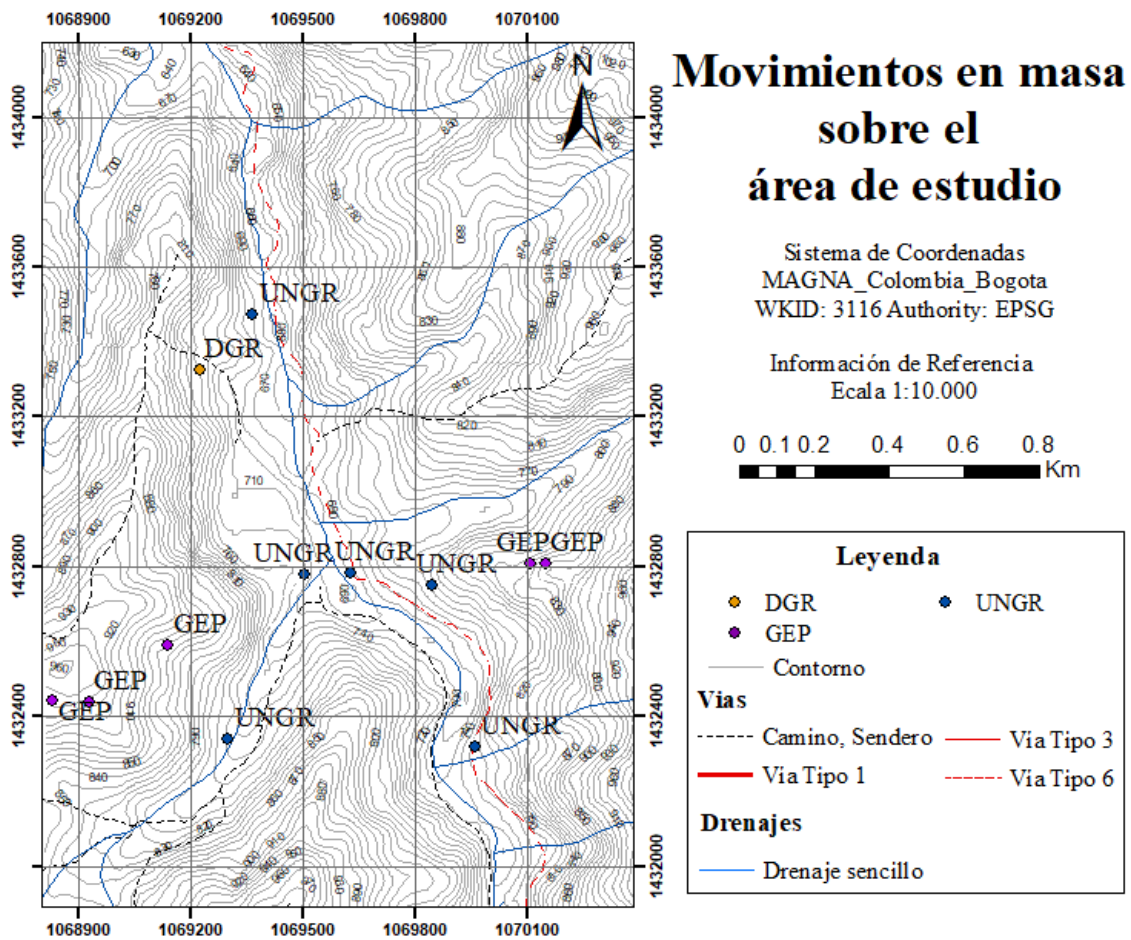


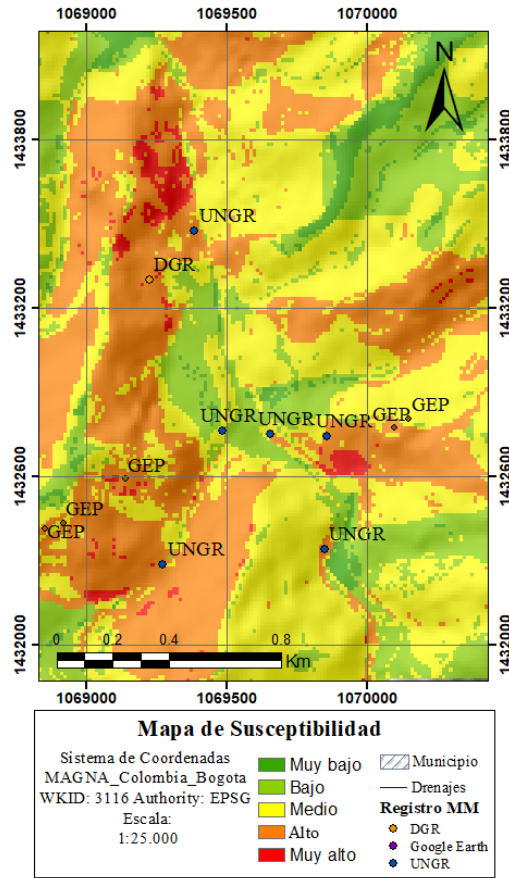
Tabla 12. Inventario de movimientos en masa identificados en la zona de estudio.

Punto	Tipo	Fuente	Ubicación	Año
1	Deslizamiento traslacional	UNGR	Barrio el Líbano	2010
2	Deslizamiento traslacional	UNGR	Barrio El Puente	2010

3	Deslizamiento traslacional	UNGR	Barrio El Tigre	2010
4	Deslizamiento traslacional	Google Earth Pro	Vereda La Cuesta	2018
5	Deslizamiento traslacional	Google Earth Pro	Vereda La Cuesta	2018
6	Deslizamiento traslacional	Google Earth Pro	Vereda La Cuesta	2018
7	Deslizamiento traslacional	Google Earth Pro	Vereda Santo Domingo	2018
8	Deslizamiento traslacional	Google Earth Pro	Vereda Santo Domingo	2018
9	Deslizamiento traslacional	DGR	Barrio Filo de la Virgen	2020
10	Deslizamiento traslacional	UNGR	Vía El Carmen- Ocaña	2022
11	Deslizamiento traslacional	UNGR	Vía El Carmen- Ocaña	2022
12	Deslizamiento traslacional	UNGR	Barrio San Luis	2025

En la Figura 40 se observa la validación del mapa de susceptibilidad por movimientos en masa mediante el inventario histórico, la cual muestra una buena correlación entre las zonas identificadas y los eventos reales. Del total de 12 movimientos en masa registrados en la Tabla 12, 10 eventos (83.3%) se localizan en zonas de susceptibilidad alta y 2 eventos (16.7%) en zona de susceptibilidad media, lo que sugiere la precisión del método aplicado.

Figura 40. *Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa donde se ubican los movimientos en masa del inventario obtenido.*



9 Conclusiones

El análisis geomorfológico permitió establecer que el área de estudio está dominada principalmente por ambientes estructurales (47,5 %) y denudativos (42,5 %). Asimismo, las unidades geológicas superficiales corresponden en su mayoría a suelos residuales (85,75 %) desarrollados sobre las formaciones Bucaramanga y Silgará, con texturas predominantemente francas a franco-arcillosas.

A partir de la evaluación de las variables consideradas, se determinó que la geomorfología y las unidades geológicas superficiales son los factores con mayor incidencia en la ocurrencia de movimientos en masa. En contraste, la variable de usos y coberturas del

suelo no mostró una influencia significativa en el comportamiento de estos fenómenos para el área analizada.

El mapa de susceptibilidad generado permitió clasificar la zona de estudio en cinco categorías: Muy Baja, Baja, Media, Alta y Muy Alta, evidenciando que más del 50 % del casco urbano del municipio de El Carmen se encuentra caracterizado por niveles de susceptibilidad Media (40.37%) y Alta (34.69%) a movimientos en masa, los cuales se asocian principalmente a la presencia de geformas estructurales, suelos residuales desarrollados sobre las formaciones Bucaramanga y Silgará, y a la influencia de depósitos coluviales, antrópicos y deslizamientos traslacionales. En contraste, las áreas clasificadas con susceptibilidad Muy Baja y Baja se relacionan con relieves suaves, pendientes reducidas y suelos de textura franco-arcillosa y franca, concentrándose principalmente en el centro urbano y en los sectores nororientales del municipio.

Finalmente, se obtuvo que la mayoría de los movimientos en masa del inventario se encuentran en zonas con una susceptibilidad Alta o Muy Alta, esto confirma la coherencia de la metodología aplicada y los resultados obtenidos.

10 Recomendaciones

Con el fin de mejorar la utilidad y la precisión del mapa de susceptibilidad generado, se recomienda realizar una cartografía más detallada de mapas de usos del suelo, coberturas vegetales y suelos edáficos, ya que esto permitiría caracterizar mejor las propiedades mecánicas del terreno. De igual forma, resulta indispensable contar con un registro histórico de movimientos en masa más detallado que incluya coordenadas específicas, fecha de ocurrencia, localización, forma, dimensiones, los factores que intervinieron o intervienen en su ocurrencia, el mecanismo que conduce a la falla del terreno, los factores detonantes, la dinámica del movimiento, la magnitud e intensidad. Este registro robusto permitiría incluir dichos datos en los modelos de susceptibilidad futuros y proporcionaría mayor precisión en la identificación de zonas con mayor susceptibilidad.

Una vez se obtengan insumos con mayor nivel de detalle y se disponga de un registro histórico más completo y detallado de movimientos en masa en la zona de estudio, se recomienda complementar los resultados obtenidos mediante el método de Análisis Jerárquico con la aplicación de otros métodos, con el fin de realizar una comparación entre ellos y determinar cuál presenta mayor precisión y utilidad para la evaluación de la susceptibilidad. Entre estos se destaca el método de Pesos de Evidencia (Weight of Evidence, WofE), el cual presenta ventajas significativas en términos de precisión y objetividad. Este método estadístico-probabilístico evalúa patrones de asociación entre los factores condicionantes y las áreas inestables mediante pesos calculados con un enfoque bayesiano, eliminando la subjetividad inherente en la asignación de pesos de los métodos semicuantitativos como el AHP. Su aplicación resulta particularmente valiosa porque evalúa de manera objetiva la relación entre factores condicionantes y movimientos en masa con

bases estadísticas sólidas, garantiza mayor replicabilidad y control del proceso de zonificación, permite el control de la capacidad de predicción del modelo, y ofrece la posibilidad de calcular probabilidades posteriores mediante la suma de pesos en una función aditiva (SGC, 2017).

Finalmente, es importante implementar un sistema de monitoreo hidrometeorológico en la zona mediante la instalación de estaciones climáticas, ya que actualmente no se cuenta con registros de precipitación disponibles en el IDEAM para esta área. Esta limitación impide la elaboración de mapas de amenaza por lluvias, siendo la precipitación uno de los principales factores detonantes de movimientos en masa registrados en la región. La disponibilidad de estos datos pluviométricos permitiría no solo mejorar los modelos de susceptibilidad futuros, sino también desarrollar sistemas de alerta temprana más efectivos basados en umbrales de precipitación críticos.

Referencias Bibliográficas

Alaska Satellite Facility. (s.f.). Alaska Satellite Facility. Tomado de: <https://asf.alaska.edu/>

Alcaldía de El Carmen - Norte de Santander. (s.f.). *Información del Municipio*. Tomado de: <https://www.elcarmen-nortedesantander.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>

Brabb E.E. , Hrod B.L. (1989). *Landslides: Extent and economic significance*: Proc., 28th International Geological Congress: Symposium on landslides, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, (pp.385). Recuperado el 16 de Junio de 2025, de <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:clkT8kloBQJ:www.erosion.com.co/presentaciones/category/14-libro-deslizamientos-y-estabilidad-detalludes-enzonastropicales-jaime-suarez.html%Fdownload%3D137:184-1-caracterizaciondelosmovimientos1+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=co>.

Decorte B., R., & Salinas E., R. (1980). *Geología de las planchas 66 Miraflores y 76 Ocaña, escala 1:100.000: Memoria explicativa* (pp. 66, 76). Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS).

Feizizadeh, B., Jankowski, P., & Blaschke, T. (2013). *A spatially explicit approach for sensitivity and uncertainty analysis of GIS-multicriteria landslide susceptibility mapping*. En T. Jekel, A. Car, J. Strobl, & G. Griesebner (Eds.), *GI_Forum 2013: Creating the GISociety* (pp. 157-164). Herbert Wichmann Verlag, VDE Verlag GmbH. Tomado de: <https://doi.org/10.1553/giscience2013s157>

Flórez, A. (2003). *Colombia: Evolución de sus relieves y modelados*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Girty, G. H. (2009). Chapter 8, *Landslides. Understanding Processes Behind Natural Disasters*. San Diego State University: Department of Geological Sciences (pp. 1-17). Recuperado el 16 de Junio de 2025, de <http://www.sci.sdsu.edu/visualgeology/naturaldisasters/Chapters/Chapter8Landslides.pdf>

Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *The Landslide Handbook—A Guide to Understanding Landslides*. Reston, Virginia, CO: U.S. Geological Survey (USGS) National Landslide Information Center (NLIC). Tomado de: <https://doi.org/10.3133/cir1325>

IDEAM. (2024). *Colombia potencia de la vida: Pronóstico de la amenaza por deslizamientos de tierra* (Boletín No. 181; Actualización: 29 de junio de 2024). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (s.f.). *Colombia en Mapas*. Tomado de: <https://www.colombiaenmapas.gov.co>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (s.f.). *Datos abiertos - Agrología*. Tomado de: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>

Kayastha, P., Dhital, M. R., & De Smedt, F. (2013). *Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal*. *Computers & Geosciences*, 52, 398–408. Tomado de: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.11.003>

Naranjo Henao, J. & Et. Al. (2013). *Memoria técnica explicativa del mapa geomorfológico analítico aplicado a la zonificación de amenazas por movimientos en masa escala 1:100.000, plancha 066 – El Tarra, departamento Norte de Santander*. Convenio especial de cooperación No. 021 de 2013. Manizales: Servicio Geológico Colombiano.

Padilla, J. et al., 2004. *Propuesta Metodológica para el Desarrollo de la Cartografía Geológica para Ingeniería*. Informe INGEOMINAS. Bogotá.

Reyes Merchán, A., & Moya, H. (2010). *Informe de la visita técnica de emergencia efectuada en el municipio de El Carmen, departamento de Norte de Santander*. Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS).

Rodríguez Castiblanco, E. A., Sandoval Ramírez, J. H. (Q.E.P.D.), Chaparro Cordón, J. L., Trejos González, G. A., Medina Bello, E., Ramírez Hernández, K. C., Castro Marín, E., Castro Guerra, J. A., & Ruiz Peña, G. L. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000: Dirección de Geoamenazas, Grupo de Evaluación de Amenaza por Movimientos en Masa*. Bogotá, Colombia: Servicio Geológico Colombiano.

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*. Bogotá, Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi; Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Servicio Geológico Colombiano. (1980). *Plancha geológica No. 76 - Ocaña*. Escala 1:100.000. Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS).

Servicio Geológico Colombiano. (2013). *Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000* (Versión No. 2). Ministerio de Minas y Energía.

Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa a escala 1:100.000* [Servicio web de mapas].

Servicio Geológico Colombiano. (s.f.). *Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA)*. Tomado de: <https://simma.sgc.gov.co/#/public/basic/>

Struth, L., Babault, J., & Teixell, A. (2015). *Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes*. *Geomorphology*, 250, 370-383. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.09.012>

Syam, M. A., et al. (2019). Mapping of Landslide Susceptibility Using Analytical Hierarchy Process in Sukamaju Area, Tenggara Seberang Regency of Kutai Kartanegara. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 279(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/279/1/012002>

Tareq H. Mezughi, Juhari Mat Akhir, Abdul Ghani Rafek and Ibrahim Abdullah, 2012. Analytical Hierarchy Process Method for Mapping Landslide Susceptibility to an Area along the E-W Highway (Gerik-Jeli), Malaysia. *Asian Journal of Earth Sciences*, 5: 13-24. <https://scialert.net/abstract/?doi=ajes.2012.13.24>

United States Geological Survey, (2004). *Landslide types and processes*. U.S. Department of the Interior – U.S. Geological Survey. Tomado de: <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/>

Velandia Patiño, Francisco Alberto (2017) *Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander - énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga*. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.

Equipo Consultor, Archivo Municipal, IGAC, & DANE. (2023). *Mapa de amenaza por movimientos en masa – Mapa 06a/22* [Mapa]. En *FG - Incorporación Gestión del Riesgo - Movimientos en Masa*. Dibujado por Esp. Ing. Carlos H. Oviedo.

Matula, M. 1981. Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. Boletín No. 24 IAEG, p 235-274.

Municipio de El Carmen. (2023). *Revisión general, actualización y ajuste del EOT del municipio de El Carmen, Norte de Santander*. Alcaldía Municipal de El Carmen.

Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill International.

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.

Soeters, R. & van Westen, C. J. (1996). *Slope instability recognition, analysis and zonation*. En Turner & Schuster (Eds.), *Landslide: Investigations and Mitigation* (Transportation Research Board, SR 247), pp. 129-177.

van Westen, C. J. (1993). *Application of geographic information systems to landslide hazard zonation*. Tesis de PhD, Delft University of Technology.

IGAC, & SINA. (2001). *Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en masa (escala 1:500 000)*.

Sánchez Ospina, S. H. (2024). *Análisis de susceptibilidad por movimientos en masa como insumo para la implementación de mallas retenedoras de caudal sólido*. Universidad Nacional de Colombia.

Domínguez Ávila, H. C. (2024). *Análisis de susceptibilidad de movimiento en masa con la implementación de la metodología AHP para un deslizamiento en el sector de Renault minuto – Manizales*. Universidad de Caldas.

Carvajal P., J. H. (2012). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano. Colección Guías y Manuales.

Tomado de: <https://doi.org/10.32685/9789589952825>

Apéndices

*Apéndice A. Tabla de las unidades presentes en el mapa morfo genético a escala**1:10.000 del área de estudio, con su respectiva calificación.*

Símbolo	Nombre	Área_(km2)	% Área	Calificación
Fc	Cauce fluvial	0.058	1.490	1
Dccrt	Cima denudativa corta redondeada	0.016	0.407	1
Dcmrt	Cima denudativa moderada redondeada	0.064	1.662	1
Scgfar	Cima estructural de gancho de flexión alargada redondeada	0.077	1.990	2
Dft	Corona de deslizamiento antiguo	0.088	2.292	5
Ddtma	Deslizamiento traslacional menor activo	0.007	0.178	5
Ddmya	Deslizamiento mayor activo	0.007	0.181	5
Sefli	Espolón facetado irregular	0.359	9.301	4
Sft	Faceta triangular	0.059	1.529	4
Dlcoct	Ladera denudativa compleja corta	0.085	2.208	4
Dlcol	Ladera denudativa compleja larga	0.120	3.119	4
Dlcom	Ladera denudativa compleja moderada	0.225	5.839	4
Dlcct	Ladera denudativa cóncava corta	0.096	2.494	3
Dlcl	Ladera denudativa cóncava larga	0.028	0.721	3
Dlcm	Ladera denudativa cóncava moderada	0.022	0.581	3
Dlxct	Ladera denudativa convexa corta	0.022	0.558	2
Dlxl	Ladera denudativa convexa larga	0.159	4.129	2
Dlxm	Ladera denudativa convexa moderada	0.070	1.802	2
Dlim	Ladera denudativa irregular moderada	0.376	9.767	4
Dlict	Ladera denudativa irregular corta	0.057	1.472	4
Dlrct	Ladera denudativa recta corta	0.037	0.966	3
Slecm	Ladera estructural cóncava moderada	0.144	3.720	3
Slexct	Ladera estructural convexa corta	0.154	3.984	2
Slexm	Ladera estructural convexa moderada	0.146	3.789	2
Slefic	Ladera estructural de espolón facetado irregular corta	0.032	0.820	4
Slgfcom	Ladera estructural de gancho de flexión compleja moderada	0.103	2.659	5
Slgfcoct	Ladera estructural de gancho de flexión compleja corta	0.147	3.820	5
Slgfcm	Ladera estructural de gancho de flexión cóncava moderada	0.041	1.072	4
Slgfict	Ladera estructural de gancho de flexión irregular corta	0.225	5.842	4
Sgflct	Ladera estructural de gancho de flexión irregular moderada	0.027	0.702	4
Sslecom	Ladera estructural de sierra compleja moderada	0.188	4.868	5
Ssleim	Ladera estructural de sierra irregular moderada	0.125	3.259	4
Ssleict	Ladera estructural de sierra irregular corta	0.030	0.788	4
Ssleil	Ladera estructural de sierra irregular larga	0.146	3.789	4
Sleict	Ladera estructural irregular corta	0.013	0.327	4

Sleim	Ladera estructural irregular moderada	0.052	1.360	4
Slerct	Ladera estructural recta corta	0.049	1.258	4
Apic	Planicie antrópica irregular corta	0.132	3.420	2
Ftc	Terraza fluvial corta	0.022	0.573	2
Ftic	Terraza fluvial irregular corta	0.049	1.258	2

Apéndice B. Tabla de las unidades presentes en el mapa de UGS a escala 1:10.000 del área de estudio, con su respectiva calificación.

Símbolo	UGS	Calificación	%Área
Stdallm	Transportado de depósitos antrópicos llenos mixtos	4	7.399
Stgad	Transportado gravo-arenoso de depósito coluvial	5	0.445
Stargdt	Transportado arenoso con gravilla depósito terraza	5	0.237
Stfadc	Transportado franco arcilloso de depósito coluvial	5	0.053
Stargda	Transportado arenoso con gravilla de depósito aluvial	5	0.015
Stfgdc	Transportado franco con gravas de depósito coluvial	5	0.377
Stmdta	Transportado mixto de depósito de terraza aluvial	5	0.571
Stfarc	Transportado franco arenoso de depósito coluvial	5	0.463
Srfagcfb	Residual franco arcilloso de gneis/cuarcita de la Fm Bucaramanga	3	4.931
Srfecfb	Residual franco de esquisto y cuarcita de la Fm Bucaramanga	2	2.805
Riefb	Roca intermedia de Esquistos de la Fm Bucaramanga	1	2.380
Srfamfs	Residual franco arcilloso de Fm Silgará-Metalimolitas	3	6.327
Srfafb	Residual Franco arcilloso de anfibolita de la Fm Bucaramanga	2	8.236
Srfaarat	Residual franco arcillo arenoso de Areniscas de Tronadero	4	0.092
Srfcfbat	Residual franco de cuarcita-Fm Bucaramanga y areniscas de Tronadero	3	5.022
Srffbat	Residual Franco de cuarcita, gneis de la Fm Bucaramanga y areniscas de Tronadero	3	3.160
Srfaracfb	Residual franco areno arcilloso de cuarcita-Fm Bucaramanga	3	0.866
Srfart	Residual Franco de arenisca de Tronadero	3	0.582
Srffmsat	Residual Franco de metalimolita- Fm Silgará y areniscas de Tronadero	3	3.479
Srfagfb	Residual franco arcilloso de gneis- Fm Bucaramanga	2	6.834
Srfaefb	Residual franco arcilloso de Esquisto- Fm Bucaramanga	3	4.706
Srfmfs	Residual franco de metalimolitas- Fm Silgará	3	12.305

Srfalafb	Residual franco arcillo limoso de anfibolita- Fm Bucaramanga	3	4.858
Srfatcfb	Residual franco de areniscas de Tronadero y cuarcita- Fm Bucaramanga	3	0.253
Stfaacfb	Transportado franco arcilloso de depósito coluvial	4	0.680
Srfcgfb	Residual franco de cuarcita y gneis de la Fm Bucaramanga	2	12.347
Srfarat	Residual Franco arenoso de arenisca de Tronadero	3	2.378
Stfadc	Transportado Franco arcilloso de depósito Coluvial	5	0.496
Srfata	Residual franco arcilloso de anfibolita- Fm Bucaramanga	3	0.373
Srfacfb	Residual franco de cuarcita Fm Bucaramanga	4	1.500
Stact	Transportado areno arcilloso de depósito de Terraza	5	0.539
Srfcfb	Residual franco arenoso de Cuarcita- Fm Bucaramanga	2	4.533
Srfceafb	Residual franco de Esquistos y Anfibolita de la Fm Bucaramanga	2	0.169
Stfdc	Transportado franco de depósito coluvial	5	0.104
Rdmfs	Roca dura metalimolita de la Fm Silgará	1	0.466
Rdgfb	Roca dura de Gneis de la Fm Bucaramanga	1	0.018

Apéndice C. Tabla de las unidades presentes en el mapa de UGS con su respectiva descripción.

Símbolo	UGS	Descripción
Stdallm	Transportado de depósitos antrópicos llenos mixtos	Depósito transportado de origen antrópico, matriz soportada, de color pardo oscuro a gris, compuesto por una mezcla heterogénea de gravas, arenas, limos y fragmentos artificiales. Presenta una estructura caótica sin estratificación, pobremente seleccionado y alta meteorización
Stgad	Transportado Gravas arenosas de depósito coluvial	Deposito clasto soportado, de color verde oscuro por alta meteorización, compuesto por fragmentos de roca de tamaño gravas gruesas a cantos, con formas angulares de baja esfericidad, embebidos en una matriz gravo-arenosa, el depósito se encuentra seco, sin gradación, con densidad suelta, compacidad moderada y pobremente seleccionada
Stargdt	Transportado arenoso con gravilla depósito terraza	Depósito transportado de terraza fluvial, matriz soportada, color pardo claro a beige, con arenas medias a gruesas y gravilla subredondeada. Se encuentra húmedo, moderadamente seleccionado, sin estructuras relictas y con baja meteorización
Stfadc	Transportado franco arcilloso de depósito coluvial	Depósito coluvial matriz soportada, de color pardo rojizo, compuesto por material fino con clastos dispersos. Se encuentra pobremente seleccionado, con meteorización alta y ligeramente húmedo.

Stargda	Transportado Arenoso con gravilla de depósito aluvial	Depósito aluvial matriz soportada, de color pardo claro, compuesto por arenas finas a medias con gravilla subredondeada en estado seco. Presenta densidad suelta, compacidad media y se encuentra moderadamente seleccionado.
Stfgdc	Transportado franco con gravas de depósito coluvial	Depósito coluvial matriz soportado, de color pardo amarillento, compuesto por gravas angulares a subangulares embebidas en matriz arenosa. Se encuentra en estado seco, pobremente seleccionado y sin gradación visible
Stmdta	Transportado mixto de depósito de terraza aluvial	Depósito matriz-soportado, conformado por fragmentos de roca que varían entre 3 y 15 cm de diámetro, con formas subangulares a subredondeadas y baja esfericidad, inmersos en una matriz pardo amarillenta compuesta por arena de granulometría media a gruesa. El material presenta condición húmeda y evidencia una estratificación incipiente a lo largo del depósito
Stfardc	Transportado franco arenoso de depósito coluvial	Depósito coluvial matriz soportado, de color pardo amarillento
Srfagcfb	Residual Franco arcilloso de gneis/cuarcita de la Fm Bucaramanga	Presenta un color marrón oscuro y textura franco-arcillosa sin estructuras visibles. El material exhibe una estructura fino-granular cohesiva con ligera plasticidad, alta consistencia y moderada meteorización, encontrándose en estado seco.
Srfecfb	Residual franco de esquisto y cuarcita de la Fm Bucaramanga	Suelo residual de esquistos y cuarcitas, color pardo claro, textura franco-limosa. Presenta una cohesión moderada, plasticidad baja a media, meteorización alta y humedad baja.
Riefb	Roca intermedia de Esquistos de la Fm Bucaramanga	Material rocoso altamente meteorizado de color gris verdoso, con estructura esquistosa. Presenta baja porosidad, sin plasticidad, alta resistencia y estado seco.
Srfamfs	Residual franco arcilloso de Fm Silgará-Metalimolitas	Presenta un color marrón oscuro y textura franco-arcillosa sin estructuras visibles. El material exhibe una textura fino-granular con baja plasticidad, de consistencia media y alta meteorización, encontrándose en estado húmedo.
Srfafb	Residual Franco arcilloso de anfibolita de la Fm Bucaramanga	Presenta un color rojizo oscuro y textura franco-arcillosa con algunas grietas superficiales. El material exhibe una estructura fino-granular con nula a ligera plasticidad, alta consistencia y meteorización baja, encontrándose en estado seco.
Srfaarat	Residual franco arcillo arenoso de Areniscas de Tronadero	Presenta un color amarillo claro y una textura franco arcillo-arenosa. El material exhibe una estructura grueso granular, plasticidad baja, alta meteorización y humedad baja.
Srfcfbat	Residual franco de cuarcita-Fm Bucaramanga y areniscas de Tronadero	Presenta un color amarillo y textura franco-arenosa sin estructuras visibles. El material exhibe una estructura grueso-granular no cohesiva con baja plasticidad y meteorización alta encontrándose en estado seco
Srffbat	Residual Franco de cuarcita, gneis de la Fm Bucaramanga y areniscas de Tronadero	Presenta un color pardo amarillento y textura franca. El material exhibe una textura grueso granular, plasticidad baja, meteorización moderada y humedad baja.

Srfaracfb	Residual franco arenoso arcilloso de cuarcita-Fm Bucaramanga	Presenta un color amarillo pálido y textura franco arenoso-arcillosa. El material exhibe una estructura fino granular, plasticidad baja a media, meteorización alta y estado seco.
Srfart	Residual Franco de arenisca de Tronadero	Presenta un color pardo claro y textura franco-arenosa. El material exhibe una estructura grueso granular, plasticidad baja y alta meteorización.
Srfmfsat	Residual Franco de metalimolita- Fm Silgará y areniscas de Tronadero	Presenta un color pardo rojizo y textura franca. El material exhibe una estructura fino granular, plasticidad media, meteorización alta y humedad baja.
Srfagfb	Residual franco arcilloso de gneis-Fm Bucaramanga	El perfil del suelo presenta dos horizontes bien diferenciados. En la parte superior se observa el horizonte VI, correspondiente a un suelo residual de color rojizo claro, textura franco arcillosa y estructura fino-granular. Este horizonte se encuentra húmedo, con alta consistencia, plasticidad moderada y baja meteorización. Hacia la base, se identifica el horizonte V, correspondiente a un saprolito fino, donde se evidencia un aumento en la cantidad de fragmentos angulosos de roca, derivados del material parental. La textura se torna más gruesa, indicando un menor grado de evolución del suelo
Srfaefb	Residual franco arcilloso de Esquisto- Fm Bucaramanga	Presenta un color marron oscuro y textura franco-arcillosa. El material exhibe una textura fino granular, plasticidad media a alta, alta consistencia, en estado seco y con moderada meteorización.
Srfmfs	Residual franco de metalimolitas- Fm Silgará	Presenta un color marrón claro y textura franca sin estructuras visibles. El material exhibe una textura grueso-granular no cohesiva con nula plasticidad y alta meteorización, encontrándose en estado seco
Srfalafb	Residual franco arcillo limoso de anfibolita- Fm Bucaramanga	Suelo residual de color pardo oscuro y textura franco arcillo-limosa. Exhibe una textura finogranular, plasticidad media, consistencia media, humedad baja y moderada meteorización.
Srfatcfb	Residual franco de areniscas de Tronadero y cuarcita- Fm Bucaramanga	Presenta un color amarillo claro y textura franca. Exhibe una estructura gruesogranular, nula plasticidad, en estado seco y con alta meteorización.
Stfaacfb	Transportado franco arcilloso de depósito coluvial	Depósito coluvial matriz soportado, color pardo oscuro, matriz con textura franco-arcillosa. Se encuentra mal seleccionado, seco, sin gradación y compacidad moderada.
Srfcgfb	Residual franco de cuarcita y gneis de la Fm Bucaramanga	Presenta un color pardo rojizo a amarillento y textura franca sin estructuras visibles. El material exhibe una estructura grueso-granular no cohesiva con baja plasticidad y moderada meteorización, encontrándose en estado seco
Srfarat	Residual Franco arenoso de arenisca de Tronadero	Presenta un color pardo amarillo y textura franco-arenosa sin estructuras visibles. El material exhibe una textura grueso-granular no cohesiva con nula plasticidad y meteorización alta encontrándose en estado seco
Stfadc	Transportado Franco arcilloso de depósito Coluvial	Depósito coluvial matriz soportado, color pardo oscuro, matriz con textura franco-arcillosa. Se encuentra mal seleccionado, seco, sin gradación y compacidad moderada.

Srfata	Residual franco arcilloso de anfibolita- Fm Bucaramanga	Suelo residual de color pardo rojizo, textura franco-arcillosa. Exhibe una textura finogranular, plasticidad media, estructura masiva y meteorización alta.
Srfacfb	Residual franco de cuarcita Fm Bucaramanga	Presenta un color pardo claro a amarillento, con textura franca. Exhibe una textura grueso granular, sin estructuras relictas visibles, material de plasticidad baja. Se encuentra altamente meteorizado, con compacidad moderada y en estado seco.
Stact	Transportado areno arcilloso de depósito de Terraza	Depósito matriz soportado, de color marrón claro, compuesto por arenas finas a medias con fracción arcillosa. Moderadamente seleccionado, con compacidad media, meteorización media y humedad baja.
Srfcfb	Residual franco arenoso de Cuarcita- Fm Bucaramanga	Presenta un color amarillo pálido y textura franco-arenosa. Exhibe un atextura grueso granular, plasticidad baja a nula y alta meteorización. Se encuentra en estado seco, con compacidad media y sin estructuras relictas visibles.
Srfceafb	Residual franco de Esquistos y Anfibolita de la Fm Bucaramanga	Presenta un color pardo oscuro a rojizo, con textura franca. Exhibe una estructura finogranular, con relictos de foliación poco definidos, plasticidad media y alta meteorización. El material se encuentra seco, con compacidad moderada.
Stfdc	Transportado franco de depósito coluvial	Depósito coluvial matriz soportado, de color pardo amarillento, compuesto por material fino con fragmentos líticos dispersos. Se encuentra pobremente seleccionado, con cohesión moderada, compacidad moderada, meteorización alta y en estado seco.
Rdmfs	Roca dura metalimolita de la Fm Silgará	Roca de color gris oscuro, de estructura masiva y grano muy fino, con alto grado de meteorización y fracturamiento.
Rdgfb	Roca dura de Gneis de la Fm Bucaramanga	Roca metamórfica de color gris oscuro, con estructura gnéisica y tamaño de grano medio a fino. Presenta venas de cuarzo de aproximadamente 1 cm de espesor y se clasifica como gneis anfibólico. Exhibe un grado medio de meteorización y un alto nivel de fracturamiento.

Apéndice D. Tabla de las unidades presentes en el mapa geomorfológico con su respectiva descripción

Símbolo	Nombre	Descripción
Fc	Cauce fluvial	Corresponde a un cauce activo de origen fluvial, asociado al tránsito permanente o estacional de agua, presenta bajo contraste de relieve respecto a las superficies adyacentes y se integra al sistema de drenaje local.
Dccrt	Cima denudativa corta redondeada	Geoforma positiva de extensión corta, con un largo de 130,44m y ancho de 175m, con pendientes suavemente inclinadas, con procesos de movimientos en masa traslacional y terracetos, mostrando bajo contraste de relieve
Dcmrt	Cima denudativa moderada redondeada	Geoforma de extensión moderada con un largo de 421,1m y ancho de 52m. Presenta pendientes inclinadas a escarpadas y contraste de relieve moderado

Scgfar	Cima estructural de gancho de flexión alargada redondeada	cima estructural asociada a un gancho de flexión, de morfología alargada y contornos redondeados, con una longitud aprox de 421,1 m y un ancho de 52 m. Presenta una geometría suavemente convexa, producto del control estructural y de la acción de procesos denudativos
Dft	Corona de deslizamiento antiguo	Superficie asociada a la corona de un movimiento en masa antiguo, con un largo de 588,22 m y un ancho de 301 m; presenta pendientes planas a escarpadas y alto contraste de relieve, con desarrollo de terracetas y patas de vaca,
Ddtma	Deslizamiento traslacional menor activo	Deslizamiento traslacional menor activo, con una superficie de ruptura plana, el cuerpo del deslizamiento está conformado por suelo residual y la zona de acumulación se encuentra poco definida en el pie del talud.
Ddmya	Deslizamiento mayor activo	Deslizamiento traslacional mayor activo con una superficie de ruptura plana a lo largo de la cual se moviliza una masa de suelo residual. El cuerpo del deslizamiento presenta deformación y grietas; y la zona de acumulación se encuentra poco definida
Sefli	Espolón facetado irregular	Geoforma positiva claramente individualizada que se proyecta desde la ladera principal entre dos drenajes, con morfología alargada y contornos irregulares, caracterizada por superficies parcialmente facetadas generadas por erosión diferencial. Presenta pendientes inclinadas a abruptas y un contraste de relieve moderado. La cobertura vegetal es heterogénea, con presencia de potreros que favorecen la escorrentía superficial concentrada y procesos denudativos de baja a moderada intensidad
Sft	Faceta triangular	Geoforma de origen estructural que corresponde a una superficie inclinada de geometría triangular, cuya morfología ha sido modificada por procesos denudativos, los cuales suavizan los escarpes y generan irregularidades en la pendiente, la cual varía de inclinada a abrupta con un contraste de relieve moderado.
Dlcoct	Ladera denudativa compleja corta	Ladera de ambiente denudativo con un largo aproximado de 206,6 m y un ancho de 334 m, caracterizada por pendientes inclinadas a muy escarpadas y alto contraste de relieve; presenta erosión laminar activa y desarrollo de terracetas
Dlcol	Ladera denudativa compleja larga	Ladera denudativa de gran extensión, con un largo de 579,75 m y un ancho de 356 m. Presenta pendientes suavemente inclinadas a muy escarpadas, alto contraste de relieve y desarrollo de terracetas; dominada por procesos de erosión laminar y potrerización que intensifican la degradación del talud.
Dlcom	Ladera denudativa compleja moderada	Ladera con un largo aproximado de 110,35 m y un ancho de 576 m, caracterizada por pendientes inclinadas a escarpadas y contraste de relieve moderado; presenta terracetas y formas tipo patas de vaca que reflejan una dinámica denudativa activa de intensidad media
Dlcct	Ladera denudativa cóncava corta	Ladera de perfil cóncavo y extensión corta, con un largo cercano a 86,7 m y un ancho de 181 m; presenta pendientes suavemente inclinadas a escarpadas y bajo contraste de relieve, asociada a concentración de escorrentía y desarrollo local de terracetas y patas de vaca.
Dlcl	Ladera denudativa cóncava larga	Ladera de ambiente denudativo con un largo aproximado de 579,75 m y un ancho de 356 m, caracterizada por un perfil cóncavo continuo y pendientes que varían de suavemente inclinadas a muy escarpadas; presenta alto contraste de relieve y está modelada por procesos de erosión laminar, desarrollo de terracetas y potrerización

Dlcm	Ladera denudativa cóncava moderada	Ladera de extensión moderada, con un largo de 111,68 m y un ancho de 161 m, de perfil cóncavo y pendientes muy inclinadas a escarpadas; presenta contraste de relieve moderado y está dominada por erosión laminar, indicando un proceso denudativo activo, pero de menor intensidad
Dlxct	Ladera denudativa convexa corta	Ladera de ambiente denudativo con un largo de 170,52 m y un ancho de 63 m, caracterizada por perfil convexo y pendientes suavemente inclinadas a escarpadas; presenta bajo contraste de relieve y está afectada por procesos de erosión laminar, terracetas, patas de vaca y potrerización, que generan una remoción superficial dispersa y de baja intensidad.
Dlxl	Ladera denudativa convexa larga	Ladera de gran extensión, con un de 513,79 m y un ancho de 338 m, de perfil convexo y pendientes inclinadas a escarpadas; presenta alto contraste de relieve y evidencia procesos denudativos activos asociados a terracetas, patas de vaca, cultivos y potrerización
Dlxm	Ladera denudativa convexa moderada	Ladera de extensión intermedia con un largo de 395,55 m y un ancho de 220 m, de perfil convexo y pendientes inclinadas a muy escarpadas; presenta alto contraste de relieve y está modelada por erosión laminar y desarrollo de terracetas
Dlim	Ladera denudativa irregular moderada	Ladera de morfología irregular y extensión moderada, con un largo aproximado de 237,66 m y un ancho de 327 m, caracterizada por pendientes inclinadas a muy escarpadas y contraste de relieve moderado; presenta procesos de erosión laminar, potrerización y cultivos, generando superficies heterogéneas
Dlict	Ladera denudativa irregular corta	Ladera denudacional con un largo de 243,45 m y un ancho de 106 m, de morfología irregular y pendientes inclinadas a muy escarpadas; presenta contraste de relieve moderado y está afectada por procesos de formación de terracetas y patas de vaca
Dlrct	Ladera denudativa recta corta	Ladera de perfil recto, con un largo de 101,83 m y un ancho de 124 m, caracterizada por pendientes suavemente inclinadas a escarpadas y bajo contraste de relieve, sin evidencias marcadas de erosión concentrada en algunas zonas y presencia de terracetas y potrerización en otras.
Slecm	Ladera estructural cóncava moderada	Ladera estructural con un largo de 318,12 m y un ancho de 167 m, caracterizada por pendientes muy inclinadas a muy escarpadas y alto contraste de relieve; con escasa expresión de procesos denudativos recientes.
Slexct	Ladera estructural convexa corta	Ladera de perfil convexo, con un largo aproximado de 158,55 m y un ancho de 214 m, caracterizada por pendientes abruptas a muy escarpadas y bajo contraste de relieve.
Slexm	Ladera estructural convexa moderada	Ladera estructural de extensión moderada, con un largo de 442,15 m y un ancho de 219 m, de perfil convexo y pendientes inclinadas a escarpadas; presenta alto contraste de relieve y evidencia procesos combinados de erosión laminar y dinámica gravitacional
Slefic	Ladera estructural de espolón facetado irregular corta	Ladera de ambiente estructural asociada a un espolón facetado, con un largo aprox de 207,79 m y un ancho de 187 m, caracterizada por pendientes inclinadas a escarpadas y contraste de relieve moderado; presenta superficies irregulares, modificadas secundariamente por procesos denudativos de baja intensidad

Slgfcsm	Ladera estructural de gancho de flexión compleja moderada	Ladera estructural compleja asociada a un gancho de flexión, con un largo de 149,89 m y un ancho de 652 m, que presenta pendientes inclinadas a muy escarpadas y alto contraste de relieve; está afectada por erosión laminar y potrerización, lo que ha suavizado localmente la forma de la ladera
Slgfcct	Ladera estructural de gancho de flexión compleja corta	Ladera estructural con un largo aproximado de 237,00 m y un ancho de 282 m, caracterizada por pendientes muy inclinadas a muy escarpadas y alto contraste de relieve, con alta vegetación y escasa o nula evidencia de procesos denudativos.
Slgfcsm	Ladera estructural de gancho de flexión cóncava moderada	Ladera estructural con perfil cóncavo, de 286,33 m de largo y 104 m de ancho, con pendientes suavemente inclinadas a escarpadas y contraste de relieve moderado; aunque el control principal es estructural, se desarrollan procesos de potrerización y erosión en la parte baja de la ladera que suavizan el perfil del talud.
Slgfcct	Ladera estructural de gancho de flexión irregular corta	Ladera de morfología irregular, con un largo aproximado de 171,67 m y un ancho de 530 m, caracterizada por pendientes inclinadas y contraste de relieve moderado
Sgflct	Ladera estructural de gancho de flexión irregular moderada	Ladera de morfología irregular, con un largo aproximado de 176,67 m y un ancho de 535 m, caracterizada por pendientes inclinadas y contraste de relieve moderado
Sslecom	Ladera estructural de sierra compleja moderada	Ladera estructural asociada a geoforma tipo sierra, con un largo de 296,67 m y un ancho de 631 m, caracterizada por pendientes inclinadas a muy escarpadas y alto contraste de relieve; presenta desarrollo de terracetas y patas de vaca que han modificado superficialmente la ladera.
Ssleim	Ladera estructural de sierra irregular moderada	Ladera asociada a relieve geoforma tipo sierra con morfología irregular, de 295,70 m de largo y 349 m de ancho, con pendientes inclinadas a muy escarpadas y alto contraste de relieve; dominada por procesos de formación de terracetas que modifican parcialmente la forma estructural original
Ssleict	Ladera estructural de sierra irregular corta	Ladera asociada a geoforma tipo sierra, con un largo aproximado de 200,68 m y un ancho de 177 m, caracterizada por pendientes abruptas a escarpadas y contraste de relieve moderado; presenta terracetas y patas de vaca que indican remoción superficial localizada sobre un talud estructural.
Ssleil	Ladera estructural de sierra irregular larga	Ladera estructural con un largo de 508,37 m y un ancho de 129 m, caracterizada por pendientes inclinadas a muy escarpadas y alto contraste de relieve; presenta procesos de erosión laminar, terracetas y potrerización que generan una modificación superficial de la ladera.
Sleict	Ladera estructural irregular corta	Ladera estructural con un largo de 134,71 m y un ancho de 213 m, caracterizada por pendientes inclinadas a muy escarpadas y bajo contraste de relieve; presenta una morfología irregular controlada estructuralmente, con escasa o nula evidencia de procesos denudativos activos.
Sleim	Ladera estructural irregular moderada	Ladera de ambiente estructural con un largo aproximado de 401,53 m y un ancho de 115 m, caracterizada por morfología irregular y pendientes abruptas a escarpadas
Slerct	Ladera estructural recta corta	Ladera de perfil rectilíneo con un largo cercano a 71,2 m y un ancho de 204 m, desarrollada en ambiente estructural; presenta pendientes inclinadas a escarpadas y bajo contraste de relieve, con predominio de erosión hídrica laminar y presencia de cultivos que genera una remoción superficial de la ladera.

Apic	Planicie antrópica irregular corta	Superficie de origen antrópico con un largo aproximado de 208,68 m y un ancho de 694 m, caracterizada por pendientes suavemente inclinadas; presenta bajo contraste de relieve y corresponde a un ambiente antropogénico donde la modificación del terreno ha alterado la forma original, favoreciendo procesos de erosión superficial asociados al uso del suelo.
------	------------------------------------	--

Ftc	Terraza fluvial corta	Superficie de origen fluvial correspondiente a antiguos niveles de sedimentación, desarrollada como una terraza de corta extensión; presenta pendientes variables desde planas a suavemente escarpadas y un contraste de relieve que bajo. Aunque su génesis es fluvial, la morfología actual evidencia una modificación por procesos denudativos que han disectado parcialmente la superficie original.
-----	-----------------------	--

Ftic	Terraza fluvial irregular corta	Terraza fluvial de morfología irregular con un largo cercano a 107,48 m y un ancho de 133 m, caracterizada por pendientes suavemente inclinadas y contraste de relieve muy bajo; corresponde a una superficie fluvial modificada por erosión diferencial y ajustes locales del drenaje
------	---------------------------------	--
