

Análisis del comportamiento de los movimientos en masa en la microcuenca del caño Parrado en el municipio de Villavicencio

Analysis of the behavior of mass movements in the caño Parrado micro-basin in the municipality of Villavicencio

Andrea Carolina Qüenza Nieves¹ 
Alfonsina Bocanegra Gómez² 
Jorge Eliecer Pardo Mayorga³ 
Juan Manuel Salgado Díaz⁴ 

Palabras clave:

condiciones geoambientales, factores condicionantes, susceptibilidad de movimientos en masa.

Resumen

Este estudio tiene como objetivo determinar la susceptibilidad de movimientos en masa en la microcuenca del caño Parrado, vereda Buenavista, Villavicencio, a través de la recopilación y análisis de datos siguiendo el método propuesto por el Servicio Geológico Colombiano a escala 1:25.000. Se consideran factores condicionantes como el contexto geológico, geomorfológico, cobertura del suelo, uso del suelo, y otros factores como las precipitaciones para determinar las áreas de mayor riesgo. Se destaca la importancia de identificar zonas susceptibles para planificar medidas de mitigación y prevención adecuadas. El estudio se enfoca en determinar los movimientos de masa presentes en la zona y establecer espacialmente las áreas de susceptibilidad, con el objetivo de proporcionar información clave para la toma de decisiones en la gestión del riesgo.

Cómo citar

Qüenza Nieves, A. C., Bocanegra Gómez, A., Pardo Mayorga, J. E. y Salgado Díaz, J. M. (2024). Análisis del comportamiento de los movimientos en masa en la microcuenca del caño Parrado en el municipio de Villavicencio. *Análisis Geográficos*, 57(1), 28 - 43.

1 Universidad Santo Tomas seccional Villavicencio. andreaquenza@ustavillavicencioedu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9825-6199>.

2 Universidad Santo Tomas seccional Villavicencio. alfonsinabocanegra@ustavillavicencioedu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3815-3902>.

3 Universidad Santo Tomas seccional Villavicencio. jorgepardo@ustavillavicencioedu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7605-8386>.

4 Universidad Santo Tomas seccional Villavicencio. juansalgado@ustavillavicencioedu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9680-2638>.

Abstract

The objective of this study is to determine the susceptibility to mass movements in the caño Parrado micro-basin, Buenavista, Villavicencio, through the collection and analysis of data following the method proposed by the Colombian Geological Service at a scale of 1:25,000. Conditioning factors such as geological and geomorphological context, land cover, land use, and other factors such as rainfall are considered to determine the areas of greatest risk. The importance of identifying susceptible areas is emphasized in order to plan appropriate mitigation and prevention measures. The study focuses on determining the mass movements present in the area and spatially establishing the susceptibility areas, with the objective of providing key information for risk management decision making.

Keyword:

conditioning factors, geoenvironmental conditions, susceptibility to mass movements.

Introducción

En un mundo donde la interacción entre el ser humano y el entorno adquiere una importancia cada vez mayor, la Geografía emerge como una ciencia que permite comprender las dinámicas que influyen en la vida individual y colectiva. En Colombia, esta perspectiva geográfica cobra una relevancia singular en el contexto de la consolidación de la paz territorial y el compromiso de convertir al país en una potencia de la vida, tal como lo establece el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026.

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), en calidad de autoridad geográfica máxima en Colombia, asume un papel central en la promoción de una "Geografía para la Vida", en el que el conocimiento del espacio físico, las interacciones naturales y las actividades humanas convergen para forjar una comprensión holística de los desafíos y oportunidades que enfrenta la sociedad. Entre estos se destacan los movimientos en masa, fenómenos geodinámicos que incluyen deslizamientos y desprendimientos de suelo y roca, que constituyen una amenaza latente en un país que tiene una geografía diversa y topografía variable. Su estudio minucioso no solo contribuye a una comprensión más completa de la interacción entre procesos naturales y actividades humanas, sino que también sirve como base fundamental para la gestión del riesgo de desastre y la planificación territorial sostenible.

Utilizar un enfoque geográfico permite delinear un camino hacia la identificación de patrones, causas y consecuencias de estos eventos, lo que a su vez puede informar estrategias de prevención y mitigación. Al establecer conexiones entre la geología, la climatología, el uso del suelo y las actividades humanas, se espera identificar las interacciones en el entorno físico que permitan generar estrategias y se conviertan en un insumo en la toma de decisiones que pueden influir en la seguridad y el bienestar de la comunidad local.

Esta investigación tiene como objetivo realizar un análisis heurístico cuantitativo de información secundaria y primaria que permitan determinar áreas que sean susceptibles a generar movimientos en masa en la microcuenca media de caño Parrado mediante la recopilación de información enfocada en la guía metodológica para la zonificación de amenazas por movimientos de masa del Servicio Geológico Colombiano del 2017 a escala 1:25.000.

El área de estudio corresponde a la microcuenca hidrográfica de caño Parrado, la cual hace parte de la cuenca del río Guatiquía y se encuentra ubicada al noroccidente del casco urbano del mu-

nicipio de Villavicencio en el departamento del Meta (Figura 1). Su cauce atraviesa los barrios Brisas del Guatiquía, Emporio, El Triunfo, La Esmeralda, Centro, Villa Julia, entre otros. De acuerdo con el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Villavicencio cuya vigencia es de 2015 a 2027, la zona fue catalogada como amenaza alta para movimientos en masa.

Debido a la presencia de este fenómeno que está afectando a la población ubicada en las inmediaciones del caño y también por las tendencias de aumento del tejido urbano continuo y discontinuo (barrios), se han presentado consecuencias como el establecimiento de asentamientos informales, lo que se traduce en un aumento de los elementos expuestos a los movimientos en masa, que agrava los escenarios de riesgo siconatural.

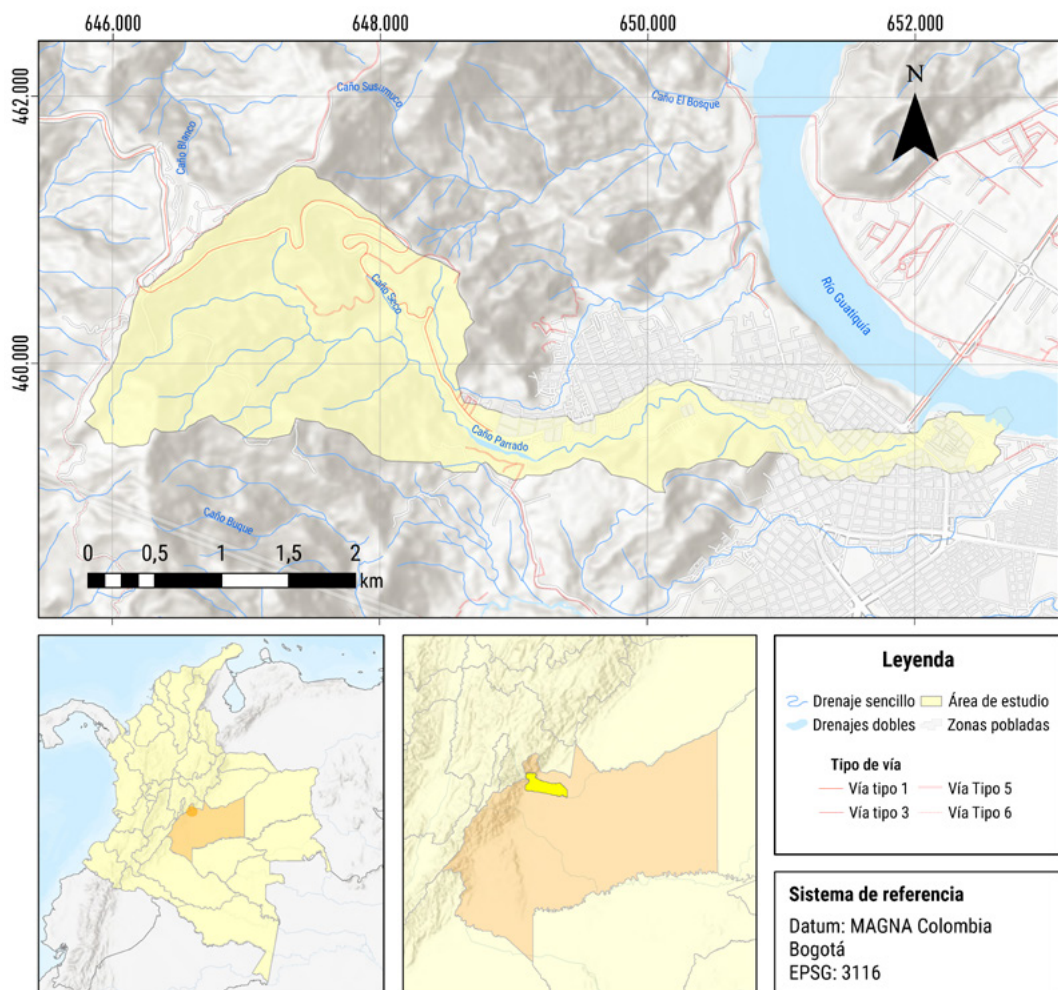
Por este motivo, se realizó un análisis del área, específicamente del cauce intermedio de la microcuenca, que corresponde al área urbana, para determinar los factores condicionantes, representados por el contexto, es decir: geológicos, geomorfológicos, de cobertura de la tierra y uso de suelo; así como los factores detonantes, a partir del estudio de las condiciones de precipitación mediante un mapa de isoyetas con las precipitaciones anuales comprendidas entre 1998 y 2010 y los datos de sismos ocurridos en el sector entre el 2000 al 2020, que influyen en los movimientos de masa presentes en la zona.

El proyecto se erige como uno de los principales pilares para el análisis de la susceptibilidad a movimientos en masa en la zona de estudio, con miras a posibles eventos. Utilizará los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta de geoprocursos, los cuales agilizan el análisis de la información del terreno donde se producen estos fenómenos. Además, mediante el empleo de sensores remotos, software y el análisis de datos en los SIG, se pueden crear modelos tanto del terreno como de los eventos de remoción en masa. Para llevar a cabo esto, es imperativo contar con información geológica, geomorfológica, y de uso del suelo, entre otros datos, sobre el área de estudio. Es por esta razón que se está llevando a cabo un estudio mediante la aplicación de SIG para la ciudad de Villavicencio, específicamente en el sector de caño Parrado, en la parte alta de la ciudad, que se encuentra ubicada sobre la cordillera Oriental, con el objetivo de evaluar la susceptibilidad a movimientos en masa.

Caño Parrado: más de 25 años de amenazas siconaturales

Durante su historia, el departamento de Meta ha enfrentado eventos de desplazamientos de tierra que han causado inestabilidad del

Figura 1 - Mapa de localización



Fuente: elaboración propia a partir de la base cartográfica del IGAC, 2014.

terreno y afectado a la población. De acuerdo con el Sistema de información de Movimientos de Masa (SIMMA), entre 1960 y 2017, se reportan 129 movimientos en masa, con ocurrencia del 73% en Villavicencio. De la totalidad de movimientos el 51% corresponde a deslizamientos (Servicio Geológico Colombiano, 2019). En Colombia, esta amenaza se presenta con recurrencia ocasionadas por las condiciones geológicas, geomorfológicas y de las precipitaciones.

A nivel local, la zonificación de susceptibilidad por avenidas torrenciales en la cuenca del río Guatiquía, realizada a escala 1:25,000 en el año 2017, indica la necesidad de priorizar estudios detallados sobre amenazas y riesgos asociados a avenidas torrenciales en ciertas microcuencas de esta arteria fluvial. Estos estudios se justifican por la presencia de diversos procesos, como movimientos en masa y erosión en cárcavas, que podrían desencadenar en futuras avenidas torrenciales, a partir de lo anterior, entre las cuencas se destaca la del caño Parrado

(Alcaldía de Villavicencio, 2020). Según Nelson Vivas Mora, un ambientalista y asesor de la Secretaría del Medio Ambiente de Villavicencio, los problemas en los taludes del caño Parrado han estado ocurriendo durante un período que abarca desde hace 25 a 17 años debido a la invasión progresiva del área circundante, especialmente en la margen izquierda del caño (Ardila, 2020).

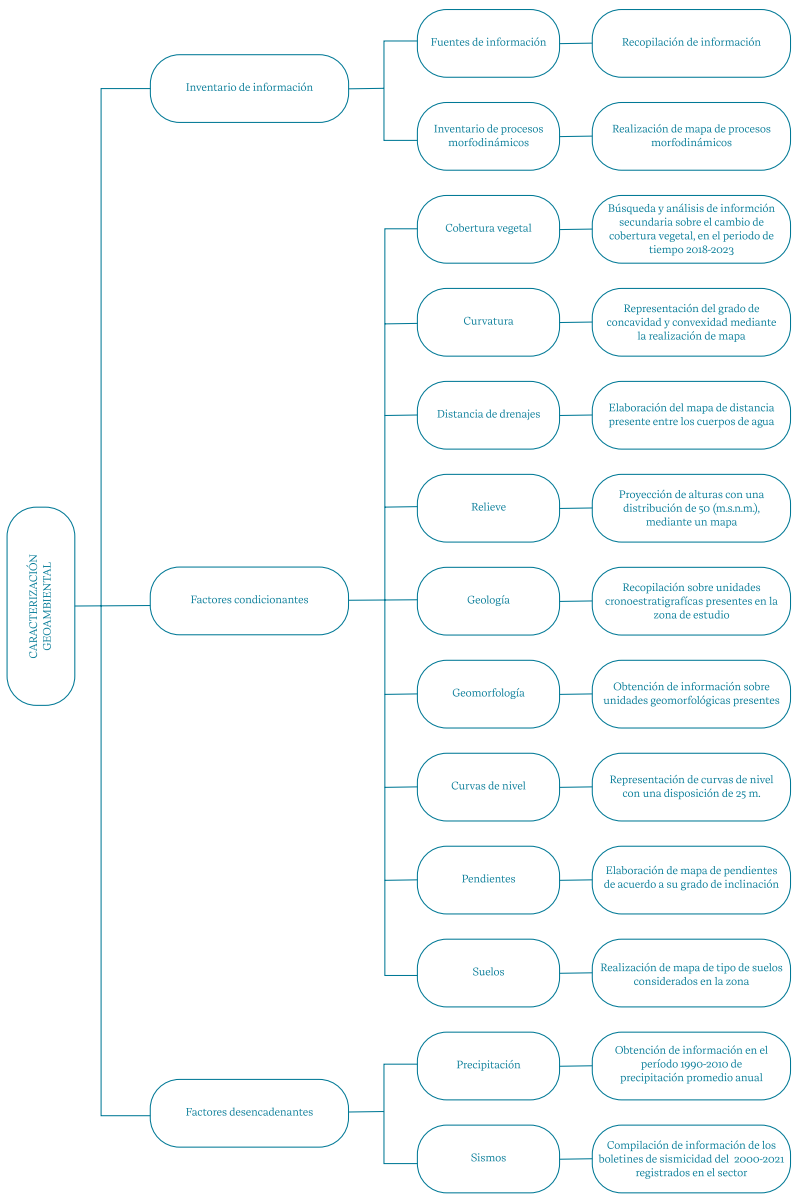
Por ello, el trabajo pretende realizar un análisis de información para determinar las áreas susceptibles a generar movimientos de masa dentro de la microcuenca. Este análisis se realizó mediante la recopilación y procesamiento de datos, utilizando el método propuesto por Servicio Geológico Colombiano en la *Guía metodológica para la zonificación de amenazas por movimientos de masa* escala 1:25,000, publicada en 2017. Este enfoque metodológico permitirá identificar con precisión las zonas de mayor riesgo dentro de la microcuenca, proporcionando así información invaluable para la planificación y ejecución de medidas de mitigación y prevención adecuadas.

Metodología

De acuerdo con los objetivos establecidos y el alcance del proyecto, este se ejecutó en conformidad con los lineamientos sugeridos en la Guía metodológica ya citada, que comprende tres etapas: caracterización geoambiental, análisis de susceptibilidad y caracterización de la amenaza. Dado que el enfoque de este proyecto es descriptivo en la determinación de áreas de susceptibilidad, se implementaron las dos primeras etapas.

La primera etapa se divide en tres actividades (Figura 2): en la primera actividad, se llevó a cabo la recopilación de información, que consistió en el levantamiento de datos en campo y la revisión de información secundaria. Esta información permitió determinar los factores condicionantes, incluidos el contexto geológico, geomorfológico, la cobertura del suelo y el uso de este, así como otros elementos como curvatura, distancia de drenaje y relieve. Se estudiaron las condiciones de precipitación mediante un mapa de isoyetas que

Figura 2 - Metodología de la fase de caracterización geoambiental



abarcaba las precipitaciones anuales entre 1998 y 2010, así como los datos de los sismos ocurridos en el sector entre 2000 y 2020, los cuales influyen en los movimientos de masa presentes en la zona.

Posteriormente, se obtuvieron los mapas de caracterización geoambiental como insumo para la zonificación de las áreas de susceptibilidad. Estas se establecieron mediante el método de análisis espacial heurístico por pesos ponderados, es decir: un método de tipo bivariado en donde se valoran las posibles áreas de movimiento en masa a futuro. Para este método, se realizó el análisis a partir de archivos tipos ráster con celdas de información de 10 x 10 m, generando así nueve factores, de los cuales, ocho son de carácter condicionante (pendiente, suelos, cobertura, relieve, geomorfología, geología y distancia de drenajes), y un mapa de isoyetas del registro de las precipitaciones anuales comprendidas entre 1998 y 2010, cabe destacar que la información se combina con la obtenida en las visitas de campo (Figura 3).

Resultados y discusión

Caracterización geoambiental

Durante la visita de campo, se pudo observar la presencia de procesos que han sido objeto de intervención a través de diversos

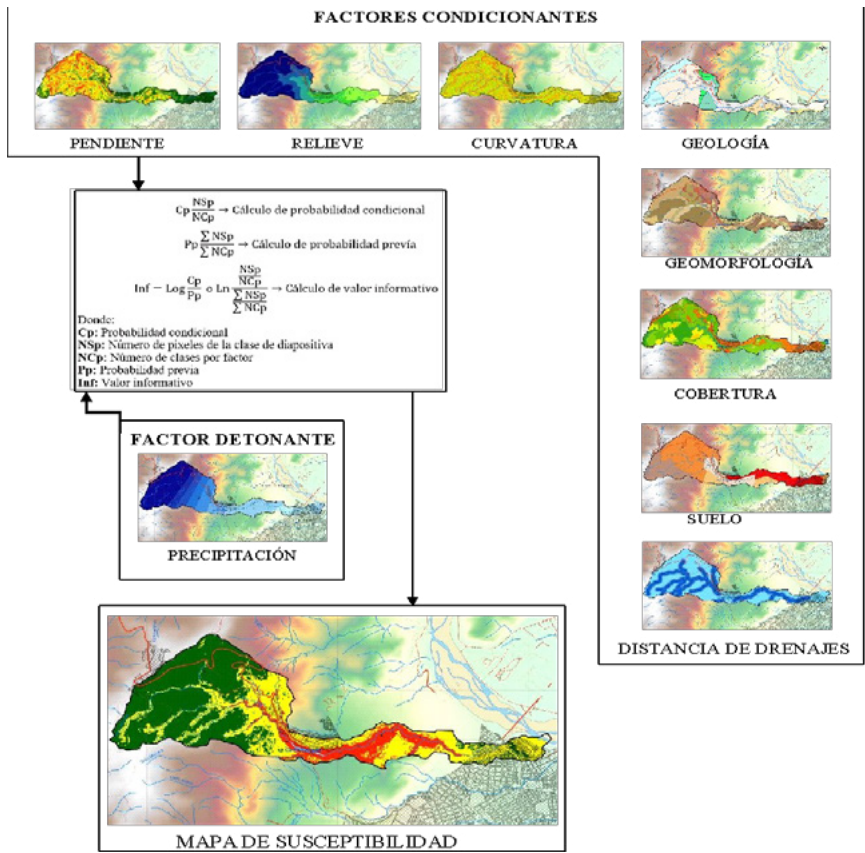
procedimientos. En este contexto, se llevó a cabo el inventario exclusivamente de los procesos activos (Tabla 1). Es importante destacar que los movimientos en masa se manifiestan en varias superficies de suelo y/o roca, principalmente debido a la acción de la gravedad y al elevado grado de deformación y meteorización del material litológico. Estos fenómenos suelen ocurrir en áreas desprovistas de vegetación o con una cobertura vegetal baja, acompañados de un elevado contenido de humedad en el suelo.

Tabla 1 - Inventario de movimientos en masa presentes en la microcuenca de caño Parrado

Nº	Tipo de movimiento	Importancia	Latitud	Longitud	Altura (m)
1	Caída	Alta	04°09'39,7"	73°38'59,1"	561
2	Deslizamiento	Alta	04°09'39,6"	73°38'58,9"	568
3	Deslizamiento	Alta	04°09'40,7"	73°39'00,1"	562
4	Caída	Alta	04°09'39,7"	73°39'01,0"	545
5	Deslizamiento	Alta	04°09'39,7"	73°39'00,9"	550
6	Deslizamiento	Alta	04°09'38,6"	73°39'03,0"	538
7	Deslizamiento	Alta	04°09'37,5"	73°39'04,4"	533
8	Deslizamiento	Alta	04°09'37,6"	73°39'04,7"	537
9	Deslizamiento	Alta	04°09'40,5"	73°38'59,2"	588
10	Deslizamiento	Alta	04°09'40,8"	73°38'59,0"	571
11	Deslizamiento	Alta	04°09'41,1"	73°38'59,1"	563
12	Deslizamiento	Alta	04°09'42,5"	73°38'56,7"	558
13	Deslizamiento	Alta	04°09'42,6"	73°38'56,8"	558

Nota: el 84,6% de los movimientos corresponde a movimientos de masa catalogados como deslizamiento.

Figura 3 - Metodología bivariado de valor informativo



Factores condicionantes

El análisis detallado de múltiples factores como la cobertura vegetal, geomorfología, pendiente, curvatura del terreno, distancia de drenajes, geología, relieve y suelos en la microcuenca de caño Parrado revela influencias clave en los movimientos en masa. Estos elementos proporcionan una visión completa de las condiciones ambientales y geológicas que predisponen a estos fenómenos. Desde cambios en la vegetación hasta características del terreno y la geología local, cada aspecto desempeña un papel esencial en la comprensión y prevención de estos riesgos naturales. Este conocimiento integral respalda la implementación de medidas efectivas de gestión y prevención.

Cobertura de la tierra

Uno de los factores condicionantes importantes en la ocurrencia de movimientos en masa se presenta por la transición (cambio) entre tipos de cobertura de la tierra, ya sea por causas naturales o antrópicas. Esto implica el cambio de los factores mecánicos dado su estado de tensión inicial, los cuales controlan la erosión, resistencia del suelo, protección del suelo y enraizamiento (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

La falta de coberturas vegetales dentro del grupo de coberturas de la tierra es un factor crucial que contribuye a los procesos erosivos y, por consiguiente, a los movimientos en masa (Ruiz et al., 2013). Cuando no hay vegetación presente, los agentes erosivos como la lluvia y el viento actúan de manera más intensa, exacerbando la erosión. Este efecto se ve acentuado en climas bimodales, como los que se encuentran en el área de estudio.

Los cambios sobre las coberturas de la tierra se presentan en áreas boscosas ubicadas en el sector de estudio, el aspecto predominante, pues abarcan un 30,43% de la microcuenca de caño Parrado. Le siguen los pastizales, con un porcentaje de área del 20,82%. Por último, se observa un valor menor para las tierras desprovistas y degradadas, representando un 0,96% del área total en 2018 (Tabla 2).

Tabla 2 - Coberturas de la tierra para el año 2018 de la microcuenca de caño Parrado

ID	Tipo de cobertura	Área (ha)	Área (%)
1	Bosque abierto alto	42,64	7,13
2	Bosque abierto bajo	2,74	0,46
3	Bosque de galería arbolado	45,66	7,64
4	Bosque de galería mixto	4,33	0,72
5	Bosque de galería y ripario	794	1,33
6	Bosque denso alto	78,66	13,16
7	Cuadua asociada a cuerpos de agua	8,14	1,36
8	Mosaico de cultivos y espacios naturales	5,87	0,98
9	Mosaico de pastos cultivos y espacios naturales	19,23	3,22
10	Mosaico de pastos y cultivos	13,00	2,17
11	Mosaico de pastos y espacios naturales	26,46	4,42
12	Pastos arbolados	9,93	1,66
13	Pastos degradados	3,17	0,53
14	Pastos enmalezados	74,94	12,53
15	Pastos limpios	36,42	6,09
16	Red vial	2,19	0,37
17	Ríos	6,57	1,10
18	Tejido urbano continuo	100,15	16,75
19	Tejido urbano discontinuo	19,16	3,21
20	Tierras desprovistas y degradadas	5,76	0,96
21	Vegetación secundaria alta	23,28	3,89
22	Vegetación secundaria baja	61,63	10,31
Total		597,88	100

Fuente: adaptado de IDEAM, 2018.

Se observan cambios significativos en la cobertura, con un aumento del 15,48% en las zonas boscosas y una disminución del 8,48% en los pastos arbolados. Además, se detectó una reducción del 1,36% en la presencia de guadua asociada a cuerpos de agua. Paralelamente, se identificó un incremento en el tejido urbano, que ascendió del 19,96% al 21,57%, acompañado de un aumento en el porcentaje de tierras desprovistas y degradadas (Tabla 3, Figura 4). Esta última transformación conlleva a una degradación de las propiedades del suelo, lo que favorece la inestabilidad de las laderas de la microcuenca. Es crucial tener en cuenta que la cobertura de tierra ejerce una influencia significativa en las propiedades hidrológicas y mecánicas del suelo, ya que mejora su cohesión, fortalece la matriz del suelo y aumenta su potencial mátrico mediante procesos como la evapotranspiración y la intercepción (Gómez y Kavzoglu, 2005).

Tabla 3 - Coberturas de la tierra para el año 2023 de la microcuenca de caño Parrado

ID	Tipo de cobertura	Número de píxeles	Área (ha)	Área (%)
1	Bosque abierto alto	3.371	52,67	8,74
2	Bosque abierto bajo	674	10,53	1,75
3	Bosque de galería arbolado	3.848	60,13	9,97
4	Bosque de galería mixto	4.425	69,14	11,47
5	Bosque denso alto	5.395	84,30	13,98
6	Mosaico de pastos cultivos y espacios naturales	61	0,95	0,16
7	Mosaico de pastos y cultivos	0	0	0
8	Mosaico de pastos y espacios naturales	1.999	31,23	5,18
9	Pastos arbolados	2.079	32,48	5,39
10	Pastos degradados	364	5,69	0,94
11	Pastos enmalezados	1.419	22,17	3,68
12	Pastos limpios	899	14,05	2,33
13	Red vial	345	5,39	0,89
14	Ríos	632	9,88	1,64
15	Tejido urbano continuo	6.869	107,33	17,80
16	Tejido urbano discontinuo	1.455	22,73	3,77
17	Tierras desnudas y degradadas	420	6,56	1,09
18	Vegetación secundaria alta	2.011	31,42	5,21
19	Vegetación secundaria baja	2.316	36,19	6
Total			602,84	100

Geomorfología

En el área de estudio se presenta la siguiente distribución geomorfológica: un 20,38% corresponde a lomo denudado, un 12,96% a ladera escarpada y otro 12,96% a abanico fluviotorrencial coalescente antiguo; estas subunidades son las más representativas a lo largo de la cuenca caño Parrado. Además, se presentan, con porcentajes menores, subunidades de cuenca denudada en la cuenca alta y de conos de talud en la parte baja, los cuales alcanzan el 0,02% y 0,03%, respectivamente (Figura 5). Las tres subunidades con mayor porcentaje pertenecen a un ambiente denudacional, fluvial y estructural, respectivamente, indicando en el primer caso el desarrollo de procesos exógenos de degradación debido a la acción de factores ambientales como la lluvia, meteorización, erosión y transporte, de origen gravitacional y pluvial. En cuanto al abanico fluviotorrencial, su génesis está asociada al ambiente montañoso y fluvial, mientras que la ladera escarpada está relacionada con el levantamiento de la cordillera, al encontrarse en el piedemonte de la cordillera oriental.

Figura 4 - Mapa de coberturas de la tierra

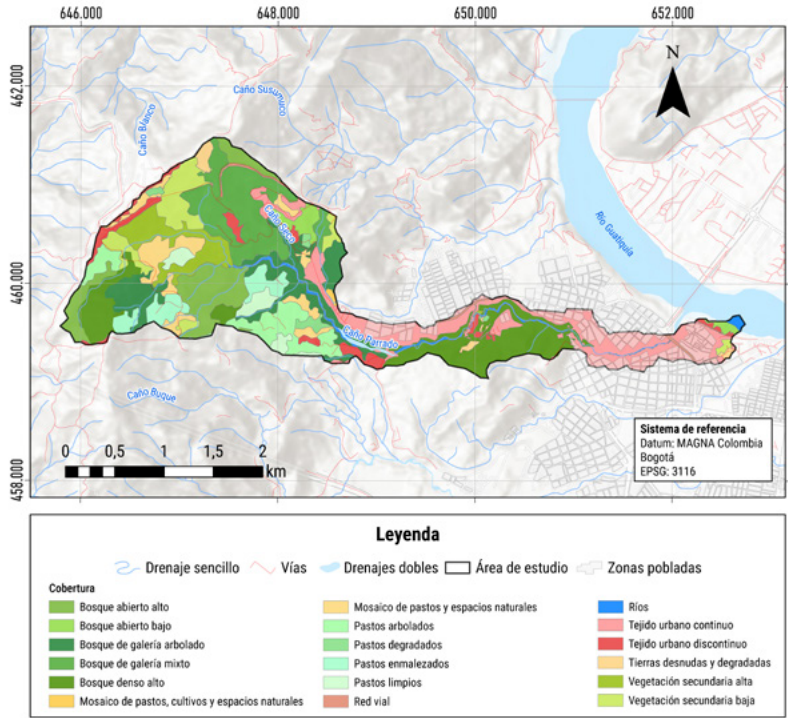
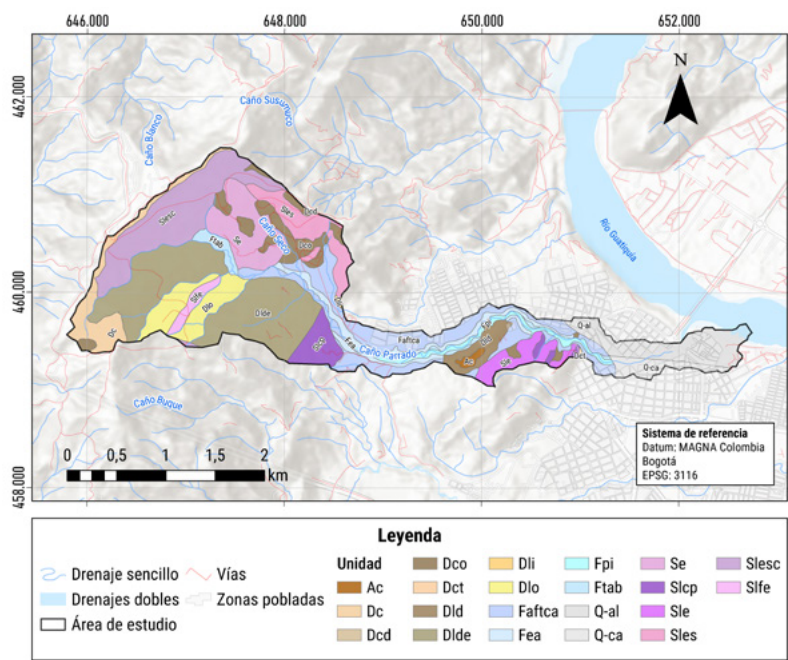


Figura 5 - Mapa geomorfológico de la microcuenca del caño Parrado



Fuente: adaptado de Servicio Geológico Colombiano e IGAC, 2018.

Pendiente

La pendiente desempeña un papel crucial como factor condicionante en los movimientos en masa, particularmente en áreas con pendientes pronunciadas (Chen et al., 2016). En el caso de la microcuenca caño Parrado, su altimetría de referencia con respecto a Villavicencio es de 467 m.s.n.m., con una amplia diversidad de pendientes. Estas pendientes se encuentran dentro de un rango de 0° a 55°, clasificadas en siete rangos según la guía metodológica 1:25.000 y adaptadas de acuerdo con las especificaciones del IGAC para el área de estudio (Tabla 4).

El intervalo de pendiente con el mayor porcentaje de área se sitúa en el rango de 18°-24°, abarcando 12797 ha (Tabla 4). Esta zona se ubica en la parte alta de la microcuenca y se extiende hacia la parte media de la misma. Además, el 52,74% del área presenta pendientes que varían desde fuertemente onduladas hasta muy escarpadas (Figura 6). Según la clasificación de susceptibilidad para movimientos de masa por variable de pendiente, estas áreas oscilan entre la categoría de mediana a muy alta (Suarez, 1998).

Curvatura

La curvatura del terreno señala el nivel de concentración o dispersión del drenaje superficial. En áreas cóncavas, el flujo se dirige hacia la celda central, mientras que en las convexas se dispersa. Es importante destacar que los valores positivos indican una superficie lateralmente convexa, mientras que los valores negativos señalan una superficie lateralmente cóncava (Servicio Geológico Colombiano, 2017) (Tabla 5).

Tabla 4 - Rangos de pendientes presentes en la microcuenca del caño Parrado

ID	Intervalo (°)	Descripción	Número de píxeles	Área (ha)	Área (%)
1	0 - 6	Plano	6.091	95,17	15,91
2	6 - 12	Ligeramente plano	5.408	84,50	14,13
3	12 - 18	Ligeramente inclinado	6.593	103,02	17,22
4	18 - 24	Fuertemente ondulado	8.190	12797	21,39
5	24 - 30	Fuertemente quebrado	6.786	106,03	17,73
6	30 - 36	Escarpado	3.799	59,36	9,92
7	> 36	Muy escarpado	1.417	22,14	3,70
Total			38.284	598,19	100,00

Figura 6 - Mapa de pendientes

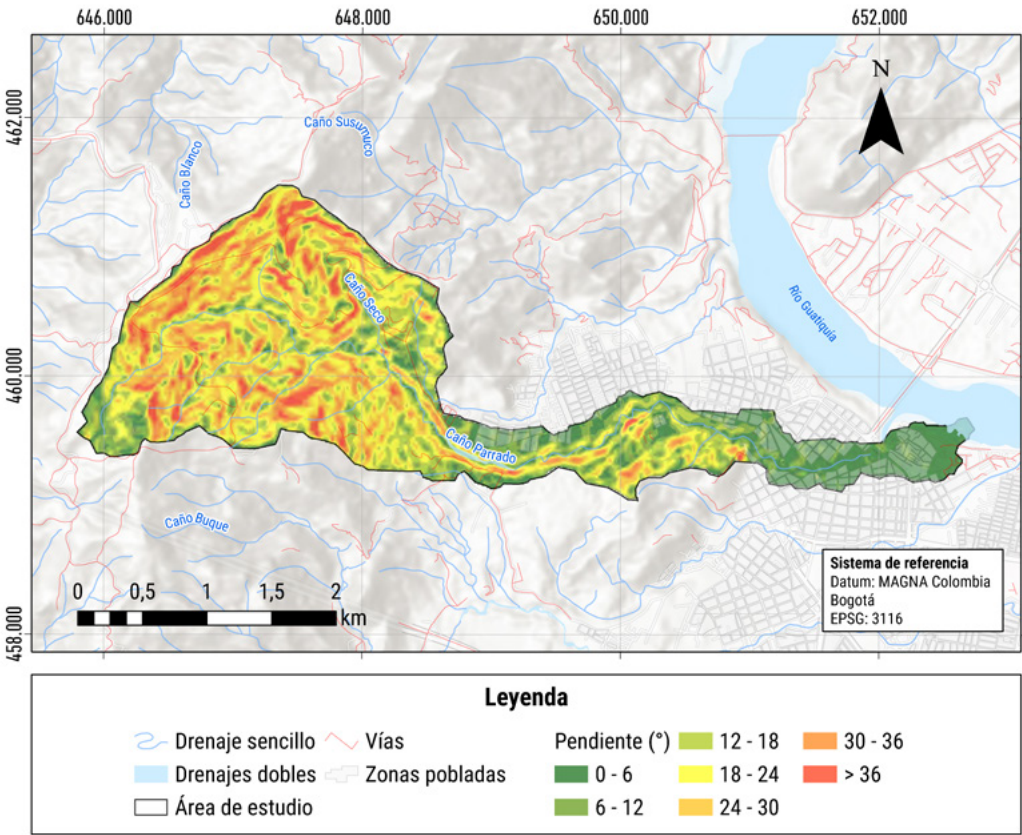


Tabla 5 - Áreas de intervalos de curvatura presentes

ID	Intervalos	Número de píxeles	Área (ha)	Área (%)
1	< -5	50	0,78	0,13
2	-5 - (-0,001)	15.220	237,81	39,82
3	-0,001 - (0,001)	7.851	122,67	20,54
4	0,001 - 5	15.038	234,97	39,34
5	> 5	64	1	0,17
Total		38.223	597,23	100,00

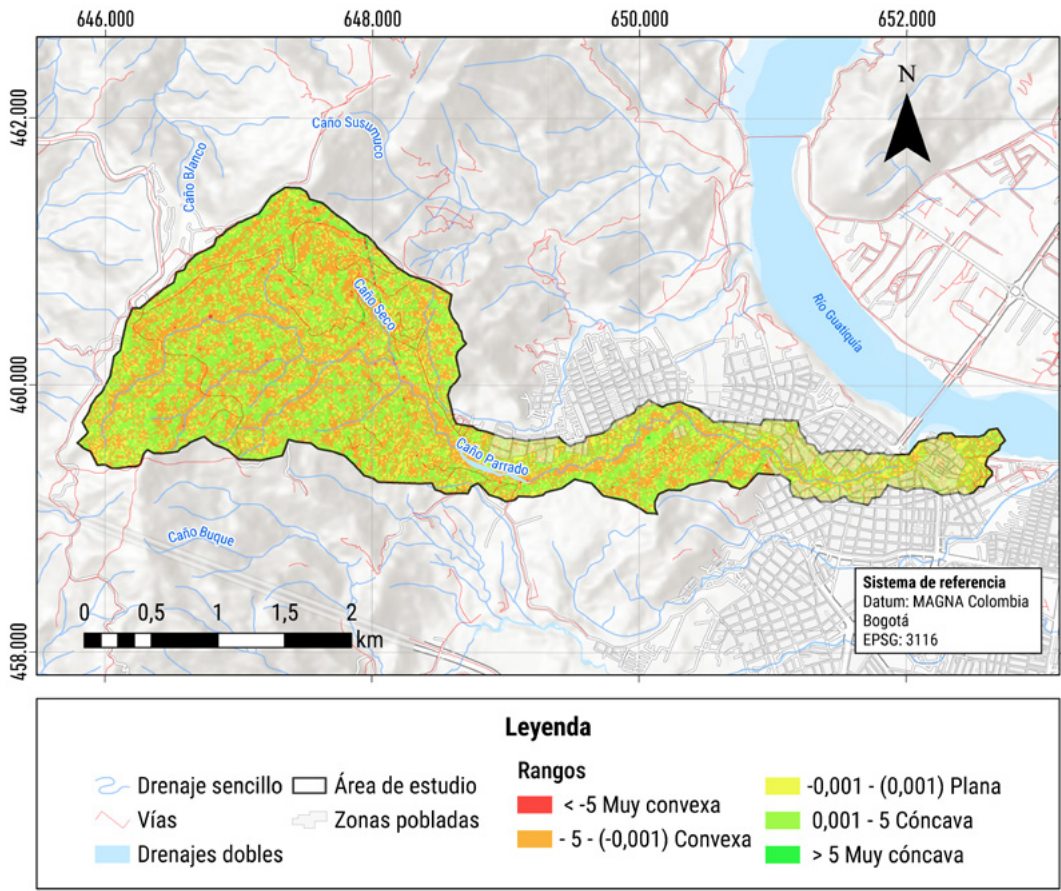
La (Figura 7) muestra claramente la distribución de la curvatura del terreno. En las superficies convexas, los flujos tienden a dispersarse, mientras que, en las cóncavas, el agua lluvia tiende a concentrarse, lo que constituye un factor morfológico crucial en la generación de movimientos en masa superficiales (Santacana, 2001). De acuerdo con los datos de la Tabla 5, se observa que el dominio de curvatura cóncava predomina con un 60,16% de cobertura, principalmente ubicado sobre los afluentes y el drenaje principal, donde se acumulan el material producto de la erosión de las márgenes, contribuyendo con la posible ocurrencia de

flujos de detritos. Por otro lado, el segundo dominio, que abarca un 39,64% del área, corresponde a zonas convexas localizadas entre los drenajes afluentes, contribuyendo con la erosión y aumentando el riesgo de movimientos de masa.

Distancia de drenajes

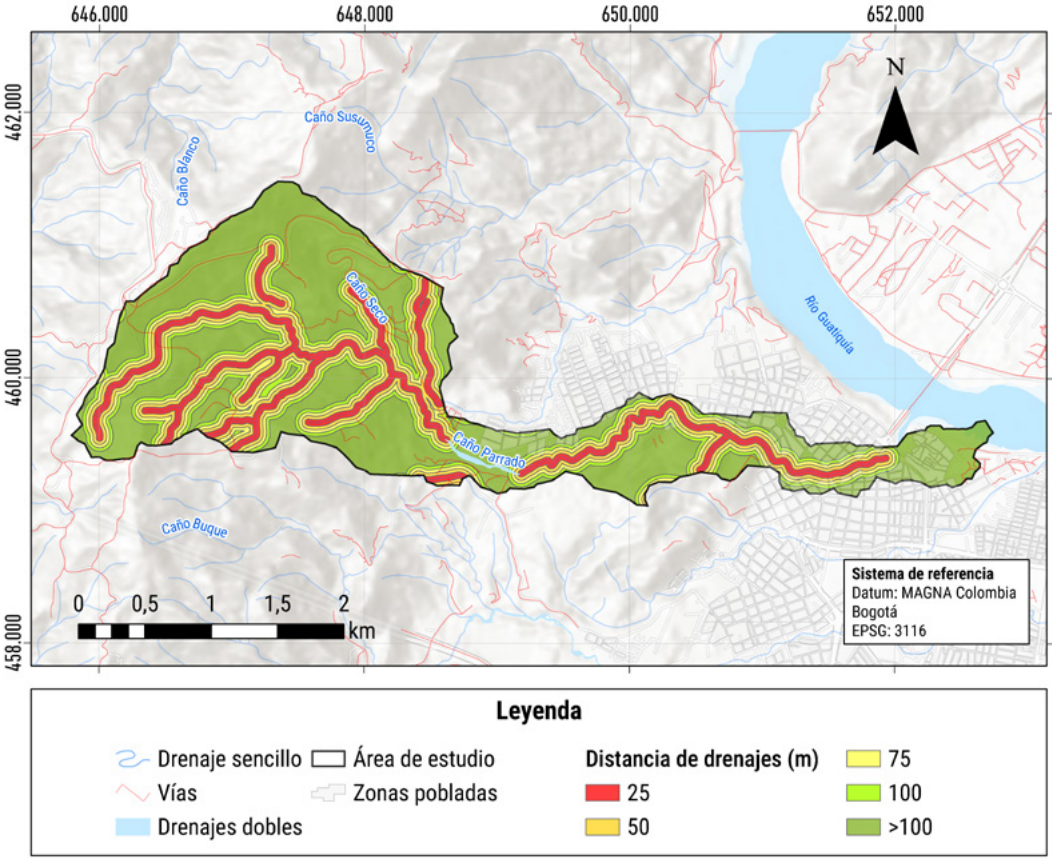
Las distancias de los drenajes se analizaron para identificar las áreas más susceptibles a movimientos en masa debido a su cercanía a estos cursos de agua (Figura 8). Las zonas próximas a los drenajes tienden a experimentar una mayor erosión y saturación del suelo, lo que incrementa el riesgo de deslizamientos y otros eventos de este tipo. Este parámetro está asociado con el arrastre de material durante las fuertes precipitaciones, así como con la contribución de material detrítico y suelo proveniente de movimientos de masa en el área. En el área de estudio, prevalece un intervalo de distancia superior a los 100 metros, cubriendo un 51,89% del área total (Tabla 6).

Figura 7 - Mapa de curvatura



Fuente: adaptado de Servicio Geológico Colombiano e IGAC, 2018.

Figura 8 - Mapa de distancia de drenajes presentes en el área de estudio



Fuente: adaptado de Servicio Geológico Colombiano e IGAC, 2018

Tabla 6 - Intervalos de distancia de drenajes

ID	Intervalo (m)	Área (ha)	Área (%)
1	0 - 25	74,89	12,53
2	25 - 50	73,64	12,32
3	50 - 75	71,49	11,96
4	75 - 100	67,63	11,31
5	> 100	310,23	51,89
Total		597,88	100

Geología

En la microcuenca de caño Parrado las rocas que afloran son de calidad mala a regular del grupo Palmichal y Cáqueza, con un porcentaje predominante de suelos transportados de origen aluvial, coluvial y fluviotorrencial. Los movimientos presentes varían debido al comportamiento de diversas condiciones ambientales, como es el caso de la litología presente, grado de meteorización, afectación estructural, entre otras. En la zona predomina las unidades pertenecientes a depósitos del Cuaternario y al Grupo Cáqueza, conformado por las formaciones areniscas de Cáqueza, lutitas de Macanal, brechas de Buenavista (Tabla 7) (Figura 9).

Tabla 7 - Formaciones geológicas presentes en la microcuenca del caño Parrado

ID	UGS	Descripción	Área (ha)	Área (%)
1	Q-al	Mezcla de arcilla, limo, arena (principalmente cuarzo), grava y materia orgánica.	42,76	7,15
2	Q-ca	Constituido por bloques y guijos de areniscas, lutitas y calizas embebidos en una matriz arenosa limosa.	13,78	2,30
3	Rmaap	Roca de calidad mala de areniscas y arcillolitas del Grupo Palmichal.	36,13	6,04
4	Rmlm	Roca de calidad mala de lutitas de la formación Lutitas de Macanal.	23,59	3,95
5	Rracb	Roca de calidad regular de conglomerados y areniscas de la formación Brechas de Buenavista.	96,08	16,07
6	Rrca	Roca de calidad regular de areniscas de la formación Areniscas de Cáqueza.	41,89	7,01
7	Rrcfigy	Roca de calidad regular de cuarcitas y filitas de la formación Guayabetal.	188,62	31,55

ID	UGS	Descripción	Área (ha)	Área (%)
8	Stalli	Suelo transportado aluvial de llanura de inundación.	14,05	2,35
9	Stat	Suelo transportado aluvial de terraza.	9,23	1,54
10	Stco	Suelo transportado coluvial.	31,32	5,24
11	Stct	Suelo transportado de cono de cono de Talus.	0,21	0,03
12	Stftac	Suelo transportado fluvio-torrencial de abanico coalescente antiguo.	100,23	16,70
Total			597,88	100,00

Fuente: adaptado de la plancha geológica 266, escala 1:25.000, Servicio Geológico Colombiano, 2017.

En el sector predominan las areniscas de la formación de Cáqueza, las cuales muestran un alto grado de meteorización (IV), baja cohesión y un contenido de humedad elevado (Figura 9). Las rocas en el área de estudio están altamente diaclasadas resultado de la fracturación causada por los esfuerzos tectónicos. Este fenómeno facilita la infiltración del agua al poseer mayor área de exposición lo que a su vez incrementa el grado de meteorización física y química, contribuyendo así al desarrollo de movimientos de masa.

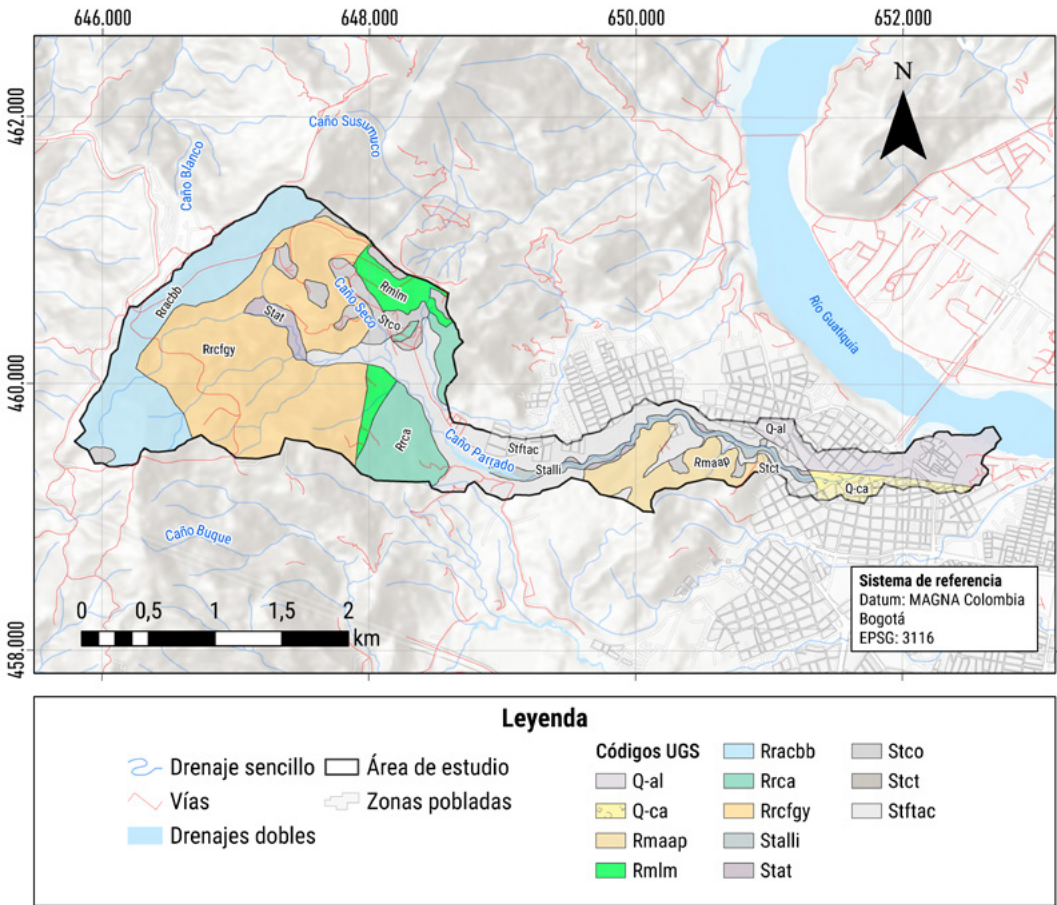
Relieve
El 47,63% del área de estudio se encuentra a alturas superiores a los 900 m.s.n.m., donde se han identificado algunos de los movimientos de masa registrados (Tabla 8, Figura 10).

Tabla 8 - Intervalos de altura en el mapa de relieve

ID	Intervalo (m.s.n.m.)	Número de píxeles	Área (ha)	Área (%)
1	437 - 500	3574	55,84	9,35
2	500 - 600	3.831	59,86	10,02
3	600 - 700	4.130	64,53	10,81
4	700 - 800	3.445	53,83	9,01
5	800 - 900	5.038	78,72	13,18
6	> 900	18.205	284,45	47,63
Total		38.223	597,23	100,00

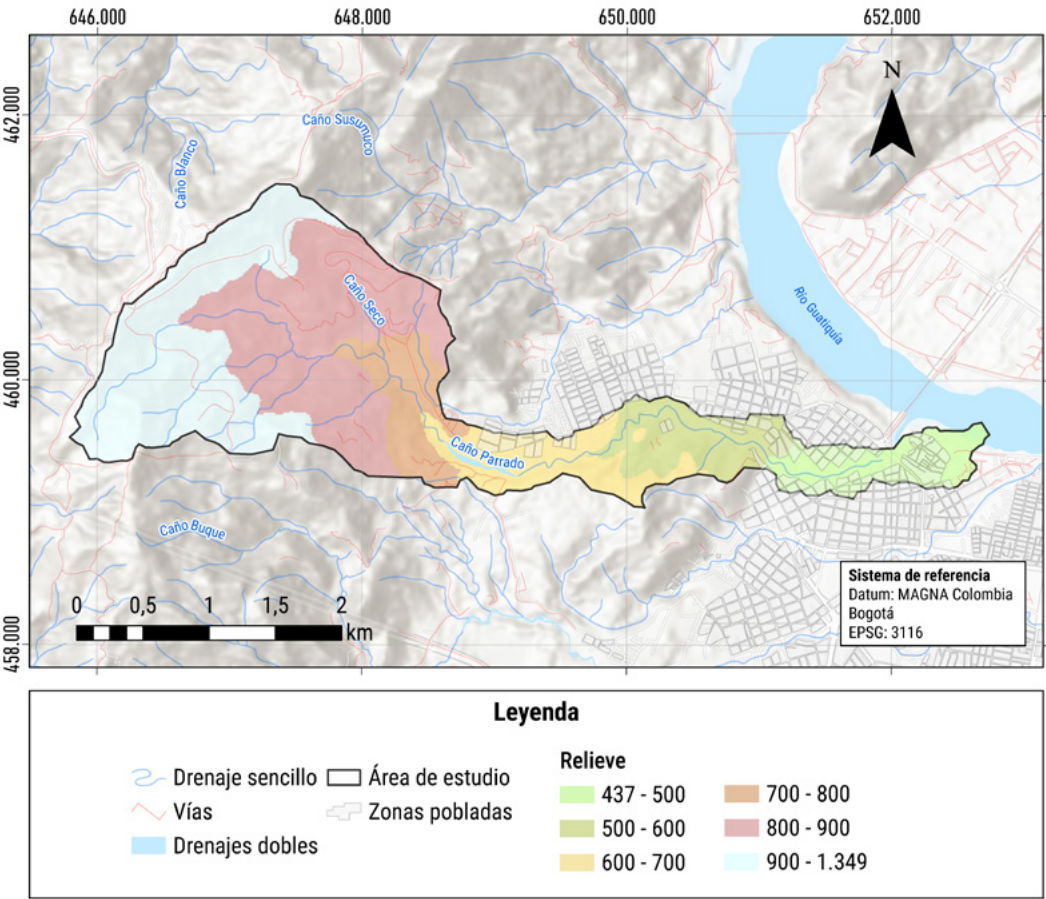
Además, en el sector occidental se concentran las zonas con las pendientes más pronunciadas, previamente identificadas como áreas de susceptibilidad media para movimientos de masa. En esta región, los valores de precipitación superan los 460

Figura 19 - Mapa de curvatura



Fuente: adaptado de Servicio Geológico Colombiano e IGAC, 2018.

Figura 10 - Mapa de relieve de la cuenca caño Parrado



Fuente: adaptado de Servicio Geológico Colombiano e IGAC, 2018.

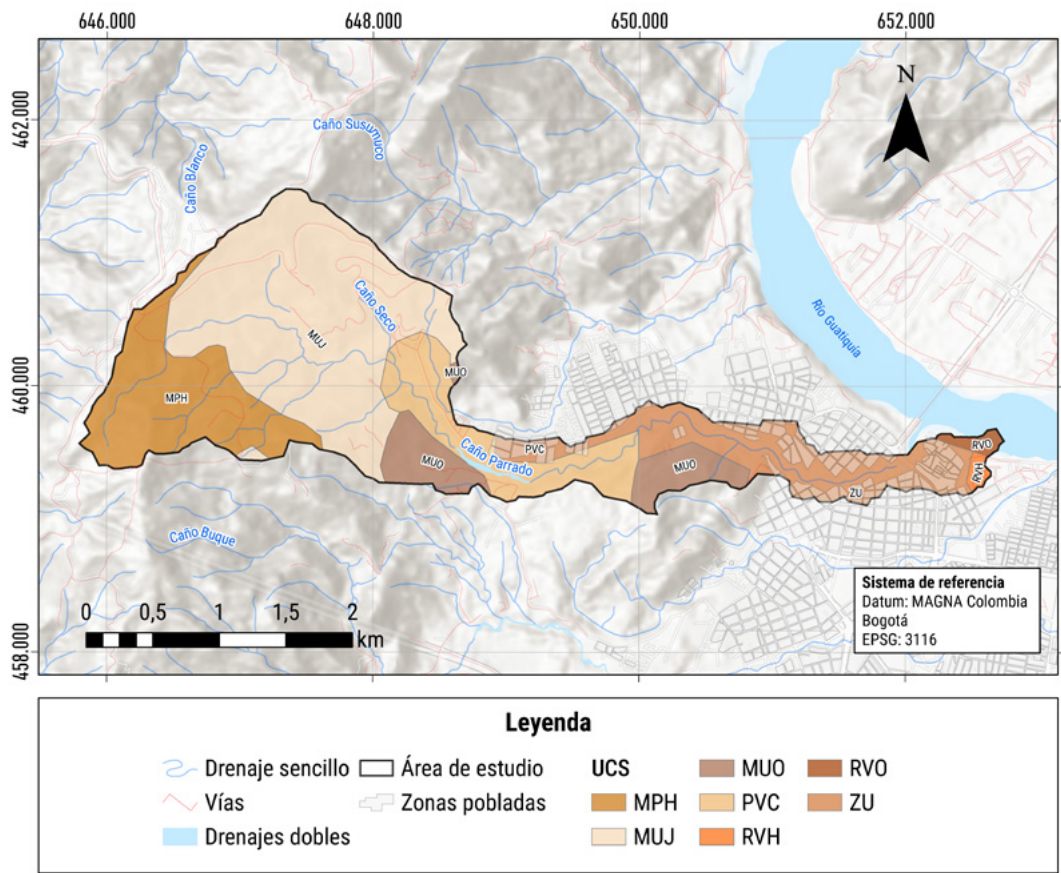
milímetros, especialmente en las áreas de mayor altitud, lo que influye en procesos de meteorización, erosión y la acumulación de depósitos de detritos en los cauces principales.

Suelos
En el sector medio de la microcuenca se destacan cuatro unidades distintivas (Figura 11): en el extremo occidental se presentan suelos con clastos de arcillolitas con 1859% y suelos con clastos de esquistos, filitas y conglomerados en un 4173%. Estos materiales detríticos corresponden a formaciones geológicas que no afloran en el área, lo que sugiere que son el resultado del transporte (Tabla 9). En el sector central se concentran sedimentos mixtos aluviales alrededor del cauce principal, que cubren un área de 1254%. Cabe destacar que el cuarto valor en porcentaje con un 1693% corresponde a zona urbana, la cual ha contribuido a la problemática mediante cambios en la cobertura de tierra, vertimiento de aguas residuales, alteraciones en el cauce, entre otros aspectos. Además, esta zona puede verse afectada por eventos de riesgo asociados a movimientos de masa.

Tabla 9 - Clasificación del suelo según el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS) en la microcuenca del caño Parrado

ID	UCS	UCS_F	Composición de los clastos presentes en los suelos	Porcentaje	Área (ha)	Área (%)
1	MPH	MPHefi	Arcillolitas con inclusiones de esquistos.	40, 35, 25	111,13	1859
2	MUJ	MUJefi	Esquistos, filitas y conglomerados brechados.	45, 30, 25	249,47	4173
3	MUO	MUOefi	Areniscas y arcillolitas intercaladas.	40, 30, 25	0,93	0,16
4	MUO	MUOefi	Areniscas y arcillolitas intercaladas.	40, 30, 25	27,16	454
5	MUO	MUOefi	Areniscas y arcillolitas intercaladas.	40, 30, 25	24,35	4,07
6	PVC	PVCap	Sedimentos mixtos aluviales que cubren depósitos de cantos y gravas bastante alterados.	75, 25	74,97	1254
7	RVH	RVHay	Depósitos mixtos aluviales.	45, 35	3,50	0,58
8	RVO	RVOax	Cantos, gravas y arenas aluviales.		5,15	0,86
9	ZU	ZU	Zona urbana	Zona urbana	101,22	1693
Total					597,88	100,00

Figura 11 - Mapa de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS) presentes en la microcuenca del caño Parrado



Fuente: adaptado de Servicio Geológico Colombiano e IGAC, 2018.

Otros factores

Precipitación

Según Dahal et al. (2008), la incidencia de precipitación es importante en el desarrollo de los movimientos en masa, y se considera en las evaluaciones de susceptibilidad. En la Figura 12 se muestra el mapa de isoyetas, que representa gráficamente la distribución de precipitación en la zona durante el periodo de 1998 a 2010, utilizando datos de precipitación anual de estaciones meteorológicas disponibles. Es importante destacar que el tramo alto de caño Parrado exhibe una mayor intensidad de lluvia, con un intervalo superior a 5.000 mm, abarcando el 35,03% del área de estudio según se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10 - Intervalos de distancia de drenajes

ID	Intervalo (mm)	Número de píxeles	Área (ha)	Área (%)
1	4.348 - 4.400	2.959	46,23	7,73
2	4.400 - 4.500	7.404	115,69	19,35
3	4.500 - 4.600	2.355	36,80	6,15
4	4.600 - 4.700	3.603	56,30	9,41

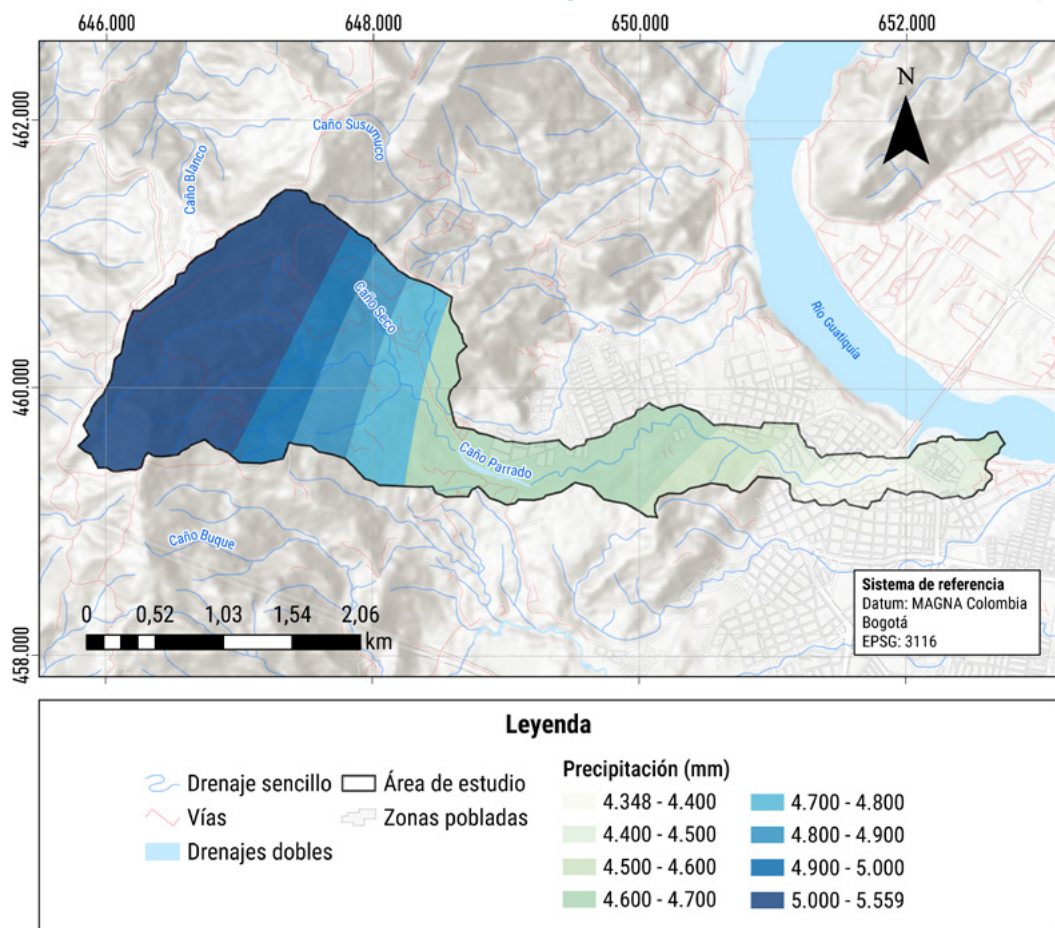
ID	Intervalo (mm)	Número de píxeles	Área (ha)	Área (%)
5	4.700 - 4.800	2.882	45,03	7,53
6	4.800 - 4.900	2.779	43,42	7,2
7	4.900 - 5.000	2.881	45,02	7,53
8	> 5.000	13.406	209,47	35,03
Total		38.269	597,95	100,00

De acuerdo al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM, Villavicencio cuenta con un promedio anual de precipitación de 4383 mm. Esto significa que la microcuenca del caño Parrado registra una precipitación anual que supera este promedio (IDEAM, 2014). Cabe destacar que la lluvia es un agente meteorizante de las rocas, como se evidencio en las areniscas de la Formación Cáqueza.

Sismos

Los sismos afectan el equilibrio de las laderas y ocasionan movimientos en masa, por medio de vibraciones que pueden generar efectos de roturas en el terreno y grandes deformaciones (Chen et al., 2016). Para este caso particular los sismos pueden activar

Figura 12 - Mapa de precipitación anual de caño Parrado (1998-2010)



Fuente: adaptado de Servicio Geológico Colombiano e IGAC, 2018.

sectores localizados en la microcuenca donde la roca se encuentran diaclasadas, con un nivel de meteorización grado IV y pendientes pronunciadas que se localizan al occidente del área de estudio.

Los sismos pueden desencadenar deslizamientos de tierra al sacudir y debilitar el terreno. Las vibraciones sísmicas pueden provocar la ruptura de la cohesión del suelo y desencadenar deslizamientos en pendientes inestables.

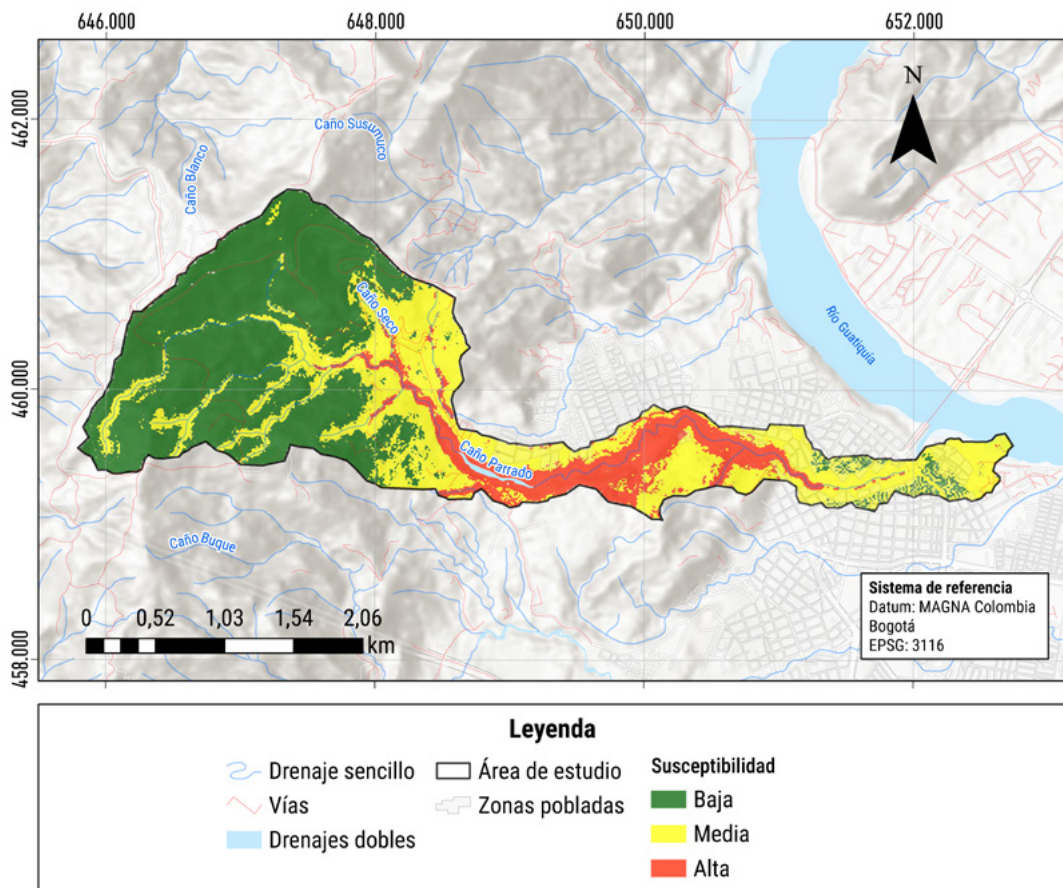
Susceptibilidad por movimientos en masa

El mapa de susceptibilidad muestra la suma ponderada de todos los factores condicionantes analizados, incluyendo el factor de precipitaciones, siguiendo el método de Peso de Evidencia (WofE). Además, en el análisis de susceptibilidad se consideró el inventario de movimientos de masa, donde el 85% corresponde a deslizamientos. El resultado final es la delimitación espacial de áreas que, debido a sus condiciones naturales y alteraciones humanas, tienen una mayor probabilidad de experimentar movimientos en masa. Estas áreas se han categorizado en tres rangos: alto, medio y bajo (Figura 13).

Empleando el método del peso de la evidencia, se exploraron

varios factores condicionantes, como el contexto geológico, geomorfológico, la cobertura del suelo, el relieve y el uso de la tierra, entre otros. Este análisis llevó a la identificación de áreas con distintos niveles de susceptibilidad: alta, media y baja. La relevancia de examinar estos factores radica en la detección de zonas propensas a movimientos de masa. En este caso particular, se confirma las áreas alta susceptibilidad con los movimientos de masa previamente identificados e inventariados en el sector.

En el caño Parrado, la susceptibilidad alta se localiza principalmente en su zona central, coincidiendo con la presencia de algunos asentamientos informales situados en la ribera norte del caño. Además, la mayoría de los movimientos en masa registrados hasta el momento han ocurrido precisamente en esta área. La alta susceptibilidad está principalmente relacionada con el grado de meteorización de las areniscas de la Formación Cáqueza y los suelos transportados fluvio-torrencialmente del abanico coalescente antiguo, alimentados por los deslizamientos presentes en la ribera del caño. Además, es la zona con mayor intervención humana.

Figura 13 - Mapa de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS) presentes en la microcuenca del caño Parrado

Fuente: adaptado de Servicio Geológico Colombiano e IGAC, 2018.

La susceptibilidad media se localiza en el centro, alrededor de la susceptibilidad alta, al oriente del caño Parrado y al occidente sobre el cauce principal y sus afluentes de este sector. Esta susceptibilidad está influenciada por la geología, específicamente por la presencia de areniscas de las Formaciones Cáqueza y las lutitas de Macanal. En el lado occidental, esta susceptibilidad se correlaciona con el trazo de las fallas El Mirador y la Falla de Bavaria. Además, está relacionada con los tipos de suelos presentes, que incluyen sedimentos aluviales y areniscas resultado de la meteorización de las formaciones mencionadas anteriormente. Hacia el oeste, la susceptibilidad media está asociada con las pendientes, la precipitación y la curvatura del terreno, dominando las zonas convexas localizadas entre los drenajes afluentes, contribuyendo con la erosión y aumentando el riesgo de movimientos de masa, factores que contribuyen al transporte de material en los afluentes. Finalmente, la susceptibilidad baja se presenta al occidente del área, con una presencia espacial del 48,88%.

Conclusiones

Los resultados de la aplicación de la guía metodológica en esta investigación ofrecieron ubicaciones espaciales de las categorías de susceptibilidad coherentes con las condiciones geoambientales de caño Parrado, alineándose con los mapas oficiales del POT 2015-2027. Es importante destacar que el mapa de susceptibilidad generado subraya las posibles atenuaciones en amenazas que enfrenta la población en esta área, cuya ocurrencia podría acarrear consecuencias graves.

Mediante el método del peso de la evidencia, se evaluaron varios factores condicionantes, incluyendo el contexto geológico, geomorfológico, la cobertura de la tierra, el relieve y el uso del suelo, entre otros. Este análisis permitió identificar tres categorías de susceptibilidad: alta, que se concentra en el centro de caño Parrado, donde se encuentran asentamientos informales, cubre el 13,57% del área; media, que abarca la sección centrorienta, correspondiente al 37,55%; y baja, que se extiende hacia el occidente del proyecto, abarca la mayor extensión con un 48,88%.

Los principales factores condicionantes que influyen en la susceptibilidad alta son el grado de meteorización de las rocas presentes en el sector, influenciados por el diaclasamiento de las mismas asociados a los procesos tectónicos de la cordillera oriental, agravándose con el mal uso del suelo donde se ha ubicado barrios informales. Aunque en el sector occidental la susceptibilidad es baja, presenta en los afluentes una susceptibilidad media asociada a las altas pendientes, a las precipitaciones y la curvatura del terreno, correspondiente a zonas convexas localizadas entre los drenajes afluentes, contribuyendo con la erosión y aumentando el riesgo de movimientos de masa.

Para concluir, es crucial llevar a cabo estudios más detallados en los diversos sectores identificados como de “amenaza alta” para movimientos de masa en el POT 2015-2027 de Villavicencio. Esto implica considerar factores desencadenantes como las lluvias y los sismos, dado que esta región de Colombia experimenta períodos de alta intensidad de precipitaciones y se han registrado en los 2023 sismos superficiales de magnitud media.

Referencias

- Alcaldía de Villavicencio. (2020). Plan de Desarrollo Villavicencio cambia contigo (2020-2023). <https://historicovillavicencio.gov.co/MiMunicipio/ProgramadeGobierno/Plan%20de%20Desarrollo%20Villavicencio%20Cambia%20Contigo%202020%20-%202023.pdf>
- Ardila, N. (2020, agosto 20). Un caño Parrado tiene en riesgo a 22660 habitantes de Villavicencio. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/un-cano-parrado-tiene-en-a-habitantes-y-una-via-de-villavicencio-531442>
- Brown, E. T. (1981). *Rock Characterization, Testing & Monitoring: ISRM Suggested Methods*. Oxford; New York: Published for the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics by Pergamon Press.
- Chen, T, Niu, R. y Jia, X. (2016). A Comparison of Information Value and Logistic Regression Models in Landslide Susceptibility Mapping by Using GIS. *Environmental Earth Sciences*, 75(10), 867. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5317-y>
- Dahal, R. K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Dhakal, S. y Paudyal, P. (2008). Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. *Geomorphology*, 102, 496-510. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.041>
- Gómez, H., y Kavzoglu, T. (2005). Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Engineering Geology*, 78(1), 11-27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.10.004>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2014). *Cartografía Base Escala 1:500.000* [Mapa]. https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e=8243784778320864,-0.17644239911865092,-71.2317930957116299032_69845022564686&b=igac&u=0&t=23&servicio=204
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2018). *Cobertura de la Tierra 100K Período 2018*. [Mapa]. <https://visualizador.ideam.gov.co/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/285c4d0a-6924-42c6-b4d4-6aef2c1aceb5>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2014). *Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos*. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%20de%20Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%20C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>
- Ruiz G. L., Navarro, S. del R., Chaparro, J. L., Gamboa, C. A., Ramírez, K. C., Camargo, B. L., Trejos, G. A. y Pérez, R. (2013). *Las amenazas por movimientos en masa de Colombia, una visión a escala 1:100.000*. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. <http://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20500.11762/36885>
- Santacana, N. (2001). *Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfica: aplicación a la cuenca alta del río Llobregat*. Universitat Politècnica de Catalunya. <https://www.wdxc.cat/handle/10803/6213#page=1>
- Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa. Escala 1: 25.000*. Servicio Geológico Colombiano. [https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM\(2017\).pdf](https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM(2017).pdf)
- Servicio Geológico Colombiano. (2019). *SIMMA - Sistema de Información de Movimientos en Masa*. SIMMA-SGC. Recuperado junio 17, 2024, de <https://simma.sgc.gov.co/#/public/results/>
- Servicio Geológico Colombiano e Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2018). *Actualización del estudio de zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 y la zonificación de amenaza por movimientos en masa tipo avenida torrencial escala 1:25.000 en el municipio Villavicencio-departamento del Meta*. https://recordcenter.sgc.gov.co/B23/639_19_ZonVillavicencio/Documento/PDF/AmenazVillavicencio2018.pdf
- Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos*. <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonas-tropicales/?cp=2>